

УДК 681.513.8

Вейвлет-анализ структур биосистем человека¹

Алдонин Г. М., Черепанов В. В.

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»,
Институт инженерной физики и радиоэлектроники
ул. Киренского, 28, Красноярск, 660041, Российская Федерация
GAldonin@sfu-kras.ru

Получено: 1 декабря 2020 г.

Отрецензировано: 12 декабря 2020 г.

Принято к публикации: 16 декабря 2020 г.

Аннотация: Показано, что актуальной задачей мониторинга состояния сердечно-сосудистой системы является создание эффективных алгоритмов компьютерных технологий обработки биосигналов на основе нелинейных динамических моделей. Поскольку биопроцессы имеют нелинейный характер и фрактальную структуру, рассмотрены актуальные нелинейные методы анализа состояния систем организма. Для этих развивающихся систем характерна структурная самоорганизация по принципу масштабно-инвариантного самоподобия. Исследована важная связь «систем коммуникации» организма, их организация в виде самоподобных фрактальных структур со скейлингом, близком к «золотому сечению». Примеры подобных структур — нервная, мышечная системы сердца и сосудистая и бронхиальная системы организма человека. Впервые предлагается получение детальной информации о состоянии биосетей организма человека. Предсказана возможность топической диагностики на основе вейвлет-анализа биосигналов («вейвлет-интроскопии» биосетей).

Ключевые слова: электрокардиограмма, фотоплетизмограмма, реограмма, самоорганизация, самоподобие, фракталы, скейлинг, автоволны, солитон, n -мерный тор, КАМ-теорема, ФПУ-теорема «возврата», вейвлет-интроскопия биосетей.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Алдонин Г. М., Черепанов В. В. Вейвлет-анализ структур биосистем человека // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 3. С. 296—307.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Алдонин, Г. М. Вейвлет-анализ структур биосистем человека / Г. М. Алдонин, В. В. Черепанов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2020. — Т. 3, № 3. — С. 296—307.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 30-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2020 (Севастополь, РФ, 6—12 сентября 2020 г.).

Wavlet-analysis of the structures of human biosystems

G. M. Aldonin and V. V. Cherepanov

*Siberian Federal University,
School of Engineering Physics and Radio Electronics
28 Kirensky str., 660041 Krasnoyarsk, Russian Federation
GAldonin@sfu-kras.ru*

Received: December 1, 2020

Peer-reviewed: December 12, 2020

Accepted: December 16, 2020

Abstract: *The actual task of monitoring the state the human body is the creation of effective algorithms for computer technologies for processing biosignals based on nonlinear dynamic models. The development of nonlinear methods for analyzing the state of body systems is important, since bioprocesses have a nonlinear nature and fractal structure, which, as for developing systems, are characterized by structural self-organization according to the principle of scale-invariant self-similarity. An important connection has been established between the “communication systems” of the organism, their organization in the form of self-similar fractal structures with scaling nearby to the “golden ratio”. Examples of such structures are the nervous, muscular systems of the heart and the vascular and bronchial systems of the human body. For the first time, it is proposed to obtain detailed information about the state of the bio-networks of the human body for topical diagnostics based on wavelet-analysis of biosignals (wavelet-introscopy).*

Keywords: *electrocardiogram, photoplethysmogram, rheogram, self-organization, self-similarity, fractals, scaling, autowaves, soliton, n-dimensional torus, KAM-theorem, FPU-theorem of “return”, wavelet-introscopy of bionets.*

For citation (IEEE): G. M. Aldonin et al. “Wavlet-analysis of the structures of human biosystems”, *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 3, no. 3, pp. 296–307, 2020. (In Russ.).

1. Введение

Инфаркт и инсульт могут быть первыми и иногда последними предупреждениями о заболевании, т. к. 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 все более совершенные средства диагностики ФСО [1, 2]. Своевременная диагностика и профилактика позволяют резко снизить риск развития ССЗ.

2. Теоретико-прикладная основа разработки методов и средств вейвлет-интроскопии биосетей

В данной работе рассматривается новый подход в исследовании физико-физиологических явлений и электрических процессов в ПНСС четырехкамерного сердца во всех звеньях. Сегодня происходит все более активное проникновение физических методов и подходов в биологию и медицину. Существующие модели имеют в основном феноменологический характер, не вполне учитывающий физико-физиологические процессы в сердце.

Поскольку деятельность биосистем организма, как самоорганизующихся систем, представляет собой нелинейные процессы, то для мониторинга состояния сердечной деятельности (СД) необходима разработка физически и физиологически адекватных нелинейных моделей СД на основе положений теории самоорганизации.

Одним из применений синергетического подхода является анализ природы электрических процессов в сердце, в частности в важнейшей биосистеме — проводящей нервной системе сердца (ПНСС). Активная среда представляется как ансамбль некоторых элементов, локально взаимодействующих друг с другом. Как известно, данный подход восходит к модели Н. Винера и А. Розенблюта [3, 4] согласно которой активная среда состоит из совокупности сцепленных элементов, находящихся в одном из трех возможных состояний: возбуждения, рефрактерности или покоя.

Основной функцией клеток пейсмейкера является автогенерация электрического импульса. Модели возбуждения дают решения в виде автоволновых вихрей, и некоторые из моделей поддерживают распад волн в спирально-волновую турбулентность.

Природные процессы, в том числе и биосистемы, имеют циклический характер. Одними из фундаментальных положений при анализе самоорганизации систем являются механизмы кооперативного поведения ансамбля систем, понятие системы слабосвязанных нелинейных осцилляторов (ССНО).

Процесс развития автоколебаний в таких самоорганизующихся системах целесообразно представить моделью системы связанных нелинейных осцилляторов (ССНО) [10, 11] на основе теоремы Ферми — Паста — Улама (ФПУ) (1), которая объясняет образование различных мод колебаний по мере распространения возбуждения по связям между элементами структуры (рис. 1): от первоначальных самых высокочастотных колебаний элемента структуры до самых низкочастотных граничных совместных колебаний всех элементов структуры.

$$m \frac{d^2 y_n}{dt^2} = k(y_{n+1} - 2y_n + y_{n-1}) + k\alpha[(y_{n+1} - y_n)^3 - (y_n - y_{n-1})^3], n = 1, 2, 3, \dots, N. \quad (1)$$

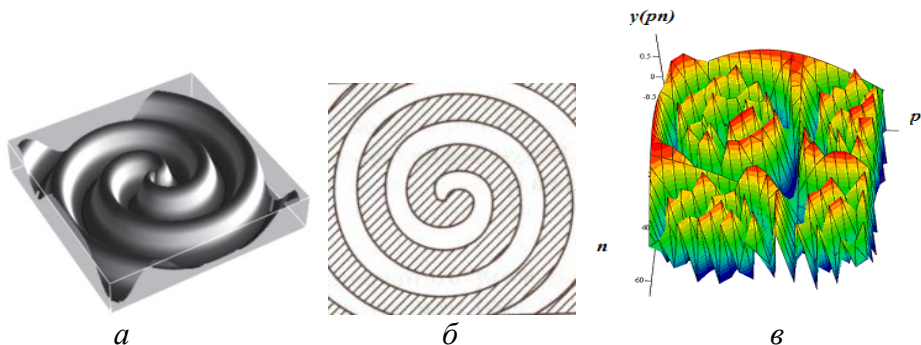


Рис. 1. Волны возбуждения в активной среде: *a* — спиральные волны модели ФитцХью — Нагумо, *б* — спиральная волна уравнения Гинзбурга — Ландау, *в* — модель ССНО на основе теоремы ФПУ и автоволновые структуры в виде спиральных волн.

Fig. 1. Excitation waves in an active medium: *a* – spiral waves of the FitzHugh–Nagumo model, *б* – spiral wave of the Ginzburg–Landau equation, *в* – CNOS model based on the FPU theorem and autowave structures in the form of spiral waves

То есть управление ритмом всех клеток синоатриального узла (САУ) в режиме автоколебания в САУ может быть достигнута лишь группой электрически связанных через межклеточную жидкость клеток пейсмекера как ССНО. Эта система колебаний представляет собой *n*-мерный тор (рис. 2, *a*), критерий устойчивости которого согласно теореме А. Н. Колмогорова, В. И. Арнольда и Ю. Мозера (КАМ-теореме) [5, 6, 7, 8, 9] является иррациональное отношение соседних мод, наилучшее из которых соответствует «золотому сечению» [5, 12], а спектр колебаний в *n*-мерном торе имеет гармонический характер и подчиняется закону $1/f(2)$, рис. 2, *б*).

$$F = F_0(t) + \sum_{i=0}^n F_i(t), F_i(t) = 0.618 \cdot A_{i+1} \cdot e^{j(1.618\omega_{i+1}t + 0.618\varphi_{i+1})}, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

Теорема ФПУ определяет самоорганизацию как систему мод (рис. 2, *в*) в виде *n*-мерного тора, критерий устойчивости которого определяется КАМ-теоремой, то есть иррациональным соотношением мод, наилучшим из которых является «золотое сечение» (3):

$$w^* = \frac{1}{1+\frac{1}{\dots}}, \text{ или } w^* = \frac{\sqrt{5}-1}{2} = 0.6180339 \dots \quad (3)$$

Механизм распространения возбуждения в водителе ритма происходит за счет формирования солитонов в ССНО, согласно КАМ-теореме (рис. 2, *з*).

Теорема ФПУ и нелинейная модель ССНО на основе КАМ-теоремы в виде *n*-мерного тора объясняет, каким образом тысячи клеток пейсмеке-

ра синхронно, за счет метаболизмов на клеточном уровне размером в десятки микрон создают на мембране потенциал в десятки милливольт с цикличностью в секундном диапазоне [13]. Образуется волна возбуждения в виде солитона, периодичность которого определяется количеством осцилляторов — клеток пейсмейкера (рис. 2, *д*).

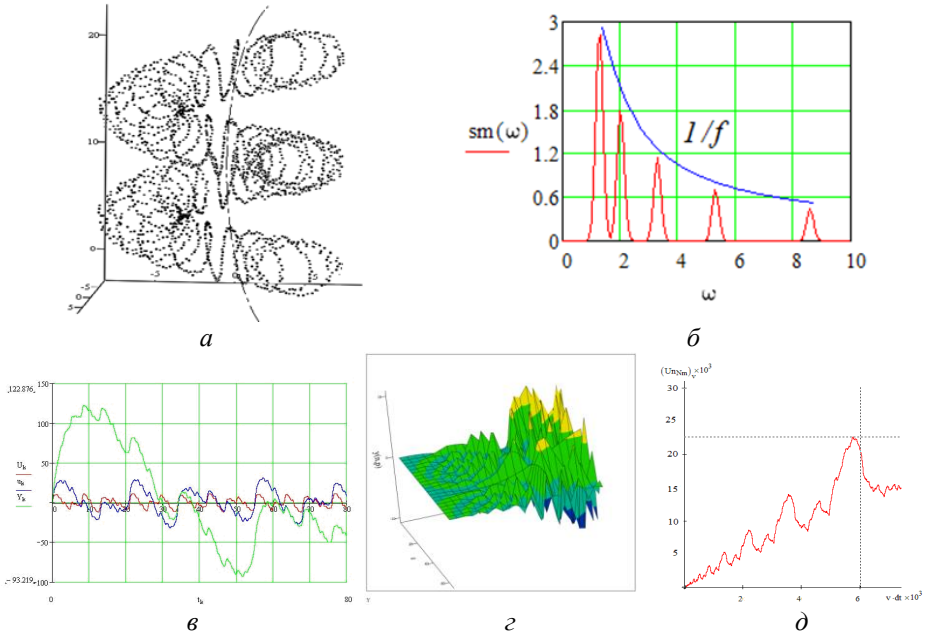


Рис. 2. Инвариантный тор — *а* и его спектр — *б*, система мод — *в*, модель n -мерного тора — *г*, механизм возбуждения P -клеток согласно модели n -мерного тора КАМ-теоремы — *д*.

Fig. 2. Invariant torus — *a* and its spectrum — *б*, system of modes — *в*, model of the n -dimensional torus — *г*, excitation mechanism of P -cells according to the model of the n -dimensional torus of the KAM theorem — *д*

3. Нелинейные модели основных биосигналов

Основные биосистемы организма человека представляют собой фрактальные структуры с масштабно-инвариантным самоподобием [14, 15]. Примеры подобных структур — проводящая нервная (рис. 3, *а*) и мышечная (рис. 3, *б*) системы сердца, сосудистая (рис. 3, *в*) и бронхиальная системы (рис. 3, *г*).

Получение детальной информации о состоянии биосистем возможно при учете нелинейного характера процессов в них, фундаментальных законов самоорганизации биопроцессов и биосистем, их самоподобной мас-

штабно-инвариантной фрактальной структуры. Учет этих факторов обеспечивает создание методики топической диагностики важнейших биосистем.

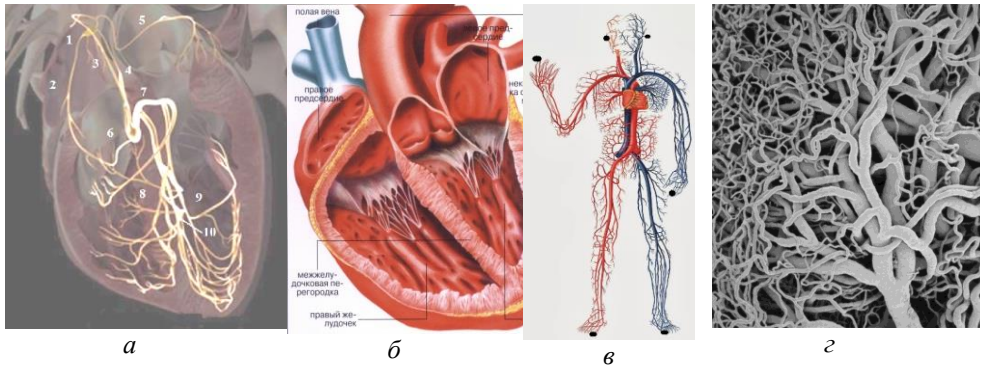


Рис. 3. Фрактальная структура биосистем: проводящей нервной сети в сердце (а), мышечной системы сердца (б), системы кровообращения человека (в) и дыхательные пути в легком (г).

Fig. 3. Fractal structure of biosystems: the conducting nervous network in the heart (а), the muscular system of the heart (б), the human circulatory system (в) and the respiratory tract in the lung (г)

Германом Гельмгольцем с учениками еще в 1850 г. установлена форма нервного импульса в ПНСС и его распространение в виде уединенной волны колоколообразной формы [16] (в современном понимании солитон) [17], подобной частице, движущаяся с постоянной скоростью в ПНСС, ветвящейся с самоподобием по закону $1/f$.

$$S_i(x, t_i) = u_i ch^{-2} \frac{x-ct_i}{\Delta}, ch \equiv \frac{e^z + e^{-z}}{2}, c = \frac{u_i}{3}, \Delta = \sqrt{\frac{12}{u_i}}, \quad (4)$$

где: u_i – амплитуда возбуждения; $i=1, \dots, n$, n — число ветвей ПНСС.

Волна возбуждения в виде солитона (4) 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 и проходит по правой и левой ножкам пучка Гиса и разветвляется по волокнам Пуркинье на миокарде левого и правого желудочков, вызывая их сокращение. При этом важно отметить изменение направления вектора поляризации в сегментах ПНСС (рис. 4, а, б).

Векторная кардиограмма описываемая в пространстве концом суммарного вектора электродвижущих сил (5), возникающих при деполяризации и реполяризации миокарда в процессе сердечного цикла, результирующий электрический вектор сердца быстро меняется по мере распростра-

нения импульса по миокарду. При этом важно учесть изменение направления вектора поляризации в сегментах ПНСС [12].

$$U(x, t) = S_1(t_1) + S_2(t_2) + S_3(t_3) + S_4(t_4) + S_5(t_5) + S_6(t_6) + S_7(t_7) + S_8(t_8), \quad (5)$$

где $S_i(t_i)$ — векторный солитон во время t_i , $U(x, t)$ — результирующий био-потенциал ЭКС.

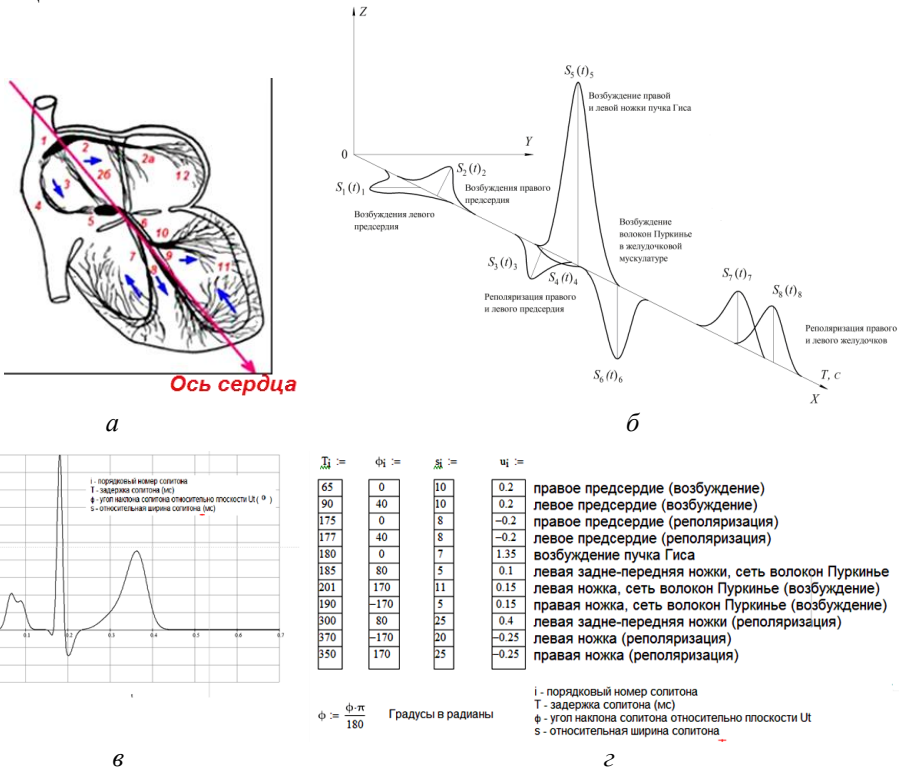


Рис. 4. Топология ПНСС — а и распространение возбуждения по сегментам ПНСС — б, Суммарный вектор электродвижущих сил — в и параметры солитонной модели ЭКС — г.
 Fig. 4. Topology of CNNH – а and propagation of excitation along the segments of CNNH – б, total vector of electromotive forces – в and parameters of the soliton model of EKS – г

4. Вейвлет-интроскопия

В последнее время в кардиологии развиваются методы топической диагностики основных биосистем организма. В данной работе эта проблема рассматривается на основе положений теории самоорганизации.

Для определения структурных свойств биосигналов и биопроцессов эффективно применение вейвлет-анализа. Вейвлет-преобразование одно-

мерного сигнала заключается в его разложении по базису, сконструированному из обладающей определенными свойствами солитоноподобной функции (вейвлета) посредством масштабных изменений и переносов. В ходе исследования использовались различные материнские вейвлеты из которых наиболее адекватными для анализа биосигналов являются «солитон» и «мексиканская шляпа».

Вейвлет-диаграммы биосигналов отражают фрактальные масштабно-инвариантные структуры со скейлингом, близким к «золотому сечению» (рис. 5). В ренормгрупповом подходе скелетные функции вейвлет-преобразования выявляют структуру анализируемого процесса, а скейлинги (\overline{Sc}) — масштабную инвариантность или их самоподобие в норме.

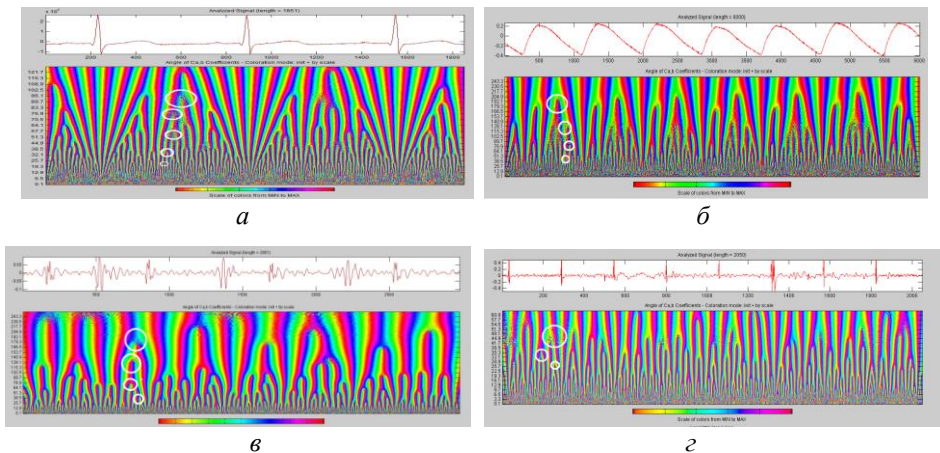


Рис. 5. Вейвлет-диаграммы биосигналов с турбулентностями в узлах ветвления: *а* — электрокардиосигнал, *б* — пульсовая волна, *в* — фонокардиосигнал, *г* — шумы легких.

Fig. 5. Wavelet diagrams of biosignals with turbulence in the branching nodes: *a* – electrocardiosignal, *б* – pulse wave, *в* – phonocardiosignal, *г* – lung noises

Исследована возможность топической диагностики состояния биосистем фрактальных структур биосигналов с масштабно-инвариантным самоподобием на основе вейвлет-интроскопии. Достоинством вейвлет-спектра ЭКС и ПВ является их представление в частотной и временной области, т. е. содержит пространственно-временную информацию о работе: ПНСС (рис. 5, *а*), сосудистой сети (рис. 5, *б*), мышечной системы (рис. 5, *в*) и бронхиальной системы (рис. 5, *д*), что может служить основой для топической диагностики [18].

На рис. (рис. 6, *в*, *г*) показано 2D и 3D вейвлет-преобразование *P*-волны ЭКС. Сопоставляя узлы ПНСС и сосудистой сети и соответствующую

щие по фазе и времени волны спектра вейвлет-диаграмм, можно получить латентную ЭКГ, отображающую весь процесс прохождения возбуждения от пейсмейкера в виде солитонов по всем сегментам ПНСС.

Для выявления более тонкой структуры возбуждения в ветвях ПНСС повышена частота квантования до 8 кГц, которая позволяет визуализировать ветвления ПНСС более высокого порядка. На (рис. 6, а, б) представлено 3D-вейвлет-преобразование ЭКС с частотой 8 кГц.

Структура P -волны наблюдается как сумма отдельных волн правого и левого предсердий и отражает истинное распространение возбуждения по миокарду правого и левого желудочков. На вейвлет-диаграммах с повышенным разрешением в P -волне дополнительно проявляются волны возбуждения в пучке Бахмана и нисходящем пучке к межпредсердной перегородке (к AB -узлу).

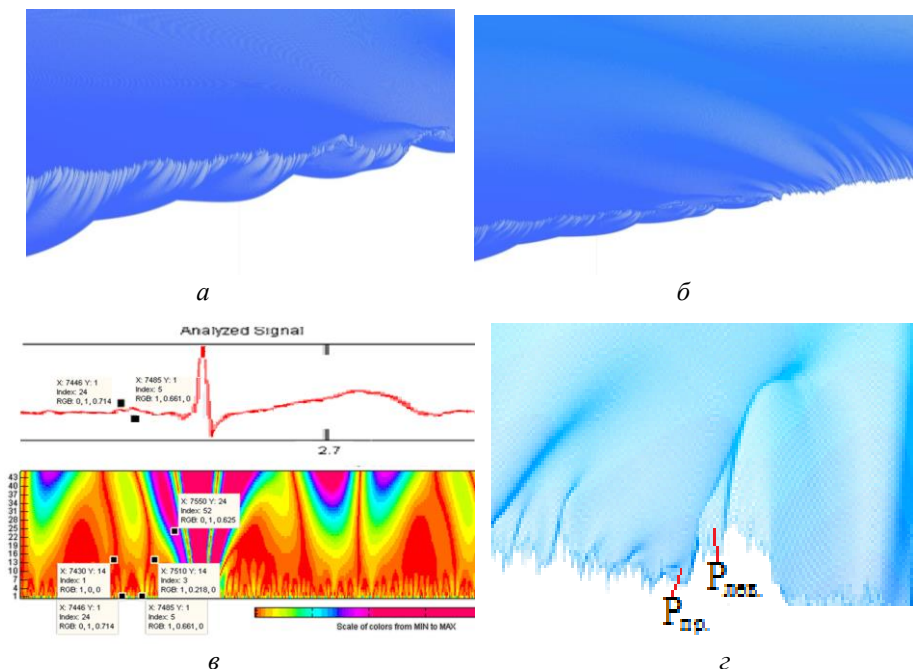


Рис. 6. Экспериментальная запись возбуждения области пейсмейкера (а) и предсердной области ПНСС (б). Выявление P -волны ЭКС в 2D (z) и 3D (z) вейвлет-преобразованиях.

Fig. 6. Experimental recording of excitation of the pacemaker region (a) and the atrial CNNH region (b). P -wave detection of ECS in 2D (z) and 3D (z) wavelet transforms

Такой же подход, как для ПНСС для топической диагностики, можно применить для вейвлет-интроскопии сосудистой системы (рис. 7, а) [19].

На рис. 7, б представлен пример вейвлет-интроскопии с помощью вейвлет-преобразования экспериментального сигнала ПВ при его прохождении по сосудам сонной артерии и выявление узлов ветвления сосудистой сети.

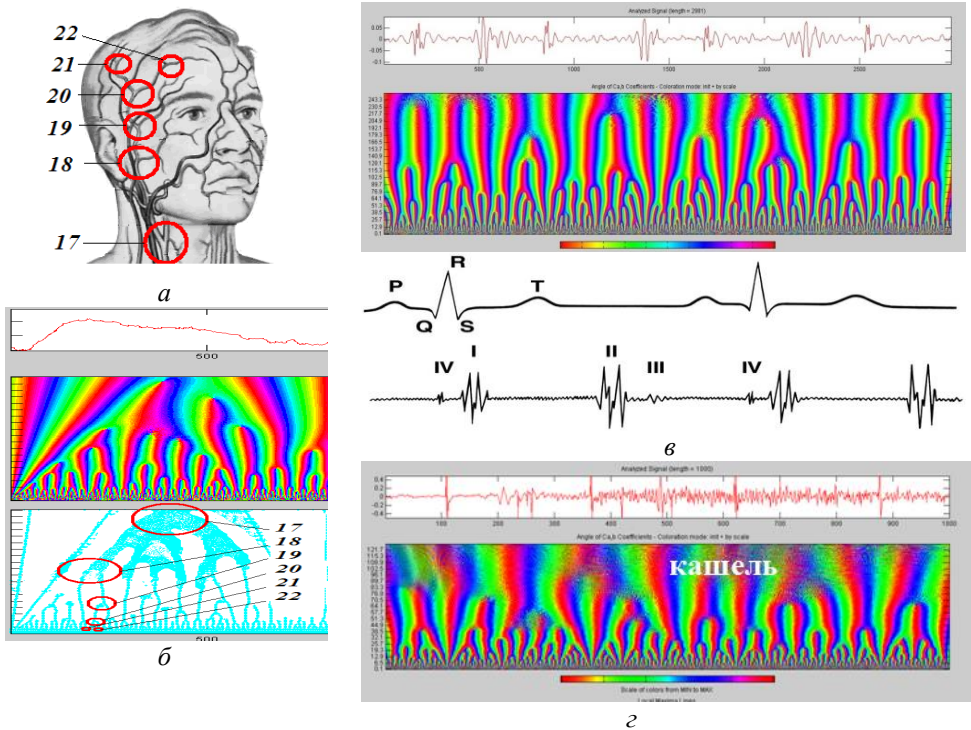


Рис. 7. Вейвлет-интроскопия: сонной артерии — а, б; фонокардиосигнала — в, и сигнала системы дыхания — з.

Fig. 7. Wavelet introscopy of the carotid artery – а, б; phonocardiogram – в and respiratory system signal – з

Аналогично такая технология вейвлет-интроскопии может применяться для анализа фонокардиосигнала (рис. 7, в) и сигнала системы дыхания (рис. 7, з).

5. Заключение

Полученные результаты динамического моделирования биопроцессов и биосистем на базе положений теории самоорганизации раскрывают феноменологию формирования в природных системах. Учет масштабности

инвариантной фрактальной структуры биосистем с самоподобием вида $1/f$ (признак наличия в них структурных связей), дают их физически и физиологически адекватное описание, устанавливают критерии структурной устойчивости биосистем, как критерии их нормы. Это дает общую теоретико-прикладную основу разработки методов и средств структурного анализа биосигналов на основе вейвлет-интроскопии. Математические модели и программные средства вейвлет-интроскопии позволяют извлекать дополнительную информацию из биосигналов о состоянии биосистем.

Список литературы

1. Aldonin G. M. Autonomous Monitoring of the Main Set of Parameners of the Cardiovascular Sistem // Biomedical Eengeeniring. 2013. Vol. 46. Iss. 6. P. 232–236.
2. Soldatov A. V., Aldonin G. M., Cherepanov V. V. Hardware-Program Complex on the Basis of Recorder MCM-11 // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2018. No. 11 (6). P. 671–678.
3. Wiener N, Rosenblueth A. The mathematical formula tion of the problem of conduction of impulses in a network of connected excitable elements, specifically in cardiac muscle // Arch. Inst. Cardiologia de Mexico. 1946. No. 16. P. 205–265.
4. Клиническая аритмология / под ред. А. В. Ардашева. М. : ИД Медпрактика, 2009. 1220 с.
5. Табор М. Хаос и интегрируемость в нелинейной динамике. М. : УРСС, 2001. 331 с.
6. Шустер Г. Детерминированный хаос. Введение. М. : Мир, 1988. 240 с.
7. Колмогоров А. Н. О сохранении условно-периодических решений при малом изменении функции Гамильтона // ДАН СССР. 1954. Т. 98, № 4. С. 527—530.
8. Арнольд В. И. Математические методы классической механики. М. : Наука, 1989. С. 320—335.
9. Мозер Ю. КАМ-теория и проблемы устойчивости. Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 448 с.
10. Zhang H., Holden A. V., Boyett M. R. The pacemaking system of the heart : from coupled oscillanjr to nonlinear waves // Nonlinear Anal Theory Methods Appl. 1997. Vol. 30. P. 1019–1027.
11. Мазуров М. Е. Ритмогенез в синоатриальном узле сердца // Биофизика. 2006. Т. 51, № 6. С. 1092—1099.
12. Алдонин Г. М. Нелинейные динамические модели и структурный анализ проводящей системы сердца // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 9. С. 46—50.
13. Алдонин Г. М., Черепанов В. В., Ярыгина О. Л. Самоорганизация в системе связанных нелинейных осцилляторов // Радиотехника. 2013. № 6. С. 50—54.
14. Мандельброт Б. Б. Фрактальная геометрия природы. М. : Институт компьютерных исследований, 2002. 660 с.
15. Goldberger A. L., Rigney P. R., West B. J. Chaos and fractals in human physiology // Sci. Am. 1990. Vol. 262. P. 42–49.
16. Гельмгольц Г. Скорость распространения нервного возбуждения. М. : ГИЗ, 1923. 91 с.
17. Zabusky N. J., Kruskal M. D. Interaction of “Solitons” in a Collisionless Plasma and the Recurrence of Initial States // Physical Review Letters. 1965. Vol. 15. P. 240–243.
18. Soldatov A. V., Aldonin G. M., Cherepanov V. V. Wavelet Analysis of Cardiac Electrical Activity Signals // Biomedical Engineering. 2018. Vol. 52. Iss. 2. P. 120–124.
19. Алдонин Г. М., Черепанов В. В. Пат. 2723763 (РФ). Способ вейвлет-интроскопии сосудистой сети кровеносного русла. Оpubл. в Б. И, 2020. № 17.

Благодарности

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

Сведения об авторах

Алдонин Геннадий Михайлович, д. т. н., профессор Сибирского федерального университета, г. Красноярск, Российская Федерация.

Черепанов Василий Викторович, аспирант Сибирского федерального университета, г. Красноярск, Российская Федерация.

Information about the authors

Gennady M. Aldonin, Doctor of Technical Sciences, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation.

Vasiliy V. Cherepanov, graduate student, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation.