

**ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КВАНТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕРДЦА**

В.Г. ПОЛОСИН

*Пензенский государственный университет ул. Красная, 40, Пенза, 440026, Россия,
e-mail: polosin-vitalij@yandex.ru*

Аннотация. Неопределённость динамики поведения сердца обусловлена сложностью структуры биологических систем, содержащих множественные случайные взаимосвязи между подсистемами. В работе предложено использовать информационно-измерительный квант в качестве меры неопределённости динамического состояния сердца для улучшения регрессионных свойств статистических моделей. Обсуждены способы оценки неопределённости выборки значений наблюдаемых параметров при определении меры кванта. Показано, что мера информационно-измерительного кванта обладает свойствами самоподобия и дробной размерностью при условии конечного количества значений массива электрокардиосигнала. Дан алгоритм для неинвазивного исследования электрофизиологических характеристик сердца. Показано, что определение формы зависимости на основе исследования распределения информационно-измерительного кванта позволяет сохранить диагностическую информацию об ионных токах эпикарда и улучшить прогнозирование АВ-блокад. В работе показано, что применение меры изменчивости результатов наблюдения повышает эффективность неинвазивной кардиодиагностики.

Ключевые слова: мера неопределённости, информационно-измерительный квант, самоподобие, изменчивость, электрофизиологические характеристики, неинвазивное измерение, электрокардиосигнал.

**APPLICATION OF INFORMATION-MEASURING QUANTUM FOR RESEARCH
OF ELECTROPHYSIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF HEART**

V.G. POLOSIN

Penza State University, Krasnaya str., 40, Penza, 440026, Russia, e-mail: polosin-vitalij@yandex.ru

Abstract. The uncertainty in the dynamics of the behavior of the heart is due to the properties of complex biological systems containing multiple random relationships between sub-systems. The paper suggests using the information-measuring quantum as a measure of the uncertainty of the dynamic state of the heart to improve regression properties of statistical models. Methods for estimating the uncertainty in the sampling of the values of the observed parameters in determining the quantum measure are discussed. It is shown that the measure of the information-measuring quantum has self-similarity and fractional dimension under the condition of a finite number of values of the array of the electrocardio signal. An algorithm for non-invasive examination of the electrophysiological characteristics of the heart is given. It is shown that the determination of the form of the dependence on the basis of the study of the distribution of the information-measuring quantum makes it possible to store diagnostic information on the ionic currents of the epicardium and to improve the prediction of the AV blockade. In this paper, it is shown that the application of a measure of the variability of the results of observation increases the effectiveness of noninvasive cardiognosis.

Key words: measure of uncertainty, information-measuring quantum, self-similarity, variability, electrophysiological characteristics, non-invasive measurement, electrocardiogram.

Введение. Сердце – сложный биологический объект, состояние которого изменяется во времени в соответствии с динамическим законом, т.е. как результат действия детерминированного оператора эволюции [1]. Принципиальная неопределённость и непредсказуемость динамики поведения сердца обусловлена особенными свойствами любой сложной биологической системы, состоящей из множества подсистем и содержащей множественные случайные взаимосвязи. Изменчивость нормального сердечного ритма в промежутках между биениями сердца – пример хаоса в организме человека, но этот хаос отличается от хаоса Лоренца [1-6, 23, 24].

В настоящее время для изучения и моделирования динамики поведения сложных медико-биологических систем всё большее внимание привлекают методы теории хаоса и синергетики. Сердечный ритм – результат функционирования сложной саморегулируемой нейрофизиологической системы, деятельность которой становится причиной не стационарности ЭКС, имеющего как периодические, так и хаотические составляющие. В этой ситуации традиционные методы сравнения и классификации кардиограмм, основанные на описательной статистике, на спектральном и корреляционном анализе часто тер-

пят неудачу [6-9]. Применение спектральных методов, основанных на периодичности и стационарности ЭКС, является одним из факторов неправильной диагностики ССС. Недостатки общепринятых спектральных методов проявляются в критических состояниях, когда особое значение имеет изменение формы сигнала и сердечного ритма [6]. В последнее время в печати наблюдается повышенный интерес анализа нестационарности ЭКС с помощью методов нелинейной динамики [5, 9-12].

Ключевой вопрос подобных методов анализа состоит в оценке неопределённости объекта. В современной литературе предлагаются различные варианты построения принципа неопределённости, которые представляют собой некоторые аналоги соотношения Гейзенберга [7-9]. В работе Осадчего Е.П. предложено использовать в качестве неопределённости состояния хаотических объектов информационно-измерительный квант, построенный на основе меры пространства измеряемых (контролируемых) величин и процедурного времени, необходимого для получения одного результата [14]. Такой подход хорошо согласуется с методами фрактальной обработки сигналов, нашедших широкое распространение в области радиофизики [18, 18]. Применение фракталов при решении физических задач основано на использовании конечного интервала самоподобия – скейлинга, представляющего собой своеобразную меру неопределённости объекта и значений контролируемых параметров.

Информационно-измерительный квант – мера модели динамической системы сердца. Выбор формы математической модели, связывающей поведение динамической системы, остаётся плохо формализуемой задачей. Для этих целей традиционно применяют графические методы установления математической формы модели: методы выделения контура рассеивания, методы медианных центров, методы выделения остатка и др. [13]. Несоответствие выбора формы аппроксимирующей функции экспериментальным данным приводит к не адекватности модели объекту наблюдения. Применение информационно-измерительного кванта, предложенного ранее в работе [14] для оценки естественной изменчивости при решении задач измерения, мониторинга и контроля, упрощает и формализует выбор формы кривой.

В соответствии с определением информационно-измерительный квант представляет собой минимальное формирование, отражающее суть *вероятностных* физических процессов [14]. Для построения измерительного кванта использована совместная оценка текущего значения разности и её нормированного значения, связанной с аддитивной и мультипликативной изменчивостью объекта исследования. В соответствии с обязательными общими свойствами и возможностями ИИК его формально логическое построение должно базироваться на *вероятностном представлении многофакторного и многоуровневого пространства* [7-13].

Концепция статистического мониторинга состояния сердца основывается на представлении взаимосвязи мер используемых для анализа информации и мер используемых для вероятного пространства отсчётов ЭКС. Для многомерного пространства следует использовать структуру меры в форме произведения абсолютных Δx_i и относительных δ_{x_i} неопределённостей параметров многомерной модели. Наиболее общая математическая структура для расчёта меры упорядоченности многомерной выборки имеет вид

$$\rho_{\text{ИИК}} = \prod_{i=1}^{N_{\Delta}} \Delta x_i \cdot \prod_{i=N_{\Delta}}^N \delta_{x_i} \quad (1)$$

Здесь N – число независимых наблюдаемых переменных; N_{Δ} – число независимых наблюдаемых переменных, дискретные свойства которых характеризуются абсолютной погрешностью Δx_i ; $(N - N_{\Delta})$ – число независимых наблюдаемых переменных, дискретные свойства которых характеризуются относительными погрешностями δ_{x_i} .

Математическая структура информационно-измерительного кванта для ЭКС задана как произведение меры кванта $\rho_{\text{ИИК}}$ на процедурное время $\Delta \tau$, необходимое для получения независимого текущего отсчёта

$$\gamma_{\text{ИИК}} = \rho_{\text{ИИК}} \cdot \Delta \tau \quad (2)$$

Простейшая геометрическая интерпретация информационно-измерительный квант представляет собой прямоугольник, стороны которого образованы мерой изменчивости и процедурным временем получения значения параметра [9]. Там же предложено в качестве меры кванта использовать меру изменчивости кванта, построенной на основе экспериментальных данных.

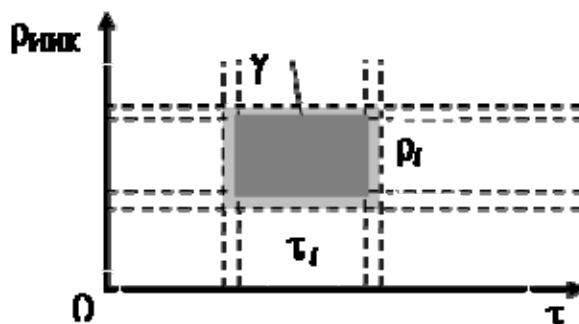


Рис. 1. Геометрическая интерпретация информационно-измерительного кванта

Так как мера ИИК отражает минимальную неопределённость оценки результата, то для оценки изменчивости исследуются разности значений. Суть оценки изменчивости в следующем. Отдельное значение выборки данных содержит конечное количество информационно измерительных квантов. Минимальное изменение значений оценивается на основе свойств модели, которая имеет неопределённость значений, превышающую погрешность измерительных средств. Оценка меры кванта проводится с помощью следующих способов.

Первый способ состоит в том, что для установления меры изменчивости кванта проводится сортировка значений выборки результатов модели в порядке возрастания (или убывания) и рассчитывается разница между соседними значениями. Оценка неопределённости приращения устанавливается как *наиболее вероятное значение* по гистограмме распределения кванта, которое и принимается в качестве меры $\rho(\varphi)$.

Другой способ построен на рассмотрении количественного содержания информационных измерительных квантов в результатах измерений. Оценка изменчивости находится как евклидова мера разброса разностей значений сортированного ряда $\Delta\varphi$. Для вычисления изменчивости в отведении А используется выражение вида:

$$\rho_A(\varphi) = \frac{1}{N} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (\Delta\varphi_i)^2} \quad (3)$$

Таким образом, суть оценки изменчивости на основе второго способа сводится к определению выборочного центрального момента второго порядка для разброса разностей результатов сортированного ряда значений, полученных в течение одного кардиоцикла. При этом, если распределение значений выборки двух модальное, то следует выделить участки сигнала с разным характером активности объекта.

Третий способ оценки изменчивости иллюстрирует рис. 2. Суть способа состоит в исследовании графика сортированных значений ЭКС. В этом способе в качестве меры изменчивости принимается произведение наклона аппроксимирующей прямой на где происходит изменения сигнала и отбросить участки с областью неизменного сигнала (т.е. выделить и отбросить изменения в результате воздействия помех). процедурное время получения одного результата.

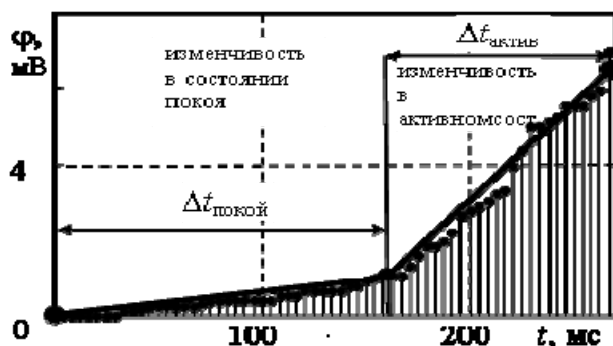


Рис. 2. Графический способ оценки изменчивости значений ЭКС

Четвёртый способ состоит в том, что при проведении статистических измерений или статистической обработки [20] в качестве меры изменчивости принимают ширину интервалов группирования данных. В этом способе для расчёта меры изменчивости параметра объекта используется формула:

$$\rho_{\varphi} = \frac{\varphi_{\max} - \varphi_{\min}}{m} \quad (4)$$

Для оценки числа группирования данных классически используется формула Старджестта ($m=3,3 \cdot \ln N + 1$), рекомендации Хайнхольда и Гаеде ($m = \sqrt{N}$), рекомендации Вильямса ($m=1,9 \cdot N^{0,4}$) и др.

[13]. При ограниченной выборке результатов измерений мера изменчивости для одного отведения принимается равной интервалу группирования данных ЭКС.

В соответствии с выражением 1 для трёх отведений ЭКС мера информационно-измерительного кванта имеет вид:

$$\rho_{\text{иик}} = \frac{2}{3} \cdot \Delta\varphi_A \cdot \Delta\varphi_B \cdot \Delta\varphi_C \quad (5)$$

где $\Delta\varphi_A$, $\Delta\varphi_B$ и $\Delta\varphi_C$ – интервалы неопределённости для значений ЭКС отведений A , B и C при ограниченной выборке результатов, в качестве которых используются интервалы группирования значений или абсолютные погрешности измерения ЭКС.

Оценка неопределённости параметра объекта возможна с помощью следующих подходов.

1. На основе оценки погрешности измерительного процесса.
2. Путём оценки наиболее вероятной изменчивости параметра стохастической динамической системы, превышающего изменчивость помех. Для этого строится сортированный ряд выборочных отсчётов, оцениваются разницы между двумя отсчётами, строится гистограмма и оцениваются статистические свойства: мат. ожидание, СКО и др..
3. Определение изменчивости стохастической системы по наклону кривой сортированного ряда. Мера кванта принимается равной произведению коэффициента наклона аппроксимирующей прямой для сортированного ряда на время получения одного независимого отсчёта.
4. Технологическая неопределённость, проявляемая в фазовом пространстве координат (дискретность организации процесса, волновая природа величины и др.)
5. Использование группирований значений сортированного ряда, для расчёта которого определяется разность максимального и минимального значений выборки и делится на количество интервалов группирования данных.

Количество квантов в выборке определяется как сумма модулей положительных и отрицательных значений всех отсчётов в выборке отнесённое к интервалу неопределённости по потенциалу для одного кванта.

Фрактальные свойства структуры электрокардиосигнала. В современной математике рассматриваются методы обработки результатов наблюдения на основе фракталов [5, 10, 11, 23]. Фракталом принято называть геометрическую фигуру, обладающую принципом самоподобия, выраженном в повторении фигуры с изменением размеров. Важнейшее свойство фрактала состоит в самоподобии, согласно которого любая его часть, даже очень малая, при сильном увеличении похожа на фрактал в целом. Естественные природные объекты и их сигналы лучше всего описываются фракталами, которые представляют собой геометрические объекты с дробной размерностью. Применение фракталов для определения хаотических свойств сигналов открыло новые перспективы развития методов обработки многомерных сигналов [17-199].

Перспективно применение теории самоподобия и фракталов к исследованию электрокардиосигнала, отражающего хаотические свойства сердца. Мера изменчивости также имеет фрактальные свойства. В качестве примера на рис. 3 дано изображение фрактала в пространстве трёх отведений ЭКС, построенного в Аффинном пространстве отрезков в форме треугольной призмы.

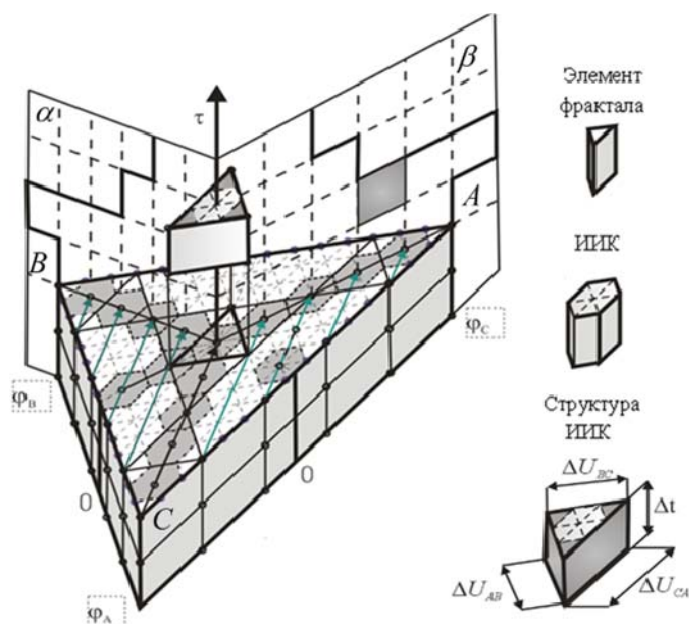


Рис. 3. Фрактальная структура электрокардиосигнала, построенная в пространстве трёх отведений

Длина сторон треугольников в основании призмы соответствует разностям потенциалов $\Delta\varphi_{AB}$, $\Delta\varphi_{BC}$, $\Delta\varphi_{CA}$ между отведениями A , B и C . Фрактал построен из структурных элементов, заданных в форме меры неопределённости информационно измерительного кванта. Ось иллюстрирует направление развития времени в пространстве, дискретность которого задана в виде отрезков боковых граней призмы, равных процедурному времени получения одного результата. В основании призмы расположен треугольник, подобный треугольнику в основании фрактала. Стороны треугольника в основании структуры информационно-измерительного кванта пропорциональны интервалам неопределённости для разностей значений отведений ЭКС: ΔU_{AB} , ΔU_{BC} и ΔU_{CA} . При построении фрактала в качестве интервала неопределённости использованы интервалы группирования значений для ограниченной выборке результатов.

В основании структуры кванта положен треугольник, подобный треугольнику в основании фрактала. Структура кванта содержит 9-ть элементов фрактала полученных делением его стороны на три части. Следовательно, размерность масштабированной треугольной структуры информационного кванта равна $d = \log(9)/\log(3) = 2$. С отсчётом связана область пространства, ограниченная шестиугольной пирамидой состоящей из шести элементов. Для этой структуры характерна дробная размерность $d_{\text{ИИК}} = \log_{10}(6)/\log_{10}(3) = 1,639$, т.е. шестигранный элемент объема пространства связан с минимальным треугольным структурным элементом дробной размерностью. Формирование отсчётов с помощью шестигранной сотовой структуры обладает свойством самоподобия и при малом количестве элементов имеет дробную размерность равную $a=1/3, n=7, d=1,77$; $a=1/5, n=19, d=1,82$. При увеличении количества делений отрезка структура сохраняет дробную размерность меньше 2. Таким образом, структура ЭКС обладает фрактальными свойствами (само подобием и дробной размерностью) при конечном количестве интервалов группирования данных, т.е. конечной мере ρ изменчивости мониторируемого параметра. Структура ИИК задаёт соотношение между масштабами единиц для потенциалов отведений и разностей потенциалов оснований.

Возможность применения информационно измерительного кванта для исследования электрофизиологических свойств сердца основаны на том, что оценка неопределённости состояния системы с помощью формулы (5) формализует информационные и вероятностные свойства электрокардиосигналов [177].

Структура (5) используется для оценки результата в единицах меры неопределенности и необходима для визуализации траектории изменения ЭКС в зависимости от времени. Ломаные линии в плоскостях, заданных осями потенциалов отведений и временной осью τ , проходящей перпендикулярно основанию призмы через центр треугольника, иллюстрирует изменение потенциала отведения во времени. На плоскости γ выделен информационно-измерительный квант, заданный мерой одного отведения ρ_c и процедурным временем Δt . Формула информационно измерительного кванта γ одного отведения имеет вид

$$\gamma = \Delta\varphi \cdot \Delta\tau \quad (6)$$

Здесь $\Delta\varphi$ – мера равна неопределённости потенциала.

Предлагаемые автором методы исследования и анализа вероятностных свойств электрокардиосигнала и электрофизиологических свойств сердца строятся на предположении, что информационно измерительный квант представляет собой своеобразный конечный интервал самоподобия для фрактальной структуры электрокардиосигнала, т.е. минимальное формирование, отражающее суть *вероятностных* физических процессов в сердечнососудистой системе.

Неинвазивное исследование электрофизиологических характеристик сердца. Наиболее ярко специфические свойства информационно-измерительного кванта проявляются при оценке параметров стохастической модели ионных токов реполяризации эпикарда, применённой для анализа решения обратной задачи электрокардиографии. Цель решения обратной задачи состоит в не инвазивном исследовании электрофизиологических характеристик сердца.

Так как зависимости во времени для потенциала эпикарда, для дипольных моментов и для ионных токов имеют одинаковую форму [15, 16], то результаты определения потенциала эпикарда и дипольных моментов были использованы для определения параметров составляющих стохастической модели ионных токов реполяризации эпикарда. Неинвазивное исследование электрофизиологических характеристик сердца основано на анализе решения обратной задачи для опорной точки эпикарда с помощью стохастической модели токов фазы реполяризации вида

$$I'_{ion}(t) = I'_{Ca}(t) - I'_{K1}(t) + K_M \cdot (I'_{Ca}(t) + I'_{K1}(t) + I'_{K1}(t)), \quad (7)$$

где $I'_{Ca}(t), I'_{K1}(t)$ – модели переходного транзитного тока эпикарда, медленного деполяризующего тока кальция и токов калия задержанного и аномального выпрямления; $I'_{Ca}(t)$ и $I'_{K1}(t)$ – модели тока калия быстрого и медленного задержанного выпрямления; $I'_{K1}(t)$ – модель тока калия аномального выпрямления.

Использование статистических функций с контролируемой формой распределений для моделирования составляющих тока реполяризации позволяет сделать модели гибкими и установить изменение формы ионных токов на основе энтропийно-параметрического потенциала.

Оценка отсчётов выборки потенциалов эпикарда с помощью меры изменчивости значений в выборке, полученной при решении обратной задачи для опорной точки эпикарда, использована для определения параметров модели. Такой подход позволил *сохранить и использовать* диагностическую информацию о составляющих ионных токов, содержащуюся в исходных выборках потенциала эпикарда [4].

Заключение. Применение меры изменчивости для построения кривой восстановления миокарда позволило улучшить прогнозирование АВ-блокады I, II, III степени и дифференцировать блокады II степени посредством определения особых точек кривой и применения в качестве сглаживающей регрессии не симметричных распределений. Выбор форм кривых распределений осуществлён посредством совпадения энтропий распределений информационно-измерительного кванта, применяемого в качестве меры вероятностных свойств взаимосвязи между интервалами времени импульсов с синусового узла до начала ответного импульса в пучке Гиса и интервалов времени распространения импульса от начала активности в пучке Гиса до момента получения следующего импульса с синусового узла [3]. При использовании двух множеств распределений (распределения Вейбулла-Гнеденко и Гамма распределения) при выборе формы на основе совпадения оценок энтропийной и параметрической изменчивостей приведённая разница аппроксимаций не превысила 0,04 %.

Литература

1. Анищенко В.С., Астахов В.В., Вадивасова Т.Е., Нейман А.Б., Стрелкова Г.И., Шиманский-Гайер Л. Нелинейные эффекты в хаотических и стохастических системах // Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 544 с.
2. Ахметов Р.С. Применение теории фракталов и вейвлет анализа для выявления особенностей временных рядов при диагностике систем // Вестник научно-технического развития. 2009. № 1 (17). С. 26–31.
3. Бодин О.Н., Полосин В.Г., Рахматуллоев Ф.К., Логинов Д.С. Балахонова С.А. Способ прогнозирования АВ-блокады I, II и III степени. Пат. № 2591839 РФ. Официальный бюллетень «Изобретения. Полезные модели». 2016. № 20.
4. Бодин О.Н., Полосин В.Г., Рахматуллоев Ф.К., Рахматуллоев А.Ф., Аржаев Д.А., Сафронов М.И. Способ определения электрофизиологических характеристик сердца. Пат. № 2615286 РФ. Официальный бюллетень «Изобретения. Полезные модели». 2017. №10.
5. Божокин С.В., Паршин Д.А. Фракталы и мультифракталы. Ижевск: НИЦ, «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 128 с.

6. Еськов В.М., Еськов В.В., Вохмина Ю.В., Горбунов Д.В., Иляшенко Л.К. М.И. Энтропия Шеннона в изучении стационарных режимов и эволюции complexity // Вестник московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. 2017. № 3. С. 90–98.
7. Еськов В.М., Баженова А.Е., Вохмина Ю.В., Филатов М.А., Иляшенко Л.К. Гипотеза Н.А. Бернштейна в описании хаотической динамики произвольных движений человека // Российский журнал биомеханики. 2017. Т.21, №1. С. 18–28
8. Еськов В.М., Филатова О.Е., Еськов В.В., Гавриленко Т.В. Эволюция понятия гомеостаза: детерминизм, стохастика, хаос-самоорганизация // Биофизика. 2017. Т.62, № 5. С. 984–997.
9. Зилев В.Г., Еськов В.М., Хадарцев А.А., Еськов В.В. Экспериментальное подтверждение эффекта «Повторение без повторения» Н.А. Бернштейна // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2017. №1. С. 4–9.
10. Кроновер Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. М.: Постмаркет, 2000. 352 с.
11. Кудинов А.Н., Лебедев Д.Ю., Цветков В.П., Цветков И.В. Математическая модель мультифрактальной динамики и анализ сердечных ритмов // Математическое моделирование. 2014. Т. 26, № 10. С. 127–136.
12. Майоров О.А., Фенечко В.Н. Повышение надёжности исследования детерминированного хаоса в биологической активности (ЭЭГ, ЭКГ и вариабельности сердечного ритма) методами нелинейного анализа // Клиническая информатика и Телемедицина. 2009. Т.5, № 6. С. 10–17.
13. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат. Линингр. от-ние, 1985. 248 с.
14. Осадчий Е.П., Берестень М.П. Информационно-измерительный квант // Датчики и системы. 1999. № 1. С. 19–21.
15. Полосин В.Г., Бодин О.Н., Рябчиков Р.В. Анализ ионных токов для рефрактерной фазы миокарда. Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации. Сб. меж. нар. науч.-техн. конф. «Шляндинские чтения – 2014». Пенза, 2014. С. 35–40.
16. Полосин В.Г., Бодин О.Н., Иванчуков А.Г. Анализ ионных токов эпикарда в период рефрактерности // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2015. № 3 (13). С. 54–60.
17. Полосин В.Г. Информационно-измерительный квант энтропийно-параметрического потенциала электрокардиосигнала для исследования электрофизиологических характеристик сердца // Математическая биология и биоинформатика: Мат-лы VI Межд-ой конф. Пушино, 2016. С. 41–42.
18. Потапов А.А. Фракталы и хаос как основа новых прорывных технологий в современных радиосистемах Дополнение к книге: Кроновер Р. “Фракталы и хаос в динамических системах”, 2006. С. 374–479.
19. Потапов А.А. Фракталы, скейлинг и дробные операторы как основа новых методов обработки информации и конструирования фрактальных радиосистем // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2008. № 5 (77). С. 3–19.
20. Прохоров С.А. Моделирование и анализ случайных процессов. Лабораторный практикум. СИЦ РАН, 2002. 277 с.
21. Файнзильберг Л.С. Компьютерный анализ и интерпретация электрокардиограмм в фазовом пространстве // SystemResearch&InformationTechnologies. 2004. №1. С. 32–46.
22. Халфен Э.Ш, Сулковская Л.С. Клиническое значение исследования скоростных показателей зубца ЭКГ // Кардиология. 1986. № 6. С. 60–62.
23. Хадарцев А.А., Филатова О.Е., Джумагалиева Л.Б., Гудкова С.А. Понятие трех глобальных парадигм в науке и социумах // Complexity. Mind. Postnonclassic. 2013. № 3. С. 35–45.
24. Хадарцев А.А., Еськов В.М., Филатова О.Е., Хадарцева К.А. Околосуточные ритмы показателей кардио-респираторной системы и биологического возраста человека // Терапевт. 2012. № 8. С. 36–44.
25. Goldberger A L Fractal mechanisms in the electrophysiology of the heart // IEEE Eng. Vtl. Biol. 1992. № 11. P. 47–52.

References

1. Anishchenko VS, Astakhov VV, Vadivasova TE, Neyman AB, Strelkova GI, Shimanskiy-Gayer L. Nelineynye efekty v khaoticheskikh i stokhasticheskikh sistemakh [Nonlinear effects in chaotic and stochastic sistemah] Moscow-Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovaniy; 2003. Russian.
2. Akhmetov RS. Primenenie teorii fraktalov i veyvlet analiza dlya vyyavleniya osobennostey vremennykh ryadov pri diagnostike system [Application of fractal theory and wavelet analysis to identify the characteristics of the time series in the diagnosis of systems]. Vestnik nauchno-tekhnnicheskogo razvitiya. 2009;1 (17):26-31. Russian.

3. Bodin ON, Polosin VG, Rakhmatullov FK, Loginov DC, Balakhonova SA. Sposob prognozirovaniya AV-blokady I, II i III stepeni. [a Method for predicting AV-blockade] Pat. № 2591839 Russian Federation. Ofitsial'nyy byulleten' «Izobreteniya. Poleznye modeli». 2016. Russian.
4. Bodin ON, Polosin VG, Rakhmatullov FK, Rakhmatullov AF, Arzhaev DA, Safronov MI. Sposob opredeleniya elektrofiziologicheskikh kharakteristik serdtsa [a Method of determining the electrophysiological characteristics of the heart.]. Pat. № 2615286 Russian Federation. Ofitsial'nyy byulleten' «Izobreteniya. Poleznye modeli». 2017. Russian.
5. Bozhokin SV, Parshin DA. Fraktaly i mul'tifraktaly [Fractals and multifractal.]. Izhevsk: NITs, "Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika"; 2001. Russian.
6. Es'kov VM, Es'kov VV, Vokhmina YV, Gorbunov DV, Ilyashenko LK. M.I. Entropiya Shennona v izuchenii statsionarnykh rezhimov i evolyutsii complexity [Shannon's Entropy in the study of stationary regimes and the evolution of complexity]. Vestnik moskovskogo universiteta. Seriya 3: Fizika. Astronomiya. 2017;3:90-8. Russian.
7. Es'kov VM, Bazhenova AE, Vokhmina YV, Filatov MA, Ilyashenko LK Gipoteza NA. Bernshteyna v opisani khaoticheskoy dinamiki neproizvol'nykh dvizheniy cheloveka [Bernstein in the description of chaotic dynamics of involuntary movements of the person]. Rossiyskiy zhurnal biomekhaniki. 2017;21(1):18-28 Russian.
8. Es'kov VM, Filatova OE, Es'kov VV, Gavrilenko TV. Evolyutsiya ponyatiya gomeostaza: determinizm, stokhastika, khaos-samoorganizatsiya [Evolucija the concept of homeostasis: determinism, stochastics, chaos-self-organization]. Biofizika. 2017;62(5):984-97. Russian.
9. Zilov VG, Es'kov VM, Khadartsev AA, Es'kov VV. Eksperimental'noe podtverzhenie effekta «Povtorenie bez povtoreniya» N.A. Bernshteyna [Experimental verification of an effect of "Repetition without repetition" in N.. Bernstein]. Byulleten' eksperimental'noy biologii i meditsiny. 2017;1:4-9. Russian.
10. Kronover RM. Fraktaly i khaos v dinamicheskikh sistemakh [Fractals and chaos in dynamic systems. Fundamentals of the theory.]. Osnovy teorii. Moscow: Postmarket; 2000. Russian.
11. Kudinov AN, Lebedev DY, Tsvetkov VP, Tsvetkov IV. Matematicheskaya model' mul'tifraktal'noy dinamiki i analiz serdechnykh ritmov [Mathematical model of multifractal dynamics and analysis of heart rate]. Matematicheskoe modelirovanie. 2014;26(10):127-36. Russian.
12. Mayorov OA, Fenechko VN. Povyshenie nadezhnosti issledovaniya determinirovannogo khaosa v biologicheskoy aktivnosti [Improving the reliability of the study of deterministic chaos in biological activity] (EEG, EKG i variabel'nosti serdechnogo ritma) metodami nelineynogo analiza. Klinicheskaya informatika i Telemeditsina. 2009;5(6):10-7. Russian.
13. Novitskiy PV, Zograf IA. Otsenka pogreshnostey rezul'tatov izmereniy [Estimation of errors of measurement results.]. Leningrad: Energoatomizdat. Liningr. ot-nie; 1985. Russian.
14. Osadchiy EP, Beresten' MP. Informatsionno-izmeritel'nyy kvant [Information-measuring quantum]. Datchiki i sistemy. 1999;1:19-21. Russian.
15. Polosin VG, Bodin ON, Ryabchikov RV. Analiz ionnykh tokov dlya refrakternoy fazy miokarda. Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii [Analysis of ion currents for the refractory phase of the myocardium. Methods, means and technologies of reception and processing of measurement information]. Sb. mezh. nar. nauch.-tekhn. konf. «Shlyandinskie chteniya – 2014». Penza; 2014. Russian.
16. Polosin VG, Bodin ON, Ivanchukov AG. Analiz ionnykh tokov epikarda v period refrakternosti [Analysis of the epicardium in the period of refractoriness]. Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'. 2015;3(13):54-60. Russian.
17. Polosin VG. Informatsionno-izmeritel'nyy kvant entropiyno-parametricheskogo potentsiala elektrokardiosignala dlya issledovaniya elektrofiziologicheskikh kharakteristik serdtsa [Informational-measuring the quantum of entropy-parametric potential of electro cardio for the study of electrophysiological characteristics of the heart]. Matematicheskaya biologiya i bioinformatika: Mat-ly VI Mezhd-oy konf. Pushchino; 2016. Russian.
18. Potapov AA. Fraktaly i khaos kak osnova novykh proryvnykh tekhnologiy v sovremennykh radiosistemakh [Fractals and chaos as the basis for new breakthrough technologies in modern radiosistemy addition to the book: Introduction] Dopolnenie k knige: Kronover R. "Fraktaly i khaos v dinamicheskikh sistemakh"; 2006. Russian.
19. Potapov AA. Fraktaly, skeyling i drobnye operatory kak osnova novykh metodov obrabotki informatsii i konstruirovaniya fraktal'nykh radiosistem [Fractals, scaling and fractional operators as a basis for new methods of information processing and design of fractal radio systems]. Tekhnologiya i konstruirovanie v elektronnoy apparature. 2008;5 (77):3-19. Russian.
20. Prokhorov SA. Modelirovanie i analiz sluchaynykh protsessov [Modeling and analysis of random processes. Laboratory workshop]. Laboraturnyy praktikum. SNTs RAN; 2002. Russian.
21. Faynzil'berg LS. Komp'yuternyy analiz i interpretatsiya elektrokardiogramm v fazovom prostranstve. SystemReseach&InformationTechnologies. 2004;1:32-46.
22. Khalfen ESh, Sulkovskaya LS. Klinicheskoe znachenie issledovaniya skorostnykh pokazateley zubtsa EKG. Kardiologiya. 1986;6:60-2.
23. Khadartsev AA, Filatova OE, Dzhumagalieva LB, Gudkova SA. Ponyatie trekh global'nykh paradigm v nauke i sotsiumakh [The concept of the three global paradigms in science and society]. Complexity. Mind. Postnonclass. 2013;3:35-45. Russian.

24. Khadartsev AA, Es'kov VM, Filatova OE, Khadartseva KA. Okolosutochnye ritmy pokazateley kardio-respiratornoy sistemy i biologicheskogo vozrasta cheloveka [Circadian rhythms of the indices of cardio respiratory system and the human biological age]. *Terapevt.* 2012;8:36-44. Russian.

25. Goldberger AL. Fractal mechanisms in the electrophysiology of the heart. *IEEE Eng. Vtl. Biol.* 1992;11:47-52.

Библиографическая ссылка:

Полосин В.Г. Применение информационно-измерительного кванта для исследования электрофизиологических характеристик сердца // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2017. №4. Публикация 1-5. URL: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2017-4/1-5.pdf> (дата обращения: 12.12.2017). DOI: 10.12737/article_5a38cce58642a7.78002703.