

---

## ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И РЕКОНСТРУКЦИИ ЭКГ ПРИ ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИХ ФЛУКТУАЦИЯХ\*

**В.В. Пипин**

Институт физики земли СО РАН  
*ул. Лермонтова, 126а, Иркутск, Россия, 664033*

**М.В. Рагульская**

Институт земного магнетизма и распространения радиоволн РАН  
*Москва*

**С.М. Чибисов**

Кафедра общей патологии и патофизиологии  
Медицинский факультет  
Российский университет дружбы народов  
*ул. Миклухо-Маклая, 8, Москва, Россия, 117198*

Настоящая работа посвящена рассмотрению теоретических моделей адапционных режимов генерации и устойчивости сердца, как нелинейного динамического точечного источника.

В статье показано, что малые возмущения динамической системы в фазовом пространстве имеют собственные моды с наибольшими показателями роста в окрестностях особых точек, две из которых находятся в интервале Т и Р-зубцов. Таким образом, качественное поведение системы и ее вариабельность при внешнем воздействии определяются эволюционными свойствами этих интервалов.

**Ключевые слова:** электрокардиограмма, сердце, мониторинг, динамическая система, адаптация.

**Методика исследования.** В Москве, Санкт-Петербурге, Киеве, Симферополе, Якутске в течение 2006—2008 гг. проводился одновременный гелиомедицинский мониторинг, который позволил собрать единую для всех городов — участников Интернет-базу данных более 20 000 измерений, отражающих временную и пространственную динамику изменений параметров 1-го отведения электрокардиограммы [1]. Измерения проводились в осенне-весенний период вблизи дат равноденствия с участием постоянной группы обследуемых. Во всех мониторинговых группах проводили ежедневную 4-кратную регистрацию в состояниях покоя, после стандартизированного психологического теста, пробы Руфье, 10 мин. отдыха от нагрузки. При проведении анализа полученные данные сравнивали со значениями чисел Вольфа (W), индексов, характеризующих возмущенность геомагнитного поля, и космических лучей, полученных по базе данных ИЗМИРАН.

**Результаты исследования и обсуждение.** Для теоретического осмысления результатов телекоммуникационного мониторинга «Гелиомед» авторы статьи решили перейти от изучения прямой задачи воздействия космофизических факторов на организм человека к обратной задаче: изучению деятельности сердечно-

---

\* Работа поддержана Грантом РФФИ 09-02-90471-Укр\_ф\_а.

сосудистой системы, как нелинейной динамической системы, и выявлению особенностей ее устойчивости и функционирования под воздействием внешней вынуждающей силы.

**Динамические модели и реконструкции ЭКГ, их достоинства и недостатки.** При изучении воздействия таких крупномасштабных явлений внешней среды, как вариации космо- и геофизических факторов, размерами сердца можно пренебречь и рассматривать его, как идеализированный нелинейный точечный источник автоколебаний, амплитуда сигнала которого изменяется в соответствии с наблюдаемыми ЭКГ. Такая постановка задачи позволяет уйти от вопроса причин, источника и особенностей генерации колебаний, а также не рассматривать процессы пространственного распространения волны возбуждения колебаний по сердечной ткани. Таким образом, в рамках поставленной задачи единственное, что интересует нас — это закономерности динамического изменения амплитуды во времени, поиск управляющих параметров в фазовом пространстве, а также особенности их изменения при различных типах внешнего воздействия.

В здоровом состоянии изменения амплитуды сигнала сердца не являются строго периодическими [2—4], а носят квазипериодический характер. Отличия от строго периодического процесса проявляются как в вариациях фазы, так и в вариациях формы сигнала ЭКГ. Такое поведение трудно объяснить в рамках одной модели. Хаотическая компонента вариаций ЭКГ может объясняться, в частности, взаимодействием сердечно-сосудистой системы с дыхательной подсистемой. Полученные результаты хорошо описывают внутреннюю перестройку динамической системы из-за эндогенных процессов и процесс срыва системы в хаотические колебания. Однако вопросы поведения системы под внешним воздействием остаются открытыми.

Неавтономные динамические модели являются весьма полезным инструментом для анализа и фильтрации кардиограмм. Один из примеров применения такого типа моделей рассмотрен G.D. Clifford и P.E. McSharty [6]. В качестве другого примера можно привести интерполяционные модели, представленные Л.С. Файнзильбергом [7]. Последние были использованы в автоматических программах обработки телемедицинского мониторинга «Гелиомед». Характерной особенностью данных моделей является то, что форма сигнала и его вариации определяются заданием модельных функций. Модельные функции представляются в виде суммы «дельта-образных» источников, центры которых совпадают с определенными моментами фазы ЭКГ, а именно с максимумами и минимумами PQRST комплекса. Эта чисто математическая процедура удачно позволяет автоматизировать задачу сравнительного анализа кардиограмм, переведя ее из координат (амплитуда сигнала; время) в фазовое пространство (скорость изменения амплитуды; амплитуда) без учета физических и биологических закономерностей наблюдаемых явлений.

Закономерности изменения амплитуды сигнала сердца, как точечного источника, но без учета влияния внешней силы рассматривались в цикле работ V.S. Anischenko. Основным вопросом, который интересовал авторов работы [8], было изу-

чение условий перехода упорядоченных колебаний в хаотические и определение меры порядка и хаоса в изучаемых системах. В этой работе моделирование формы кардиосигнала проводилось методами математической реконструкции нелинейной динамической системы по реальным кардиограммам. Функциональная зависимость представлялась суммой нескольких десятков полиномов, подгоночные коэффициенты для которых находились из «загрубленных» данных реальных кардиограмм. Для восстановления особенностей PQRS T комплекса кардиосигнала пришлось пренебречь хаотическими вариациями ЭКГ и рассматривать идеализированную модель для колебаний, постоянных по форме и фазе. Модель имеет следующий вид:

$$\partial_t x_1 = x_2, \quad \partial_t x_2 = x_3, \quad \partial_t x_3 = f(x_1, x_2, x_3), \quad (1)$$

$$f(x_1, x_2, x_3) = \sum_{l_1 l_2 l_3=0}^3 C_{l_1 l_2 l_3} \prod_{k=1}^3 x_k^{l_k},$$

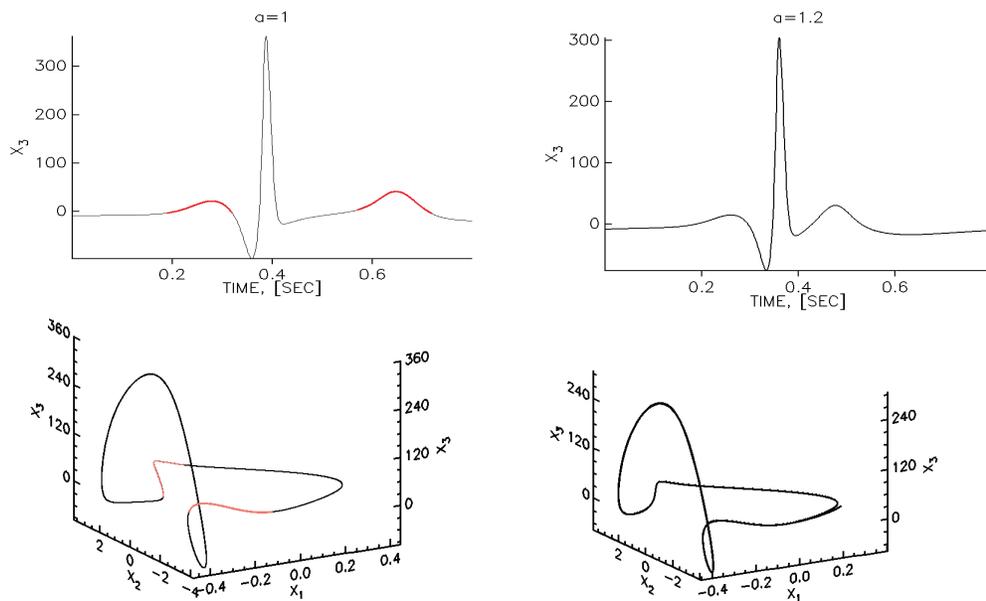
где переменная  $x_3$  моделирует сигнал ЭКГ, коэффициенты  $C_{l_1 l_2 l_3}$  приведены в [8].

Данная модель достаточно хорошо описывает усредненные свойства одного из типов кардиосигнала в спокойном состоянии. При внешней нагрузке может происходить перестройка управляющих параметров динамической системы. Для исследования этих процессов необходим дополнительный анализ численных реконструкций, основанных на ЭКГ, полученных в разные интервалы времени: до нагрузки, во время и после. На данный момент такая работа еще не сделана.

Мы применили предложенные в [8] полиномиальные уравнения для анализа реальных данных нашего мониторинга и выяснили, что наряду с несомненными аналитическими достоинствами, имеются и выраженные неудобства использования модели Анищенко в рамках нашей задачи внешнего воздействия. Например, модель хорошо работает, если амплитуда R-зубца много больше амплитуды T-зубца, а время релаксации между колебаниями сравнимо со временем самих колебаний, что практически всегда нарушается в реальных электрокардиограммах при тахикардии и повышенных физических нагрузках.

Авторами настоящей статьи было проведено определение стационарных состояний нелинейной динамической системы (1). Будем использовать  $b$  в качестве параметра внешней силы, а также введем дополнительный параметр  $a$  как характеристику **жесткости** системы. При  $a = 1$ ,  $b = 560$  модель достаточно хорошо описывает усредненные свойства одного из распространенных типов экспериментально наблюдаемых кардиосигналов в спокойном состоянии.

Линеаризуя (1), можно найти собственные моды, описывающие решение (1) в окрестности особых точек. Анализ показывает, что относительно малое изменение параметра  $a$  (в пределах 10%), которое можно интерпретировать, как вариации интегральных скоростей реакции биосистемы, приводит к существенному изменению показателей роста собственных решений в окрестности особых точек, что в свою очередь дает изменение морфологических и топологических свойств системы. Примеры показаны на рис. 1. Можно видеть, что значение параметра  $a$  сильно влияет на свойства T-зубца, особенно на его протяженность, а также на соотношения между фазами роста и спада.



**Рис. 1.** Реконструкция ЭКГ по (1) при разных значениях жесткости:  
слева при  $\alpha = 1$ , справа — при  $\alpha = 1.2$ . Сверху — сигнал ЭКГ, снизу  
его реконструкция в 3-мерном фазовом пространстве

Выяснение наиболее чувствительных к внешнему воздействию параметров кардиосигнала важно как с точки зрения планирования эксперимента, так и для понимания природы и общих свойств, характеризующих устойчивость сердечно-сосудистой системы человека, и ее способностей к адаптации. Стационарные состояния определяются из решения системы уравнений  $x_2 = 0, x_3 = 0, f(x_1, x_2, x_3)$ .

Система (1) имеет несколько положений равновесия и два из них, совпадающие с нулями функции  $f$  лежат на траектории системы,  $x_2 = x_3 = 0, \{x_1 \approx -0,03, x_1 \approx -0,28\}$ . При переводе этого решения из фазового пространства в пространство координат амплитуда—время, регистрируемого в реальных кардиограммах, оказалось, что найденные стационарные точки системы (1) находятся на краях Р и Т зубцов.

Обнаружено, что стационарные точки, находящиеся в начале Р и конце Т интервала, относятся к типу «фокус», а точки в начале Q- и Т-интервалов — к типу «седло». Известно, что присутствие стационарных состояний «седло»-фокусного типа определяет характер хаотической динамики нелинейной системы. Обсуждение и анализ приведены в работе [9—10]. Из полученного результата можно предположить, что для нормально функционирующей автоколебательной системы сердечного типа именно вариации характеристик Р и Т-интервалов (а не R-R вариабельность) могут служить диагностическим признаком для обнаружения изменений состояний сердечно-сосудистой системы в результате внешних возмущений. Этот же вывод подтверждается тем, что фазовый портрет R-R интервалов автоколебательного кардиоцикла представляет собой тип «центр», частота которого не зависит от характеристик внешней силы, а зависит только от изменения собственных внутренних управляющих параметров. Возможно, именно динами-

кой особой точки «седло»-узельного типа, находящейся на границе P- и Q-интервалов, определяются Q-зависимые инфаркты. Однако этот вопрос требует дальнейшего изучения и численного моделирования значительного массива кардиограмм соответствующих больных. На настоящий момент неизвестно, насколько данные позиции и типы стационарных состояний сохраняются для разных типов кардиограмм.

**Заключение.** Проведенный анализ показал, что используемые в литературе основные базовые нелинейные модели ЭКГ строятся по принципу итерационной замены наблюдаемого сигнала неким набором математических функций. Такой подход хорош для компьютеризации обработки экспериментальных данных, но не проливает свет на выявление сути исследуемых процессов, а также оказывается ограниченным в рамках описания только одного-двух из реально наблюдаемых эффектов. Для описания следующего эффекта требуется привлечение следующей подгоночной модели и т.д. Применение предложенных в [5—8] моделей к реальным данным показало, что для максимально полного описания наблюдаемых явлений при изучении влияния факторов внешней среды на сердечную деятельность, необходимо дальнейшее значительное «загрубление» исходных динамических уравнений, а также построение модели, исходящее не из математических, а физических принципов описания явления.

Проведенное авторами исследование системы (1) на устойчивость выявило, что малые возмущения динамической системы в фазовом пространстве имеют собственные моды с наибольшими показателями роста в окрестностях особых точек, две из которых находятся в интервале T и P-зубцов. Таким образом, качественное поведение системы и ее вариабельность при внешнем космо- и геофизическом воздействии определяется эволюционными свойствами этих интервалов и соотношением характерных времен релаксации системы.

Авторы выражают глубокую признательность д. ф.-м. н. В.Н. Обридко за консультации и поддержку.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Чибисов С.М. Вишневецкий В.В., Рагульская М.В. Телекоммуникационное мониторинговое исследование, как метод изучения влияния гелиогеомагнитных флуктуаций на функцию сердца // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. — 2008. — Т. 145. — № 6. — С. 714—718.
- [2] Babloyantz A., Destexhe A. Is the normal heart a periodic oscillator // Biol. Cybern. — 1988. — Т. 58. — P. 203—211.
- [3] Wessel N., Kurths J., Ditto W., Bauernschmitt R.. Introduction: Cardiovascular physics // Chaos. — 2007. — 17. — 015101.
- [4] Wessel N., Malberg H., Bauernschmitt R., Kurths J. Nonlinear methods of cardiovascular physics and their clinical applicability // J. of Bifurcation and Chaos. — 2007. — 17. — P. 3325—3371.
- [5] Duggento A., Luchinsky, D.G., Smelyanskiy V.N., Khovanov I., McClintock P. Inferential framework for nonstationary dynamics. II. Application to a model of physiological signaling // Phys. Rev. E. — 2008. — 77. — 6.

- [6] *Clifford G.D., McSharry P.E.* A realistic coupled nonlinear artificial ECG, BP and respiratory signal generator for assessing noise performance of biomedical signal processing algorithm // In *Fluctuations and Noise in Biological, Biophysical, and Biomedical Systems II*, D. Abbott et al. Editors, Spie-Int Society Optical Engineering: Bellingham. — 2004. — P. 290—301.
- [7] *Файнзильберг Л.С.* Информационные технологии обработки сигналов сложной формы. Теория и практика // Киев: Нуакова Думка, 2008.
- [8] *Janson N., Pavlov A.N., Anischenko V.S.* One method for restoring inhomogeneous attractors // *J. of Bifurcation and Chaos*. — 1998. — 8. — P. 825—833.
- [9] *Пипин В.В., Рагульская М.В.* Управляющая роль шумов в обеспечении устойчивости функционирования сердечно-сосудистой системы человека // *Системы поддержки принятия решений*. — Киев, июнь 2008. — С. 201—205.
- [10] *Obriadko V.N., Ragulskaia M.V., Pipin V.V., Vishnevskiy V.V.* The dynamical properties of the human ECG in the light of tele-communicational helio-medical monitoring («Heliomed») // *Luxemburg*, 2009. — 1—4 April.

## **DYNAMIC MODELS AND RECONSTRUCTION OF AN ELECTROCARDIOGRAM AT GEOPHYSICAL FLUCTUATIONS**

**V.V. Pipin**

Institute of physics of the ground  
Siberian Branch of the Russian Academy of Science  
*at. Lermontov, 126a, Irkutsk, Russia, 664033*

**M.V. Ragulskaya**

Institute of terrestrial magnetism and distribution of radiowaves  
Russian Academy of Science  
*Moscow*

**S.M. Chibisov**

Department of the general pathology and pathophysiology  
Medical faculty  
Peoples' Friendship University of Russia  
*Miklukho-Maklaya str., 8, Moscow, Russia, 117198*

Clause is devoted to consideration of theoretical models of adaptable modes of generation and stability of heart, as nonlinear dynamic dot source. Consideration is limited by research of time dynamics of an electrocardiogram. The comparative description of corresponding mathematical dynamic models available on today is lead. Necessity of creation of as much as possible general model which are based physical laws of processes of the response of heart on external influence is revealed.

**Key words:** the electrocardiogram, heart, monitoring, dynamic system, adaptation.