

## УПРАВЛЯЮЩАЯ РОЛЬ ШУМОВ В ОБЕСПЕЧЕНИИ УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА

М.В. Рагульская\*, В.В. Пипин\*\*

\*Институт земного магнетизм и распространения радиоволн им. Пушкова РАН,

\*\*Институт солнечно-земной физики, Иркутск

e-mail: mary@izmiran.ru

### Введение

В докладе автора «Роль самоорганизации и хаотичности в эволюционной адаптации живых систем» на конференции «СППР-2007» [1] обсуждались процессы возникновения и развития сложных систем, от Галактик и социума до уровня клеток. Эти процессы подчиняются одним и тем же сценариям самоорганизации из шумовых флуктуаций и описывается сходными математическими уравнениями. В процессе поэтапного развития на каждом этапе в системе возможна реализация лишь несколько состояний, проявляющихся в виде аттракторов траекторий движения в фазовом пространстве, переход между которыми возможен через точки бифуркации. **Существование всех уровней биосферы, как сложной системы, есть непрерывный переход между возможными состояниями или неустойчивое балансирование вблизи границы такого перехода.** Напомню, что доклад заканчивался абзацем: «По-видимому, чередование детерминированности и хаотичности является неременным условием реализации управления сложных систем с элементами самоорганизации. Т. е. при решении задач управления типа «1 функция или набор близких функций – 1 система управления» выгоднее организация запаздывающего внешнего управления полностью детерминированной системой на основе обратной связи (по отклонению и т.п.). В задаче же создания многофункциональных универсальных систем управления природа изначально вводит в сложную систему элемент хаотичности и управление «передается на места»; при этом управление каждый раз «чуть-чуть ошибается», но эта хаотическая ошибка способствует генерации новой информации и перестройке внутри системы, и позволяет сложной системе самой гибко подстраиваться под изменяющиеся внешние условия».

За прошедший год авторов доклада заинтересовал вопрос, как эти общие закономерности проявляются в конкретном функционировании сердечно-сосудистой системы человека? Для решения задачи было проведено аналитическое моделирование динамической устойчивости основных характеристик ЭКГ при слабом внешнем воздействии, соответствующем привычному для организма воздействию таких не экстремальных факторов естественной внешней среды, как текущие вариации магнитного поля Земли и космической погоды.

**Динамическая модель изменений основных характеристик кардиосигнала при воздействии космо- и геофизических полей.** 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. Для целей данной работы, использование теории динамических систем представляется одним из наиболее привлекательных инструментов исследования (Павлов и др. 1997). Динамическая система определяется набором некоторых физических величин (вектором состояния) и оператором, описывающим эволюцию начального состояния во времени. Можно выделить несколько направлений исследования:

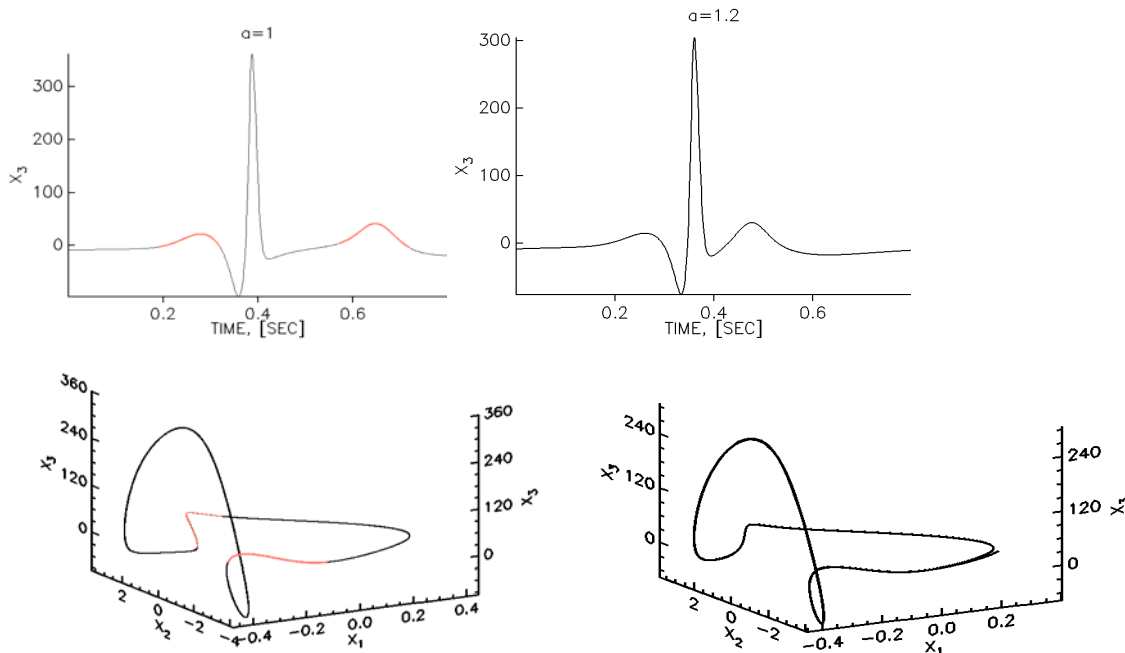
1. Исследование устойчивости морфологических и топологических характеристик кардио-сигнала.
2. Исследование адаптационных возможностей динамической системы.
3. Анализ статистических свойств динамической системы.

Каждое из названных направлений требует использования специфических инструментов. Первая задача может быть, по-видимому, удовлетворительно рассмотрена при помощи динамической дифференциальных уравнений, полученной, методом реконструкции по данным измерений ЭКГ. Рассмотрим, например, динамическую систему, полученную в цитированной выше работе [4].

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= x_2, \dot{x}_2 = ax_3, \dot{x}_3 = f(x_1, x_2, x_3) + \xi(t) \\
 f &= -b - 180x_3 - 1.313556x_3^2 - 0.00196x_3^3 \\
 &+ 2140x_2 - 8.3x_3x_2 + 230x_2^2(1 - x_2) \\
 &- 17700x_1 - 1240x_1x_3 - 4.4x_1x_3^2 - 3850x_1x_2 \\
 &+ 90x_1x_2x_3 - 70x_1x_2^2 - 46525x_1^2 \\
 &- 2250x_1^2x_3 - 20000x_1^2x_2 + 33618x_1^3,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где переменная  $x_3$  моделирует сигнал ЭКГ,  $x_2 = \int_0^t x_3 dt$ ,  $x_1 = \int_0^t x_2 dt$ ,  $\xi(t)$ , введена искусственно для исследования возможной реакции системы на шум. 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. При внешней нагрузке может происходить перестройка управляющих параметров динамической системы. Для исследования этих процессов необходим анализ реконструкций, основанных на ЭКГ полученных в разные интервалы времени: до нагрузки, во время и после. На данный момент такая работа еще не сделана. Используя модель (1) мы попробуем показать, что этот подход может иметь смысл. Например, исходя из общей теории динамических систем известно, что наиболее чувствительные к внешнему воздействию, участки траектории лежат в окрестности особых точек. Система (1) имеет несколько положений равновесия и два из них, совпадающие с нулями  $f$  лежат на траектории системы,

$x_2 = x_3 = 0, \{x_1 \approx -0.03, x_1 \approx -0.28\}$ . Это особые точки типа седло-фокус [4]. 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 **Рисунке 1**.

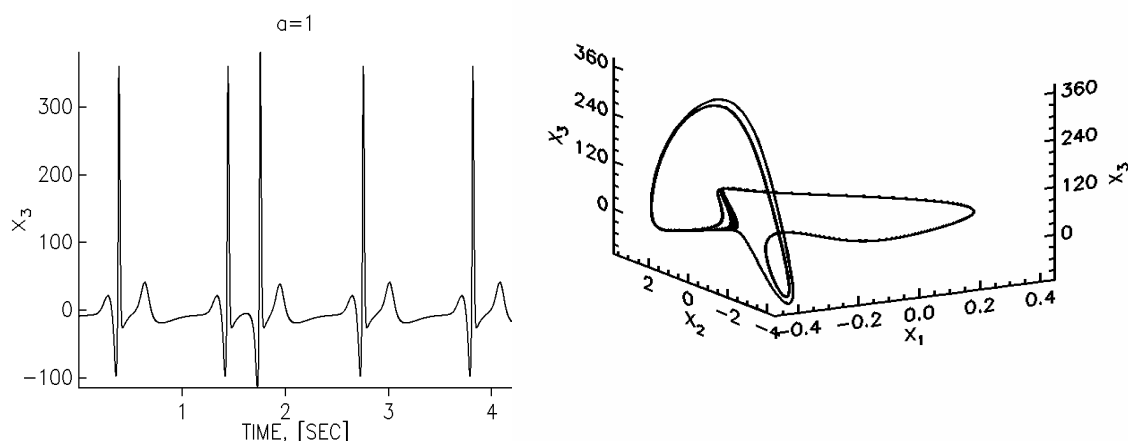


**Рисунок 1:** Реконструкция ЭКГ по (1) при разных значениях параметра  $a$ :  
слева при  $a=1$ , справа - при  $a=1.2$ .

Сверху - сигнал ЭКГ, снизу его реконструкция в 3-мерном фазовом пространстве.

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. Исследование устойчивости модели выявило, что малые возмущения динамической системы имеют собственные моды с наибольшими показателями роста в окрестностях особых точек динамической системы, две из которых находятся в интервале T и Q – зубцов. Таким образом, качественное поведение системы и ее варибельность при внешнем воздействии может сильно зависеть от эволюционных свойств T и Q интервалов. Полученный вывод хорошо согласуется с результатами разноширотного гелиомедицинского кардиомониторинга «Гелиомед» [2], проведенного в 2006-2008 гг. одновременно в гг. Москва, Якутск, Киев, Симферополь, и объясняет, почему вариации космо- и геофизических факторов малой амплитуды мало влияют на основной ритм сердца здоровых людей (так называемую варибельность R-R интервалов). Кроме того оказывается, что динамическая система с  $a > 1$  является более устойчивой к шумовому

воздействию. Шум задавался как случайный гауссовый процесс малой амплитуды ( $< 5\%$  от уровня сигнала) с некоторым характерным временем корреляции 0.1-2 сек. Оказалось, что при полном занулении внешнего и внутреннего шума реконструированная динамическая система априори оказывается неустойчивой. При  $a=1$  в системе появляются внеплановые выбросы (сокращения) в районе Т-зубца. Пример такого выброса показан на **Рисунке 2**. В то время, как динамическая система с  $a=1.2$  демонстрирует устойчивость в исследованных параметрах шумового возмущения. Насколько эти свойства присущи различным динамическим системам, отвечающим разным ЭКГ, еще предстоит выяснить.

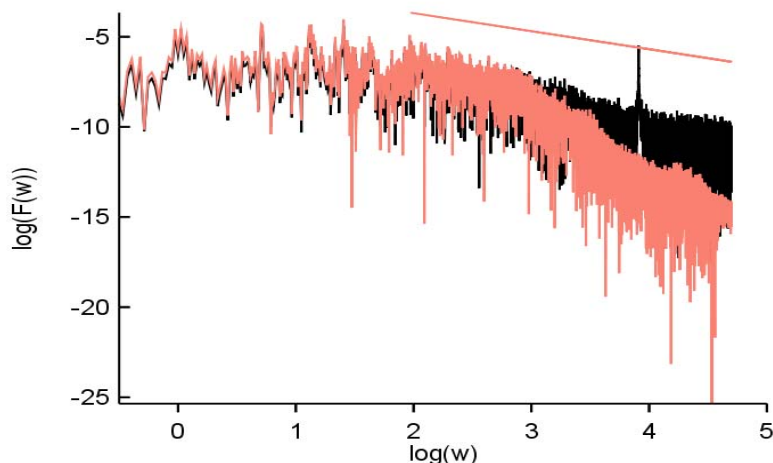


**Рисунок 2:** Реакция на малый шум при истощении адаптационных возможностей: усложнение предельного цикла (внеочередное сокращение).

Выявлено, что добавление шумовой компоненты (до 10%) к строго периодическому автоколебательному процессу сердечных сокращений также ведет к повышению устойчивости системы и определяет возможный амплитудно-частотный диапазон подстройки биосистемы под внешние воздействия [3]. Общий вид шума, обнаруживаемый нами и другими исследователями в реальных кардиограммах, не является абсолютно случайным процессом (так называемым «белым шумом»), а имеет функцию распределения  $1/f$  (где  $f$  – частота сигнала). Примеры реального и сглаженного частотного шумового распределения ЭКГ приведены на **Рисунке 3**. В литературе такой шум проходит под названиями «розовый шум» или фликкер – шум. С повышением частоты его спектральная плотность уменьшается на 3 дБ на каждую октаву (плотность обратно пропорциональна частоте). Т.е. фликкер- шум имеет плоский спектр частоты в логарифмическом пространстве. Кроме сердечной ритмики, «розовый шум» обнаруживается, например в графиках электрической активности мозга, распределении магнитных бурь и электромагнитном излучении космических тел.

**Выводы.** Проведенное аналитическое исследование системы дифференциальных уравнений, описывающих деятельность сердца как точечного источника, показали, что наблюдаемые экспериментально на разных географических широтах особенности

подстройки сердечно-сосудистой системы к слабым естественным внешним воздействиям не являются случайными, а проистекают из общих свойств исследуемой динамической системы. Через локальную неустойчивость и возможность внутреннего переструктурирования обеспечивается общая устойчивость системы к кратковременным внешним воздействиям большой амплитуды, которые в случае жесткой системы привели бы к ее слому.



**Рисунок 3:** Типичные спектры ЭКГ. Черным цветом — реальный сигнал, красным цветом показан спектр сглаженного сигнала используемого для реконструкции. Сверху линией отображена контур спектра фликкер-шума.

#### Литература

1. М.В. Рагульская // Роль самоорганизации и хаотичности в эволюционной адаптации живых систем. Системы поддержки и принятия решений, Киев июнь 2007, С. 40-43.
2. В.В. Вишневский, М.В. Рагульская, С.Н. Самсонов // Телекоммуникационные технологии в выявлении закономерностей функционирования живых систем. Технологии живых систем, 2007, №4, С. 61-66.
3. V.V. Pipin, M.V. Ragulskaia/ Heliophysical impact on variations of basic ECG properties in light of nonlinear dynamical model - Workshop on the International Heliophysical Year 2007 and Basic Space Science "First Results of IHY 2007", June 2008, Sozopol, Bulgaria.
4. А.Н. Павлов, Н.Б. Янсон, В.С. Анищенко // Применение статистических методов при решении задачи глобальной реконструкции, Письма в ЖТФ, 1997, 23, С. 7-13.