

УДК 612.17:577.3+616

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И РЕКОНСТРУКЦИЙ ЭКГ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОСМО- И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Пипин В.В.*, Рагульская М.В.***, Чибисов С.М.***

* *Институт физики земли СО РАН, Иркутск, Россия*

** *Институт земного магнетизма и распространения радиоволн РАН, Москва, Россия*

*** *Кафедра общей патологии и патофизиологии РУДН, Москва, Россия*

Статья посвящена рассмотрению теоретических моделей адапционных режимов генерации и устойчивости сердца, как нелинейного динамического точечного источника. Рассмотрение ограничено исследованием временной динамики ЭКГ. Проведено сравнительное описание имеющихся на сегодняшний день соответствующих математических динамических моделей. Выявлена необходимость создания максимально общей модели, базирующейся на физических закономерностях процессов отклика сердца на внешнее воздействие. Выявлено, 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 определяется эволюционными свойствами этих интервалов.

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

Введение

В статье [7] авторами обсуждалась технология построения и первичные результаты крупномасштабного телекоммуникационного гелиомедицинского мониторинга «Гелиомед», являющегося совместным междисциплинарным проектом Российской Академии наук и Национальной Академии наук Украины. Напомним, что для изучения воздействия космофизических и погодных факторов на организм человека впервые на территории СНГ создана распределенная телекоммуникационная сеть научных центров длительного мониторинга физиологических параметров организма человека и окружающей среды. Все центры (Москва, Санкт-Петербург, Киев, Симферополь, Якутск) работают на едином оборудовании и по единому протоколу исследований с он-лайн регистрацией текущих данных на едином портале сервера в г. Киеве (рис.1).

Основным результатом разноширотного гелиомедицинского мониторинга бы-

ло выявление методами статистического анализа существования во временной окрестности изолированной магнитной бури однонаправленных изменений параметров сердечной деятельности, наблюдаемые одновременно по всем городам. Адапционное изменение функционального состояния происходит в 2 этапа:

1) За день до начала магнитной бури при воздействии дополнительной физической нагрузки более, чем у 50% обследуемых, наблюдается смена режимов управления сердечной деятельностью с нормально-го на стрессовый. Этот эффект является общим для всех групп и обследуемых.

2) Следом за этим непосредственно в день магнитной бури наблюдается патологическое изменение амплитуды измеряемых параметров; тип изменений зависит от индивидуальных особенностей и компенсаторных возможностей конкретно-го человека.

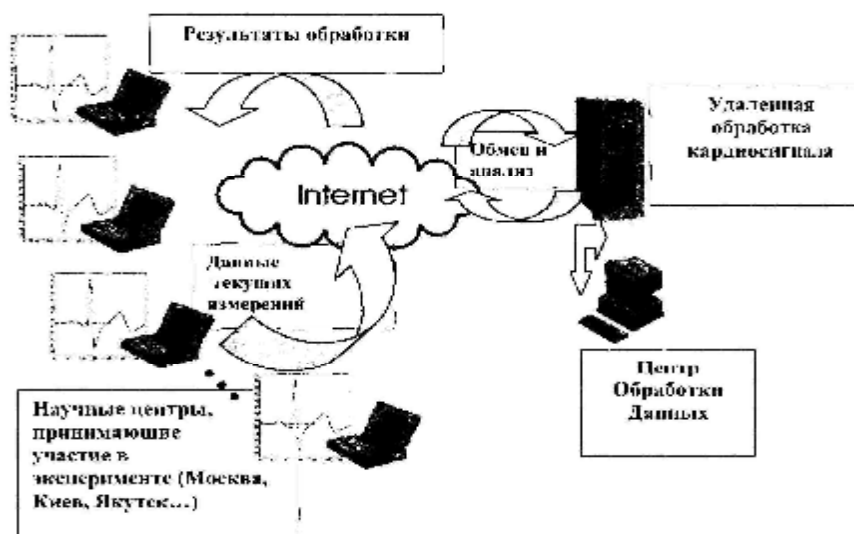


Рис.1. Схема проведения телекоммуникационного разноширотного гелиомедицинского мониторинга и экспресс-технологии обработки данных в фазовом пространстве

Одновременное использование телекоммуникационного и мониторингового методов позволило разнести в пространстве и времени изучение биотропного влияния локальных и глобальных факторов внешней среды, таких как атмосферное давление, температура, длина светового дня, уровень инсоляции (локальные факторы) и параметры комической погоды, вариации геомагнитного поля земли и космических лучей (общепланетарные факторы). Однако выявить единственный космогеофизический фактор, оказывающий преимущественное влияние на организм человека, до сих пор не удалось ни авторам статьи, ни каким-либо другим научным группам. Этот вопрос является основным дискуссионным пунктом современной физики солнечно-земных связей. И причин тут несколько. Во-первых, факторы внешней среды имеют крайне малые амплитуды вариаций. Воздействие таких полей возможно не напрямую, а опосредованно, параметрически, через сложную систему нелинейных резонансов и обратных связей. На настоящий момент предложено множество возможных механизмов биотропного воздействия естественных полей (см. [2]). К сожалению, ни один из этих механизмов не описывает всю совокупность наблюдаемых явлений и не позволяет делать достоверные прогнозы индивидуального поведения живых организмов под воз-

действием различных факторов внешней среды. Именно поэтому проект «Гелиомед» изначально был разработан для изучения не индивидуальной, а коллективной, общепопуляционной психофизиологической реакции людей при резких вариациях солнечной активности и погоды [1,4].

Второй объективной сложностью, затрудняющей поиск конкретного физического агента влияния, является высокая взаимная согласованность всех факторов земной внешней среды, проистекающая из их общей зависимости от процессов на Солнце. Амплитудно-частотные характеристики физических процессов ВСЕХ оболочек Земли, от ионосферы и атмосферы до литосферы, практически синхронно друг с другом изменяются в соответствии с изменениями текущих параметров солнечного ветра. При этом из-за наличия у Земли магнитосферы, сам солнечный ветер не доходит до поверхности планеты (за исключением области полярных касп), и следовательно, не может считаться прямым действующим агентом. В данной ситуации поиск причинно-следственных связей между солнечной активностью и резкими периодическими увеличениями вызовов скорой помощи и числа смертей, изучение этой проблемы методами статистического анализа, оказываются оправданным для выявления самого факта воздействия. Но

бессильными для выделения определенного, однозначно единственного, основного внешнего действующего фактора.

Третьей проблемой, возникающей при анализе экспериментальных медицинских данных, является нелинейность отклика самого биологического объекта и его полиреакционность. Реакция на воздействия факторов естественной внешней среды является нелинейной и неспецифической, к тому же находящейся в зависимости от внутреннего состояния изучаемого объекта и предыстории его развития. На практике это означает, что в ответ на воздействие различных факторов внешней среды организм может демонстрировать одинаковые изменения изучаемых физиологических параметров. И напротив, в эксперименте по изучению идентичного воздействия одного и того же выделенного фактора в разные моменты времени будет наблюдаться различная по амплитуде и даже знаку реакция.

Целью настоящей работы является рассмотрение теоретических моделей адапционных режимов генерации и устойчивости сердца, как нелинейного динамического точечного источника.

Методика исследования

В Москве, Санкт-Петербурге, Киеве, Симферополе, Якутске в течение 2006-2008 гг проводился одновременный гелио-медицинский 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. 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-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 так же не рассматривать процессы пространственного распространения волны возбуждения колебаний по сердечной ткани (эти вопросы подробно обсуждаются, например, в [3]). 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 [8,13], 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. Такой подход развит в [10]. В этой работе особенности спектра колебаний сердечно-сосудистой

системы моделируются, как результат взаимодействия двух стохастических осцилляторов один из которых отвечает за сердце, а другой за дыхательную систему. 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. McSharry [9]. В качестве другого примера можно привести интерполяционные модели представленные Л. С. Файнзильбергом [6]. 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 PQRSST комплекса. Эта чисто математическая процедура

удачно позволяет автоматизировать задачу сравнительного анализа кардиограмм, переводя 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 [11], было изучение условий перехода упорядоченных колебаний в хаотические и определение меры порядка и хаоса в изучаемых системах. В этой работе моделирование формы кардиосигнала проводилась 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 PQRSST комплекса кардиосигнала пришлось пренебречь хаотическими вариациями ЭКГ и рассматривать идеализированную модель для колебаний, постоянных по форме и фазе. Модель имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \mathbb{1}_t \mathbf{x}_1 = \mathbf{x}_2, \mathbb{1}_t \mathbf{x}_2 = \mathbf{x}_3, \mathbb{1}_t \mathbf{x}_3 = \mathbf{f}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3), \\ \mathbf{f}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3) = \sum_{i_1, i_2, i_3=0}^3 c_{i_1, i_2, i_3} \overset{\circ}{\mathbf{O}} \mathbf{x}_k^{i_k} \end{aligned} \quad (1)$$

где переменная \mathbf{x}_3 моделирует сигнал ЭКГ, коэффициенты c_{i_1, i_2, i_3} приведены в [11]. 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 [11] полиномиальные уравнения для анализа реальных данных нашего мониторинга и выяснили, что наряду с несомненными аналитическими достоинствами, имеются и выраженные неудобства использования модели V.S Anischenko 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 тахи-

кардии 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.

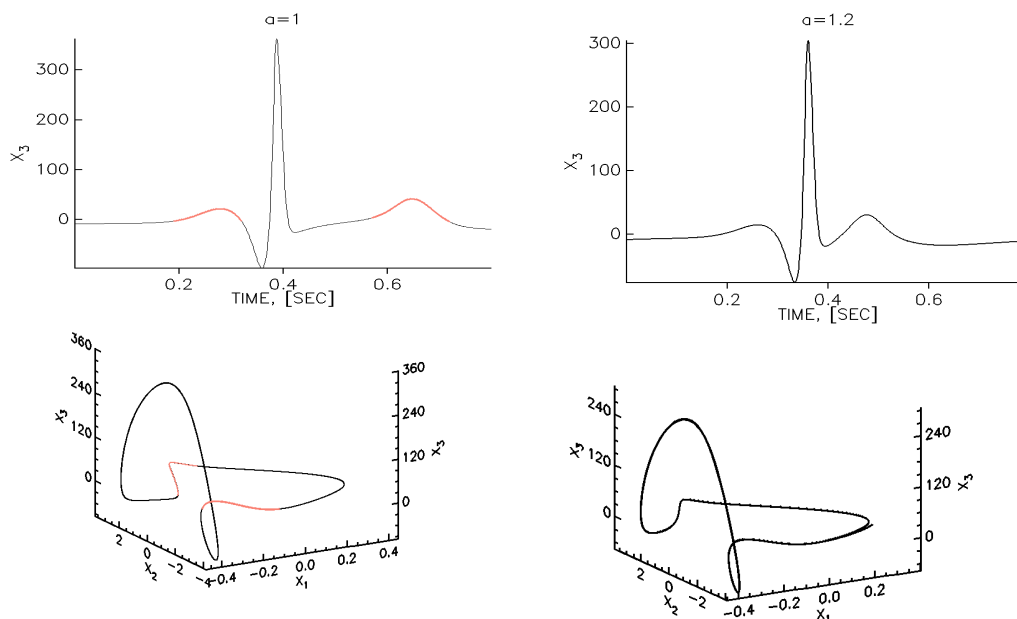


Рис. 2. Реконструкция ЭКГ по (1) при разных значениях жесткости: слева при $a=1$, справа - при $a=1.2$. Сверху - сигнал ЭКГ, снизу его реконструкция в 3-мерном фазовом пространстве

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 2**. 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.

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 $\mathbf{x}_2 = \mathbf{0}, \mathbf{x}_3 = \mathbf{0}, \mathbf{f}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3) = \mathbf{0}$. 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 най-

денные стационарные точки системы (1) (нок 3).
находятся на краях P и T зубцов (см Рису-

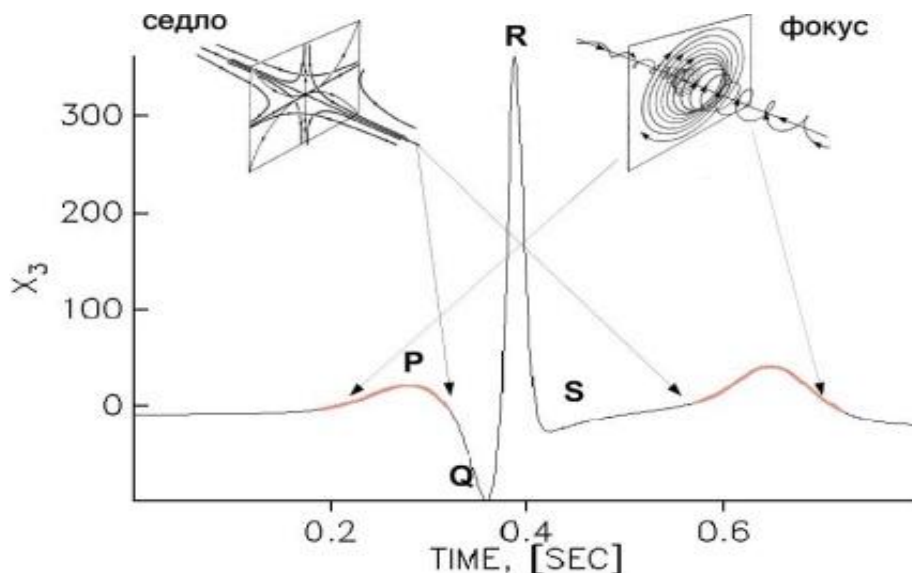


Рис.3. Траектории динамической системы в окрестности особых точек стационарных состояний седло-фокусного типа.

Обнаружено, что стационарные точки, находящиеся в начале P и конце T интервала относятся к типу «фокус», а точки в начале Q – и T- интервалов - к типу «седло». Известно, что присутствие стационарных состояний седло-фокусного типа определяет характер хаотической динамики нелинейной системы. Обсуждение и анализ приведены в работе [5,12]. Из полученного результата можно предположить, что для нормально функционирующей автоколебательной системы сердечного типа именно вариации характеристик P и T 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 кардицикла представляет собой тип «центр», частота которого не зависит от характеристик внешней силы, а зависит только от изменения собственных внутренних управляющих параметров. Характерные типы траекторий динамической системы в окрестности особых точек показаны также на Рисунке 3. Возможно, именно динамикой особой точки седло-узельного типа, нахо-

дящейся 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 [6,9-11] 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, исходя 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.

Работа поддержана Грантом РФФИ 09-02-90471-Укр_ф_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Вишневский В.В., Рагульская М. В., Самсонов С.Н. Телекоммуникационные технологии в выявлении закономерностей функционирования живых систем // Технологии живых систем- №4-2007- С. 61-66.
2. Владимирский Б. М., Темуриянц Н. А. Влияние солнечной активности на биосферу –гелиосферу» // Москва, Издательство МНЭПУ.- 2000 – С.375.
3. Лоскутов А. Ю. , Михайлов А. С. Основы теории сложных систем // Москва, 2007. - 612 С.
4. Обридко В. Н., Рагульская М. В. , Стрелков Д. Г. , Чибисов С. М., Подладчикова Т. Н. Оценка функциональных резервов сердечно-сосудистой системы человека при воздействии различных внешних факторов // Технологии живых систем- № 2-3.- 2008. - С.38-46.
5. 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.
6. Файнзильберг Л. С. Информационные технологии обработки сигналов сложной формы. Теория и практика // Киев, Нуакова Думка, 2008.- 333 С.
7. Чибисов С.М. Вишневский В.В., Рагульская М.В. Телекоммуникационное мониторингирование, как метод изучения влияния гелиогеомагнитных флуктуаций на функцию сердца // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины - Т. 145 - 6. -2008.- С. 714 — 718.
8. Babloyantz A., Destexhe A. Is the normal heart a periodic oscillator // Biol. Cybern., 58- 1988- 203-211.
9. 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.- 2007, P. 290-301.
10. 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.
11. Janson N., Pavlov A.N., Anischenko V.S. One method for restoring inhomogeneous attractors // J. of Bifurcation and Chaos, 8, 825-833, 1998
12. Obriдко V.N., Ragulskaiia M.V., Pipin V.V., Vishnevskiy V.V. The dynamical properties of the human EGC in the light of telecommunicational helio-medical monitoring // “Helio-med” Luxemburg, 2009- 1-4 April, С. 342
13. Wessel N., Malberg H., Bauernschmitt R., Kurths J. «Nonlinear methods of cardiovascular physics and their clinical applicability» // J. of Bifurcation and Chaos, 17, 2007, С. 3325-337.

**THE ANALYSIS OF DYNAMIC MODELS AND RECONSTRUCTION OF AN
ELECTROCARDIOGRAM AT INFLUENCE COSMO- AND GEOPHYSICAL
FACTORS**

Pipin V.V.*, Ragulskaya M.V.***, Chibisov S.M.***

**Institute of physics of the ground of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science,
Irkutsk, Russia*

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

****Department of the general pathology and pathophysiology RPFU, Moscow, Russia*

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.

Keywords: the electrocardiogram, heart, monitoring, dynamic system, adaptation