



На правах рукописи

ХОРОВ Владимир Сергеевич

**ОЦЕНКА ЗАПАЗДЫВАНИЯ И СВЯЗИ МЕЖДУ
КОЛЕБАТЕЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ ПО ВРЕМЕННЫМ РЯДАМ
В ЗАДАЧАХ РАДИОФИЗИКИ И БИОФИЗИКИ**

01.04.03 – радиопизика

03.01.02 – биофизика

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук**

Саратов

2015

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского» на кафедре динамического моделирования и биомедицинской инженерии

Научные руководители:

Пономаренко Владимир Иванович, д.ф.-м.н., доцент;

Прохоров Михаил Дмитриевич, д.ф.-м.н., доцент.

Официальные оппоненты:

Кащенко Сергей Александрович, д.ф.-м.н., профессор, ФГБОУ ВПО «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова», первый проректор.

Руннова Анастасия Евгеньевна, к.ф.-м.н., ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», старший научный сотрудник.

Ведущая организация: **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный университет им. Н.Г. Лобачевского».**

Защита состоится «22» июня 2015 года в 15:30 на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.243.01 при Саратовском государственном университете им. Н.Г. Чернышевского по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Университетская, 40, III корпус, Большая Физическая Аудитория.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке СГУ и на сайте: <http://www.sgu.ru/research/dissertation-council/d-212-243-01/kandidatskaya-dissertaciya-horeva-vladimira>

Автореферат разослан «__» апреля 2015 г.

Ученый секретарь



Аникин Валерий Михайлович

Общая характеристика диссертации

Актуальность темы исследования

Системы с запаздывающей обратной связью чрезвычайно широко распространены в природе и технике. Обычно они моделируются дифференциальными уравнениями с запаздывающим аргументом. Такие модели успешно применяются во многих разделах физики, биологии, физиологии и химии. Уравнения с запаздыванием используются, например, для моделирования и описания динамики изменения состава крови¹, процессов обработки информации внутри мозга², колебательных процессов в различных радиофизических системах³, при моделировании оптических систем^{4,5,6}, в биологических моделях, описывающих динамику изменения популяций^{7,8,9}, для моделирования процессов распространения инфекционных заболеваний^{10,11}, роста онкологических образований в организме¹², в моделях экологических взаимодействий¹³, моделях химических реакций¹⁴. Это во многом объясняет высокую популярность уравнений с запаздыванием у исследователей в различных научных дисциплинах, в частности, задачи определения по временным рядам экспериментально наблюдаемых величин наличия, направленности и задержки взаимодействия между источниками сложных сигналов. Изучение нелинейных динамических моделей систем с задержкой позволило продвинуться в понимании сложной динамики многих практически важных систем и процессов. При построении модельных

¹ Mackey M. C., Glass L. Oscillations and chaos in physiological control systems, *Science*. 1977. V. 197. P. 287-289.

² Борисюк Г.Н., Борисюк Р.М., Казанович Я.Б., Иваницкий Г.Р. Модели динамики нейронной активности при обработке информации мозгом — итоги "десятилетия", *УФН*. 2002. Т. 172. М 10. С. 987-1189

³ Кузнецов С.П. Сложная динамика генераторов с запаздывающей обратной связью, *Изв. Вузов. Радиофизика*. 1982. Т. 25. С. 1410-1428.

⁴ Ikeda K. Multiple valued stationary state and its instability of the transmitted light by a ring cavity system, *Opt.Commun.* 1979. V. 30. P. 257-261.

⁵ Lang R., Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection lasers, *IEEE J. Quantum Electron.* 1980. V. 16. P. 347-355.

⁶ Bestehorn M., Grigorieva E.V., Haken H., Kaschenko S.A. Order parameters for class-B lasers with a long time delayed feedback, *Physica D*, 2000, V.145, P.110-129.

⁷ G. E. Hutchinson, *An Introduction to Population Ecology*, Yale University Press, New Haven, 1978.

⁸ Kuang Y. *Delay Differential Equations with Applications in Population Dynamics*. Boston : Academic Press, 1993. 398 p.

⁹ May R.M. Simple mathematical models with very complicated dynamics, *Nature*. 1976. V. 261. P. 459-467.

¹⁰ Bocharov G. A., Rihan F. A. Numerical modelling in biosciences using delay differential equations, *J. Comp. Appl. Math.* 2000. V. 125. P. 183-199.

¹¹ Белых Л.Н., Марчук Г.И. Качественный анализ простейшей математической модели инфекционного заболевания, *Математическое моделирование в иммунологии и медицине*. Новосибирск: Наука, 1982. С. 5-26.

¹² H.M. Byrne, The effect of time delays on dynamics of avascular tumor growth, *Math. Biosci.* 1997. V. 2 P. 83-117.

¹³ Кашенко С.А. Релаксационные колебания в системе с запаздываниями, моделирующей задачу «хищник-жертва», *Моделирование и анализ информационных систем*, 2013, Т.20, №1, С.52-98.

¹⁴ I.R. Epstein, Delay effects and differential delay equations in chemical kinetics, *Intern. Reviews in Physical Chemistry*, 1992, V. 11 P. 135-160.

уравнений систем с запаздыванием и исследовании взаимодействия колебательных систем по их временным рядам актуальной задачей является оценка времени задержки этих систем и запаздывающей связи между ними.

Разнообразие специфических ситуаций и сложность решения задачи оценки задержки взаимодействия в характерных для практики условиях нехватки данных, нестационарности временных рядов и наличия шумов привели к разработке большого числа подходов, которые были развиты в рамках теории информации и нелинейной динамики. Для успешного решения конкретных задач анализа связей по экспериментальным рядам требуется знание границ применимости и специфики того или иного подхода.

Задержка зачастую присутствует в фундаментальных физических взаимодействиях, лежащих в основе процессов жизнедеятельности. Согласно современным представлениям, состояние и степень активности подсистем регуляции деятельности сердечно-сосудистой системы являются чувствительным индикатором, отражающим степень развития различных патологий как в сердечно-сосудистой системе, так и в организме в целом¹⁵. Вместе с тем, до последнего времени предложенные количественные меры оценки степени активности этих подсистем основывались на простейших методах статистического и спектрального анализа, не учитывая особенностей взаимодействия этих подсистем¹⁶. Это можно объяснить сложностью сигналов исследуемых систем, анализ которых требует разработки специализированных методов, основанных на современных методах нелинейной динамики и динамического моделирования.

Целью диссертационной работы является разработка и модернизация методов оценки времени задержки, а также исследование пределов применимости методов определения взаимодействия сложных колебательных систем по временным рядам и приложение этих подходов к анализу физических и физиологических данных. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- сопоставление на эталонных примерах различных методов, опирающихся на разные подходы к выявлению взаимодействия между колебательными системами;
- исследование на эталонных радиофизических моделях пределов применимости и демонстрация на реальных генераторах работоспособности метода определения слабого взаимодействия между

¹⁵ Флейшман А.Н. Медленные колебания гемодинамики. Теория, практическое применение в клинической медицине и профилактике. -Новосибирск: НАУКА РАН, 1999. -264 с.

¹⁶ Баевский Р.М. и др. Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем, Вестник аритмологии. 2001. №24. С.1-23.

системами, использующего прогностическую модель фазовой динамики связанных осцилляторов, по коротким зашумленным временным рядам¹⁷;

- разработка и модернизация подходов определения задержки в автоколебательных системах;
- приложение метода выявления связи по временным рядам, базирующегося на построении прогностической модели фазовой динамики, к анализу сигналов, отражающих динамику процессов регуляции сердечно-сосудистой системы человека.

Научная новизна

1. На эталонных радиофизических примерах проиллюстрированы количественные характеристики оценки времени задержки в связи, полученные с помощью различных методов выявления взаимодействия между колебательными системами (по анализу следования событий во временных рядах, анализу в пространстве состояний и построении прогностической модели фазовой динамики).

2. При однонаправленном воздействии с запаздыванием показана зависимость между коэффициентом связи и точностью определения задержки в связи между колебательными системами, которую необходимо учитывать для обеспечения работоспособности подхода, основанного на построении прогностической модели фазовой динамики.

3. Для определения времени задержки по хаотическим временным рядам систем с запаздывающей обратной связью предложен оригинальный метод, основанный на методе поиска ближайших соседей.

4. Впервые произведена оценка направленности и задержки во взаимодействии процессов вегетативной регуляции в сердечно-сосудистой системе человека, имеющих собственную частоту около 0.1 Гц.

Достоверность полученных результатов обуславливается воспроизводимостью численных расчётов, их совпадением с теоретическими, а также соответствием результатов экспериментальных исследований и численного анализа.

¹⁷ D. Smirnov, B. Bezruchko Estimation of interaction strength and direction from short and noisy time series, Phys. Rev. E, 2003, V.68, 046209.

Практическая значимость

1. Критический обзор и результаты сопоставления методов оценки связи имеют методическое значение и могут быть использованы в исследовательской практике и спецкурсах для студентов.
2. Проведенные исследования могут быть использованы для восстановления параметров полупроводникового лазера с оптической обратной связью по временным рядам колебаний интенсивности лазерного излучения.
3. Полученные значения оценок задержки во взаимодействии процессов вегетативной регуляции с частотой 0.1 Гц в сердечно-сосудистой системе человека могут быть использованы для задач медицинской диагностики.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Точная оценка времени задержки в связи между колебательными системами может быть получена даже при больших значениях коэффициента связи с помощью метода, основанного на моделировании фазовой динамики. Увеличение длины ряда и присутствие умеренного динамического шума способствует более точному определению времени задержки в связи между осцилляторами.
2. Время задержки в воздействии системы медленной регуляции сердечного ритма на систему медленной регуляции кровенаполнения микроциркуляторного русла у пациентов, перенёсших инфаркт миокарда, больше, чем у здоровых людей, и уменьшается по мере восстановления функционального состояния сердечно-сосудистой системы.
3. Предложенный метод оценки времени запаздывания, основанный на поиске ближайших соседей векторов состояния временного ряда, позволяет восстановить времена запаздывания в автоколебательных системах различного порядка с задержкой при существенно более высоких уровнях шума, чем другие методы.

Личный вклад соискателя.

Основные результаты диссертации получены лично автором. Планирование и постановка экспериментов осуществлялись совместно с научными руководителями и другими соавторами. В совместных работах автором выполнялись компьютерные расчеты, включая обработку экспериментальных данных. Постановка задач, разработка методов их решения, выбор объектов исследования, объяснение и интерпретация результатов осуществлялись совместно с руководителями и другими соавторами.

Апробация результатов.

Основные результаты диссертации были представлены автором на:

- научных семинарах кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии факультета нано- и биомедицинских технологий СГУ;
- международных школах «Хаотические автоколебания и образование структур» (ХАОС-2007, ХАОС-2013), Саратов, 2007; 2013;
- всероссийских конференциях молодых ученых Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика, г. Саратов, 2007-2014;
- VII международной научно-технической конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии - ФРЭМЭ 2006», г. Владимир, 2006;
- научных школах-конференциях «Нелинейные дни в Саратове для молодых», Саратов, 2006-2011;
- всероссийских научных школах-конференциях «Волновые явления в неоднородных средах», Звенигород, 2008, 2009;
- международной школе-семинаре «StatInfo-2009», Саратов, 2009.
- всероссийских научных школах-семинарах «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине», 2007- 2013
- всероссийской научной конференции «Нелинейные колебания механических систем», Н. Новгород, 2008;
- научной конференции в рамках всероссийского конкурса инновационных проектов «Живые системы», г. Киров, 2006;
- Международной научной конференции «Nonlinear Dynamics of Deterministic and Stochastic Systems: Unraveling Complexity», г. Саратов, 2014 г.;
- студенческих научных конференциях факультета нано- и биомедицинских технологий СГУ, Саратов, 2007-2011.

Соискатель является победителем Молодёжного Научно-Инновационного Конкурса 2013 (УМНИК-2013).

По результатам, изложенным в диссертационной работе, опубликовано 32 печатных работы, включая 5 статей в реферируемых журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 112 страниц. Список литературы содержит 91 наименование.

Основное содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность выбранной темы, характеризуется степень ее разработанности, определяются цели и задачи диссертационного исследования, осуществляется выбор предмета и объекта исследования, раскрывается научная новизна, определяются

методологические основания исследования, теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов, формулируются положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации рассматриваются особенности оценки направления взаимодействия при сильной связи между системами. С помощью метода моделирования фазовой динамики исследована задача выявления по временным рядам значимого взаимодействия двух колебательных систем, а также преимущественного направления и времени задержки в связи для случая сильной связи систем. Рассмотрены модельные системы связанных осцилляторов с различными видами функций связи.

Были рассчитаны значения зависимостей ошибки определения времени задержки в связи от длины ряда и уровня шума при большом значении коэффициента связи. На примерах однонаправленно связанных фазовых осцилляторов

$$\begin{aligned}\frac{d\varphi_1}{dt} &= f_1 + \xi_1 \\ \frac{d\varphi_2}{dt} &= f_2 + k\sin(\varphi_{1,\Delta}) + \xi_2\end{aligned}\tag{1}$$

и однонаправленно связанных осцилляторов Ван-дер-Поля

$$\begin{aligned}\frac{d^2x_1}{dt^2} - (\lambda - x_1^2) + f_1x_1 + \xi_1 &= 0 \\ \frac{d^2x_2}{dt^2} - (\lambda - x_2^2) + f_2x_2 + k\left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_{1,\Delta}}{dt}\right) + \xi_2 &= 0,\end{aligned}\tag{2}$$

где φ_1 и φ_2 — фазы осцилляторов, $f_{1,2}$ — частоты осцилляторов, k — коэффициент связи между осцилляторами, Δ — задержка в связи между системами, $\xi_{1,2}$ — белые шумы с нулевым средним, λ — коэффициент нелинейности, установлено, что области, в которых ошибка определения времени задержки Δ мала, расположены в правой верхней части рис. 1, то есть, при высоких значениях уровня шума и длины ряда. Увеличение длины ряда (величины L) позволяет более точно определить время запаздывания в связи систем. Кроме того, более точно определить задержку в связи позволяет умеренное увеличение уровня шума (величины среднеквадратичного отклонения шума $\sigma(\xi)$).

На практике, когда анализируются экспериментальные сигналы в случае сильной связи между системами, велика вероятность получения неточной оценки времени задержки в связи и её ошибочного толкования. Однако точная оценка времени задержки в связи между системами может быть получена и при больших значениях коэффициента связи, если

принимать во внимание зависимости оценки времени задержки от свойств временного ряда. В рассмотренных примерах параметры исследуемых связанных осцилляторов были идентичны за исключением собственных частот. Показано, что негативное влияние на точность оценки величины Δ оказывает увеличение расстройки частот осцилляторов при слабом уровне шума в случае малой длины ряда.

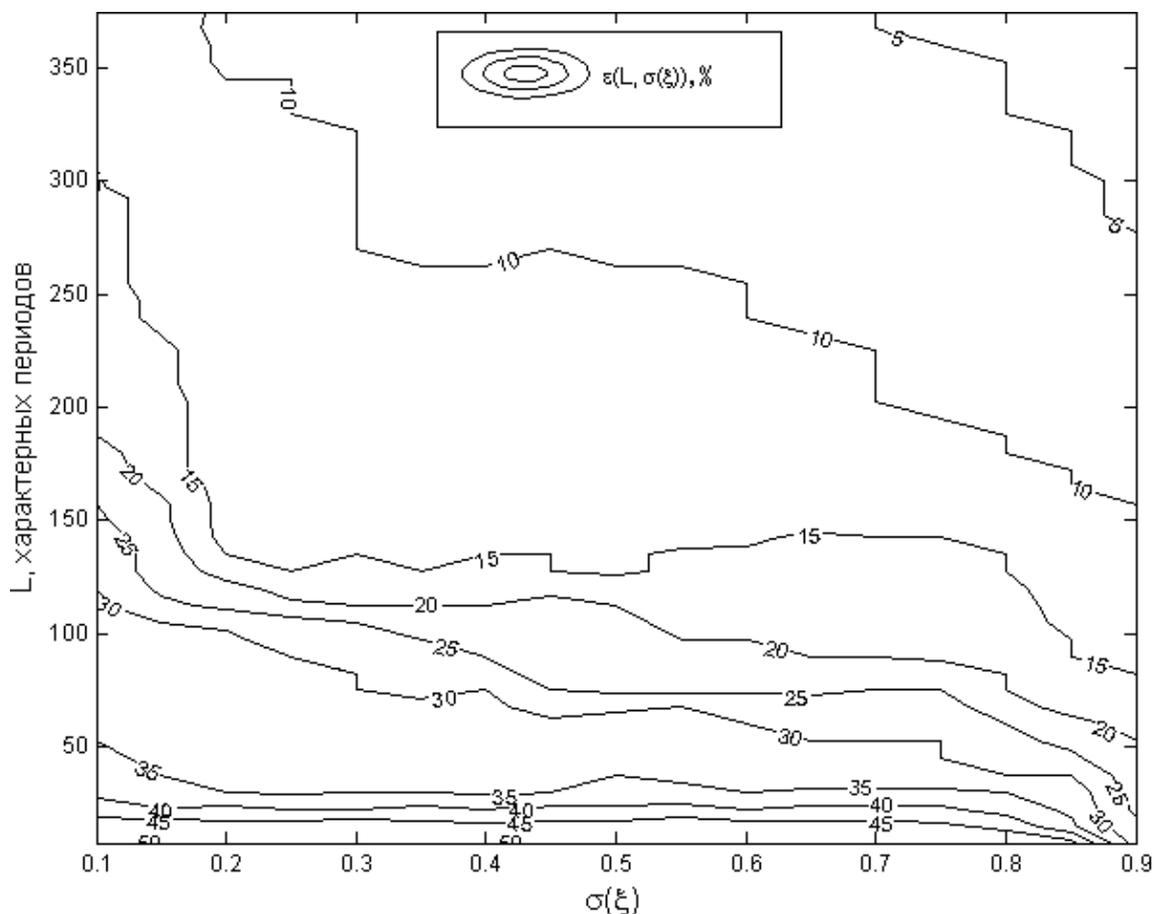


Рис. 1. Оценки ошибки (в %) определения времени задержки в связи между осцилляторами системы (2) в зависимости от длины ряда и уровня шума.

Во **второй главе** экспериментально оценена направленность и задержка взаимодействия процессов вегетативной регуляции в сердечно-сосудистой системе человека, представляющие собой медленные (с частотой около 0.1 Гц) колебания, выявляемые в вариабельности сердечного ритма (ВСР) и кровенаполнении микроциркуляторного русла (МЦР).

В исследование было включено 125 пациентов с острым инфарктом миокарда (ИМ), находившихся на лечении в клинике Саратовского НИИ кардиологии, и 33 здоровых человека без признаков сердечной патологии. Для всех обследуемых была проведена оценка времени запаздывания в связи между 0.1 Гц-колебаниями в ВСР и кровенаполнении МЦР.

На рис. 2 приведены распределения времени задержки между медленными колебаниями в ВСР и МЦР, полученные по ансамблю здоровых людей и пациентов после ИМ с помощью расчёта индекса

фазовой синхронизации для пробного времени запаздывания. Из рисунка видно, что средние значения времен задержки для пациентов и разброс их оценок близки для периодов наблюдения от 3 недель до 1 года. При этом средние значения времени запаздывания имеют величину около 2 с, что несколько больше, чем у здоровых людей. Направление воздействия «сердце → МЦР» является преимущественным.

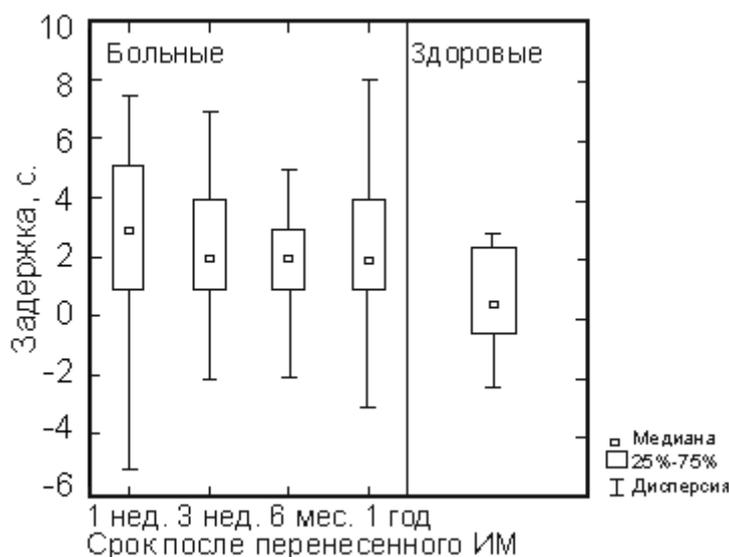


Рис. 2. Распределения времени задержки между медленными колебаниями в ВСП и МЦР для здоровых людей и пациентов на разных сроках после инфаркта миокарда.

Для оценки направленности и задержки взаимодействия 0.1 Гц-колебаний в ВСП и МЦР был также применен метод, основанный на моделировании фазовой динамики. С его помощью установлено, что в течение первой недели после острого ИМ разброс средних значений оценок сил связи в воздействии колебаний кровенаполнения МЦР на ВСП (связь «МЦР → сердце») достаточно большой, а оценки воздействия со стороны 0.1 Гц-колебаний в ВСП на 0.1 Гц-колебания кровенаполнения МЦР (связь «сердце → МЦР») оказываются незначимыми. В последующие периоды наблюдения (через 3 недели, 6 месяцев и 1 год) за пациентами, перенёсшими острый ИМ, разброс оценок уменьшается, а оценки сил связи становятся значимыми. Через 6 месяцев время запаздывания между 0.1 Гц-колебаниями в направлении «сердце → МЦР» составило 2.5–4.5 с, а к концу первого года наблюдения оно уменьшилось до 1.5–2.5 с.

Показано, что при развитии острого ИМ отмечается значительное разрушение вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы, выраженность которой индивидуальна, что согласуется с данными других работ. При этом в результате развития ИМ нарушается преимущественно связь регуляторных систем по направлению «сердце → МЦР». Восстановление функционального статуса направления связи «сердце → МЦР» происходит постепенно, достигая к концу первого года

после острого ИМ величины задержки 1.5–2.5 с, которая, тем не менее, превышает аналогичное время задержки для здоровых лиц (~1 с).

Время запаздывание в связи «МЦР → сердце» восстанавливается до значений, сопоставимых с таковыми у здоровых лиц (1.5–2.5 с) в течение первых трех недель после развития острого ИМ.

В **третьей главе** предложен оригинальный метод определения времени задержки по временным рядам систем с запаздывающей обратной связью, основанный на методе ближайших соседей.

Поясним идею метода на примере одного из наиболее широко используемых дифференциальных уравнений первого порядка с одним временем запаздывания:

$$\varepsilon \dot{x}(t) = -x(t) + f(x(t - \tau)), \quad (3)$$

где ε — параметр инерционности, τ — время запаздывания, f — нелинейная функция.

Поскольку при анализе временных рядов мы всегда имеем дело с переменными, измеренными в дискретные моменты времени, удобно перейти от дифференциального уравнения (3) к разностному уравнению

$$\varepsilon \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t} = -x(t) + f(x(t - \tau)), \quad (4)$$

где Δt — малое время, равное интервалу выборки. Уравнение (4) можно переписать в виде

$$x(t + \Delta t) = a_1 x(t) + a_2 f(x(t - \tau)), \quad (5)$$

где $a_1 = 1 - \Delta t / \varepsilon$, $a_2 = \Delta t / \varepsilon$. Запишем уравнение (5) в виде дискретного отображения:

$$x_{n+1} = a_1 x_n + a_2 f(x_{n-d}), \quad (6)$$

где $n = t / \Delta t$ — дискретное время, а $d = \tau / \Delta t$ — дискретное время задержки.

Пусть у нас имеется временной ряд $\{x_n\}_{n=1}^N$ системы (3) длиной N точек. Введем вектор $\vec{X}_i = (x_i, x_{i-d})$ и найдем для него ближайшего соседа — вектор $\vec{X}_j = (x_j, x_{j-d})$, где $j \neq i$. Существует несколько критериев выбора ближайшего соседа для заданного вектора, отличающихся выбором метрики. Наиболее часто используемой является Евклидова метрика

$$L(\vec{X}_i, \vec{X}_j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (x_{i-d} - x_{j-d})^2}, \quad (7)$$

Ближайшим соседом для вектора \vec{X}_i будет такой вектор \vec{X}_j , для которого расстояние $L(\vec{X}_i, \vec{X}_j)$ минимально. В общем случае, по временному ряду находят не одного, а k ближайших соседей для заданного вектора.

Идея предлагаемого метода состоит в том, что ближайшим соседним векторам, содержащим динамическую переменную в моменты времени n и $n-d$, где $n \in [d+1, N-1]$, будут соответствовать близкие состояния системы в моменты времени $n+1$, так как эволюция системы (3) определяется ее текущим состоянием и состоянием в задержанный момент времени. Поскольку время запаздывания нам неизвестно, будем перебирать пробные задержки m из некоторого интервала и для k ближайших соседних векторов каждого вектора $\vec{X}_n = (x_n, x_{n-m})$ временного ряда оценивать дисперсию σ_n^2 соответствующих им состояний системы в моменты времени $n+1$.

При ошибочном выборе величины m ($m \neq d$) дисперсия этих состояний может оказаться большой, так как состояния системы в моменты времени $n+1$ не будут зависеть от ее состояний в моменты времени $n-m$. Истинному времени запаздывания d будет соответствовать положение минимума величины

$$D(m) = \frac{1}{N-m-2} \sum_{n=m+1}^{N-1} \sigma_n^2. \quad (8)$$

В отличие от большинства других методов предложенный подход можно применять для восстановления времени запаздывания не только систем вида (3), но и систем более общего вида, с нелинейной функцией F , зависящей от обеих переменных $x(t)$ и $x(t-\tau)$:

$$\dot{x}(t) = F(x(t), x(t-\tau)), \quad (9)$$

Проиллюстрируем применение метода на временных рядах уравнения Маккея-Гласса:

$$\dot{x}(t) = -bx(t) + \frac{ax(t-\tau)}{1+x^c(t-\tau)}, \quad (10)$$

которое приводится к виду (3) с $\varepsilon = 1/b$ делением на b . Параметры системы (10): $a = 0.2$, $b = 0.1$, $c = 10$, $\tau = 300$ соответствовали движению на хаотическом аттракторе, шаг выборки точек $\Delta t = 1$, длина ряда $N = 10000$.

На рис. 3,а приведены зависимости дисперсии D от пробного времени запаздывания m при различном количестве k ближайших соседей для вектора $\vec{X}_n = (x_n, x_{n-m})$. Величина m перебирается из интервала от 1 до 500 с шагом 1. Все зависимости $D(m)$ демонстрируют ярко выраженный абсолютный минимум при $m = 300$, обеспечивая точное восстановление дискретного времени запаздывания $d = \tau/\Delta t = 300$.

При слишком частой выборке точек возможна ситуация, когда ближайшими соседями вектора $\vec{X}_i = (x_i, x_{i-d})$ окажутся близкие ему по времени вектора $\vec{X}_j = (x_j, x_{j-d})$ с $j = i \pm p$, где $p = 1, 2, \dots, P$, которые мешают оценке времени запаздывания.

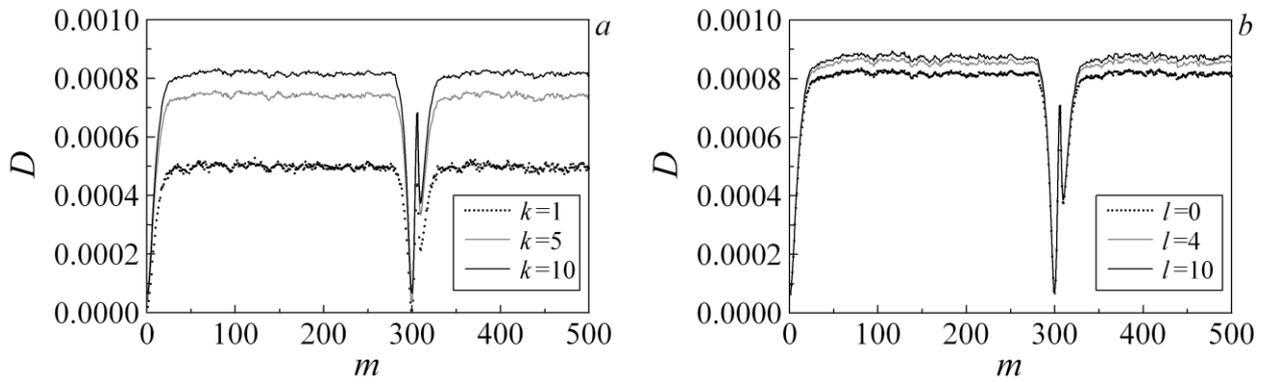


Рис. 3. Зависимости дисперсии D от пробного времени запаздывания m при различном количестве k ближайших соседей (а) и при различном количестве l исключаемых из рассмотрения близких по времени векторов (б) для системы Маккея-Гласса в хаотическом режиме.

В таких случаях при поиске ближайших соседей вектора $\vec{X}_i = (x_i, x_{i-d})$ следует исключить из рассмотрения близкие ему по времени вектора $\vec{X}_j = (x_j, x_{j-d})$ в количестве $l = 2P$.

На рис. 3,б построены зависимости $D(m)$ при различном количестве близких по времени векторов l , не учитываемых при поиске ближайших соседей, для случая $k=10$. Как и на рис. 3,а все графики имеют абсолютный минимум при $m = d = 300$.

Предложенный метод применим к системам высокого порядка с задержкой, системам с несколькими временами запаздывания, связанным системам с задержкой и позволяет определить порядок модельного уравнения системы. Параметры метода могут быть выбраны в широких пределах, а сам метод остается эффективным при высоких уровнях как динамического, так и измерительного шума. Метод применим к системам с задержкой, совершающим хаотические колебания, а также системам с задержкой в периодических режимах, находящимся под действием динамического шума.

В четвертой главе для полупроводникового лазера с оптической обратной связью предложен метод, позволяющий по модельным и экспериментальным временным рядам колебаний интенсивности излучения оценить время запаздывания и различить режимы слабого и сильного хаоса, установление которых зависит от уровня обратной связи.

Эффективность метода продемонстрирована сначала в численном примере на временных рядах уравнений Лэнга-Кобаяши, моделирующих динамику одномодового полупроводникового лазера с оптической обратной связью, успешно использованных для определения уровня обратной связи по форме и амплитуде сигнала¹⁸:

¹⁸ Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Кашавцев Е.О., Калинин М.Ю. Определение амплитуды нановибраций с помощью полупроводникового лазерного автодина с учетом внешней оптической обратной связи, Нано- и микросистемная техника. 2012. № 9. С. 43-49.

$$\begin{aligned} \frac{dE(t)}{dt} &= (1 + i\alpha)F(t)E(t) + \eta E(t - \tau_0) \exp(-i\Omega \tau_0), \\ T \frac{dF(t)}{dt} &= P - F(t) - (1 + 2F(t))|E(t)|^2, \end{aligned} \quad (11)$$

где E — медленно меняющаяся (за период оптических колебаний) комплексная амплитуда электрического поля, F — концентрация неравновесных носителей, время t измеряется в единицах времени жизни фотона в резонаторе τ_p , $T = \tau_s / \tau_p$ — отношение времени жизни носителей τ_s ко времени жизни фотонов, P — параметр накачки (превышение порога генерации), τ_0 — время запаздывания в цепи обратной связи, η — коэффициент обратной связи, α — фактор неизохронности, Ω — частота излучения лазера без обратной связи.

График $D(m)$ на рис. 4а, построенный с помощью описанного в третьей главе метода, демонстрируют отчетливый минимум при $m=2$ нс., обеспечивая точное восстановление дискретного времени запаздывания по временным рядам интенсивности излучения $I = |E|^2$ даже в присутствии аддитивного белого шума с нулевым средним и среднеквадратичным отклонением 0.05.

Для различения режимов сильного и слабого хаоса в лазере был предложен следующий метод: ближайшим соседним точкам x_{i+1} и x_{i+j+1} поставим в соответствие вектора $\vec{X}_i = (x_i, x_{i-d})$ и $\vec{X}_{i+j} = (x_{i+j}, x_{i+j-d})$ исходного временного ряда и будем рассчитывать характеристику, зависящую от дисперсий точек, соответствующих «незадержанной» компоненте x_{i+j} и «задержанной» компоненте x_{i+j-d} . Поскольку величины динамических переменных x_{i+j+1} зависят от величин «незадержанных» x_{i+j} и «задержанных» x_{i+j-d} переменных, можно сделать вывод о том, что чем больше отношение дисперсии «незадержанных» переменных к дисперсии «задержанных» переменных, тем больше уровень обратной связи. Для k ближайших соседей для каждой точки x_{i+1} временного ряда найдем дисперсии $g_1 = \text{var}_{j=0}^k(x_{i+j-d})$ и $g_2 = \text{var}_{j=0}^k(x_{i+j})$. Усреднив полученные значения, найдем средние дисперсии «задержанной» (R_1) и «незадержанной» (R_2) компонент по всему ряду:

$$D_j = \frac{1}{N-d-1} \sum_{i=d}^N r_{j,i} \quad (j=1,2) \quad (12)$$

Различить режим сильного и слабого хаоса можно по величине $\kappa = D_2 / D_1$. Чем больше величина коэффициента обратной связи η , тем больше значение, принимаемое κ . По временным рядам системы (11), построенным при различных η , при наличии аддитивного белого шума с

нулевым средним и среднеквадратичным отклонением 0.05 получены следующие оценки D_1 , D_2 и κ :

η	0.005	0.010	0.015
D_1	$4.271 \cdot 10^{-6}$	$3.423 \cdot 10^{-5}$	$1.276 \cdot 10^{-4}$
D_2	$6.333 \cdot 10^{-7}$	$8.687 \cdot 10^{-6}$	$5.340 \cdot 10^{-5}$
κ	0.148	0.251	0.418

По экспериментальным временным рядам интенсивности излучения полупроводникового лазера с оптической обратной связью время задержки тоже удалось восстановить точно, используя предложенный в работе метод (рис. 4б). $D(m)$ имеет минимум при истинном времени задержки $m=2$ нс.

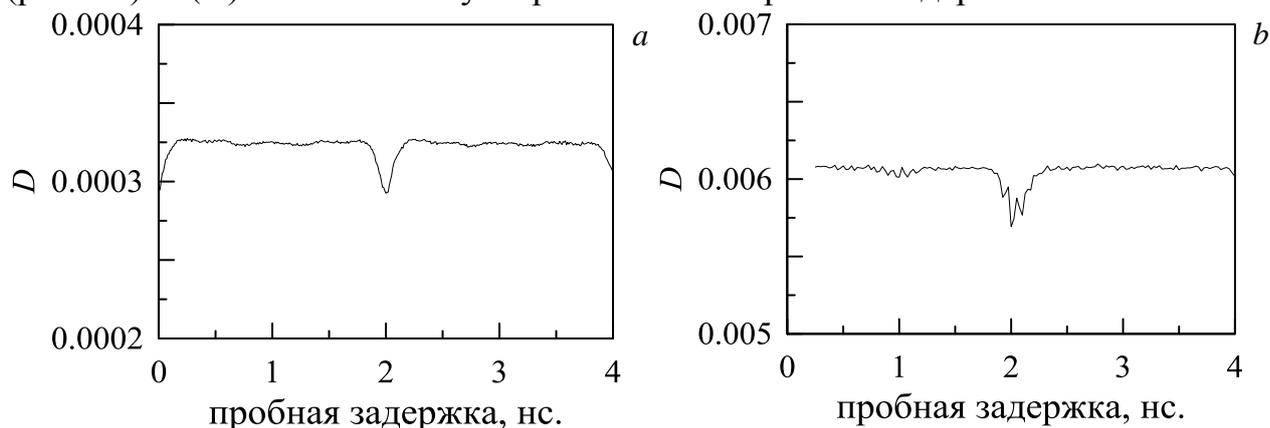


Рис. 4. Зависимости дисперсии D от пробного времени запаздывания m , рассчитанные по временному ряду модельной системы Лэнга-Кобаяши при $\eta=0.005$ с аддитивным шумом (а) и реального полупроводникового лазера с оптической обратной связью (б).

Для различных значений тока накачки (I_n) по экспериментальным временным рядам колебаний интенсивности излучения лазера были получены следующие значения коэффициента κ :

I_n	12мА		15мА		20мА	
	Слабая	Сильная	Слабая	Сильная	Слабая	Сильная
Обратная связь						
κ	0.45	0.50	0.61	0.65	0.78	0.82

При фиксированном I_n величина κ оказывается больше при сильной обратной связи, чем при слабой, то есть предложенный метод позволяет различить по временным рядам лазера режимы слабого и сильного хаоса, установление которых зависит от величины коэффициента обратной связи.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

- 1) Проведено исследование пределов применимости метода определения слабого взаимодействия между системами, использующего прогностическую модель фазовой динамики связанных осцилляторов в случае сильной связи на эталонных радиофизических моделях по коротким зашумленным рядам.

- 2) Проведена оценка времени запаздывания в связи между 0.1 Гц-колебаниями в вариабельности сердечного ритма и кровенаполнения микроциркуляторного русла у здоровых испытуемых и людей, перенесших инфаркт миокарда.
- 3) Предложен оригинальный метод определения времени задержки по временным рядам систем с запаздывающей обратной связью, основанный на методе поиска ближайших соседей.
- 4) Проведена оценка параметров полупроводникового лазера с оптической обратной связью по временным рядам колебаний интенсивности излучения с помощью метода, основанного на методе ближайших соседей.

Список публикаций автора по теме диссертации

1. *Прохоров М.Д., Пономаренко В.И., Хорев В.С.* Определение времени задержки по временным рядам на основе метода ближайших соседей. // Известия вузов Прикладная нелинейная динамика, 2014. Т. 22, №.1., С. 3-152.
2. *Хорев В.С.* Оценка направления взаимодействия между модельными системами связанных осцилляторов при сильной связи. // Известия вузов Прикладная нелинейная динамика, 2013. Т. 21, № 2 С. 52-60.
3. *Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Хорев В.С.* Восстановление времени запаздывания по временным рядам с применением метода ближайших соседей. // Письма в ЖТФ, -2013. Т.39, В.15, С.32–39.
4. *Prokhorov M.D., Ponomarenko V.I., Khorev V.S.* Recovery of delay time from time series based on the nearest neighbor method. // Phys. Lett. A., -2013, V.377, N.43, P.3106-3111.
5. *Киселев А.Р., Хорев В.С., Гриднев В.И., Прохоров М.Д., Караваев А.С., Посненкова О.М., Пономаренко В.И., Безручко Б.П., Шварц В.А.* Взаимодействие 0.1 Гц-колебаний в вариабельности ритма сердца и вариабельности кровенаполнения дистального сосудистого русла. // Физиология человека, -2012, Т.38, №.3, С.92-99.
6. *Киселев А.Р., Караваев А.С., Гриднев В.И., Посненкова О.М., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Хорев В.С., Астахов О.В., Безручко Б.П., Миронов С.А.* Динамика синхронизованности подсистем вегетативной регуляции ритма сердца и артериального давления на фоне двухчасовой иммобилизации в горизонтальном положении у здоровых лиц // Бюллетень медицинских Интернет-конференций, 2012, Т.2, №.8, С.604–607.
7. *Кульминский Д.Д., Боровкова Е.И., Хорев В.С., Миронов С.А.* Разработка устройства суточного мониторинга состояния сердечно-сосудистой системы на основе анализа синхронизации ее ритмов // Бюллетень медицинских Интернет-конференций, 2014, Т.4, №.7, С.962-967
8. *Хорев В.С., Кульминский Д.Д., Миронов С.А.* Оценка запаздывания и связи между 0,1 Гц ритмами регуляции в сердечно-сосудистой системе // Бюллетень медицинских Интернет-конференций, 2014, Т.4, №.7, С.958-962
9. *Кульминский Д.Д., Хорев В.С., Караваев А.С.* Портативное устройство для суточного мониторинга синхронизованности ритмов сердечно-сосудистой системы по записям фотоплетизмограммы // Сборник материалов IX Всероссийской конференции молодых ученых «Нанопотоника, нанoeлектроника и нелинейная физика», – Саратов, 2014, С. 85-86.
10. *Хорев В.С., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д.* Определение параметров лазера с оптической обратной связью по модельным и экспериментальным временным

- рядам. // Сборник материалов IX Всероссийской конференции молодых ученых «Нанопотоника, наноэлектроника и нелинейная физика», – Саратов, 2014, С. 197-198.
11. *Хорев В.С., Кульминский Д.Д.* Разработка специализированного датчика оценки уровня регуляции сердечно-сосудистой системы и аппаратно-программного комплекса на его основе // материалы ежегодной Всероссийской научной школы-семинара / под ред. проф. Д.А. Усанова. – Саратов, 2013, С. 209-212.
 12. *Хорев В.С., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д.* Метод оценки времён задержки и порядка модельного уравнения по временным рядам систем с запаздыванием // сборник материалов X Всероссийской научной школы-конференции «Хаотические колебания и образование структур» (ХАОС-2013), – Саратов, - 2013, С.42.
 13. *Хорев В.С.* Диагностика взаимодействия систем с задержкой при сильной запаздывающей связи между ними // сборник материалов VIII Всероссийской научной конференции для молодых ученых «Нанопотоника, наноэлектроника и нелинейная физика», – Саратов, 2013, С.249.
 14. *Хорев В.С.* Оценка времени запаздывания по хаотическим временным рядам на основе метода ближайших соседей // сборник материалов VIII Всероссийской научной конференции для молодых ученых «Нанопотоника, наноэлектроника и нелинейная физика», – Саратов, 2013, С.250-252.
 15. *Хорев В.С., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д.* Оценка времени задержки в связи между временными рядами на модели кардиореспираторной системы // Материалы VII конференции молодых ученых «Нанопотоника, наноэлектроника и нелинейная физика», – Саратов, 2012, С.167-168.
 16. *Хорев В.С., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Киселёв А.Р., Гриднев В.И.* «Оценка времени задержки в связи между низкочастотными ритмами сердечно-сосудистой системы» // Сборник материалов Ежегодной Всероссийской научной школы-семинара «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине – 2011», – Саратов, 2011, С.60-62.
 17. *Хорев В.С., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Киселёв А.Р., Гриднев В.И.* Исследование связи между ритмами сердечно-сосудистой системы в норме и при патологии // Материалы VI конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанопотоника и нелинейная физика», – Саратов, 2011, С.170-171.
 18. *Хорев В.С.* Развитие методов анализа взаимодействия низкочастотных ритмов сердечно-сосудистой системы человека // Сборник материалов научной школы-конференции «Нелинейные дни в Саратове для молодых – 2010», – Саратов, 2010, С. 120-122.
 19. *Хорев В.С., Бодров М.Б., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д.* «Синхронизации и направленность взаимодействия между дыханием и ритмами с частотой 0.1 Гц в сердечно-сосудистой системе человека» // Сборник материалов Ежегодной Всероссийской научной школы «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине – 2009», – Саратов, 2009, С.115-117.
 20. *Хорев В.С., Караваев А.С., Киселёв А.Р., Гриднев В.С.* Исследование направления связи между ритмами сердечно-сосудистой системы человека // Материалы Международной школы-семинара «StatInfo-2009», – Саратов, 2009, С.182-185.
 21. *Хорев В.С., Бодров М.Б., Сысоев И.В.* Исследование направления и синхронизации между ритмами сердечно-сосудистой системы человека // Материалы IV Конференции молодых учёных «Наноэлектроника, нанопотоника и нелинейная физика», – Саратов, 2009, С.142-143.
 22. *Хорев В.С., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д.* Оценка запаздывания и направления связи между низкочастотными колебаниями сердечного ритма и

- кровенного давления человека // Материалы XII Всероссийской школы семинара «Волновые явления в неоднородных средах», – Звенигород, -2009, С. 25-26.
23. *Хорев В.С.* Исследование взаимодействия низкочастотных ритмов сердечно-сосудистой системы в норме и при патологиях // Сборник материалов научной школы-конференции «Нелинейные дни в Саратове для молодых – 2009», – Саратов, 2009, С. 48-51.
24. *Хорев В.С., Бодров М.Б., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д.* Синхронизация и направленность взаимодействия между дыханием и ритмами с частотой 0.1 Гц в сердечно-сосудистой системе человека // Материалы XI Всероссийской школы семинара «Волновые явления в неоднородных средах», – Звенигород, 2008, С. 117-118.
25. *Хорев В.С., Диканев Т.В., Смирнов Д.А., Безручко Б.П.* Запаздывающая связь между нелинейными осцилляторами: возможности оценки времени задержки по временным рядам // Сборник трудов VIII Всероссийской научной конференции «Нелинейные колебания механических систем», т. 1., – Нижний Новгород, 2008 г. С. 339-340.
26. *Хорев В.С., Смирнов Д.А., Безручко Б.П.* Оценка времени запаздывания в однонаправленной связи по короткому временному ряду // тезисы Международной школы-конференции «ХАОС-2007», – Саратов, 2007. С. 82.
27. *Хорев В.С., Бодров М.Б., Смирнов Д.А.* Выявление запаздывающей однонаправленной связи между двумя фазовыми осцилляторами по короткому временному ряду // Материалы II конференции молодых учёных «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», – Саратов, 2007. С. 114-115.
28. *Караваяев А.С., Агапова М.Г., Сидак Е.В., Хорев В.С.* Исследование фазовой синхронизации между ритмами сердечно-сосудистой системы человека // тезисы доклада Федеральной школы-конференции по инновационному малому предпринимательству в приоритетных направлениях науки и высоких технологий, – Москва.-2006.-С.70.
29. *Безручко Б.П., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Бодров М.Б., Караваяев А.С., Хорев В.С.* Синхронизация дыхания и процесса с частотой 0,1 Гц в сердечно-сосудистой системе человека // тезисы VII международной научно-технической конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии - ФРЭМЭ 2006», – Владимир, 2006, С. 167-170.
30. *Караваяев А.С., Хорев В.С.* «Использование суррогатных данных для тестирования метода оценки уровня фазовой синхронизации» // Материалы I конференции молодых учёных «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», – Саратов, 2006,-С.62-63.
31. *Хорев В.С., Караваяев А.С.* «Использование суррогатных данных при исследовании синхронизованности систем по экспериментальным данным» // Сборник материалов научной школы-конференции «Нелинейные дни в Саратове для молодых – 2006», – Саратов, 2006. С. 212-215.
32. *Караваяев А.С., Агапова М.Г., Сидак Е.В., Хорев В.С.* «Исследование фазовой синхронизации между ритмами сердечно-сосудистой системы человека: разработка аппаратно-программного комплекса» // Сборник докладов Всероссийского конкурса инновационных проектов «Живые системы», – Киров, 2006, - С. 55-59.