

На правах рукописи

Демин Сергей Анатольевич

**СТОХАСТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ  
В КОНЕЧНО-РАЗНОСТНОМ ФОРМАЛИЗМЕ ЦВАНЦИГА-МОРИ  
С МОДЕЛЬНЫМИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯМИ  
ФУНКЦИЙ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ**

**01.04.02 – теоретическая физика**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Казань – 2019

Работа выполнена на кафедре вычислительной физики и моделирования физических процессов федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования “Казанский (Приволжский) федеральный университет”

**Научный руководитель:**

Мокшин Анатолий Васильевич – доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой вычислительной физики и моделирования физических процессов федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования “Казанский (Приволжский) федеральный университет”

**Официальные оппоненты:**

Сибатов Ренат Тимергалиевич – доктор физико-математических наук, начальник лаборатории моделирования диффузионных процессов Научно-исследовательского технологического института им. С.П. Капицы федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования “Ульяновский государственный университет”

Прудников Павел Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры теоретической физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования “Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского”

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского”

Защита состоится “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2019 года в \_\_\_\_\_ на заседании диссертационного совета Д 212.296.03 при Челябинском государственном университете по адресу: 454001, г. Челябинск, ул. Братьев Кашириных, д. 129, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Челябинского государственного университета.

Автореферат разослан “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2019 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук,  
профессор

Е.А. Беленков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Исследование сложных систем относится к актуальным проблемам статистической физики, а также тех областей человеческого знания, которые имеют междисциплинарный характер. С одной стороны, это обусловлено разнообразными практическими приложениями теоретической физики в астрономии, сейсмологии, геологии, медицине, экологии окружающей среды, биологии. С другой стороны, связано с быстрорастущими потребностями науки, техники и производства.

В широком смысле *сложная система* – это составной объект, части которого рассматриваются как компоненты, закономерно объединенные в единое целое в соответствии с определенными принципами или связанные между собой заданными отношениями. Взаимодействие компонентов приводит к возникновению качественно новых эмерджентных особенностей, отличных от свойств отдельных подсистем. В физической интерпретации выделяют следующие свойства сложной системы: большое число взаимосвязанных степеней свободы (вследствие чрезвычайно высокой размерности); присутствие обратной связи у некоторых динамических переменных; возникновение случайного, непредсказуемого поведения при внешних воздействиях, т.е. нарушение установленных функциональных взаимосвязей; существенная изменчивость фиксируемых параметров (широкая область распределения); смена плавной эволюции внезапными периодами нестационарности – участками “стохастического дрейфа”; наличие механизмов самоорганизации и самонастройки, степенных распределений и масштабных преобразований.

Возросший интерес к математическому описанию сложных систем на основе подходов теоретической физики для равновесных и неравновесных систем, нелинейной динамики и теории динамического хаоса, разнообразных дискретных и непрерывных отображений способствовал широкому распространению методов статистического анализа временных последовательностей экспериментальных показателей, генерируемых такими системами. В связи с этим закономерно стали возникать вопросы, связанные с извлечением из сигналов разной сущности информационно значимых параметров, способствующих установлению структурной организации и эволюции сложных систем. Вместе с тем по-прежнему остаются трудности, связанные с отсутствием га-

мильтониана и привычных для статистической физики функций распределения или распределений вероятностей. Кроме того, имеющиеся теоретические подходы в недостаточной степени отражают такие свойства сложных систем, как дискретность, долговременные корреляции – дальний порядок взаимосвязей фиксируемых параметров, эффекты последствия (статистической памяти), смена динамических режимов – перемежаемость, нестационарность. Ситуация осложняется отсутствием процедур локализации, позволяющих осуществлять параметризацию отдельных локальных выборок в последовательности экспериментальных данных и методов анализа неравноинтервальных временных рядов. Таким образом, поиск новых способов параметризации временных сигналов сложных систем, раскрывающих указанные свойства, представляется на данный момент весьма актуальным.

**Цель работы** состоит в развитии теоретического формализма функций памяти и техники проекционных операторов Цванцига-Мори для анализа динамики негамильтоновых систем и оценки эффектов статистической памяти. При этом методология расчетов апробировалась для разнообразных вариантов временных рядов: экви- и неэквидистантные дискретные временные сигналы, последовательности конечно-разностных производных различных порядков, локальные выборки фиксированной длины.

Для достижения указанной цели решались следующие задачи:

1. Развитие статистической теории кинетических процессов в сложных системах с учетом дискретности, долговременных корреляций, эффектов последствия, динамической перемежаемости и нестационарности.

2. Разработка теоретического подхода к параметризации и извлечению информационно значимых характеристик последовательностей экспериментальных фиксируемых показателей сложных систем. Определение динамических, спектральных, кинетических и релаксационных параметров негамильтоновых систем.

3. Разработка численных алгоритмов модельных представлений функций статистической памяти для количественного описания эволюции сложных систем.

4. Установление взаимосвязи между проявлением эффектов статистической памяти и атипичной динамикой сложных систем.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. В рамках техники проекционных операторов Цванцига-Мори для временных последовательностей квазипроизводных фиксируемых параметров сложных систем получены системы конечно-разностных уравнений с модельными представлениями функций статистической памяти.

2. Разработан теоретический подход к анализу локальных выборок фиксированной длины, перемещаемых вдоль исходной последовательности экспериментальных наблюдений, с предварительным выбором их оптимального размера.

3. Развита конечно-разностная формализация Цванцига-Мори на случай анализа неэквидистантных временных последовательностей, генерируемых сложными системами.

4. С целью извлечения информационно значимых характеристик на основе развиваемого формализма функций памяти проанализирована динамика следующих процессов:

а) проведено исследование исходных сигналов негамильтоновых живых систем, а также особенностей квазипроизводных дискретного типа;

б) реализованы процедуры построения локальных кинетических и релаксационных характеристик на примере биомедицинских сигналов и последовательностей физиологических показателей человека;

в) выполнен анализ равно- и неравноинтервальной динамики на примере полного потока рентгеновского излучения астрофизических объектов. Проведена классификация рентгеновской активности микроквазаров в зависимости от соотношения временных масштабов релаксации сигнала и существования памяти.

5. На основе количественного описания последовательностей экспериментальных наблюдений в терминах эффектов последствия и временных корреляционных функций впервые обнаружена зависимость между проявлениями статистической памяти и аномальными состояниями живых систем.

**Научная ценность и практическая значимость** состоит в разработке теоретической концепции параметризации и извлечения информационно значимых характеристик исходных временных и квазипроизводных последовательностей стохастической динамики сложных систем в рамках конечно

- разностного аналога формализма Цванцига-Мори. Выполняются численные расчеты ортогональных динамических переменных, временных корреляционных функций, экспериментальных и теоретических значений времен релаксации на разных уровнях статистического описания, кинетических и релаксационных параметров, спектральных характеристик критериев памяти непосредственно из набора равноинтервально и неравноинтервально фиксируемых экспериментальных данных. Практические приложения связаны с разработкой новых методов анализа, диагностики и прогнозирования динамических состояний сложных негамильтоновых систем. Полученные результаты позволяют судить о проявлениях статистической памяти, динамике корреляций и флуктуаций в исходных равно- и неравноинтервальных временных последовательностях, квазипроизводных разных порядков, кинетических и релаксационных особенностях локальных выборок фиксированной длины экспериментальных данных.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Формализм Цванцига-Мори в конечно-разностном представлении применим для анализа динамики негамильтоновых систем.

2. Учет нестационарности в динамике сложных систем реализуется на основе введения локальных кинетических и релаксационных параметров.

3. Цепочка конечно-разностных уравнений для событийных функций памяти воспроизводит особенности неравноинтервальной дискретной динамики негамильтоновых систем.

4. Критерии памяти и их частотные обобщения позволяют осуществлять количественную оценку эффектов коррелированности и статистической памяти, а также выявлять характерные режимы динамики сложных систем.

**Достоверность** результатов, выводов и научных положений диссертационной работы обеспечивается применением фундаментальных идей статистической физики в анализе временных последовательностей, продуцируемых сложными системами, обоснованностью и последовательностью проводимых математических преобразований и расчетов, используемых для модельных представлений функций статистической памяти, сопоставлением полученных в диссертации результатов с известными наработками.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационного исследова-

ния докладывались на следующих конференциях и семинарах: всероссийских и республиканских семинарах “Флуктуации и шумы в сложных системах” (г. Казань, КГПУ, ТГГПУ, КГТУ/КАИ им. А.Н. Туполева, 2003, 2005, 2007, в 2010 г. посвящен памяти проф. Р.М. Юльметьева); второй, третьей и четвертой всероссийских конференциях “Необратимые процессы в природе и технике” (г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003, 2005, 2007); X и XI международных научно-практических конференциях “Современные техника и технологии” (г. Томск, ТПУ, 2004, 2005); третьей международной конференции “Фундаментальные проблемы физики” (г. Казань, КФУ, 2005); всероссийском конкурсе инновационных проектов “Живые системы” (г. Киров, ВятГУ, 2005); VI, VII, X, XI международных научных конференциях “Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии” (г. Владимир, ВлГУ, 2004, 2006, 2012, 2014); V Уральской региональной научно-практической конференции “Современные проблемы физики и физико-математического образования” (г. Уфа, БГПУ, 2006); XIV, XX, XXI международных конференциях “Ломоносов” (г. Москва, МГУ, 2007, 2013, 2014); четвертой всероссийской астрономической конференции “Космические рубежи XXI века” (г. Казань, КГУ, 2007); III Евразийском конгрессе “Медицинская физика - 2010” (г. Москва, МГУ, 2010); 5 и 6 Троицких конференциях “Медицинская физика и инновации в медицине” (г. Троицк, ИСАН, 2012, 2014); всероссийской астрометрической конференции “Пулково - 2012” (г. Санкт-Петербург, ГАО РАН, 2012); I международной школы-конференции “Биомедицина, материалы и технологии XXI века” (г. Казань, КФУ, 2015); международной конференции “Пилотируемое освоение космоса” (г. Королев, МАА, 2016); международных конференциях “Физик А.СПб” (г. Санкт-Петербург, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2014, 2016, 2017); 17 и 18 международных научных конференциях “SGEM” (г. Албена-Варна, Болгария, Конгресс-центр, 2017, 2018), а также ежегодных итоговых научных конференциях и семинарах кафедр теоретической физики ТГГПУ (КГПУ), ЕГПУ (ЕГПИ), КФУ (КГУ), вычислительной физики и моделирования физических процессов, оптики и нанофотоники КФУ (КГУ).

Работа выполнена при поддержке Аналитической ведомственной целевой программы “Развитие научного потенциала высшей школы (2006-2008 годы)”, № РНП.2.1.1.741, Российского фонда фундаментальных исследований

(№№ 02-02-16146-а, 03-02-96250-р2003татарстан-а, 05-02-16639-а, 08-02-00123-а, 12-02-97000-р\_поволжье\_а, 12-02-31044-а, 13-02-00792-а, 14-02-31385-а, 15-02-01638, 16-02-00496), Российского гуманитарного научного фонда (№ 03-06-00218а), Министерства образования Российской Федерации (№ А03-2.9-804), Федерального агентства по образованию (№ А04-2.9-4).

**Вклад автора в разработку проблемы.** Настоящая диссертация представляет собой обобщение исследований автора в области анализа дискретной динамики разнообразных сложных систем, выполненных лично или в соавторстве. Положения диссертационной работы, выносимые на защиту, получены автором лично. В работах, включенных в диссертацию и выполненных совместно с соавторами, автор принимал непосредственное участие в постановке задач, разработке теоретических подходов анализа и проведении математических расчетов, создании большинства численных алгоритмов и компьютерных программ, анализе и обобщении ряда полученных результатов, их сопоставлении с известными данными.

**Публикации.** Содержание диссертационного исследования отражено в 58 печатных работах, из них: 21 статья представлена в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов диссертационных работ, 12 статей проиндексированы базой цитирования Web of Science, 15 статей размещены в базе цитирования Scopus; 10 работ представлены в прочих научных изданиях (включая 3 главы в коллективных монографиях); 27 тезисов и трудов международных и всероссийских конференций.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 148 страницах, включая 19 рисунков, 3 таблицы и список цитируемой литературы из 108 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** аргументируется актуальность проблемы, обосновывается научная и практическая значимость диссертационного исследования, формулируются цель и положения, выносимые на защиту. Здесь же приводятся сведения об апробации работы и дается краткое изложение содержания.

**Первая глава** посвящена обзору существующих подходов теоретической

физики к изучению эмерджентных свойств сложных систем. Приводятся ключевые методы статистического анализа временных зависимостей экспериментально фиксируемых параметров сложных негамильтоновых систем. Обосновывается необходимость учета дискретности, неэквидистантности, нестационарности и неустойчивости, динамической перемежаемости, самоорганизации в исследованиях корреляций и эффектов статистической памяти в динамике сложных систем. Внимание уделяется проблеме выбора частоты дискретизации. В этой же главе дается краткая историческая справка о развитии теории марковских случайных процессов и возникновении новой парадигмы немарковских процессов. Отдельный параграф посвящен обсуждению результатов, связанных с построением кинетических уравнений Цванцига-Мори в неравновесной статистической физике конденсированных сред.

Во **второй главе** в рамках конечно-разностного формализма функций памяти Цванцига-Мори (ФФП) разрабатывается теоретический подход к анализу квазипроизводных дискретного типа, вычисленных для исходных временных рядов.

Динамика экспериментально фиксируемого параметра сложной системы представляется в виде дискретной серии переменной  $x$ :

$$x = \{x_j\} = \{x(T), x(T + \tau), x(T + 2\tau), \dots, x(T + (N - 1)\tau)\}, \quad (1)$$

$$x_j = x(T + j\tau).$$

Здесь  $T$  – момент начала регистрации,  $(N - 1)\tau$  – время регистрации сигнала,  $\tau$  – шаг дискретизации. Для наглядности последовательность наблюдений  $x_j$ , зафиксированных в моменты времени  $t = T + j\tau$ , рассматривается как “координаты” *квазичастицы* с “эффективной массой”  $m^*$  (в дальнейшем частица), перемещающейся в одномерном пространстве.

Последовательности квазипроизводных дискретного типа отождествляются с набором переменных, характеризующих движение частицы: “скоростью”  $v_j$ , “ускорением”  $a_j$ , “кинетической энергией”  $e_j$ , “поток энергии”  $q_j$ . Для этого используется метод конечных разностей. Например,

$$v = \{v(T), v(T + \tau), v(T + 2\tau), \dots, v(T + (N - 2)\tau)\}, \quad (2)$$

где  $v_j = v(T + j\tau) = \frac{x_{j+1} - x_j}{\tau}$  и т.д.

Вводятся нормированные корреляционные функции  $X(t)$ ,  $V(t)$ ,  $A(t)$ ,  $E(t)$ ,

$Q(t)$ . В частности,

$$V(t) = \frac{1}{(N-m-1)\sigma_V^2} \sum_{j=0}^{N-m-2} \delta v(T+j\tau) \delta v(T+(j+m)\tau),$$

$$\sigma_V^2 = \frac{1}{(N-1)} \sum_{j=0}^{N-1} \delta v^2(T+j\tau), \dots$$
(3)

где  $1 \leq m \leq N-2$ ,  $\delta v_j$  – флуктуация величины  $v$  на  $j$  шаге,  $\sigma_V^2$  – абсолютная дисперсия последовательности  $\{v_j\}$ .

Используя проекционный формализм Цванцига-Мори получают цепочку уравнений, связывающих исходную временную корреляционную функцию (ВКФ)  $\Xi(t) = X(t), \dots, Q(t) = M_0^\Xi(t)$  динамического процесса  $\xi = x, \dots, q$  с функциями статистической памяти  $M_i^\Xi(t)$ ,  $i = 1, 2, \dots$ :

$$\frac{\Delta M_{n-1}^\Xi(t)}{\Delta t} = \lambda_n^\xi M_{n-1}^\Xi(t) - \tau \Lambda_n^\xi \sum_{j=0}^{m-1} M_n^\Xi(j\tau) M_{n-1}^\Xi(t-j\tau).$$
(4)

Здесь  $\lambda_n^\xi$  – собственные значения квазиоператора Лиувилля  $\hat{L}^\xi$ ,  $\Lambda_n^\xi$  – релаксационные параметры, имеющие размерность квадрата частоты:

$$\lambda_n^\xi = i \frac{\langle \mathbf{W}_n^\xi \hat{L}_n^\xi \mathbf{W}_n^\xi \rangle}{\langle |\mathbf{W}_n^\xi|^2 \rangle}, \quad \Lambda_n^\xi = \frac{\langle |\mathbf{W}_n^\xi|^2 \rangle}{\langle |\mathbf{W}_{n-1}^\xi|^2 \rangle}.$$
(5)

Нормированные функции памяти  $n-1$  порядка определяются в виде

$$M_{n-1}^\Xi(t) = \frac{\langle \mathbf{W}_{n-1}^\xi (1 + i\tau \hat{L}_{n-1}^\xi)^m \mathbf{W}_{n-1}^\xi \rangle}{\langle |\mathbf{W}_{n-1}^\xi|^2 \rangle}.$$
(6)

Ортогональные динамические переменные  $\mathbf{W}_n^\xi$  в уравнениях (5)-(6) получают с помощью процедуры ортогонализации Грама-Шмидта<sup>1</sup>:  $\langle \mathbf{W}_n^\xi, \mathbf{W}_m^\xi \rangle = \delta_{n,m} \langle |\mathbf{W}_n^\xi|^2 \rangle$ , где  $\delta_{n,m}$  – символ Кронекера. Переменные  $\mathbf{W}_n^\xi$  связаны с младшими  $\mathbf{W}_{n-1}^\xi$  следующими рекуррентными соотношениями:

$$\mathbf{W}_0^\xi = \mathbf{A}_k^0(0) = \{\delta\xi_0, \dots, \delta\xi_{k-1}\},$$

$$\dots$$

$$\mathbf{W}_n^\xi = (i\hat{L}^\xi - \lambda_n^\xi) \mathbf{W}_{n-1}^\xi - \Lambda_{n-1}^\xi \mathbf{W}_{n-2}^\xi - \dots,$$
(7)

где  $\mathbf{A}_k^0(0)$  –  $k$ -компонентный вектор начального состояния системы.

---

<sup>1</sup>Рид М. Методы современной математической физики. Т. 1 / М. Рид, Б. Саймон. - М.: Мир, 1997. - 357 с.

В случае нестационарного процесса выражение (4) примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta M_{n-1}^{\Xi}(t)}{\Delta t} = & \lambda_n^{\xi} M_{n-1}^{\Xi}(t) - \\ & - \tau \Lambda_n^{\xi} \sum_{j=0}^{m-1} M_n^{\Xi}(j\tau) M_{n-1}^{\Xi}(t - j\tau) \left\{ \frac{\gamma_{n-1}^{\xi}(j\tau) \gamma_{n-1}^{\xi}(t - j\tau)}{\gamma_{n-1}^{\xi}(t)} \right\}, \end{aligned} \quad (8)$$

где функции вида

$$\gamma(T, t) = \left\{ \frac{\sigma^2(T + t)}{\sigma^2(T)} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

называются функциями нестационарности.

Здесь же вводятся критерии статистической памяти, позволяющие количественным образом оценить степень коррелированности и проявление эффектов последействия в последовательностях конечно-разностных квазипроизводных исходных временных рядов.

В третьей главе проводится обобщение ФФП на случай локальных выборок экспериментальных данных сложных негамильтоновых систем. Эффекты нестационарности учитываются путем предварительного выбора оптимальной длины локального окна, для которого рассчитываемые временные корреляционные функции, функции статистической памяти, частотные релаксационные и кинетические параметры сохраняют свою инвариантность.

В исходной временной серии выбирается сегмент оптимальной длины:

$$\xi_0 = \{x(T), x(T + \tau), \dots, x(T + (n - 1)\tau)\}, \quad (10)$$

где  $(n - 1)\tau$  – время регистрации наблюдений, вошедших в выборку  $\xi_0$ . Перемещая сегмент вдоль временной последовательности каждый раз на один шаг дискретизации получаем  $R = N - n + 1$  локальных выборок.

Вводится набор нормированных ВКФ:

$$a^{(0)}(t) = \frac{\langle \delta \xi_0(0) \delta \xi_0(t) \rangle}{\langle |\delta \xi_0(0)|^2 \rangle}, \dots \quad (11)$$

В выражении (11)  $t = m\tau$  и

$$\langle \delta \xi_0(0) \delta \xi_0(t) \rangle = \frac{1}{n - m} \sum_{j=0}^{n-1-m} \delta x(T + j\tau) \delta x(T + (j + m)\tau), \dots \quad (12)$$

Используя технику проекционных операторов Цванцига-Мори, получают конечно-разностное уравнение для ВКФ  $a^{(0)}(t)$ , позволяющей описать дина-

мические свойства в последовательности наблюдений  $\xi_0$ :

$$\frac{\Delta a^{(0)}(t)}{\Delta t} = \lambda_1^{(0)} a^{(0)}(t) - \tau \Lambda_1^{(0)} \sum_{j=0}^{m-1} M_1^{(0)}(j\tau) a^{(0)}(t - j\tau). \quad (13)$$

В последнем выражении учтено, что  $0 < m \leq n - 1$ . Аналогичным образом для любой из последующих выборок  $\xi_\theta$ , где  $\theta = 1, \dots, R - 1$ , получают формально точное кинетическое уравнение для ВКФ  $a^{(\theta)}(t)$ :

$$\begin{aligned} \frac{\Delta a^{(\theta)}(t + \theta\tau)}{\Delta t} &= \lambda_1^{(\theta)} a^{(\theta)}(t + \theta\tau) - \\ &- \tau \Lambda_1^{(\theta)} \sum_{j=0}^{m-1} M_1^{(\theta)}((j + \theta)\tau) a^{(\theta)}(t + (\theta - j)\tau). \end{aligned} \quad (14)$$

Окончательно для произвольной выборки с индексом  $\theta$  приходят к цепочке уравнений, связывающих нормированные функции статистической памяти  $s - 1$  порядка:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta M_{s-1}^{(\theta)}(t + \theta\tau)}{\Delta t} &= \lambda_s^{(\theta)} M_{s-1}^{(\theta)}(t + \theta\tau) - \\ &- \tau \Lambda_s^{(\theta)} \sum_{j=0}^{m-1} M_{s-1}^{(\theta)}((j + \theta)\tau) M_s^{(\theta)}(t + (\theta - j)\tau). \end{aligned} \quad (15)$$

В дополнение к результатам предыдущей главы (см. выражение (4)) представленное обобщение приводит к временным зависимостям кинетических и релаксационных параметров, что используется для количественного описания закономерностей релаксационных процессов на отдельных участках исходных последовательностей экспериментальных наблюдений.

В **главе четвертой** анализ неравноинтервально фиксируемых наблюдений экспериментальных показателей сложных систем осуществляется в рамках ФФП, сформулированного в терминах “событий”. Неравноинтервальность во времени возникает в силу ряда причин, в условиях когда регистрация сигнала с постоянным шагом дискретизации оказывается невозможной. Это может быть связано с природой исследуемого объекта, сбоями или погрешностями измерительного оборудования. Разработка теоретических подходов, адаптированных к непосредственному анализу неравноинтервальных последовательностей экспериментальных данных, является актуальной задачей современной статистической физики.

Неравноинтервальная последовательность наблюдений представляется в

виде набора событий:

$$E = \{\xi_1, \dots, \xi_k, \dots, \xi_N\}, \quad (16)$$

где  $\xi_i$  – событие (временная вариация параметра), зафиксированное в момент времени  $t_i$ ,  $i = 1, \dots, N$  – номер события.

Используя конечно-разностное уравнение Лиувилля для вектора текущего состояния системы

$$\frac{\Delta \mathbf{A}_{m+k}^m(n)}{\Delta n} = i \hat{L}(n, \Delta n) \mathbf{A}_{m+k}^m(n), \quad (17)$$

где  $\mathbf{A}_{m+k}^m(n) = \{\delta \xi_m, \dots, \delta \xi_{m+k-1}\}$ , а также технику проекционных операторов Цванцига-Мори, приходят к уравнениям, связывающим функции памяти  $s-1$  порядка:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta M_{s-1}(n)}{\Delta n} = \lambda_s M_{s-1}(n) - \\ - \Delta n \lambda_s \sum_{j=1}^m M_{s-1}(j \Delta n) M_s((m-j+1) \Delta n). \end{aligned} \quad (18)$$

ФФП позволяет осуществить разделение “собственного движения” некоторой переменной  $\mathbf{A}_{m+k}^m(n) = \mathbf{A}(n)$  и эффектов взаимодействия с другими степенями свободы. Появление таких эффектов связано с наличием связи между  $\mathbf{A}(n)$  и так называемой “флуктуирующей силой”  $\mathbf{W}_1(n)$ , ортогональной к  $\mathbf{A}_{k+1}^1(\Delta n) = \mathbf{A}(\Delta n)$ . В свою очередь переменная  $\mathbf{W}_2(n)$  связана с  $\mathbf{W}_1(\Delta n)$  и т.д. В результате появляется возможность описания взаимодействий, реализующихся в последовательности наблюдений событий в предшествующие и текущие моменты времени. Ортогональные динамические переменные включаются в выражения для функций статистической памяти.

В **пятой главе** демонстрируются приложения разрабатываемых подходов к анализу дискретных временных рядов сложных негамильтоновых систем: динамики астрофизических объектов, последовательностей биомедицинских данных, физиологических показателей человека.

На рис. 1, 2 представлены спектральные плотности мощности ВКФ и функций памяти  $\mu_i^q(\nu)$  для временных зависимостей квазипроизводной  $\{q_j\}$ , вычисленных для сигналов МЭГ здорового испытуемого и пациента с ФЧЭ, фиксируемых 10 СКВИДом (сверхпроводящий квантовый интерференционный датчик). Экспериментальные данные, представляющие собой вызванные

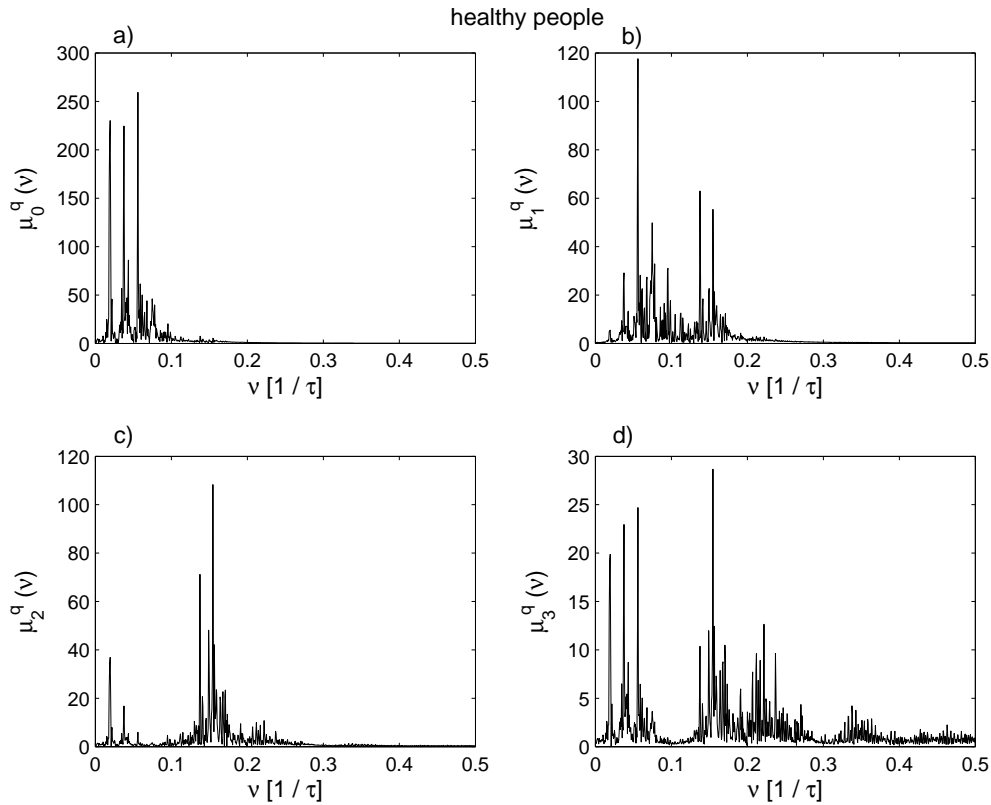


Рис. 1: Спектры мощности исходной ВКФ и функций памяти  $\mu_i^q(\nu)$ , где  $i = 0 \dots 3$ , для регистрируемого с десятого сенсора сигнала МЭГ здорового испытуемого при красно-голубом мерцающем стимуле. Частотные зависимости  $\mu_i^q(\nu)$  построены для последовательности  $\{q_j\}$ .

мерцающими световыми стимулами нейромагнитные отклики коры головного мозга девяти здоровых испытуемых и пациента с ФЧЭ, были любезно предоставлены в ходе международного сотрудничества Dr. J. Bhattacharya (Department of Psychology, Goldsmiths College, University of London)<sup>2</sup>. Сигналы МЭГ с частотой дискретизации 500 Гц фиксировались 61 сенсором, которые располагались на всей поверхности головы и были способны регистрировать слабые градиенты магнитной индукции, генерируемые отдельными участками коры головного мозга человека. В случае здорового испытуемого преобладающими являются процессы с частотами до 50 Гц, соответствующие

<sup>2</sup>Bhattacharya J. Nonlinear dynamics of evoked neuromagnetic responses signifies potential defensive mechanisms against photosensitivity / J. Bhattacharya, K. Watanabe, S. Shimojo // Int. J. Bifur. Chaos. - 2004. - V. 14. - P. 2701-2720; Watanabe K. Neuromagnetic responses to chromatic flicker: Implication for photosensitivity / K. Watanabe, T. Imada, K. Nihei, S. Shimojo // Neuroreport. - 2004. - V. 13, No 16. - P. 2161-2165.

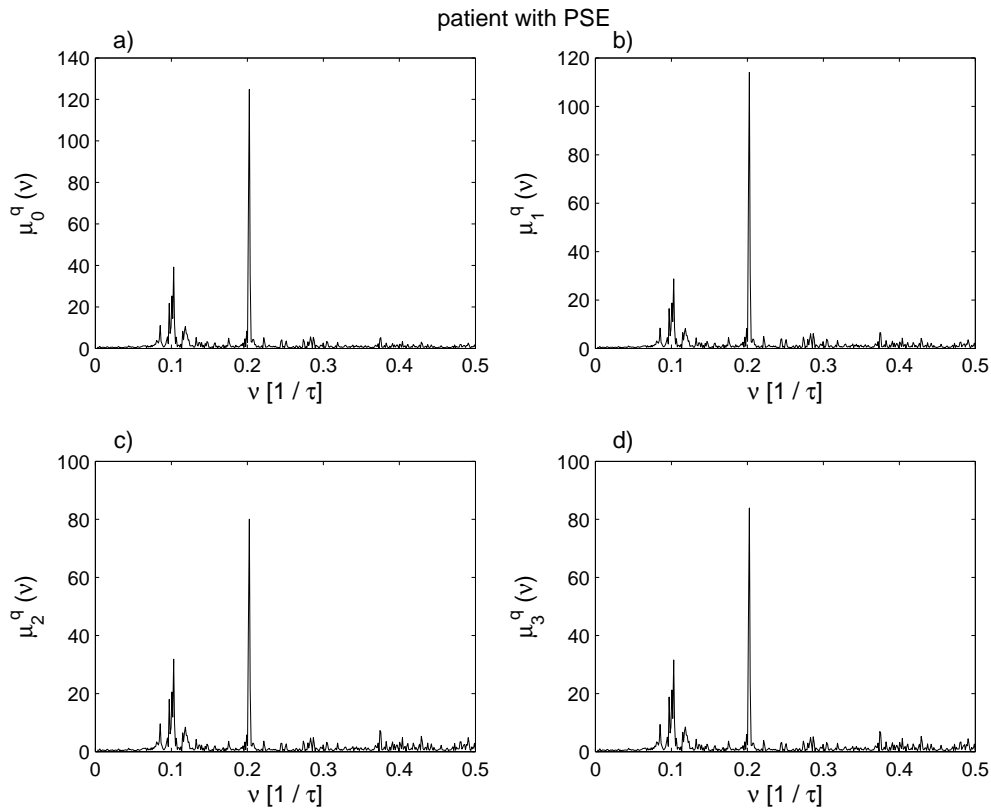


Рис. 2: Частотные зависимости исходной ВКФ и функций памяти  $\mu_i^q(\nu)$  для нейромагнитного отклика коры головного мозга пациента с ФЧЭ (сенсор №10, красно-голубой мерцающий стимул).

физиологическим ритмам (рис. 1а). Нарушение мозговых ритмов, отражающих сложные психо-физиологические процессы деятельности мозга, является ключевым фактором в диагностике различных неврологических патологий. В сигналах МЭГ пациента доминирующими становятся более высокочастотные составляющие (порядка 50 Гц и 100 Гц). В дополнение к этому показано, что коллективное возбуждение нейронов коры головного мозга пациента в случае стороннего светового воздействия при ФЧЭ приводит к критическим изменениям эффектов статистической памяти и скорости затухания релаксационных процессов для последовательностей конечно-разностных производных разного порядка.

Используя процедуру локализации, выполняется построение временных зависимостей кинетических и релаксационных параметров. С начала исходной временной последовательности выбирается локальная выборка, для которой вычисляются кинетические и релаксационные параметры. Выполняется

сдвиг локального окна на один шаг дискретизации. Производится расчет параметров. Локальное окно передвигается до конца временной серии, каждый раз вычисляются параметры.

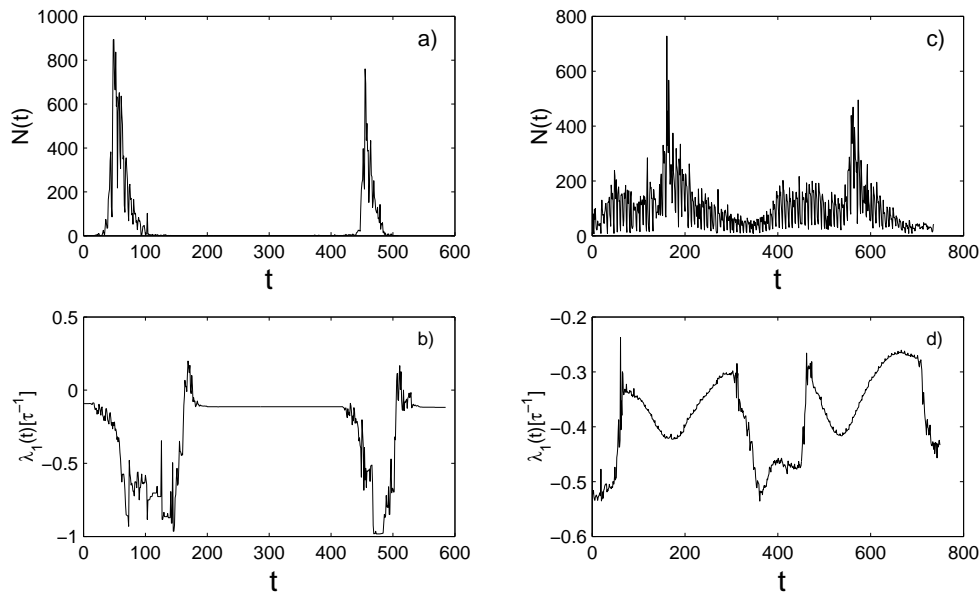


Рис. 3: Временные серии заболеваемости гриппом (a) и ОРЗ (c) и локальное поведение кинетического параметра  $\lambda_1(t)$  в сравнении. Временная зависимость параметра  $\lambda_1(t)$  отражает релаксационные особенности эпидемических процессов гриппа (b) и ОРЗ (d).

На рис. 3 представлены временная зависимость локального кинетического параметра  $\lambda_1(t)$  для динамики заболеваемости людей гриппом (рис. 3b) и ОРЗ (рис. 3d). Использовались статистические данные санитарно-эпидемиологической станции Приволжского района г. Казани<sup>3</sup>. Наиболее значительные изменения в динамике заболеваемости гриппом соответствуют возникновению эпидемических процессов средней степени интенсивности (рис. 3a). Процесс заболеваемости ОРЗ характеризуется более сложной структурой (рис. 3c). Более детальное представление об эпидемических процессах гриппа и ОРЗ можно обнаружить на основе исследования временного поведения кинетического параметра  $\lambda_1(t)$ . Пользуясь процедурой оптимизации, была вычислена длина локального временного окна, которая составила  $N=200$  точек. В случае гриппа в локальной зависимости параметра  $\lambda_1(t)$  в каждый осенне-

<sup>3</sup>Demin S.A. Non-Markov stochastic dynamics of real epidemic process of respiratory infections / R.M. Yulmetyev, N.A. Emelyanova, S.A. Demin, F.M. Gafarov, P. Hänggi, D.G. Yulmetyeva // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. - 2004. - Vol. 331. - P. 300-318.

зимний период система выходит из устойчивого состояния. Незначительные флуктуации в поведении параметра  $\lambda_1(t)$  соответствуют началу эпидемии, сам эпидемический процесс сопровождается появлением крупномасштабных флуктуаций, затем происходит переход к мелкомасштабным флуктуациям, приходящимся на окончание эпидемии. При завершении эпидемического процесса скорость релаксации возрастает от 4 до 12 раз, что указывает на постепенную стабилизацию системы. Периоды между эпидемическими вспышками характеризуются чрезвычайно медленной релаксацией. На спаде эпидемического процесса ОРЗ скорость релаксации возрастает в 2-2.5 раза. Сопоставление среднеквадратичных амплитуд параметра  $\lambda_1(t)$  для эпидемических процессов ОРЗ и гриппа составляет 3.4 раза.

В завершение данной главы проводится анализ равноинтервальной (I тип данных) и неравноинтервальной (II тип данных) динамики полного потока рентгеновской активности 19 микроквазаров, фиксируемого обзорной камерой *ASM* (All-Sky Monitor) орбитальной обсерватории *RXTE* (Rossi X-Ray Timing Explorer)<sup>4</sup>. Установлено, что вводимые ФФП-параметры позволяют выделить три класса двойных звездных систем в зависимости от сопоставления временных масштабов релаксации сигнала и существования статистической памяти.

В результате анализа временных и событийных корреляций обнаружены стратификация фазовых портретов (рис. 4), различимый характер спектров мощности корреляционных функций и частотных зависимостей критериев памяти, изменения во временных масштабах релаксационных процессов в равно- и неравноинтервальной динамике излучения ХТЕ J1550-564 в рентгеновском диапазоне энергетического спектра. На рис. 4 представлены фазовые портреты комбинаций ортогональных динамических переменных  $\mathbf{W}_i = f(\mathbf{W}_0), i = 1..3$ . Фазовые портреты, построенные для равноинтервальной динамики (рис. 4а), имеют симметричное относительно начала координат ядро. Подобная форма определяется усреднением экспериментальных данных. Обработка “сырых” данных II типа (рис. 4б) приводит к пространственно-

---

<sup>4</sup>Levine A.M. First results from the All-Sky Monitor on the *Rossi X-Ray Timing Explorer* / A.M. Levine, H. Bradt, W. Cui, J.G. Jernigan, E.H. Morgan, R. Remillard, R.E. Shirey, D.A. Smith // *Astrophys. J.* - 1996. - V. 469. - P. L33-L36.

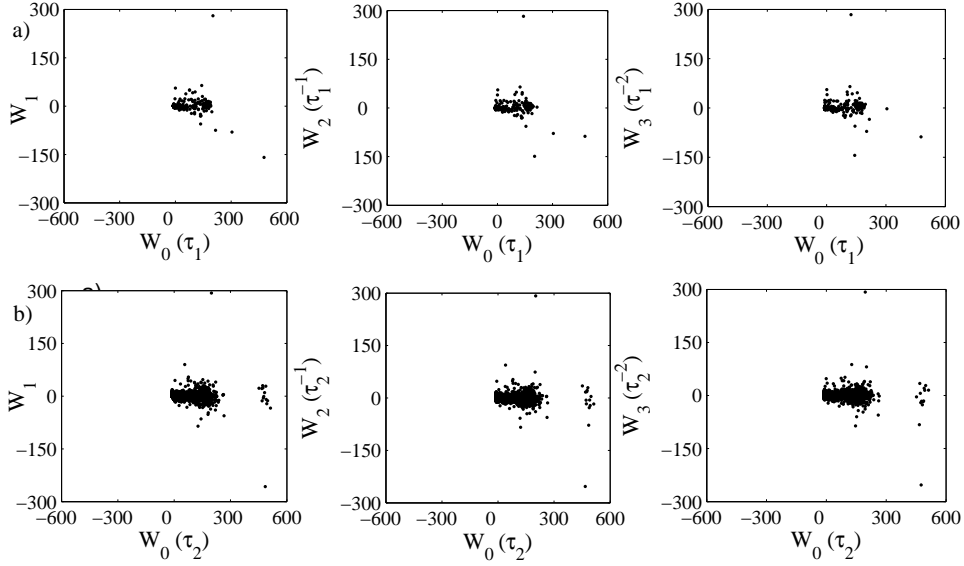


Рис. 4: Фазовые портреты динамических переменных  $\mathbf{W}_i = f(\mathbf{W}_0)$ , где  $i = 1..3$ , для динамики полного потока рентгеновского излучения микроквазара ХТЕ J1550-564. а – построение выполнено для эквидистантной временной серии, б – для событийного представления рентгеновской активности микроквазара.

временной структуре с более значительным масштабным расслоением. Небольшие по площади облака в правой части фазовых портретов связаны с изменением динамического режима – усилением интенсивности рентгеновской активности на кривых блеска.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Реализовано обобщение техники проекционных операторов и формализма функций памяти Цванцига-Мори для случая негамильтоновых систем.
2. Получены конечно-разностные уравнения для набора ортогональных динамических переменных.
3. Выполнено развитие формализма Цванцига-Мори применительно к динамике, где проявляются эффекты нестационарности.
4. Характерной особенностью динамики негамильтоновых систем является перемежаемость, которая проявляется в *последовательной* смене различных

режимов. Предложенные в работе локальные частотные релаксационные параметры позволяют идентифицировать такие режимы. Соответствующие численные оценки выполнены на примере некоторых сложных систем.

5. Показано, что обобщение формализма функций памяти Цванцига-Мори может быть применимо к анализу неравноинтервальной дискретной динамики.

6. Установлено, что критерии статистической памяти позволяют осуществлять количественную оценку коррелированности в динамике рассматриваемой системы. Получены частотные обобщения данных критериев. Установлена зависимость между проявлением эффектов статистической памяти и атипичной динамикой сложных систем.

## ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов диссертационных работ*

1. Demin S. Stratification of the phase clouds and statistical effects of the non-Markovity in chaotic time series of human gait for healthy people and Parkinson patients / R. Yulmetyev, S. Demin, N. Emelyanova, F. Gafarov, P. Hänggi // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2003. – Vol. 319. – P. 432-446.

2. Demin S.A. Non-Markov stochastic dynamics of real epidemic process of respiratory infections / R.M. Yulmetyev, N.A. Emelyanova, S.A. Demin, F.M. Gafarov, P. Hänggi, D.G. Yulmetyeva // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2004. – Vol. 331. – P. 300-318.

3. Demin S.A. Dinara's Crosses, chaoticity and robustness in stochastic dynamics of solar activity / R.M. Yulmetyev, S.A. Demin, P. Hänggi, A.I. Galeev // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2004. – Vol. 7, № 3. – P. 210-226.

4. Demin S.A. Age-related alterations of relaxation processes and non-Markov effects in stochastic dynamics of R-R intervals variability from human ECGs / R.M. Yulmetyev, S.A. Demin, O.Yu. Panishev, P. Hänggi // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2005. – Vol. 353. – P. 336-352.

5. Demin S.A. Regular and stochastic behavior in Parkinsonian pathological tremor signals / R.M. Yulmetyev, S.A. Demin, O.Yu. Panishev, P. Hänggi, S.F. Timashev, G.V. Vstovsky // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2006. – Vol. 369. – P. 655-678.

6. Demin S.A. Non-Markov Statistical Effects of X-Ray Emission Intensity of The Microquasar GRS 1915+105 / R.M. Yulmetyev, S.A. Demin, R.M. Khusnutdinov, O.Yu. Panishev, P.

Hänggi // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2006. – Vol. 9, № 4. – P. 313-330.

7. Демин С.А. Локальные особенности стохастической динамики живых систем / Р.М. Юльметьев, С.А. Демин, О.Ю. Панищев, Э.В. Хусаенова // Технологии живых систем. – 2007. – Т. 4, № 2. – С. 32-46.

8. Demin S.A. Statistical quantifiers of memory for an analysis of human brain and neuro-system diseases / S.A. Demin, R.M. Yulmetyev, O.Yu. Panischev, P. Hänggi // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2008. – Vol. 387. – P. 2100-2110.

9. Демин С.А. Нелинейная стохастическая динамика событийных корреляций в астрофизических объектах / С.А. Демин, Р.М. Юльметьев, О.Ю. Панищев, Галеев А.И., Р. Hänggi // Нелинейный мир. – 2008. – Т. 6, № 10. – С. 560-578.

10. Demin S.A. Analysis of biomedical signals by flicker-noise spectroscopy: Identification of photosensitive epilepsy using magnetoencephalograms / S.F. Timashev, Yu.S. Polyakov, R.M. Yulmetyev, S.A. Demin, O.Yu. Panischev, S. Shimojo, J. Bhattacharya // Laser Physics. – 2009. – Vol. 19, № 4. – P. 836-854.

11. Демин С.А. Псевдочастичный подход в описании дискретных стохастических процессов сложных систем / С.А. Демин, О.Ю. Панищев, А.В. Яценко, Р.М. Юльметьев // Нелинейный мир. – 2009. – Т. 7, № 11. – С. 820-834.

12. Demin S.A. Frequency and phase synchronization in neuromagnetic cortical responses to flickering-color stimuli / S.F. Timashev, Yu.S. Polyakov, R.M. Yulmetyev, S.A. Demin, O.Yu. Panischev, S. Shimojo, J. Bhattacharya // Laser Physics. – 2010. – Vol. 20, № 3. – P. 604-617.

13. Демин С.А. Анализ персистентных и антиперсистентных корреляций в биомедицинских сигналах / С.А. Демин, Б.Н. Галимзянов, О.Ю. Панищев // Успехи современной радиоэлектроники. – 2011. – Т. 5. – С. 61-71.

14. Демин С.А. Особенности динамики рентгеновского излучения астрофизических объектов: Классификация эффектов статистической памяти / С.А. Демин, О.Ю. Панищев, Ю.А. Нефедьев, Н.Ю. Вараксина // Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки. – 2012. – Т. 154, № 3. – С. 62-74.

15. Демин С.А. Анализ кросс-корреляционных взаимосвязей в сигналах интенсивности радиоизлучения квазаров / С.Ф. Тимашев, О.Ю. Панищев, С.А. Демин, Ю.А. Нефедьев // Георесурсы. – 2013. – Т. 3. – С. 44-48.

16. Demin S.A. Dynamic and spectral X-ray features of the microquasar XTE J1550-564 / S.A. Demin, O.Y. Panischev, Y.A. Nefedyev // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. – 2014. – Vol. 30, № 2. – P. 63-69.

17. Demin S.A. Correlation features of microquasar X-ray activity / S.A. Demin, O.Y. Panischev, Y.A. Nefedyev // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2014. – Vol. 17, № 2. – P. 177-182.

18. Demin S.A. Auto- and cross-correlation analysis of the QSOs radio wave intensity / S.A. Demin, O.Y. Panischev, Y.A. Nefedyev // Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Vol. 661. – P. 012003.

19. Demin S.A. Non-stationarity and cross-correlation effects in the MHD solar activity / S.A. Demin, Y.A. Nefedyev, A.O. Andreev, N.Y. Demina, S.F. Timashev // Advances in Space Research. – 2018. – Vol. 61, № 2. – P. 639-644.

20. Demin S.A. The study of full flow statistical features of the X-rays Cygnus X-1 binary system / S.A. Demin, N.Y. Demina, A.O. Andreev, Y.A. Nefedyev // SGEM. – 2018. – Vol. 18, № 6.1. – P. 607-614.

21. Demin S.A. Development of new methods of auto- and cross-correlation analysis of quasi-star objects' X-rays intensity / N.Y. Demina, S.A. Demin, A.O. Andreev, Y.A. Nefedyev // SGEM. – 2018. – Vol. 18, № 6.1. – P. 561-568.

### *Статьи в прочих научных изданиях*

22. Демин С.А. Дальнейшее развитие теоретических идей академика К.А. Валиева / А.В. Мокшин, С.А. Демин // Вестник КГПУ. – 2004. – Т. 1. – С. 151-154.

23. Demin S.A. Manifestation of Chaos in Real Complex Systems / R.M. Yulmetyev, S.A. Demin, P. Hänggi // The Logistic Map and the Route to Chaos: From the Beginnings to Modern Applications / ed. by M. Ausloos, M. Dirickx. – Springer, Berlin Heidelberg New York, 2006. – P. 175-196.

24. Демин С.А. Приложение нового метода анализа неравноинтервальных временных серий к исследованию рентгеновского излучения астрофизических объектов / С.А. Демин, Р.М. Юльметьев, О.Ю. Панищев, Н.Т. Замалеева // Вестник ТГГПУ. – 2006. – Т. 7. – С. 3-17.

25. Флуктуации и шумы в сложных системах живой и неживой природы: коллективная монография / редкол.: Р.М. Юльметьев, А.В. Мокшин, С.А. Демин, М.Х. Салахов. – Казань: РИЦ “Школа”, 2008. – 456 с.

26. Демин С.А. Стохастические особенности временных и событийных корреляций в экви- и неэквидистантных сериях астрофизических данных / В.М. Залялиева, С.А. Демин // Вестник СПбГУ ИТМО. – 2008. – Т. 46. – С. 69-81.

27. Демин С.А. Многообразие эффектов статистической памяти в стохастической динамике рентгеновского излучения микрокварзов / Р.М. Юльметьев, В.М. Залялиева, С.А. Демин // Modern Problems of Statistical Physics - Актуальные проблемы статистической радиофизики (Малаховский сборник). – 2008. – Т. 7. – С. 83-100.

28. Демин С.А. Стохастические особенности рентгеновского излучения микрокварза ХТЕ J1550-564 / В.М. Залялиева, С.А. Демин, Р.М. Юльметьев // Вестник ТГГПУ. – 2008. – Т. 15. – С. 21-24.

29. Динамические явления в сложных системах: коллективная монография / редкол.: А.В. Мокшин, С.А. Демин, Р.М. Хуснутдинов, О.Ю. Панищев. – Казань: Изд-во МОиН РТ, 2011. – 308 с.

30. Демин С.А. Релаксационные особенности рентгеновской активности микрокварзов / С.А. Демин, О.Ю. Панищев, Ю.А. Нефедьев // Сборник статей “Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове”. – 2013. – Т. 220. – С. 355-360.

31. Демин С.А. Корреляционные взаимосвязи радиоизлучения квазаров / О.Ю. Панищев, С.А. Демин, С.Ф. Тимашев, Ю.А. Нефедьев // Сборник статей “Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове”. – 2013. – Т. 220. – С. 435-440.

*Тезисы и труды в сборниках международных и всероссийских конференций*

32. Демин С.А. Немарковская стохастическая динамика реального эпидемического процесса респираторных заболеваний человека / С.А. Демин, Р.М. Юльметьев, Н. Емельянова, Ф. Гафаров, Д. Юльметьева // Сборник тезисов Второй Всероссийской конференции *Необратимые процессы в природе и технике.* – МГТУ, Москва, 2003. – С. 184-185.

33. Демин С.А. Выявление динамических закономерностей протекания эпидемических процессов гриппа и ОРЗ на основе физики сложных систем / С.А. Демин, Р.М. Юльметьев // Сборник тезисов X-ой Юбилейной международной конференции *Современные техника и технологии.* – ТПУ, Томск, 2004. – Т. 1. – С. 289-290.

34. Демин С.А. Проявление статистических эффектов немарковости в реальных сложных системах / С.А. Демин, Р.М. Юльметьев // Сборник тезисов Третьей Всероссийской конференции *Необратимые процессы в природе и технике.* – МГТУ, Москва, 2005. – С. 34-36.

35. Демин С.А. Возрастные изменения немарковских эффектов и скорости релаксации в варибельности RR-интервала / О.Ю. Панищев, Р.М. Юльметьев, С.А. Демин // Сборник тезисов Третьей Всероссийской конференции *Необратимые процессы в природе и технике.* – МГТУ, Москва, 2005. – С. 36-38.

36. Демин С.А. Немарковские эффекты и хаотичность в стохастической динамике рентгеновского излучения микроквара GRS 1915+105 / С.А. Демин, О.Ю. Панищев, Э.В. Хусаенова, Р.М. Юльметьев // Сборник тезисов *ВНКСФ-12.* – Новосибирск, 2006. – С. 59-61.

37. Демин С.А. Разработка нового метода анализа временных серий с переменным шагом дискретизации / С.А. Демин, Р.М. Юльметьев, О.Ю. Панищев // Сборник материалов V Уральской региональной научно-практической конференции *Современные проблемы физики и физико-математического образования.* – БГПУ, Уфа, 2006. – С. 31-37.

38. Демин С.А. Анализ локальных закономерностей в стохастической динамике живых систем / С.А. Демин, О.Ю. Панищев, Р.М. Юльметьев // Сборник докладов 7-ой Международной научно-технической конференции *Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии.* – ВлГУ, Владимир-Суздаль, 2006. – С. 175-178.

39. Демин С.А. Стохастическая динамика событийных корреляций в сложных системах: приложение к астрофизическим данным / Р.М. Юльметьев, С.А. Демин, О.Ю. Панищев // Сборник трудов Четвертой Всероссийской астрономической конференции *Космические рубежи XXI века.* – КГУ, Казань, 2007. – С. 256-258.

40. Демин С.А. Классификация астрофизических объектов (квазары, микроквазары, лацертиды, галактики и пульсары) на основе стохастической динамики рентгеновского излучения / В.М. Залялиева, Р.М. Юльметьев, С.А. Демин, А.И. Галеев // Сборник трудов Четвертой Всероссийской астрономической конференции *Космические рубежи XXI века.* – КГУ, Казань, 2007. – С. 236-237.

41. Демин С.А. Немарковские особенности в динамике полного потока рентгеновского излучения микрокваров / В.М. Залялиева, С.А. Демин // Сборник материалов Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по физике. – ДВГУ, Владивосток, 2007. – С. 4-6.

42. Демин С.А. Локальные спектральные и релаксационные особенности дискретной стохастической эволюции живых систем / Демин С.А. // Сборник тезисов XIV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам *Ломоносов-2007*. Секция “Физика”. – МГУ, Москва, 2007. – С. 28-30.
43. Demin S.A. Flicker-noise spectroscopy: analysis of biomedical signals in photodiagnosis / S.F. Timashev, Yu.S. Polyakov, R.M. Yulmetyev, S.A. Demin, O.Yu. Panischev // In: Abstracts of the Conference *Photodynamic Therapy and Photodiagnosis in Clinical Practice*. – University of Padova, Brixen/Bressanone, Italy, 2008. – P. 106.
44. Demin S.A. Identification of photosensitive epilepsy using the flicker-noise spectroscopy of magnetoencephalograms / S.F. Timashev, R.M. Yulmetyev, S.A. Demin, O.Yu. Panischev, Yu.S. Polyakov // In: Abstracts of the Conference *LPHYS'2008*. – Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2008. – P. 206.
45. Демин С.А. Стохастические особенности временных и событийных корреляций в экви- и неэквидистантных сериях астрофизических данных / В.М. Залялиева, С.А. Демин, Р.М. Юльметьев // Сборник научных трудов V Всероссийской межвузовской конференции молодых ученых. – СПбГУ ИТМО, Санкт-Петербург, 2008. – С. 5-6.
46. Демин С.А. Анализ персистентных и антиперсистентных корреляций физиологических сигналов человека / С.А. Демин, Б.Н. Галимзянов // Сборник материалов III Евразийского конгресса по медицинской физике и инженерии *Медицинская физика-2010*. – МГУ, Москва, 2010. – Т. 4. – С. 201-204.
47. Демин С.А. Псевдочастичное описание сигналов МЭГ человека при фоточувствительной эпилепсии / С.А. Демин, О.Ю. Панищев // Сборник материалов III Евразийского конгресса по медицинской физике и инженерии *Медицинская физика-2010*. – МГУ, Москва, 2010. – Т. 4. – С. 205-208.
48. Demin S.A. Flicker-noise spectroscopy analysis of magnetoencephalogram signals in diagnosis and treatment of photosensitive epilepsy / S.F. Timashev, O.Yu. Panischev, S.A. Demin, Yu.S. Polyakov, J. Bhattacharya // In: Proceedings of the Conference *ALT'12*. – Bern University of Applied Sciences, Switzerland, 2012. – P. 327-328.
49. Демин С.А. Корреляционные взаимосвязи радиоизлучения некоторых квазаров на длинах волн 11 см и 3.7 см / О.Ю. Панищев, С.А. Демин, Ю.А. Нефедьев, С.Ф. Тимашев // Сборник тезисов Всероссийской астрометрической конференции *Пулково-2012*. – Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, 2012. – С. 52.
50. Демин С.А. Релаксационные особенности рентгеновской активности микроквазаров: Классификация эффектов памяти / С.А. Демин, О.Ю. Панищев, Ю.А. Нефедьев // Сборник тезисов Всероссийской астрометрической конференции *Пулково-2012*. – Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, 2012. – С. 16-17.
51. Demin S. Method of analysis of time series based on statistical physics including Fourier analysis, correlation analysis, elements of fractal analysis and regression modeling / S. Demin, O. Panischev, Y. Nefedyev // In: Abstracts of the European Planetary Science Congress *EPSC-2013*. – University College London, London, United Kingdom, 2013. – Vol. 8. – P. EPSC2013-82.
52. Демин С.А. Кросс-корреляционные особенности интенсивности радиоизлучения квазаров / О.Ю. Панищев, С.А. Демин // Материалы Международного молодежного науч-

ного форума *Ломоносов-2013*. Секция “Физика”. – МГУ, Москва, 2013. – С. 11-13.

53. Demin S. Cross-correlation in quasar radio emission / Y. Nefedyev, O. Panishev, S. Demin // In: Abstracts of the 40th COSPAR scientific assembly. – Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, 2014. – P. E1.18-17-14.

54. Демин С.А. Анализ авто- и кросс-корреляций в сигналах интенсивности радиоизлучения квазаров / С.А. Демин, О.Ю. Панищев, Ю.А. Нефедьев // Сборник тезисов российской молодежной конференции по физике и астрономии *Физика.СПб-2014*. – ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 2014. – С. 13-14.

55. Demin S. Non-stationary effects and cross correlations in Solar activity / Y. Nefedyev, S. Demin, O. Panishev // In: Abstracts 41st COSPAR scientific assembly. – TUBITAK Space Technologies Research Institute, Istanbul, Turkey, 2016. – P. D2.6-12-16.

56. Demin S. MFF-analysis of Zurich sunspot numbers / Y. Nefedyev, S. Demin, O. Panishev // In: Abstracts 41st COSPAR scientific assembly. – TUBITAK Space Technologies Research Institute, Istanbul, Turkey, 2016. – P. D2.6-13-16.

57. Демин С.А. Исследование статистических закономерностей Цюрихского ряда чисел Вольфа / С.А. Демин, Н.Ю. Демина, Ю.А. Нефедьев, О.Ю. Панищев // Сборник Тезисов 17 Международной солнечной конференции *Физика солнечной плазмы и активность Солнца*. – Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Крым, п. Научный, 2016. – С. 30.

58. Демин С.А. Нестационарные эффекты и перекрестные корреляции в динамике солнечной активности / Н.Ю. Демина, С.А. Демин, Ю.А. Нефедьев, О.Ю. Панищев, С.Ф. Тимашев // Сборник Тезисов 17 Международной солнечной конференции *Физика солнечной плазмы и активность Солнца*. – Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Крым, п. Научный, 2016. – С. 31.