

На правах рукописи



ЖУРАВЛЕВ Максим Олегович

ПЕРЕМЕЖАЮЩЕЕСЯ ПОВЕДЕНИЕ ХАОТИЧЕСКИХ
ОСЦИЛЛЯТОРОВ ВБЛИЗИ ГРАНИЦ СИНХРОННЫХ
РЕЖИМОВ

01.04.03 – Радиофизика

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико–математических наук

Саратов – 2014

Работа выполнена на кафедре физики открытых систем и в отделении физики нелинейных систем НИИ ЕН СГУ ФГБОУ ВПО “Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского”.

Научный руководитель:

Короновский Алексей Александрович, д.ф.–м.н., профессор, ФГБОУ ВПО “Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского”, профессор кафедры физики открытых систем

Официальные оппоненты:

Курушина Светлана Евгеньевна, д.ф.–м.н., ФГБОУ ВПО “Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)”, профессор кафедры физики

Сатаев Игорь Рустамович, к.ф.–м.н., ФГБУН “Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской Академии наук”, Саратовский филиал, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: ФГБУН “Институт прикладной физики РАН”, г. Нижний Новгород

Защита состоится “17” октября 2014 г. в 15 часов 30 минут в 34 ауд. III корпуса СГУ на заседании диссертационного совета Д 212.243.01 в Саратовском государственном университете (410012, г. Саратов, ул. Университетская, 42).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Саратовского государственного университета (Саратов, ул. Университетская, 42) и на сайте <http://www.sgu.ru/dissertation-council/d-212-243-01/dissertaciya-m-o-zhuravleva>.

Автореферат разослан “20” августа 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



В.М. Аникин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследуемой проблемы. В ходе проведенных многочисленных исследований на настоящий момент установлено, что перемежающееся поведение характерно для большого количества процессов, протекающих в системах различной природы¹. В этом случае во временной реализации изучаемой системы попеременно сосуществуют два различных динамических режима (примером такого состояния может служить внезапный переход от периодических колебаний к хаотическим и дальнейшая смена хаотических колебаний на периодические и т.д.), при этом значения управляющих параметров остаются фиксированными. Таким образом, говоря о перемежаемости, можно в полной мере говорить об универсальности данного явления и его фундаментальном характере, так как оно проявляется весьма разнообразно и охватывает широкий круг систем. В настоящее время существует определенная классификация типов перемежаемости: перемежаемость типов I-III, on-off перемежаемость, перемежаемость типа “игольное ушко” и некоторые другие². Все эти типы перемежающегося поведения можно наблюдать в различных системах, например, перемежающаяся структура течения возникает в гидродинамике в ряде случаев при больших числах Рейнольдса, перемежающееся поведение наблюдается также в радиофизических системах. Кроме этого, перемежаемость можно наблюдать вблизи границы возникновения режимов хаотической синхронизации связанных осцилляторов; перемежающееся поведение проявляется в чередовании судорожной активности и нормального функционирования мозга у животных, генетически предрасположенных к абсанс эпилепсии; различные приборы и устройства (например, оптические генераторы) также могут работать в перемежающихся режимах³.

Таким образом, с учетом фундаментального характера и универсальности, изучение перемежающегося поведения в настоящее время является актуальной задачей не только для радиофизики, но и для других областей науки, поскольку выявление общих закономерностей, присущих различным типам перемежающегося поведения, позволяет как продвинуться в понимании поведения отдельных систем, представляющих по тем или иным соображениям интерес для исследователей, так и использовать полученные знания в практических приложениях (например, в медицине, в диагностических целях).

¹Bergé P., Pomeau Y., Vidal Ch. *L'Ordre Dans Le Chaos* Hermann, Paris (1988); Кац В.А., Трубецков Д.И., Письма в ЖЭТФ **39** (1983), No. 3, 116–119; Анищенко В.С. *Сложные колебания в простых системах* М.: Наука (1990); Hramov A.E., Koronovskii A.A., Kurovskaya M.K., Boccaletti S., Phys. Rev. Lett. **97** (2006), 114101.

²Pikovsky A.S., Osipov G.V., Rosenblum M.G., Zaks M., Kurths J., Phys. Rev. Lett. **79** (1997), No. 1, 47–50; Heagy J.F., Platt N., Hammel S.M., Phys. Rev. E **49** (1994), No. 2, 1140–1150; Dubois M., Rubio M., Bergé P., Phys. Rev. Lett. **51** (1983), 1446–1449.

³Короновский А.А., Кузнецова Г.Д., Мидзяновская И.С., Ситникова Е.Ю., Трубецков Д.И. Храммов А.Е., ДАН (2006); Boccaletti S., Allaria E., Meucci R., Arecchi F.T., Phys. Rev. Lett. **89** (2002), No. 19, 194101; osenblum M.G., Pikovsky A.S., Kurths J., Phys. Rev. Lett. **78** (1997), No. 22, 4193–4196.

Тем не менее, несмотря на большой интерес к изучению перемежающегося поведения со стороны исследователей, в настоящее время остается открытым ряд вопросов, связанных с данным явлением. Одним из таких вопросов является изучение перемежающегося поведения, которое возникает при переходе от синхронизации временных масштабов⁴ к асинхронной динамике в нелинейных системах. Необходимо отметить, что исследование именно данного типа поведения до настоящего момента не проводилось, и его изучение представляет значительный интерес, так как синхронизация временных масштабов позволяет рассматривать с единой позиции все остальные типы хаотической синхронизации. Стоит отметить, что хаотическая синхронизация представляется в настоящее время одним из фундаментальных феноменов нелинейной динамики, радиофизики и электроники в целом⁵. Интерес к изучению хаотической синхронизации связан как с большим фундаментальным значением ее исследования, так и широкими практическими приложениями, например, при скрытой передаче информации, в биологических, физиологических и химических задачах, при управлении хаосом, в том числе в системах СВЧ электроники и т.д.⁶.

В связи с этим выявление причин, приводящих к разрушению (установлению) синхронизации временных масштабов, а также исследование характеристик перемежающегося поведения, через которое осуществляется переход от синхронной динамики к асинхронной (и наоборот), имеет важное научное значение. Именно поэтому одной из задач, решенных в рамках настоящей диссертационной работы, стало изучение перемежающегося поведения, которое наблюдается при переходе от синхронизации временных масштабов к асинхронной динамике.

Известно, что в рамках исследований любого типа перемежаемости важную роль играют статистические характеристики, такие как распределение длительностей ламинарных фаз в зависимости от значений управляющих параметров изучаемой системы и зависимость средней длительности ламинарной фазы от параметра надкритичности. Таким образом, при изучении перемежаемости возникает необходимость в решении задачи по выделению длительности ламинарных фаз в исследуемой системе. В настоящее время существует большое количество методов выделения участков синхронного и

⁴Hramov A.E., Koronovskii A.A., *Physica D* **206** (2005), (3–4), 252–264.

⁵Анищенко В.С., Астахов В.В., Вадивасова Т.Е., Регулярные и хаотические автоколебания. Синхронизация и влияние флуктуаций, Издательский Дом "Интеллект", 2009; Анищенко В.С., Астахов В.В., Вадивасова Т.Е. и др., Нелинейные эффекты в хаотических и стохастических системах, М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003; Пиковский А.С., Розенблюм М.Г., Куртс Ю., Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление, М.: Техносфера, 2003.

⁶Anishchenko V.S. Pavlov A.N., *Phys. Rev. E* **57** (1998), 2455–2457; Анищенко В.С., Павлов А. Н., Янсон Н.Б., *ЖТФ* **68** (1998), No. 12, 1–8; Анищенко В.С., Астахов В.В., Николаев С.М., Шабунин А.В., *Радиотехника и электроника* **45** (2000), No. 2, 179–185; Трубецков Д.И., Храмов А.Е., *Радиотехника и электроника* **48** (2003), No. 1, 116–124; Prokhorov M.D., Ponomarenko V.I., Gridnev V.I., Bodrov M.B., Bespyatov A.B., *Phys. Rev. E* **68** (2003), 041913.

асинхронного поведения. Как правило, данные методы используют различные преобразования временной реализации, например непрерывное вейвлетное преобразование. Это позволяет достаточно точно выделять участки синхронного и асинхронного поведения, но общим недостатком этих методов является сильное увеличение времени, необходимого для обработки временной реализации и получения необходимых данных. Особенно это заметно на длительных временных реализациях. В то же самое время, именно длительные временные реализации необходимы для анализа статистических характеристик перемежающегося поведения. В связи с этим, в рамках настоящей диссертационной работы был разработан новый метод выделения ламинарных и турбулентных фаз во временных реализациях взаимодействующих осцилляторов, находящихся вблизи границы режима фазовой хаотической синхронизации. Особенностью метода является его простота реализации и значительное уменьшение времени выполнения процедуры выделения ламинарных и турбулентных участков поведения в рассматриваемых системах.

Особо следует подчеркнуть, что все исследования различных типов перемежающегося поведения в сложных нелинейных системах до настоящего времени были сконцентрированы на случае, когда в исследуемой системе при фиксированных значениях управляющих параметров сосуществуют и последовательно сменяют друг друга два типа различных режимов (“стационарное состояние — колебания”, “периодическая динамика — хаотическая динамика”, “синхронное поведение — асинхронная динамика” и т.п.). Однако необходимо заметить, что теоретически не исключена ситуация, когда в нелинейной системе одновременно сосуществуют два различных типа перемежающегося поведения. В этом случае во временной реализации будут наблюдаться “переключения” между двумя различными динамическими режимами в рамках одного типа перемежающегося поведения, после чего может произойти переход к другому типу перемежаемости, при котором переходы между режимами будут подчиняться другим закономерностям, причем и сменяющие друг друга режимы тоже могут быть другими, а по истечении некоторого интервала времени система снова вернется к первому типу перемежаемости, после чего все подобные переходы от одного типа перемежаемости к другому будут повторяться. Очевидно, что такая ситуация, вполне возможная с теоретической точки зрения, приведет к усложнению (или, по крайней мере, к модификации) характеристик режима, наблюдающегося в анализируемой системе. К сожалению, до настоящего момента не существовало никаких исследований подобного типа поведения, в рамках которого в системе одновременно сосуществует два различных типа перемежаемости. Тем не менее, такая ситуация вполне возможна, и одним из возможных примеров является случай, когда сигнал системы, находящейся вблизи границы фазовой хаотической синхронизации, проходит через фильтр (который может быть естественным обра-

зом встроен в анализируемую систему или являться составляющей частью измерительной аппаратуры). В таких случаях наблюдающиеся режимы не удастся классифицировать и описать в рамках существующих теоретических представлений о перемежающемся поведении, что может существенно усложнять, например, работу с приборами и устройствами или осуществление медицинской диагностики. Именно поэтому в диссертационной работе большое внимание уделено изучению возможного сосуществования двух различных типов перемежающегося поведения в нелинейных динамических системах. В силу масштабности рассматриваемой проблемы, ее изучению посвящены вторая и третья главы диссертационной работы. В рамках изучения данной проблемы была разработана и апробирована теоретическая модель, которая описывает поведение систем, в которых одновременно реализуются два типа перемежаемости, а также изучено несколько систем, в которых наблюдается данное явление.

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что круг вопросов, требующих дальнейших исследований в области перемежающегося поведения, достаточно широк, а тема диссертационной работы является актуальной и важной для радиофизики, нелинейной динамики и современной теории нелинейных колебаний и волн.

Цель диссертационной работы. Настоящая работа посвящена исследованию перемежающегося поведения, которое возникает при переходе от синхронизации временных масштабов к асинхронной динамике, а также изучению одновременного сосуществования двух типов перемежаемости в нелинейных системах.

Основными вопросами, подробно рассмотренными в диссертационной работе, являются следующие:

- создание метода выделения ламинарных и турбулентных фаз во временных реализациях взаимодействующих осцилляторов, находящихся вблизи границы режима фазовой хаотической синхронизации;
- изучение перемежающегося поведения, через которое осуществляется переход от синхронизации временных масштабов к асинхронной динамике;
- создание теоретической модели, описывающей поведение нелинейных систем, находящихся в режиме, в котором они одновременно демонстрируют два различных типа перемежающегося поведения;
- изучение поведения дискретных систем и систем с потоковым временем, которые способны демонстрировать сосуществование двух различных типов перемежающегося поведения;
- создание модифицированного метода выделения ламинарных и турбулентных участков поведения, позволяющего соотносить каждый участок

с конкретным типом перемежаемости, который в текущий момент реализуется в системе;

Изучение данных вопросов в рамках настоящей диссертационной работы позволяет продвинуться в понимании того, каким образом и через какие типы поведения может осуществляться переход от синхронной динамики поведения к асинхронной для нелинейных систем.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Для нелинейных систем переход от синхронизации временных масштабов к асинхронной динамике осуществляется через перемежаемость кольца, как для случая малой расстройки управляющих параметров, так и для случая большой расстройки.
2. Различные нелинейные системы способны одновременно демонстрировать два различных типа перемежающегося поведения, при этом такое состояние характерно как для систем с дискретным временем, так и для систем с потоковым временем. Поведение таких систем, описывается с использованием одной теоретической модели, которая позволяет получить для них теоретические соотношения (распределение длительностей ламинарных фаз при фиксированном значении управляющих параметров и зависимость средней длительности участка ламинарного поведения от управляющих параметров) в зависимости от того, какие два типа перемежающегося поведения реализуются.
3. Использование при определении длительностей турбулентных и ламинарных участков поведения мгновенных фаз, лежащих в диапазоне $[0; 2\pi]$ и наблюдение за движением фазовой траектории на вращающейся плоскости в момент турбулентной фазы для случая одновременного существования двух типов перемежаемости, позволяет определять длительность таких участков и соотносить каждую турбулентную фазу с конкретным механизмом перемежаемости.

Научная новизна. Научная новизна результатов, представленных в диссертационной работе, заключается в изучении перемежающегося поведения, возникающего на границе синхронизации временных масштабов, а также в определении общих закономерностей, характерных для нелинейных систем, демонстрирующих одновременное сосуществование двух типов перемежающегося поведения.

В рамках настоящей работы впервые получены следующие результаты:

- предложен новый метод выделения ламинарных и турбулентных фаз во временных реализациях взаимодействующих осцилляторов, находящихся

ся вблизи границы режима фазовой хаотической синхронизации. Особенностью метода является его простота реализации и значительное уменьшение времени выполнения процедуры выделения ламинарных и турбулентных участков поведения в рассматриваемых системах;

- исследованы статистические характеристики перемежающегося поведения при переходе от синхронизации временных масштабов к асинхронной динамике поведения. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что при малой и большой расстройках управляющих параметров настоящий переход осуществляется через перемежаемость кольца;
- разработана теоретическая модель, описывающая одновременное сосуществование двух типов перемежающегося поведения в нелинейных системах. В рамках разработанной теории был получен общий вид теоретических соотношений, описывающих одновременное сосуществование двух типов перемежаемости (распределение длительностей ламинарных фаз при фиксированном значении управляющих параметров и зависимость средней длительности участка ламинарного поведения от параметров надкритичности);
- предложен модифицированный метод выделения ламинарных и турбулентных участков поведения для нелинейных систем, в которых одновременно сосуществуют два различных типа перемежающегося поведения. Отличительной особенностью метода является то, что он позволяет соотносить каждый участок турбулентного поведения с конкретным типом перемежаемости, который в данный момент реализуется в системе;
- изучено поведение дискретных систем и систем с потоковым временем, в которых одновременно реализуются два различных типа перемежаемости. Для этих систем получены статистические характеристики (распределение длительностей ламинарных фаз при фиксированном значении управляющих параметров и зависимость средней длительности участка ламинарного поведения от параметров надкритичности), проведено их сопоставление с теоретическими зависимостями;
- на примере взаимодействия кардиоваскулярной и респираторной систем человека показано, что в физиологических системах возможно сосуществование двух различных типов перемежающегося поведения.

Научная и практическая значимость работы. Диссертационная работа решает научную задачу, имеющую существенное значение для радиофизики, нелинейной динамики и современной теории колебаний и волн, связанную с изучением перемежающегося поведения, предшествующего синхронизации в хаотических системах. Можно ожидать, что результаты, полученные

в настоящей диссертационной работе, имеют общий характер и могут быть распространены на большое количество систем различной природы — радиофизические, биологические, физиологические и т.д. Это связано с тем, что большая часть исследований проводилась на примере эталонных нелинейных динамических систем, таких как система Ресслера или автогенератор Ван Дер Поля. Полученные результаты позволяют продвинуться в понимании особенностей поведения и получить общие закономерности, характерные для нелинейных систем, способных демонстрировать два типа перемежающегося поведения.

В частности, предложен новый метод выделения ламинарных и турбулентных фаз во временных реализациях взаимодействующих осцилляторов, находящихся вблизи границы режима фазовой хаотической синхронизации. Метод основан на использовании непосредственной разности мгновенных фаз хаотических сигналов взаимодействующих осцилляторов, что позволяет значительно упростить данную процедуру, а это, в свою очередь, значительно уменьшает продолжительность времени обработки данных. Еще одним неоспоримым преимуществом предложенного метода является возможность выделения не только ламинарных фаз, но и турбулентных.

В диссертационной работе предложен модифицированный метод выделения ламинарных и турбулентных участков поведения для нелинейных систем, в которых одновременно реализуются два различных типа перемежаемости. Отличительной особенностью разработанного метода является то, что он позволяет соотносить каждый участок турбулентного поведения с конкретным типом перемежаемости, который в данный момент реализуется в анализируемой системе.

Разработана новая теоретическая модель, описывающая поведение нелинейной системы, в которой одновременно сосуществуют два типа перемежаемости. В рамках предложенной теории был впервые получен общий вид теоретических соотношений, описывающих одновременное сосуществование двух типов перемежаемости: распределение длительностей ламинарных фаз при фиксированном значении управляющих параметров и зависимость средней длительности участка ламинарного поведения от параметров надкритичности.

Полученные результаты и разработанные методы могут широко использоваться при анализе экспериментальных данных, относящихся к динамике взаимодействующих нелинейных систем, для диагностики наблюдаемых динамических режимов и определения их характеристик в различных областях человеческой деятельности, таких как техника, медицина и др.

Результаты, изложенные в диссертационной работе, внедрены в учебный процесс по подготовке специалистов по специальности “Радиофизика и электроника”, а также по направлению подготовки бакалавров и магистров “Ра-

диофизика” в ФГБОУ ВПО “Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского”.

Достоверность полученных результатов. Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием строгих математических процедур, общеизвестных уравнений, методов и подходов, которые строго обоснованы в научной литературе, апробированных и хорошо себя зарекомендовавших при проведении научных исследований. При это о достоверности результатов говорит их воспроизводимость, сопоставление аналитических зависимостей с численными результатами, сопоставление результатов при использовании различных методов выделения ламинарных фаз. Кроме этого, в приведенных результатах отсутствуют противоречия с известными в научной литературе достоверными общепризнанными результатами.

Личный вклад. Основная часть представленных в диссертации результатов получена лично автором. В большинстве совместных работ автором выполнены все численные и аналитические расчеты. Постановка задач, разработка методов их решения, объяснение и интерпретация результатов были осуществлены либо лично автором, либо совместно с научным руководителем и другими соавторами научных работ, опубликованных соискателем. Необходимо также отметить, что в рамках настоящей диссертационной работы были использованы записи сигналов ЭКГ и дыхания человека, которые были получены и любезно предоставлены научной группой под руководством д.ф.-м.н. М.Д. Прохорова и д.ф.-м.н. В.И. Пономаренко.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы использовались при выполнении научно-исследовательских работ по грантам Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проекты 12–02–00221, 14–02–31088–мол_a), Федеральной целевой программы “Научные и научно педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 годы (соглашения соглашения № 14.В37.21.0751 от 27 августа 2012 г., № 14.В37.21.1289 от 21 сентября 2012 г., №14.В37.21.1426 от 12 октября 2012 г., ГК № П586 от 18 мая 2010 г., П2492 от 20 ноября 2009 г., П1136 от 27 августа 2009 г., П451 от 31 июля 2009 г.), Президентской Программы поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (2010–2011, 2012–2013, 2014–2015 гг., руководитель ведущей научной школы — чл.-корр. РАН, профессор Д.И. Трубецков), Президентской Программы поддержки молодых ученых — кандидатов наук (проект № МК–807.2014.2, руководитель проекта — к.ф.-м.н., доцент О.И. Москаленко, 2014–2015 гг.), фонда некоммерческих программ “Династия”.

Представленные результаты неоднократно докладывались на различных научных конференциях и семинарах и отражены в тезисах докладов: Всероссийской научной школы-конференции “Нелинейные феномены, хаос, критические явления и методы их исследования с помощью вейвлетного, кластерного и спектрального анализа в геоэкологических процессах” (Саратов, октябрь

2009), XV научной школы “Фундаментальные и прикладные задачи нелинейной физики — Нелинейные волны-2010” (Нижний Новгород, март 2010), IX Международной школы “Хаотические автоколебания и образование структур (ХАОС-2010)” (Саратов, октябрь 2010), XIII Всероссийской школы-семинара “Волновые явления в неоднородных средах (Волны–2012)” (Звенигород, май 2012), VII Всероссийской конференции молодых ученых “Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика” (Саратов, сентябрь 2012), III Всероссийского научно-практического форума “Экология: синтез естественнонаучного, технического и гуманитарного знания” (Саратов, октябрь 2012), IX Всероссийской научной конференции им. Ю.И. Неймарка “Нелинейные колебания механических систем” (Нижний Новгород, сентябрь 2012), XIV Всероссийской школы-семинара “Физика и применение микроволн (Волны–2013)” (Звенигород, май 2013), X Международной школы “Хаотические автоколебания и образование структур (ХАОС-2013)” (Саратов, октябрь 2013), 21th IEEE Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems (NDES2013) (Бари, Италия, 2013), всего 10 публикаций в трудах конференций. Результаты, изложенные в диссертационной работе, неоднократно обсуждались на научных семинарах кафедры электроники, колебаний и волн и кафедры физики открытых систем процессов СГУ.

Публикации. Результаты работы опубликованы в центральных реферируемых научных журналах, таких как “Журнал технической физики” (1 статья), “Письма в журнал технической физики” (2 статьи), “Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика” (2 статьи), “Известия РАН. Серия физическая” (1 статья), “Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского” (1 статья), “Physical Review E” (1 статья), “CHAOS: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science ” (1 статья), всего 9 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук. По материалам диссертации получен 1 патент Российской Федерации на изобретение и 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения. Она содержит 132 страницы текста, включая 29 иллюстраций. Список литературы содержит 120 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулирована цель работы, описаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Введение содержит основные положения и результаты, выносимые на защиту, сведения о достоверности и апробации результатов.

Первая глава диссертационной работы посвящена изучению перемежающегося поведения, наблюдаемого в нелинейных системах с малой и боль-

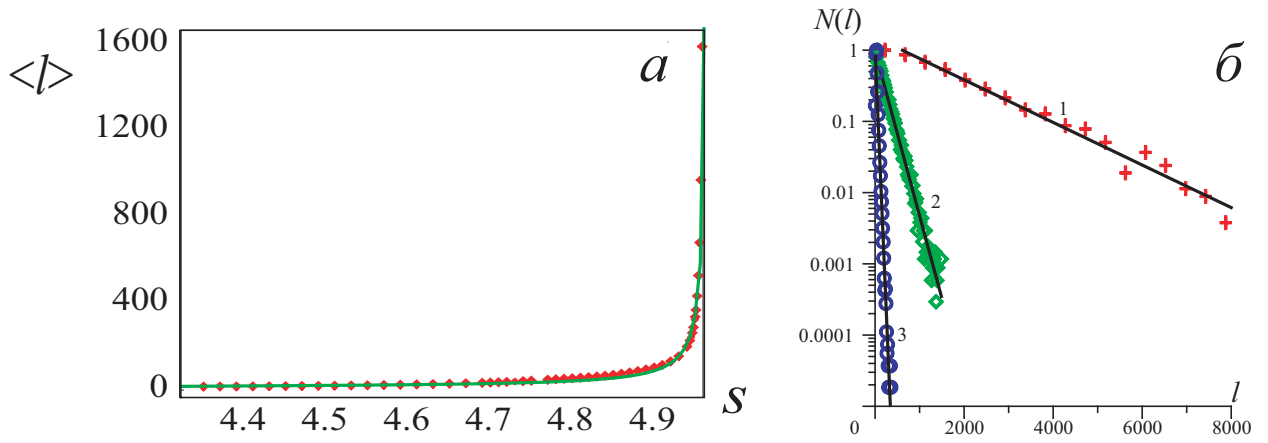


Рис. 1: (а) Зависимость средней длительности ламинарных участков поведения от параметра надкритичности ($s_c - s$) (показана точками) и аппроксимирующая ее кривая (1) (показана сплошной линией), $s_c = 4.9919$, $s_t = 4.34$, $T = 8.0$; (б) Распределения длительностей ламинарных участков поведения $N(l)$ при различных значениях временного масштаба s , нормированные на максимальное значение, и соответствующие им экспоненциальные аппроксимации, показанные сплошными линиями: 1 — временной масштаб $s = 4.9885$, численно полученные точки показаны символами “+”; 2 — $s = 4.9700$ (\diamond); 3 — $s = 4.7200$ (\circ). Ось ординат приведена в логарифмическом масштабе. Значение параметра связи $\varepsilon = 0.085$

шой расстройкой управляющих параметров при переходе от синхронизации временных масштабов к асинхронной динамике. Начало этой главы посвящено обсуждению общих понятий перемежающегося поведения, в разделе 1.1 приведены основные сведения и статистические характеристики для всех наиболее известных типов перемежаемостей, которые затем используются на протяжении всей диссертационной работы и которые необходимы для понимания и логичного изложения всего материала.

Дальнейшее изложение материала первой главы посвящено всестороннему изучению перемежающегося поведения, через которое осуществляется переход от синхронизации временных масштабов к асинхронной динамике. В рамках этого изложения в разделе 1.2 предлагается новый метод выделения ламинарных и турбулентных фаз поведения во временных реализациях взаимодействующих осцилляторов, находящихся вблизи границы режима фазовой хаотической синхронизации. Отличительной особенностью разработанного метода является то, что он использует мгновенные фазы, лежащих в диапазоне $[0; 2\pi]$, это позволяет выделять ламинарные и турбулентные фазы с высокой точностью, без использования дополнительных преобразований, что в свою очередь значительно сокращает время численных расчетов. Предложенный метод прошел апробацию на примере системы однонаправлено связанных осцилляторов Ресслера, находящейся вблизи границы возникновения фазовой хаотической синхронизации. Результаты, полученные с помощью предложенного метода, находятся в очень хорошем соответствии с теоретическими оценками.

При помощи предложенного метода выделения ламинарных фаз проведено изучение перемежающегося поведения, наблюдаемого в нелинейных системах с малой расстройкой управляющих параметров, при переходе от синхронизации временных масштабов к асинхронной динамике. С этой целью в начале разделе 1.3 приведена концепция синхронизация временных масштабов, которая основана на введении в рассмотрение непрерывного множества фаз исследуемых сигналов связанных хаотических систем. Исследование перемежающегося поведения на границе синхронизации временных масштабов проводилось для системы однонаправлено связанных осцилляторов Ресслера, при этом значение расстройки управляющих параметров было выбрано малым. Для данной системы были получены статистические характеристики перемежающегося поведения: распределение длительностей ламинарных фаз при фиксированном значении управляющих параметров и зависимость средней длительности участка ламинарного поведения от параметра надкритичности. На рисунке 1, *а*, представлена зависимость средней длительности $\langle l \rangle$ ламинарной фазы от параметра надкритичности $(s_c - s)$ для данного типа перемежаемости, точками приведены результаты численного моделирования, а линией показана теоретическая зависимость для перемежаемости “кольца”, которая имеет следующий вид

$$\langle l(s) \rangle = T - \frac{T}{\ln(1 - p(s))}, \quad (1)$$

где $T = \langle l(s_t) \rangle$ является средней длительностью ламинарной фазы для временного масштаба наблюдения s_t , ограничивающего область перемежаемости “кольца”, $p(s)$ — вероятность детектировать фазовый проскок на временном интервале наблюдения длиной T на временном масштабе s . Также было установлено, что распределение длительностей ламинарных участков поведения при фиксированном значении параметра связи на разных временных масштабах является экспоненциальным (рисунок 1, *б*), что позволяет говорить о наличии перемежающегося поведения типа “кольцо”. На основе полученных результатов было установлено, что переход от синхронизации временных масштабов к асинхронному поведению в хаотических системах с малой расстройкой управляющих параметров осуществляется через перемежаемость “кольца”.

В разделе 1.4, приведены результаты по изучению перемежаемости, которая реализуется в нелинейных системах с большой расстройкой управляющих параметров на границе синхронизации временных масштабов. С этой целью для системы однонаправлено связанных осцилляторов Ресслера была построена зависимость $\langle l \rangle$ средней длительности ламинарной фазы от параметра надкритичности $(s_c - s)$, которая представлена на рисунке 2, где точками показаны численно полученные результаты, а линия соответствует теоретической зависимости средней длительности ламинарного поведения от пара-

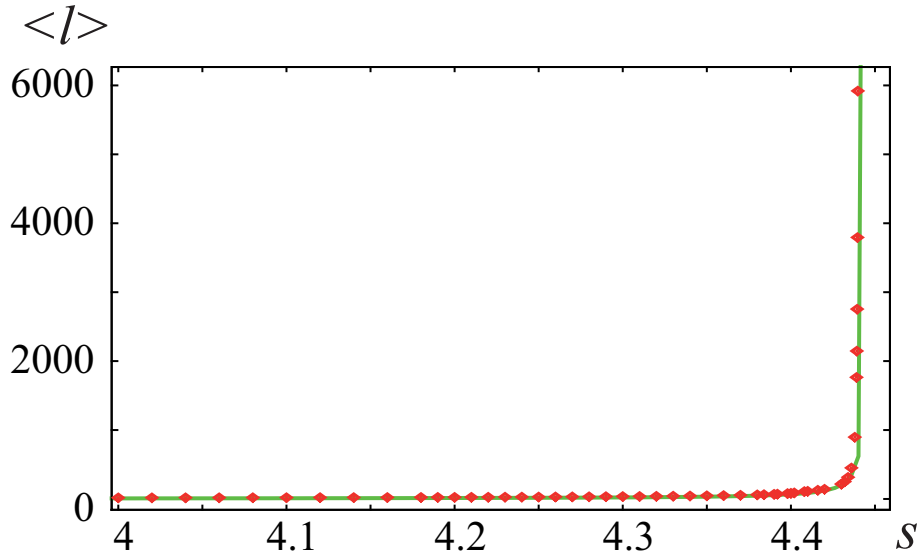


Рис. 2: Зависимость средней длительности ламинарных участков поведения от параметра надкритичности ($s_c - s$) (показана точками) и аппроксимирующая ее кривая (1) (показана сплошной линией), $s_c = 4.445$, $s_t = 3.9$, $T = 4.0$

метра надкритичности для перемежаемости “кольца”. Таким образом, как и в случае малой расстройки управляющих параметров, для большой расстройки значений управляющих параметров переход от синхронизации временных масштабов к асинхронной динамике осуществляется через перемежаемость “кольца”.

Во **второй главе** диссертационной работы обсуждается вопрос возможности одновременного сосуществования двух различных типов перемежающегося поведения. В разделе 2.1 приводятся доводы о возможности одновременного сосуществования двух различных типов перемежающегося поведения в нелинейных системах. В рамках этого рассмотрения в разделе 2.2 разработана новая теоретическая модель, описывающая нелинейные системы, в которых одновременно реализуются два различных типа перемежающегося поведения. Данная теоретическая модель позволила получить для данного поведения нелинейной системы такую статистическую характеристику, как распределение длительностей ламинарных участков поведения при фиксированных управляющих параметрах, которая определяется следующим соотношением

$$p(\tau) = \frac{1}{T_1 + T_2} \left[\int_{\tau}^{\infty} \frac{ds}{s} \int_{\tau}^{\infty} [p_1(l)p_2(s)T_2 + p_1(s)p_2(l)T_1] dl + \right. \\ \left. + \int_{\tau}^{\infty} \left(1 - \frac{\tau}{s}\right) [p_1(\tau)p_2(s)T_2 + p_1(s)p_2(\tau)T_1] ds \right]. \quad (2)$$

где T_1 — средняя длительность ламинарного участка поведения перемежа-

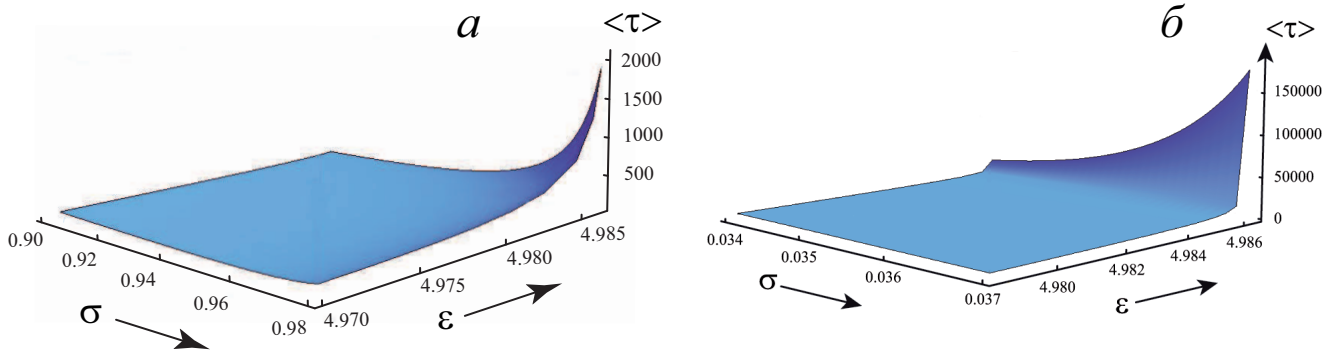


Рис. 3: (а) Зависимость средней длительности участков ламинарного поведения от двух параметров надкритичности (ε и σ) для системы, демонстрирующей одновременное сосуществование двух типов перемежаемости кольца; (б) Зависимость средней длительности ламинарного поведения от двух параметров надкритичности (ε и σ) для системы, демонстрирующей одновременно два типа перемежающегося поведения: тип “кольцо” и тип игольного ушка

емости первого типа, T_2 — средняя длительность ламинарной фазы перемежаемости второго типа. Зависимость средней длительности ламинарного поведения от управляющих параметров может быть найдена как

$$\langle \tau \rangle = \int_0^{\infty} \tau p(\tau) d\tau, \quad (3)$$

где плотность вероятности $p(\tau)$ определяется соотношением (2).

Для понимания поведения нелинейной системы, в которой одновременно реализуются два различных типа перемежаемости, в разделе 2.3 было проведено изучение зависимости средней длительности ламинарных участков поведения от двух управляющих параметров для различных сочетаний типов перемежающегося поведения. На рисунке 3, а приведена зависимость средней длительности ламинарного поведения для случая одновременного сосуществования двух типов перемежаемости кольца, рисунок 3, б иллюстрирует случай одновременного сосуществования перемежаемости типа “кольцо” и перемежаемости игольного ушка.

В разделе 2.4 было проведено исследование системы с дискретным временем, которая при определенных значениях управляющих параметров демонстрирует одновременное сосуществование двух различных типов перемежающегося поведения. Для данной системы было численно получено распределение длительностей ламинарных участков поведения при фиксированных управляющих параметрах, которое было сопоставлено с теоретической зависимостью (2), показано хорошее соответствие численных результатов и теории. Таким образом, показано, что предложенная теория корректно описывает поведение системы, которая характеризуется одновременным сосуществованием двух различных типов перемежаемостей.

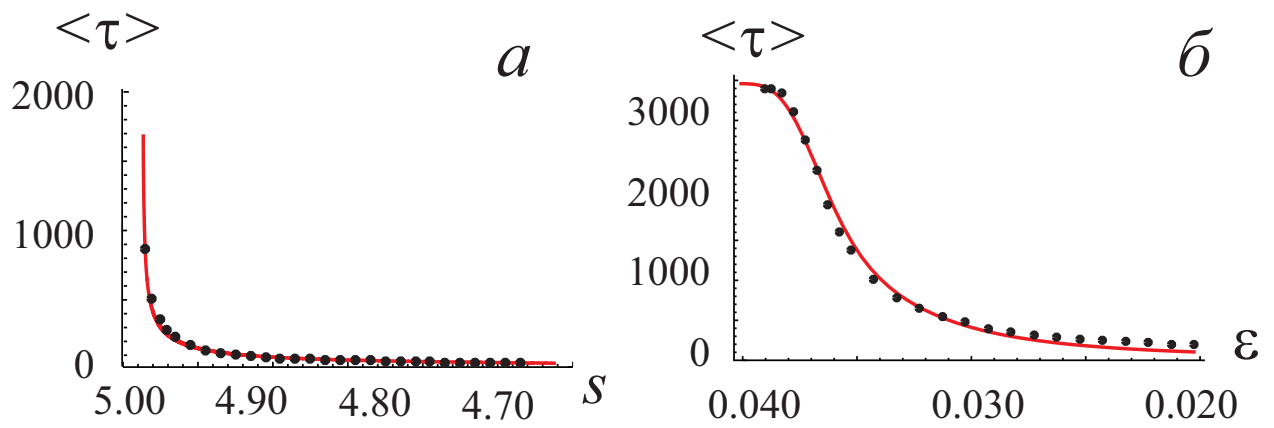


Рис. 4: (а) Зависимость средней длительности ламинарных участков поведения от временного масштаба s для модельной системы однонаправлено связанных осцилляторов Ресслера; точками показаны результаты численного моделирования ($\varepsilon = 0.037$), линией — аппроксимирующая кривая; (б) Зависимость средней длительности ламинарных участков поведения от параметра связи ε для модельной системы однонаправлено связанных осцилляторов Ресслера. Точками показаны результаты численного моделирования ($s = 4.98$), линией — аппроксимирующая кривая

В **третьей** главе диссертационной работы рассмотрены нелинейные системы с потоковым временем, в которых одновременно реализуются два различных типа перемежающегося поведения. В разделе 3.1 третьей главы предложен модифицированный метод выделения ламинарных и турбулентных участков поведения для нелинейных систем, в которых одновременно сосуществуют два различных типа перемежающегося поведения. Отличительной особенностью данного метода является то, что он позволяет соотносить каждый участок турбулентного поведения с конкретным типом перемежаемости, который в данный момент реализуется в исследуемой системе.

В дальнейшем с использованием предложенного модифицированного метода выделения ламинарных участков поведения в разделе 3.2 было проведено исследование нелинейных потоковых систем, способных одновременно демонстрировать два различных типа перемежаемости. Данное исследование проводилось на примере системы однонаправлено связанных осцилляторов Ресслера и неавтономного генератора Ван дер Поля с шумом. В результате для этих систем были получены статистические характеристики, для случая, когда в них одновременно наблюдаются два типа перемежаемости. На рисунке 4, а, б численно полученная зависимость средней длительности ламинарных участков поведения от временного масштаба s и параметра связи ε для модельной системы однонаправлено связанных осцилляторов Ресслера представлена точками, а аппроксимирующая ее кривая — линией. Из рисунка отчетливо видно, что теоретическая зависимость хорошо соотносится с численными результатами. Таким образом, полученные в разделе 3.2 статистические характеристики позволили показать, что предложенный во второй

главе настоящей диссертационной работы теоретический подход к описанию сосуществования двух типов перемежающегося поведения корректно описывает динамику систем с потоковым временем. Кроме этого, в разделе 3.3 данной главы была продемонстрирована возможность сосуществования двух типов перемежающегося поведения в реальных физиологических системах, на примере взаимодействия кардиоваскулярной и респираторной систем человека.

В **Заключении** подведены итоги диссертационной работы, сформулированы основные результаты и намечены направления дальнейших исследований в данном направлении.

Основные результаты и выводы

1. Разработан новый метод для выделения ламинарных и турбулентных фаз во временных реализациях взаимодействующих осцилляторов, находящихся вблизи границы режима фазовой хаотической синхронизации.
2. Исследованы статистические характеристики перемежающегося поведения на границе режима синхронизации временных масштабов. Установлено, что переход от синхронизации временных масштабов к асинхронной динамике осуществляется через перемежаемость кольца.
3. Создана теоретическая модель, описывающая поведение нелинейных систем, находящихся в режиме, в котором они одновременно демонстрируют два различных типа перемежающегося поведения.
4. Изучено поведение дискретных систем и систем с потоковым временем, которые способны демонстрировать сосуществование двух различных типов перемежающегося поведения.
5. Предложен модифицированный метод выделения ламинарных и турбулентных участков поведения, позволяющий соотносить каждый участок с конкретным типом перемежаемости, который в текущий момент реализуется в исследуемой системе.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- [1] Журавлев М.О., Куровская М.К., Москаленко О.И. *Метод выделения ламинарных и турбулентных фаз в перемежающихся временных реализациях систем, находящихся вблизи границы фазовой синхронизации*, Письма в ЖТФ **36** (2010), No. 10, 31–38.
- [2] Журавлев М.О., Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. *Перемежающееся поведение на границе синхронизации временных масштабов*, ЖТФ **81** (2011), No. 7, 7–12.

- [3] Журавлев М.О., Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. *Переमेжаемость кольца вблизи границы синхронизации временных масштабов*, Изв. Вузов. Прикладная нелинейная динамика. **19** (2011), No. 4, 12–24.
- [4] Журавлев М.О., Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. *Перемежающееся поведение вблизи границы фазовой хаотической синхронизации на различных временных масштабах*, Изв. Вузов. Прикладная нелинейная динамика. **19** (2011), No. 1, 109–121.
- [5] Zhuravlev M.O., Koronovskii A.A., Moskalenko O.I., Ovchinnikov A.A., Hramov A.E. *Ring intermittency near the boundary of the synchronous time scales of chaotic oscillators*, Phys. Rev. E **83** (2011), 027201.
- [6] Журавлев М.О., Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. *Исследование на различных временных масштабах поведения неавтономного осциллятора Ван-дер-Поля в присутствии шума вблизи границы синхронизации*, Изв. РАН. Сер. физическая **76** (2012), No. 12, 1503–1506.
- [7] Журавлев М.О., Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. *Теоретическое и численное исследование “перемежаемости перемежаемостей” в связанных хаотических системах*, Письма в ЖТФ **39** (2013), No. 14, 1–7.
- [8] Журавлев М.О., Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. *Метод выделения ламинарных участков поведения в хаотических системах, в которых одновременно реализуется два различных типа перемежаемости*, Вестник ННГУ **1** (2013), No. 3, 196–200.
- [9] Hramov A.E., Koronovskii A.A., Moskalenko O.I., Zhuravlev M.O., Ponomarenko V.I., Prokhorov M.D. *Intermittency of intermittencies*, CHAOS **23** (2013), No. 3, 033129.
- [10] Журавлев М.О. *Выделение ламинарных и турбулентных фаз в однонаправленных связанных систем*, Труды Всероссийской научной школы-конференции “Нелинейные феномены, хаос, критические явления и методы их исследования с помощью вейвлетного, кластерного и спектрального анализа в геоэкологических процессах”, 2009, 17–19.
- [11] Журавлев М.О. *Метод выделения турбулентных и ламинарных фаз и его апробация на примере однонаправленных связанных систем Рёсслера*, Материалы XV научной школы “Фундаментальные и прикладные задачи нелинейной физики - Нелинейные волны - 2010”, 2010, 39–40.
- [12] Журавлев М.О., Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. *Перемежаемость “кольца” вблизи границы синхронизации временных масштабов*, Материалы IX Международной школы “Хаотические автоколебания и образование структур” (ХАОС-2010), 2010, 59–60.
- [13] Журавлев М.О., Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. *Исследование на различных временных масштабах поведения однонаправлено связанных хаотических систем вблизи границы фазовой синхронизации*, Труды XIII школы-семинара “Волны-2012”, 2012, 15–16.
- [14] Журавлев М.О. *Исследование основных характеристик поведения неавтономного осциллятора Ван дер Поля, демонстрирующего одновременно два различных типа перемежаемости*, Тезисы докладов VII Всероссийской конференции молодых ученых “НАНОЭЛЕКТРОНИКА, НАНОФОТОНИКА И НЕЛИНЕЙНАЯ ФИЗИКА”, 2012, 61–62.

- [15] Журавлев М.О., Короновский А.А., Москаленко О.И., Иванов А.В., Храмов А.Е. *Переменяемость переменяемостей на границе синхронизации временных масштабов: суррогатные данные и биомедицинские системы*, Материалы III Всерос. науч.-практ. форума Экология: синтез естественнонаучного, технического и гуманитарного знания, 2012, 322–323.
- [16] Журавлев М.О. *Переменяющееся поведение при разрушении синхронизации временных масштабов*, Труды IX Всероссийской научной конференции им. Ю.И. Неймарка “Нелинейные колебания механических систем”, 2012, 409–410.
- [17] Журавлев М.О., Москаленко О.И., Короновский А.А., Храмов А.Е. *Переменяющееся поведение на границе фазовой синхронизации в присутствии шума*, Труды школы-семинара “Волны-2013”, 2013, 23–24.
- [18] Журавлев М.О., Храмов А.Е., Короновский А.А., Москаленко О.И. *Теория переменяемости переменяемостей в нелинейных системах*, Материалы X Международной школы “Хаотические автоколебания и образование структур” (ХАОС-2013), 2013, 129–130.
- [19] Zhuravlev M. O., Hramov A.E., Koronovskii A.A., Moskalenko O.I. *General theoretical model describing coexistence of two types of intermittency in nonlinear dynamical systems*, Proceedings of 21th edition of the Nonlinear Dynamics of Electronic Systems, 2013, 9P.
- [20] Журавлев М.О., Москаленко О.И., Короновский А.А. *Способ определения моментов синхронного и асинхронного поведения двух связанных систем*, Патент на изобретение № 2431857, 2011. Бюллетень № 29
- [21] Журавлев М.О., Короновский А.А., Куровская М.К., Москаленко О.И. *Программа для определения длительностей турбулентных и ламинарных фаз поведения систем, находящихся вблизи границы хаотической фазовой синхронизации*, Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012613432, 2012.
- [22] Москаленко О.И., Короновский А.А., Храмов А.Е., Журавлев М.О. *Программа для ЭВМ, позволяющая производить непрерывное вейвлетное преобразование для экспериментальных данных с неэквидистантным шагом по времени*, Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013661094, 2013.

ЖУРАВЛЕВ Максим Олегович

ПЕРЕМЕЖАЮЩЕЕСЯ ПОВЕДЕНИЕ ХАОТИЧЕСКИХ
ОСЦИЛЛЯТОРОВ ВБЛИЗИ ГРАНИЦ СИНХРОННЫХ
РЕЖИМОВ

Автореферат

Подписано к печати 03.07.2014 Формат 60 × 84 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура “Times”
Усл. печ. л. 1,39 (1,5). Тираж 120 экз. Заказ №.

Отпечатано с готового оригинал-макета
Типография СГУ.
410012, Саратов, Большая Казачья, 112а, корпус 8.