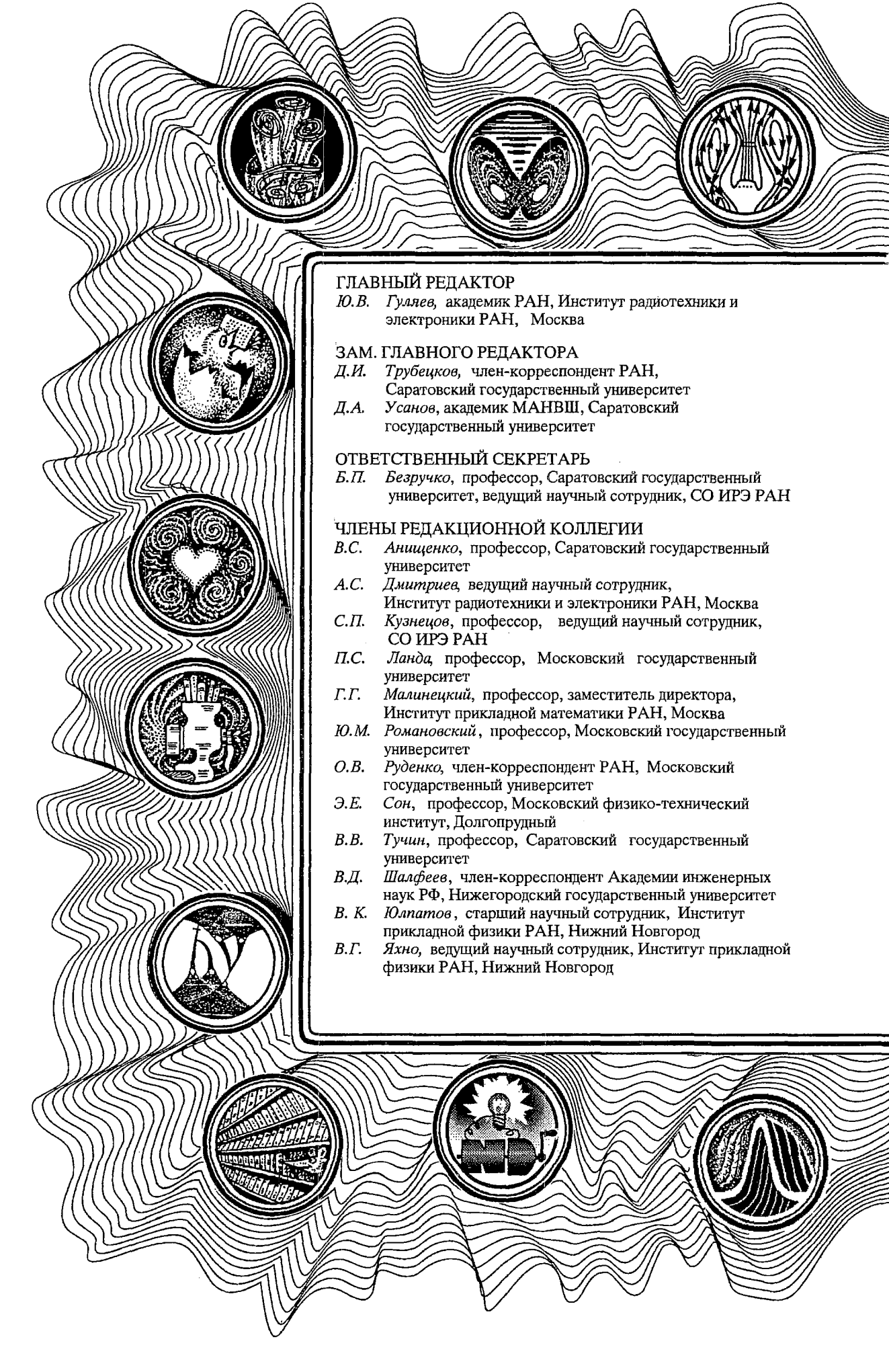


# Трикладная Деловая Динамика



*150 лет со дня рождения Анри Пуанкаре*

ИЗДАНИЕ САРАТОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА



ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

*Ю.В. Гуляев*, академик РАН, Институт радиотехники и электроники РАН, Москва

ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

*Д.И. Трубецков*, член-корреспондент РАН, Саратовский государственный университет

*Д.А. Усанов*, академик МАНВШ, Саратовский государственный университет

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

*Б.П. Безручко*, профессор, Саратовский государственный университет, ведущий научный сотрудник, СО ИРЭ РАН

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

*В.С. Анищенко*, профессор, Саратовский государственный университет

*А.С. Дмитриев*, ведущий научный сотрудник, Институт радиотехники и электроники РАН, Москва

*С.П. Кузнецов*, профессор, ведущий научный сотрудник, СО ИРЭ РАН

*П.С. Ланда*, профессор, Московский государственный университет

*Г.Г. Малинецкий*, профессор, заместитель директора, Институт прикладной математики РАН, Москва

*Ю.М. Романовский*, профессор, Московский государственный университет

*О.В. Руденко*, член-корреспондент РАН, Московский государственный университет

*Э.Е. Сон*, профессор, Московский физико-технический институт, Долгопрудный

*В.В. Тучин*, профессор, Саратовский государственный университет

*В.Д. Шалфеев*, член-корреспондент Академии инженерных наук РФ, Нижегородский государственный университет

*В.К. Юлпатов*, старший научный сотрудник, Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

*В.Г. Яхно*, ведущий научный сотрудник, Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Известия высших учебных заведений

**ПРИКЛАДНАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА**

научно-технический журнал

издается с 1993 года

Выходит 6 раз в год

Том 12, № 5, 2004, Саратов

**СО Д Е Р Ж А Н И Е**

**КВАНТОВЫЙ ХАОС**

- Демиховский В.Я., Мальшиев А.И.* Квантовая диффузия Арнольда в канале с гофрированной границей в присутствии переменного электрического поля . . . . . 3

**ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ НЕЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИИ КОЛЕБАНИЙ И ВОЛН**

- Кузнецов А.П., Тюрюкина Л.В.* Синхронизация автоколебательной системы Ван дер Поля - Дуффинга короткими импульсами . . . . . 16
- Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Лёвин Ю.И.* Экспериментальное исследование сложной динамики неавтономного многорезонаторного клистронного автогенератора с запаздыванием . . . . . 32
- Попов П.В.* Влияние флуктуаций на синхронизацию автоколебаний в распределенной электронно-волновой системе взаимодействующих встречных волн . . . . . 39

**ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЙ ХАОС**

- Кузнецов А.П., Седова Ю.В., Сатаев И.Р.* Устройство пространства управляющих параметров неидентичных связанных систем с удвоениями периода . . . . . 46

**АВТОВОЛНЫ. САМООРГАНИЗАЦИЯ**

- Постнов Д.Э., Сецинский Д.В., Рязанова Л.С.* Резонансный механизм возбуждения в динамике связанных нейронов . . . . . 58

**НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА И ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ**

- Пойзнер Б.Н.* Харизма: Репликация восприятия . . . . . 72

**КНИЖНОЕ ОБОЗРЕНИЕ**

- Данилов Ю.А.* Причудливый мир науки . . . . . 98

**PERSONALIA**

- Юрий Михайлович Романовский. К 75-летию со дня рождения . . . . . 104

- Правила для авторов . . . . . 106

DEPARTMENT OF EDUCATION OF RUSSIAN FEDERATION

Izvestiya VUZ

APPLIED NONLINEAR DYNAMICS

*scientific-technical journal*

published since 1993

Published 6 times a year

Vol.12, № 5, 2004, Saratov

---

C O N T E N T S

QUANTUM CHAOS

Quantum Arnold diffusion in rippled channel at the presence of alternating electric field *V.Ya. Demikhovskii, A.I. Malyshev* . . . . . 3

APPLIED PROBLEMS OF NONLINEAR OSCILLATION AND WAVE THEORY

Synchronization of self-oscillating Van der Pol - Duffing system by the short pulses *A.P. Kuznetsov, L.V. Turukina* . . . . . 16

Experimental research of complex dynamics of on-line multycavity klystron oscillator with delay. *B.S. Dmitriev, Yu.D. Zharkov, Yu.I. Levin* . . . . . 32

Influence of noise on synchronization of auto-oscillations in electron-wave system of interacting backward waves. *P.V. Popov* . . . . . 39

DETERMINISTIC CHAOS

Structure of control parameters space of nonidentical coupled systems with period-doublings. *A.P. Kuznetsov, J.V. Sedova, I.R. Sataev* . . . . . 46

AUTOWAVES. SELF-ORGANIZATION

Resonance mechanism of excitability in dynamics of coupled neuron. *D.E. Postnov, D.V. Setsinsky, L.S. Ryazanova* . . . . . 58

NONLINEAR DYNAMICS AND HUMANITIES

Charisma: Replication of reception. Part 3. *B.N. Poizner* . . . . . 72

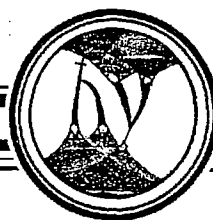
BOOK REVIEW

Marvellous world of science. *Yu.A. Danilov* . . . . . 98

PERSONALIA

To the 75th Birthday of professor Yu.M. Romanovsky . . . . . 104

Author's rules . . . . . 106



## КВАНТОВАЯ ДИФФУЗИЯ АРНОЛЬДА В КАНАЛЕ С ГОФРИРОВАННОЙ ГРАНИЦЕЙ В ПРИСУТСТВИИ ПЕРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

*В.Я. Демиховский, А.И. Мальшиев*

Изучается квантовая диффузия Арнольда в модели частицы, движущейся в двумерном канале с гофрированной границей и в переменном электрическом поле. Построен оператор эволюции системы за произвольное число периодов и рассчитана скорость квантовой диффузии вдоль одного из резонансов связи для различной амплитуды гофрировки и напряженности электрического поля. Обнаружены два квантовых эффекта: остановка диффузии на больших временах наблюдения вследствие динамической локализации и подавление диффузии в условиях, когда число квантовых состояний, попадающих в присепаратрисный стохастический слой, становится порядка единицы. При произвольных значениях параметров задачи скорость квантовой диффузии Арнольда оказывается меньше скорости классической диффузии.

Изучению классической и квантовой динамики частиц, движущихся в каналах с гофрированной границей (периодических бильярдах), посвящено большое число работ. Полученные в них результаты весьма полезны как для понимания природы квантового хаоса вообще, так и для интерпретации ряда экспериментов, проведенных в недавнее время с низкоразмерными мезоскопическими структурами. Классическая динамика и транспорт электронов в двумерном канале с синусоидально-модулированной границей изучались в работе [1], где для канала конечной длины был рассчитан коэффициент прозрачности, а также длина траектории при различных значениях глубины модуляции. Квантовые состояния в бесконечном двумерном канале переменной толщины были получены в работе [2], где соответствие между классическим и квантовым подходами устанавливалось путем построения функций Хушими. Кроме этого была исследована статистика межуровневых расстояний зонного спектра, как в регулярном, так и в хаотическом режимах. Следует отметить также работу [3], где, в частности, было установлено, что статистика собственных функций, а также локальная плотность состояний в периодических бильярдах не соответствует предсказаниям теории случайных матриц.

В настоящее время периодические бильярды, в которых движение электронов носит квазиклассический характер, могут быть реализованы экспериментально. Так, в работе [4] описана изготовленная методом электронной литографии последовательность пятнадцати квантовых точек, образующих

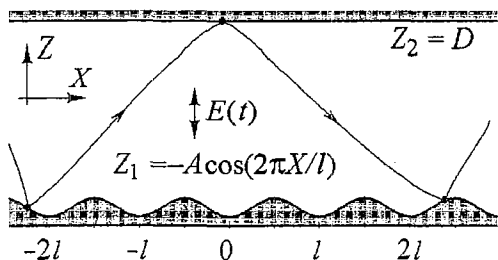


Рис. 1. Двумерный канал и траектория движения в нем материальной точки в присутствии электрического поля, направленного по осиз. В отсутствие поля движение происходит по прямым линиям

подобный бильярд. В такой системе исследовались также транспортные и магнитотранспортные процессы [5].

Настоящая работа посвящена изучению квантовой диффузии Арнольда для частицы, движущейся в двумерном канале, одна из стенок которого ровная, а другая имеет синусоидальную форму. На частицу действует также внешнее периодическое поле, ориентированное поперек канала (рис. 1). Учитывается взаимодействие трех резонансов: резонанса связи, который имеет место при

рациональном соотношении времени движения поперек канала и времени пролета одного периода гофрировки вдоль канала, а также двух резонансов системы с внешним полем. Подобная система может быть реализована экспериментально с использованием мезоскопической полупроводниковой структуры с модулированной поверхностью, помещенной в монохроматическое электромагнитное поле.

Классическая диффузия Арнольда была теоретически предсказана в 1964 году в работе [6]\*. Суть этого универсального динамического явления, как известно, заключается в следующем. В  $2N$ -мерном фазовом пространстве резонансы, определяемые соотношением  $(\mathbf{m} \cdot \omega) = 0$ , где  $\omega$  - это набор частот, а вектор  $\mathbf{m}$  имеет целочисленные компоненты, образуют  $(2N-1)$ -мерные поверхности. В то же время КАМ-поверхности являются  $N$ -мерными [7]. Условие, при котором возможно пересечение стохастических слоев, окружающих различные резонансы, можно получить из простых геометрических соображений. Для того чтобы резонансные поверхности не были изолированы друг от друга инвариантными поверхностями, необходимо, чтобы их размерности отличались более чем на единицу, то есть должно выполняться условие:  $N < (2N - 1) - 1$ .

Отсюда получаем  $N > 2$ . Таким образом, пересечение стохастических слоев различных резонансов является общим свойством систем с числом степеней свободы больше двух. Пересекаясь друг с другом, резонансы образуют в фазовом пространстве единую всюду плотную «паутину». Медленно диффундируя вдоль стохастических слоев этой сети, за достаточно долгое время система может уйти от своего начального состояния очень далеко.

Как было отмечено [6], такая нестабильность - диффузия Арнольда - является универсальной в том смысле, что не существует критической величины возмущения, необходимой для ее возникновения, хотя скорость диффузии стремится к нулю при уменьшении амплитуды возмущения.

Классическая диффузия Арнольда изучалась в связи с задачей динамики трех гравитационно взаимодействующих тел [8, 9], динамики галактик [10] и движения элементарных частиц в ускорителе [11], а также в связи с задачей о сильно возбужденном атоме водорода, находящемся в скрещенных электрическом и магнитном полях [12]. Диффузия Арнольда для классической частицы, движущейся в трехмерном канале, одна из границ которого промодулирована в двух взаимно перпендикулярных направлениях, рассматривалась в монографии Лихтенберга и Либермана [7].

\* Термин «диффузия Арнольда» был позже введен Б.В. Чириковым.

В работе [13] диффузия Арнольда изучалась в квазиклассическом приближении в так называемой модели стохастической накачки.

В наших предыдущих работах [14], выполненных совместно с Ф.М. Израилевым, изучалась квантовая диффузия Арнольда в системе, состоящей из двух взаимодействующих нелинейных осцилляторов, на один из которых действует переменное электрическое поле (аналогичная классическая система была подробно рассмотрена Чириковым [15]). Было установлено, что диффузионная эволюция квантового состояния имеет место лишь для начальных условий, лежащих в области сепаратрисы. В соответствии с классической теорией обнаружена экспоненциальная зависимость скорости диффузии от параметра, определяющего интенсивность взаимодействия осцилляторов. При малой константе связи, когда число квантовых состояний, попадающих в область классического стохастического слоя, оказывается порядка единицы, диффузия Арнольда отсутствует. Нами обнаружен также эффект подавления квантовой диффузии на больших временах, что является проявлением динамической локализации, подобной андерсеновской локализации в случайных средах.

Настоящая работа построена следующим образом. Первый раздел посвящен классической диффузии Арнольда в двумерном канале с периодически модулированной границей в присутствии переменного электрического поля. Рассчитан классический коэффициент диффузии. Во втором разделе сформулирована квантовая модель и описана процедура расчета стационарных состояний, описывающих систему на резонансе связи. Третий раздел посвящен изучению аппарата, описывающего квантовую динамику в присутствии внешнего двухчастотного электрического поля. Здесь определен оператор эволюции за период поля, рассчитаны квазиэнергетические состояния. В четвертом разделе рассчитана скорость квантовой диффузии Арнольда по резонансу связи.

## 1. Классическая система

В отсутствие внешнего поля в периоды между соударениями частица движется по прямолинейным траекториям, и ее динамику удобно изучать с помощью отображений, связывающих между собой последовательные значения углов отражения  $\alpha_n$  и координат точек отражения от нижней границы  $X_n$  (см. рис.1)

$$\begin{cases} \alpha_{n+1} = \alpha_n - 2\arctg((A2\pi/l)\sin(2\pi X_n/l)), \\ X_{n+1} = X_n + 2D\operatorname{tg}\alpha_{n+1} + A\operatorname{tg}\alpha_{n+1}(\cos(2\pi X_n/l) + \cos(2\pi X_{n+1}/l)). \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $D$  - средняя ширина канала,  $A$  - амплитуда гофрировки. Заметим, что это отображение является точным в отличие от аналогичного отображения, приведенного, например, в книге [7]. Процедура линеаризации (1) вблизи стационарных точек позволяет перейти к стандартному отображению и определить как частоты колебаний на резонансах, так и условия их перекрытия.

Для упрощения записи в дальнейшем будем использовать безразмерные переменные, измеряя все длины в единицах  $l/2\pi$ . Таким образом, далее  $X=l/2\pi x$ , где  $x$  - безразмерная продольная координата. Поступая аналогично со всеми величинами, имеющими размерность длины, введем  $d$ ,  $a$  и  $z$  - безразмерные ширину канала, амплитуду гофрировки и поперечную координату, соответственно. Для того чтобы работать в дальнейшем с безразмерными единицами, необходимо определить также единицу времени  $t_0$  и единицу массы  $m_0$ .

Рис. 2 дает представление о структуре фазового пространства системы (1).

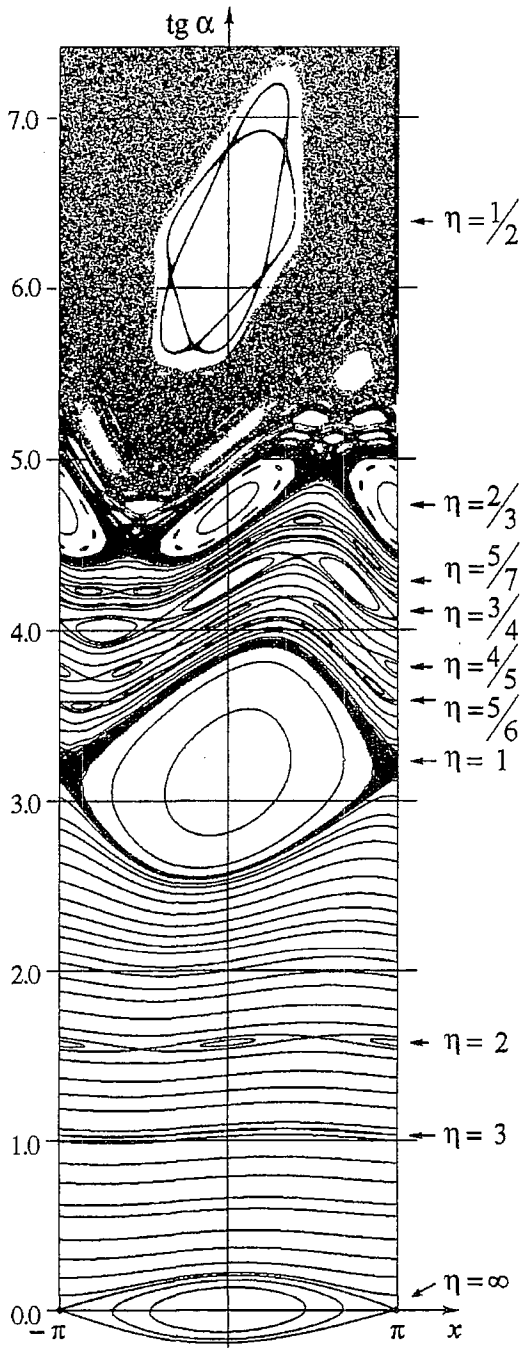


Рис. 2. Структура фазового пространства при  $\alpha=0.01$ ,  $d=1$  (верхняя полуплоскость). По вертикальной оси отложен тангенс угла отражения

связи.

Следует отметить, что в отсутствие внешнего переменного поля движение материальной точки в канале может осуществляться по одной траектории с разными скоростями. В процессе диффузии Арнольда частица остается на резонансе связи, но при этом компоненты ее скорости  $v_x$  и  $v_z$  будут приблизительно пропорционально варьироваться.

Здесь хорошо заметно множество резонансов, возникающих при рациональном соотношении времени движения поперек канала (туда и обратно)  $T_z$  и времени пролета одного периода гофрировки вдоль канала  $T_x$ . Для их характеристики удобно использовать параметр  $\eta=T_x/T_z$  (или  $\eta=\omega_z/\omega_x$ ). Заметим, что на рис. 2 показана лишь та часть фазовой плоскости, которая соответствует частицам, движущимся в положительном направлении оси  $x$ .

Рис. 3 наглядно иллюстрирует механизм диффузии Арнольда в рассматриваемой системе. Здесь показано расположение некоторых из резонансных поверхностей (в данном случае - прямых линий) в пространстве частот  $\omega_x$ ,  $\omega_z$ , которые связаны с безразмерной кинетической энергией  $E$  соотношением

$$\omega_x^2 + (\omega_z d/\pi)^2 = 2mE, \quad (2)$$

где  $m$  - масса материальной точки, принимаемая далее за единицу. Заметим, что энергия здесь измеряется в единицах  $m_0 l^2 / (2\pi t_0)^2$ . Каждый из приведенных резонансов имеет свою ширину, однако переход из стохастического слоя одного резонанса в стохастический слой другого (поперек слоя и вдоль изоэнергетической поверхности) невозможен, так как они изолированы друг от друга КАМ-поверхностями. Такой переход был бы возможен лишь при перекрытии двух резонансов в условиях сильного хаоса. Перемещение траектории вдоль стохастического слоя (на рис. 3 это направление показано двумя стрелками) невозможно в силу сохранения энергии. Однако при наличии внешнего, переменного во времени поля последнее ограничение снимается и становится возможной диффузия вдоль резонанса



Внешнее поле  $U(z,t) = -f_0 z (\cos \Omega_1 t + \cos \Omega_2 t)$  порождает свои резонансы в фазовом пространстве системы на частотах  $\omega_z = \Omega_1$  и  $\omega_z = \Omega_2$ . Их положение также показано на рис. 3 штриховыми линиями. В простейшем случае можно учитывать взаимодействие лишь трех резонансов: резонанса связи и двух резонансов системы с внешним полем. Заметим, что это лишь часть паутины Арнольда, заполняющей все фазовое пространство. Выбирая начальные условия, например, в области стохастического слоя резонанса связи  $\eta=1$ , можно наблюдать за тем, как изображающая точка диффундирует под действием поля вдоль него. Для того чтобы обеспечить стохастичность на сепаратрисах отдельных резонансов и в то же время избежать их перекрытия, мы в дальнейшем будем полагать выполненным соотношение  $f_0/a = 1000$ .

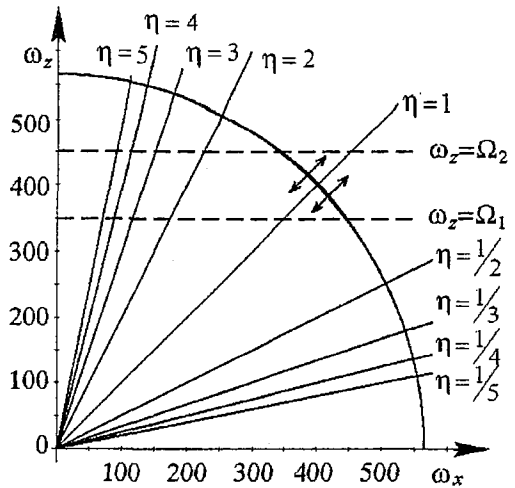


Рис. 3. Взаимное расположение резонансов связи и изоэнергетической поверхности. Здесь  $d=\pi$ ,  $m=1$ ,  $E=160000$

Для получения количественной информации о динамике системы был численно рассчитан коэффициент диффузии Арнольда. Для этого использовались отображения, в которых было учтено внешнее переменное электрическое поле, действующее на частицу в канале. Ввиду громоздкости формул мы не приводим здесь явный вид этих отображений. Обратимся сразу к результатам. Поскольку мы владеем информацией о системе лишь в те моменты времени, когда материальная точка ударяется о стенки канала, а они, вообще говоря, слабо коррелируют с периодом внешнего поля, для расчета коэффициента диффузии в безразмерных единицах имеет смысл использовать следующее соотношение:

$$D_{\lg N} = \left( \frac{\overline{(E_{i+1} - E_i)^2}}{(\Delta t_i + \Delta t_{i+1})/2} \right). \quad (4)$$

Поясним смысл входящих сюда величин. Усреднение здесь проводится в два этапа. Все время наблюдения за системой (например,  $10^5$  отображений) разбивается на  $N$  отрезков времени длительностью  $\Delta t_i$ , соответствующей, например,  $10^3$  отображений. Величина  $\bar{E}_i$  в (4) имеет смысл среднего значения энергии на одном таком интервале, а  $(\Delta t_i + \Delta t_{i+1})/2$  - расстояния по времени между соседними интервалами. Верхняя черта в формуле (4) означает усреднение выражения, стоящего в круглых скобках, по интервалам. Нижний индекс,  $\lg N$ , при коэффициенте диффузии  $D$  указывает на число временных интервалов, на которые разбито все время наблюдения. Столь громоздкая процедура определения коэффициента диффузии Арнольда позволяет снизить эффект случайных колебаний величины энергии системы [15].

Результаты наших расчетов коэффициента классической диффузии приведены ниже на рис. 7 (см. раздел 4). Отчетливо видно, что в довольно широком интервале значений амплитуды гофрировки  $a$  ( $30 < 1/a^{1/2} < 50$ ), где коэффициенты  $D_1$  и  $D_2$  практически равны друг другу, эволюция имеет диффузионный характер, причем скорость диффузии приблизительно линейно убывает с ростом величины  $1/a^{1/2}$ . Это согласуется с общей теорией, развитой в

[15]. Появление заметных различий между  $D_1$  и  $D_2$  указывает на изменение характера временной эволюции. Так, различия в области  $1/a^{1/2} > 70$  вызваны тем, что здесь ширина стохастического слоя резонанса связи становится крайне малой, отчего эволюция системы становится квазипериодической. Расхождение между  $D_1$  и  $D_2$  и их резкий рост (на порядок) в области  $1/a^{1/2} \approx 6$  связаны с перекрытием резонанса связи  $\eta=1$  с резонансами на частотах  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  в условиях сильного хаоса. Здесь в игру вступает механизм перемещения траекторий *поперек* стохастических слоев этих резонансов, на фоне которого слабая диффузия Арнольда *вдоль* слоя перестает играть заметную роль.

## 2. Квантовые стационарные состояния. Резонанс связи

Для определения стационарных состояний частицы, движущейся в двумерном канале с гофрированной границей, удобно перейти к новым координатам, в которых границы являются плоскими, а граничные условия достаточно простыми. Однако при этом гамильтониан приобретает дополнительные слагаемые, зависящие от координат и содержащие операторы дифференцирования [16].

Пусть поверхность канала в безразмерных переменных задана уравнениями  $z_1=0$  и  $z_2=d+a\cos x$ , причем потенциал внутри канала равен нулю, а на границе обращается в бесконечность. В этом случае преобразование координат, выпрямляющее границы, будет иметь вид

$$x' = x, \quad z' = z/(d + a\cos x). \quad (5)$$

Метрический тензор такого преобразования есть

$$g_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & ax' \sin x' / (d + a\cos x') \\ ax' \sin x' / (d + a\cos x') & (1 + a^2 x'^2 \sin^2 x') / (d + a\cos x')^2 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Преобразованное уравнение Шредингера будет иметь вид

$$-1/2 \frac{1}{g^{1/2}} \frac{\partial}{\partial x'_i} g^{1/2} g_{ij} \frac{\partial \psi}{\partial x'_j} = E\psi, \quad (7)$$

а условие нормировки запишется как

$$\int \psi_i^* \psi_j g^{1/2} dS' = \delta_{ij}. \quad (8)$$

Здесь и всюду далее мы положили, что безразмерная постоянная Планка равна единице. На новой плоской границе потенциал бесконечен и выполняются нулевые граничные условия:  $\psi_i(x', 0) = \psi_i(x', 1) = 0$ .

Если ограничиться линейными по  $a/d$  членами, то при записи гамильтониана можно считать, что  $x' = x$  и  $z' = z/d$ . Тогда он примет вид

$$\hat{H} = \hat{H}_0(x, z) + \hat{U}(x, z), \quad (9)$$

где

$$\hat{H}_0 = -1/2 \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right), \quad (10)$$

$$\hat{U} = \frac{a}{2d} \left( 2\cos x \frac{\partial^2}{\partial z^2} - 2\sin x \cdot z \frac{\partial^2}{\partial x \partial z} - \cos x \cdot z \frac{\partial}{\partial z} - \frac{\cos x}{2} - \sin x \frac{\partial}{\partial x} \right).$$

Чтобы найти стационарные состояния гамильтониана  $\hat{H}$ , запишем уравнение Шредингера в представлении гамильтониана  $\hat{H}_0$ . Спектр и волновые функции невозмущенной задачи имеют вид

$$E_m^0(\kappa) = 1/2 (\kappa^2 + m^2 \pi^2 / d^2), \quad \psi_{m\kappa}^0(x, z) = [2/(Ld)]^{1/2} e^{-i\kappa x} \sin(\pi m z), \quad (11)$$

где  $L$  - полная безразмерная длина канала,  $L \gg 2\pi$ .

Ввиду периодичности задачи по  $x$ , точная волновая функция должна иметь блоховский вид, где квазиволновой вектор изменяется в пределах первой зоны Бриллюэна, определяемой неравенствами  $-1/2 \leq k \leq 1/2$ . При этом будет удобно работать в схеме приведенных зон, полагая  $\kappa = k + n$ , где  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ .

Представляя волновую функцию в виде двойного ряда

$$\psi^k(x, z) = \sum_{n, m} c_{nm}^k \psi_{nm}^0(k), \quad (12)$$

запишем стационарное уравнение Шредингера (7) с учетом (9) и (10) как

$$E(k) c_{nm}^k = 1/2 [(k+n)^2 + m^2 \pi^2 / d^2] c_{nm}^k + \sum_{n', m'} U_{(k+n)m, (k+n')m'} c_{n'm'}^k, \quad (13)$$

где

$$U_{(k+n)m, (k+n')m'} = \int (\psi_{(k+n')m'}^0)^* \hat{U}(x, z) \psi_{(k+n)m}^0 dx dz = \\ = -d/(2d) \{ \pi^2 m^2 / d^2 (\delta_{n', n+1} + \delta_{n', n-1}) \delta_{m, m'} + m n' / (m^2 - m'^2) (-1)^{m+m'} [(1+2(k+n)) \delta_{n', n+1} + (1-2(k+n)) \delta_{n', n-1}] \}. \quad (14)$$

Изучаемый далее режим - режим резонанса связи  $\eta=1$  - соответствует случаю, когда выполняется условие  $\omega_{n_0} = \omega_{m_0}$ , где  $\omega_{n_0} = E_{n_0+1}(k) - E_{n_0}(k) = k + n_0 + 1/2$  и  $\omega_{m_0} = E_{m_0+1} - E_{m_0} = \pi^2 (2m_0 + 1) / (2d^2)$ . Поскольку мы будем работать в квазиклассическом режиме, полагая  $n_0 \gg 1$  и  $m_0 \gg 1$ , то можно считать, что  $\omega_{n_0} \approx k + n_0$  и  $\omega_{m_0} = \pi^2 m_0 / d^2$ . Квантовые состояния на резонансе связи удобно характеризовать новыми индексами  $r = n - n_0$  и  $p = r + (m - m_0)$ , а полную энергию отсчитывать от уровня  $E_{n_0, m_0}^0(k)$ . В этом случае уравнение Шредингера (13) примет вид

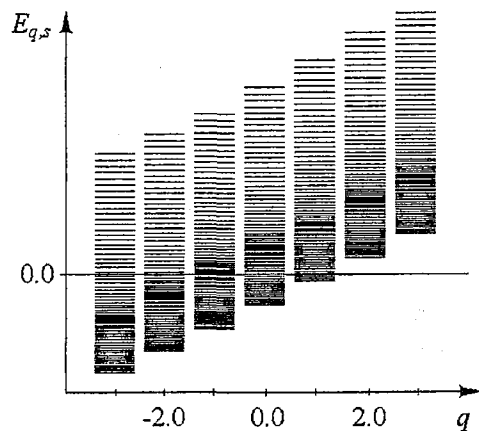
$$E(k) c_{rp}^k = p \omega_{m_0} c_{rp}^k + 1/2 (r^2 + (\pi^2 / d^2) (p-r)^2) c_{rp}^k + \sum_{r', p'} U_{k+n_0-r, p-r+m_0, k+n_0-r', p'-r'+m_0} c_{r'p'}^k.$$

Далее для простоты положим  $d=\pi$  и будем рассматривать состояния в центре зоны Бриллюэна, считая  $k=0$ . При этом  $\omega_{n_0} = n_0$ ,  $\omega_{m_0} = m_0$ , откуда следует  $n_0 = m_0$ . В этом случае уравнение Шредингера приобретает более компактный вид

$$E c_{rp} = (p m_0 + p^2 / 2 - p r + r^2) c_{rp} + \sum_{r', p'} U_{n_0-r, p-r+n_0, n_0-r', p'-r'+n_0} c_{r'p'}. \quad (15)$$

Рассчитанный с помощью (15) фрагмент энергетического спектра частицы, движущейся в канале с гофрированной границей, показан на рис. 4. Видно, что спектр состоит из отдельных групп уровней со схожей структурой. Расстояние между соседними группами составляет  $\omega_{n_0}$ . Внутри каждой группы спектр напоминает спектр Матье, что довольно типично для квантового нелинейного резонанса. Нижние уровни расположены практически эквидистантно.

Рис. 4. Фрагмент энергетического спектра системы (9) вблизи резонанса связи. Здесь  $\alpha=0.01$ ,  $d=\pi$ ,  $k=0$



тно. Точка сгущения уровней соответствует классической сепаратрисе нелинейного резонанса. Уровни, расположенные над сепаратрисной областью, крайне слабо расщеплены (с высокой степенью точности их можно считать двукратно вырожденными) и в классике соответствуют «вращениям» на резонансе в противоположных направлениях. В соответствии с такой структурой спектра стационарные состояния на резонансе связи удобно характеризовать с помощью двух индексов - номера группы  $q$  и номера уровня внутри каждой группы  $s$ . В этом случае энергетический спектр системы может быть записан в следующем виде:

$$E_{q,s} = \omega_{n_0} q + E_{q,s}^M, \quad (16)$$

где  $E_{q,s}^M$  есть Матье-подобный спектр группы с номером  $q$ .

### 3. Эволюция квантовых состояний

**3.1. Оператор эволюции.** Далее обратимся к рассмотрению эволюции состояний на резонансе связи в присутствии внешнего переменного поля. Его частоты выберем так, чтобы выполнялось соотношение  $\omega = (\Omega_1 + \Omega_2)/2$ . В численных экспериментах полагалось:  $\omega_{n_0} = 400$ ,  $\Omega_1 = 350$  и  $\Omega_2 = 450$ . Таким образом, в силу кратности частот внешнее поле, а следовательно, и гамильтониан имели период  $T = 7 \times 2\pi/\Omega_1 = 9 \times 2\pi/\Omega_2 \approx 0.125664$ .

Известно, что в том случае, когда оператор Гамильтона периодически зависит от времени, то есть  $\hat{H}(t+T) = \hat{H}(t)$ , решение нестационарного уравнения Шредингера, согласно теореме Флоке, можно представить в виде

$$\psi(x, z, t) = \exp(-i\varepsilon_Q t) u_Q(x, z, t),$$

где  $u_Q(x, z, t) = u_Q(x, z, t+T)$  - так называемая квазиэнергетическая функция,  $\varepsilon_Q$  - квазиэнергия. Квазиэнергетические функции  $u_Q(x, z, t)$  являются собственными функциями оператора эволюции  $\hat{U}(T)$  за период поля  $T$ , причем каждой такой функции соответствует собственное значение  $\exp(-i\varepsilon_Q T)$

$$\hat{U}(T) u_Q(x, z, t) = \exp(-i\varepsilon_Q T) u_Q(x, z, t). \quad (17)$$

Для исследования эволюции нашей системы необходимо найти явный вид оператора  $\hat{U}(T)$ . Для этого представим квазиэнергетическую функцию в виде двойного ряда

$$u_Q(x, z) = \sum_{q,s} A_{q,s}^Q \psi_{q,s}^k(x, z),$$

где  $\psi_{q,s}^k(x, z)$  - найденные в предыдущем разделе стационарные функции частицы в канале с гофрированной границей (12). В последней формуле у квазиэнергетической функции опущен аргумент  $t$ , поскольку она определена лишь в моменты времени, кратные периоду поля  $T$ . Последнее соотношение позволяет перейти в уравнении (17) к матричному представлению. В результате такого перехода получим, что коэффициенты  $A_{q,s}^Q$  являются собственными векторами матрицы  $U_{q,s;q',s'}(T)$ , и могут быть найдены вместе с собственными значениями путем ее диагонализации. Для построения матрицы оператора эволюции можно воспользоваться процедурой, описанной в наших предыдущих работах [14]. Ее смысл состоит в следующем. Подействуем оператором (матрицей)  $U_{q,s;q',s'}(T)$  на некоторое начальное состояние  $C_{q,s}^{s_0 q_0} = \delta_{qq'} \delta_{ss_0}$

$$U_{q,s;q',s'}(T) C_{s'q'}^{(s_0 q_0)} = U_{q,s;q_0 s_0}(T) = C_{q,s}^{q_0 s_0}. \quad (18)$$

Коэффициенты  $C_{q,s}^{q_0,s_0}$  могут быть найдены путем численного интегрирования нестационарного уравнения Шредингера на промежутке времени от 0 до  $T$ , при этом они образуют столбец матрицы  $U_{q,s;q',s'}(T)$ . Повторяя эту процедуру для различных начальных условий  $C_{q,s}^{q',s'} = \delta_{q,q'} \delta_{s,s'}$ , где  $q \neq q_0$ ,  $s \neq s_0$ , мы заполним, таким образом, всю матрицу  $U_{q,s;q',s'}(T)$ .

Приводя полученную матрицу оператора эволюции к диагональному виду, находим спектр квазиэнергий  $\epsilon_Q$  и квазиэнергетические функции  $A_{q,s}^Q$ , после чего сам оператор эволюции можно представить в виде

$$U_{q,s;q',s'}(T) = \sum_Q A_{q,s}^Q A_{q',s'}^{Q*} \exp(-i\epsilon_Q T). \quad (19)$$

Для того, чтобы вычислить оператор эволюции за  $N$  периодов внешнего поля, нужно возвести (19) в степень  $N$  и воспользоваться соотношением ортогональности квазиэнергетических функций. В результате будем иметь

$$U_{q,s;q',s'}(NT) = \sum_Q A_{q,s}^Q A_{q',s'}^{Q*} \exp(-i\epsilon_Q NT).$$

Теперь для того, чтобы проследить за эволюцией начального состояния вида  $C_{q,s}^{q_0,s_0}(0) = \delta_{q,q_0} \delta_{s,s_0}$  на сколь угодно больших временах, достаточно подействовать матрицей  $U_{q,s;q',s'}(NT)$  на функцию (столбец) начального состояния.

**3.2. Резонансное приближение.** Чтобы выполнить намеченную программу, необходимо, прежде всего, решить нестационарное уравнение Шредингера в представлении функций  $\psi_{q,s}^k(x,z)$

$$i\partial C_{q,s} / \partial t = (\omega_{n_0} q + E_{q,s}^M) C_{q,s} - f_0 \sum_{q',s'} z_{q,s;q',s'} (\cos \Omega_1 t + \cos \Omega_2 t) C_{q',s'}. \quad (20)$$

Для этого, совершая преобразование вида

$$C_{q,s}(t) = b_{q,s}(t) \exp[-i(\omega_{n_0} q + E_{q,s}^M)t], \quad (21)$$

перейдем от функций  $C_{q,s}(t)$  к функциям  $b_{q,s}(t)$ , которые удовлетворяют системе уравнений

$$i db_{q,s} / dt = -f_0 \sum_{q',s'} z_{q,s;q',s'} (\cos \Omega_1 t + \cos \Omega_2 t) b_{q',s'} \exp[-i(\omega_{n_0} (q-q') + (E_{q',s'}^M - E_{q,s}^M))t]. \quad (22)$$

Теперь в так называемом резонансном приближении в сумме по  $q'$  в правой части (22), учитывая, что  $\omega_{n_0} = (\Omega_1 + \Omega_2)/2$ , сохраним лишь медленно осциллирующие слагаемые с  $q' = q \pm 1$  и в результате придем к следующему уравнению:

$$i db_{q,s} / dt = -f_0 \cos(\delta\Omega t/2) \sum_{s'} \{ z_{q,s;q+1,s'} b_{q+1,s'} \exp[-i(E_{q+1,s'}^M - E_{q,s}^M)t] + \\ + z_{q,s;q-1,s'} b_{q-1,s'} \exp[-i(E_{q-1,s'}^M - E_{q,s}^M)t] \}, \quad (23)$$

где  $\delta\Omega = |\Omega_1 - \Omega_2|$ .

Очевидный интерес представляет строение матриц  $z_{q,s;q \pm 1,s'}$ , определяющих переходы между состояниями  $s$  и  $s'$  соседних групп уровней. На рис. 5 схематично показана внутренняя структура матрицы  $z_{0,s;1,s'}$ : шкалой интенсивности серого цвета указан порядок величин  $|z_{0,s;1,s'}|$ . В данном случае состояния внутри групп упорядочены так, что низший уровень имеет индекс  $s=0$ , а остальные уровни в порядке возрастания энергии имеют индексы  $s=1, -1, 2, -2, \dots$  и т.д.

Исходя из произведенного упорядочивания состояний внутри групп, можно сделать ряд важных замечаний. Довольно очевидно, что центр «креста» на рис. 5 соответствует переходам между самыми низкими состояниями в группах

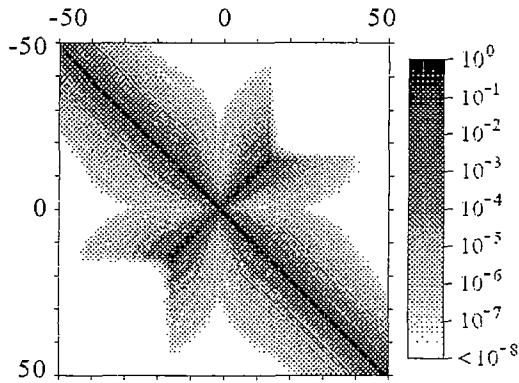


Рис. 5. Матричные элементы  $z_{q,s;q+1,s'}$ , определяющие переходы между группами  $q=0$  и  $q=1$ , то есть вдоль резонанса связи. Параметры те же, что и на рис. 4

На концах «креста» видны заметные уширения - эти области соответствуют сепаратрисной области резонанса. Величины матричных элементов здесь достаточно велики, поэтому для  $\delta$ -образного начального условия на сепаратрисе возможны практически равновероятные переходы в широкую по числу уровней область спектра соседних групп. Таким образом, легко понять, что во внешнем переменном поле переходы между присепаратрисными состояниями разных групп будут происходить с большей интенсивностью, нежели между другими состояниями. Именно данный факт и определяет скорость диффузии Арнольда в стохастическом сепаратрисном слое вдоль резонанса связи.

#### 4. Квантовая диффузия вдоль резонанса связи

В нашей модели квантовая диффузия Арнольда вдоль резонанса связи проявляется как перераспределение начального состояния по группам уровней с разными  $q$ . В этом случае количественной характеристикой скорости диффузии может служить дисперсия распределения состояний по группам. Для различных начальных состояний нами вычислялась зависимость дисперсии энергии  $(\overline{\dot{H}})^2 = \omega_{n_0}^2 \Delta_q$  от времени  $t$ , или числа периодов  $N$ . Здесь  $\Delta_q = \sum_q (q - \bar{q})^2 \sum_s |C_{q,s}|^2$  и  $\bar{q} = \sum_q q \sum_s |C_{q,s}|^2$ . На рис. 6 изображена зависимость  $\Delta_q(N)$  для трех различных начальных условий: нижняя кривая соответствует начальному состоянию, выбранному вблизи центра резонанса связи, средняя кривая - начальному условию на одном из надсепаратрисных состояний, а верхняя кривая - начальному условию, соответствующему одному из сепаратрисных уровней. График демонстрирует явное различие между эволюциями во времени данных начальных состояний. Так, если для под- и надсепаратрисных состояний величина  $\Delta_q$  квазипериодически осциллирует около некоторого значения, то для состояний, отвечающих сепаратрисе резонанса связи величина  $\Delta_q$  после некоторого времени, соответствующего классическому времени стохастизации, испытывая небольшие осцилляции, в среднем возрастает. Определение среднего наклона графика позволяет найти коэффициент квантовой диффузии Арнольда. Результаты представлены на рис. 7. Подобно тому, что было отмечено в наших предыдущих работах [14], здесь величина коэффициента квантовой диффузии  $D_q$  также оказывается на 1.5-2.0 порядка ниже классических результатов. При этом сравнении, правда, нужно иметь в виду и то, что флуктуации классического коэффициента диффузии составляют, как минимум, плюс-минус полпорядка.

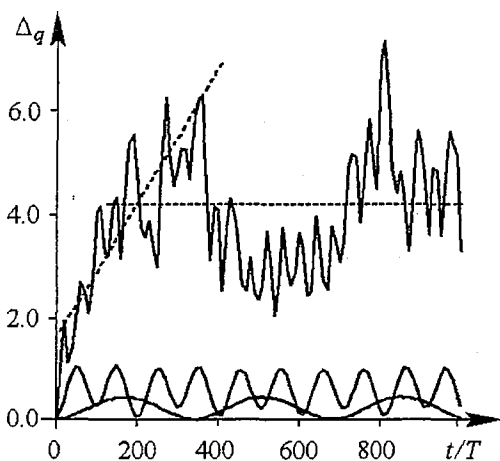


Рис. 6. Временная эволюция  $\Delta_q$  для начального условия вблизи центра резонанса  $\eta=1$  (нижняя кривая), для надсепаратрисного начального условия (средняя кривая) и для начального условия в области классической сепаратрисы (верхняя кривая). Здесь  $a=0.01$ ,  $f_0=10$

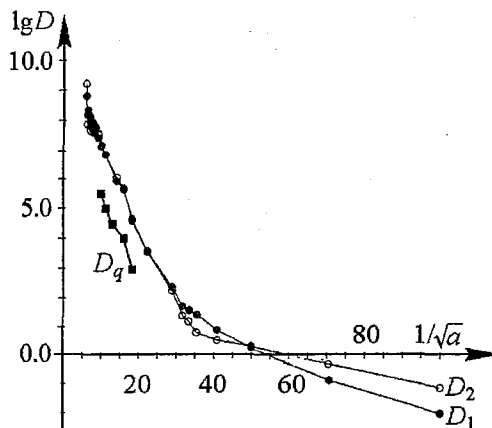


Рис. 7. Зависимость коэффициента диффузии Арнольда в классической ( $D_1$  и  $D_2$ ) и квантовой ( $D_q$ ) системах от амплитуды гофрировки одной из стенок канала  $a$ . Здесь  $E(t=0)=160000$ ,  $\Omega_1=350$ ,  $\Omega_2=450$ ,  $f_0/a=1000$ , ширина канала  $d=\pi$

Необходимо отметить также, что зависимости  $D_1$ ,  $D_2$  и  $D_q$  от величины гофрировки в области  $10 < 1/a^{1/2} < 20$  практически линейны и имеют одинаковый наклон. При  $1/a^{1/2} < 10$  расчет коэффициента квантовой диффузии, к сожалению, был крайне затруднен необходимостью учета громадного числа состояний (ввиду большой ширины всех рассматриваемых резонансов и близости границы их перекрытия). При  $1/a^{1/2} > 20$  участок линейного роста дисперсии  $\Delta_q(N)$  отсутствовал. Последнее обстоятельство, очевидно, связано с тем, что при слабой гофрировке в область классического стохастического слоя резонанса связи попадает всего 1-2 квантовых состояния. Понятно, что в этом случае говорить о какой-то «квантовой стохастизации» не имеет смысла, отчего и квантовая диффузия Арнольда отсутствует.

Из данных, приведенных на рис. 6, также следует, что через 200-300 периодов поля после своего начала квантовая диффузия останавливается и величина  $\Delta_q$  начинает осциллировать около некоторого среднего значения (на рисунке оно показано горизонтальной штриховой линией).

Такое поведение, очевидно, можно рассматривать как одно из проявлений динамической локализации, которая впервые была описана в модели одномерного ротатора с  $\delta$ -образными толчками [17, 18]. Позднее была установлена связь этого явления с локализацией Андерсона [19]. В нашем случае можно сказать, что динамическая локализация связана с локализацией квазиэнергетических сепаратрисных функций в  $q$ -пространстве. В силу этого в разложении любого начального состояния по квазиэнергетическим функциям эффективно содержится ограниченное число членов, что в конечном итоге приводит к насыщению диффузии и квазипериодическим осцилляциям. Следует подчеркнуть, что в данном случае динамическая локализация имеет место в системе с числом степеней свободы  $N=2.5$ , в то время как в случае ротатора с периодическими толчками  $N=1.5$ . Необходимо подчеркнуть также, что в нашем случае динамическая локализация наблюдается в условиях слабого хаоса на сепаратрисах, а не глобального хаоса, как в случае ротатора с  $\delta$ -толчками.

*Настоящая работа поддержана грантом РФФИ (проект № 03-02-17054), программой «Университеты России» (№ ур.01.01.022), а также ФНП «Династия».*

## Библиографический список

1. Luna-Acosta G.A., Krokhin A.A., Rodriguez M.A., Hernandez-Tejeda P.H. Classical chaos and ballistic transport in a mesoscopic channel // Phys. Rev. B. 1996. Vol. 54. P. 11410.
2. Luna-Acosta G.A., Na K., Reichl L.E., Krokhin A.A. Band structure and quantum Poincare sections of a classically chaotic quantum rippled channel // Phys. Rev. E. 1996. Vol. 53. P. 3271; Luna-Acosta G.A., Rodriguez M.A., Krokhin A.A., Na K., and Mendez R.A. Quantum and classical ballistic transport in a chaotic 2D electron channel // Rev. Mex. Fis. 1998. Vol. 44. P. 7.
3. Luna-Acosta G.A., Mendez-Bermudez J.A., Izrailev F.M. Periodic chaotic billiards: Quantum-classical correspondence in energy space // Phys. Rev. E. 2001. Vol. 64. P. 036206.
4. Kouwenhoven L.P. et al. Transport through a finite one-dimensional crystal // Phys. Rev. Lett. 1990. Vol. 65. P. 361.
5. Lent C.S., Leng M. Magnetic edge states in a corrugated quantum channel // J. Appl. Phys. 1991. Vol. 70. P. 3157.
6. Арнольд В.И. О неустойчивости динамических систем со многими степенями свободы // ДАН СССР. 1964. Т. 156. С. 9.
7. Лухтенберг А., Либерман М. Регулярная и стохастическая динамика. М.: Мир, 1984.
8. Ferraz-Mello S., Sessin W. Resonances in the motion of planets, satellites and asteroids. Sao Paulo: Brazil, 1985.
9. Reichl L.E. The Transition to Chaos. New-York: Springer-Verlag, 1992.
10. Binney J., Tremaine S. Galactic Dynamics. Princeton: Princeton University Press, 1987.
11. Nonlinear dynamics aspects of particle accelerators // Lecture Notes in Physics. Berlin: Springer-Verlag, 1986. Vol. 247.
12. Milczewski J. von, Diercksen G.H.F., Uzer T. Computation of the Arnold web for the hydrogen atom in crossed electric and magnetic fields // Phys. Rev. Lett. 1996. Vol. 76. P. 2890.
13. Leitner D.M., Wolynes P.G. Quantization of the stochastic pump model of Arnold diffusion // Phys. Rev. Lett. 1997. Vol. 79. P. 55.
14. Demikhovskii V.Ya., Izrailev F.M., and Malyshev A.I. Manifestation of Arnold diffusion in quantum systems // Phys. Rev. Lett. 2002. Vol. 88. P. 154101; Demikhovskii V.Ya., Izrailev F.M., and Malyshev A.I. Quantum Arnold diffusion in a simple nonlinear system // Phys. Rev. E. 2002. Vol. 66. P. 036211.
15. Chirikov B.V. A universal instability of many dimensional oscillator systems // Phys. Rep. 1979. Vol. 52. P. 263.
16. Демиховский В.Я., Потапенко С.Ю., Сатанин А.М. Электронный спектр в системах с периодически модулированной поверхностью // Физика и техника полупроводников. 1983. Т. 17. С. 213.
17. Casati G., Chirikov B.V., Izrailev F.M., and Ford J. Stochastic behavior of a quantum pendulum under a periodic perturbation // Lecture Notes in Physics. Springer-Verlag, Berlin. 1979. Vol. 93. P. 334.
18. Chirikov B.V., Izrailev F.M., and Shepelyansky D.L. Dynamical stochasticity in classical and quantum mechanics // Sov. Sci. Rev. 1981. Vol. 2. P. 209.
19. Fishman S. et al. Chaos, quantum recurrence and Anderson localization // Phys. Rev. Lett. 1989. Vol. 49. P. 509.

Нижегородский государственный  
университет

Поступила в редакцию 01.11.2004



## QUANTUM ARNOLD DIFFUSION IN RIPPLED CHANNEL AT THE PRESENCE OF ALTERNATING ELECTRIC FIELD

*V.Ya. Demikhovskii, A.I. Malyshev*

We study quantum Arnold diffusion for the particle moving in the rippled channel at the presence of periodic external electric field. The evolution operator for arbitrary number of field periods and diffusion rate was calculated for different ripple amplitude and electric field intensity. Two new effects which limit quantum Arnold diffusion have been observed - the diffusion suppression due to dynamical localization and diffusion stop in the case when the number of quantum states corresponding to the classical near separatrix chaotic region has the order of unity. For any model parameters the quantum diffusion coefficient prove to be smaller then classical one.



*Демиховский Валерий Яковлевич* - родился в Харькове (1938), окончил Горьковский государственный университет (1961). После окончания ГГУ работает на кафедре теоретической физики физического факультета. Защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук (1979). Основная область интересов - теория конденсированного состояния, физика низкоразмерных квантовых структур, квантовый хаос. Опубликовал более 150 научных работ, в том числе монографию «Физика квантовых низкоразмерных структур» (М.: Логос, 2000, в соавторстве с Г.А. Вугальтером). Заслуженный деятель науки Российской Федерации, Соросовский профессор.



*Мальшиев Александр Игоревич* - родился в г. Бор Нижегородской области (1978), окончил Нижегородский государственный университет (2001). Работает на кафедре теоретической физики физического факультета ННГУ в должности ассистента и учится на заочном отделении аспирантуры. Основная область научных интересов - квантовый хаос и квантовая диффузия Арнольда. Стипендиат ФНП «Династия».



## СИНХРОНИЗАЦИЯ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ВАН ДЕР ПОЛЯ - ДУФФИНГА КОРОТКИМИ ИМПУЛЬСАМИ

*А.П. Кузнецов, Л.В. Тюрюкина*

Дан краткий обзор работ, посвященных особенностям динамики неавтономных систем с предельным циклом в виде окружности и системы Ван дер Поля под действием периодической последовательности дельта-импульсов. Рассматривается динамика системы Ван дер Поля - Дуффинга под действием такой последовательности импульсов. С помощью метода медленно меняющихся амплитуд построены модели в виде двумерных и одномерных отображений. Изучено устройство плоскостей параметров период - амплитуда воздействия таких отображений и исходной дифференциальной системы. Обсуждается роль кубической нелинейности, характерной для системы Ван дер Поля - Дуффинга.

### Введение

Ситуации, когда система с предельным циклом подвержена внешнему периодическому воздействию, широко распространены в радиофизике, электронике, биологии, химии и других областях естествознания [1-7]. С точки зрения теории колебаний и теории динамических систем это задачи о возникновении квазипериодических движений и явлений синхронизации [1-9]. Среди них выделяется класс задач, в которых внешнее воздействие носит характер коротких, но значительных по амплитуде импульсов. В таких случаях внешнее воздействие можно рассматривать как периодическую последовательность  $\delta$ -функций. Ясно, что подобные задачи привлекательны не только с точки зрения приложений в радиофизических, биологических и других системах, но и существенны для теории колебаний и нелинейной динамики с позиций возможной специфики картины синхронизации. В работах [10-18] аналогичная задача была рассмотрена в рамках простейшей модели, представляющей собой укороченное уравнение с предельным циклом под воздействием периодической последовательности  $\delta$ -импульсов. Так, в работах [11-14] авторы рассматривали абстрактную модель (иногда называемую «prototypical kicked oscillator»), в рамках которой система с предельным циклом в виде окружности

$$\begin{aligned} \dot{r} &= sr(1 - r^2), \\ \dot{\phi} &= 1, \end{aligned} \tag{1}$$

где  $r=x + iy$ , подвергалась импульсному воздействию вдоль оси  $x$ , так что

$$\begin{aligned} \dot{x} &= sx(1 - x^2 - y^2) + C \sum \delta(t - nT), \\ \dot{y} &= x + sy(1 - x^2 - y^2). \end{aligned} \quad (2)$$

Система (2) является дифференциальной, но она допускает *точное* построение двумерного аналитического отображения, поскольку в промежутках между импульсами решается аналитически. Действие же  $\delta$ -импульса увеличивает переменную  $x$  на величину  $C$ , не меняя координату  $y$ . С другой стороны, для этой системы в случае, когда изображающая точка в фазовом пространстве в промежутке между импульсами успевает вернуться на предельный цикл, можно *приближенно* получить одномерное отображение окружности для фазы следующего вида:

$$\operatorname{tg} \theta_{n+1} = \sin(\theta_n + T) / (C + \cos(\theta_n T)). \quad (3)$$

Даже на первый взгляд полученное отображение существенно отличается от стандартного синус-отображения окружности [1-4, 20], что в высокой степени подтверждается и его детальным исследованием. Заметим, что приоритет в получении одномерного отображения (3) принадлежит известному канадскому ученому Леону Гласу [16, 21]. Дальнейший вклад в его изучение внесли как сам Глас [17], так и Динг с соавторами и ряд других исследователей.

В работе [11] Динг показал, что картина синхронизации в системах (2, 3) обладает рядом особенностей и отличается от той, которая характерна для синус-отображения окружности. Плоскость параметров период - амплитуда воздействия такой системы делится на две области с существенно разным поведением. Причина такого разделения объясняется тем, что возможны две качественно разные ситуации - амплитуда толчка очень велика и смещает предельный цикл так, что он перестает охватывать начало координат. Или, наоборот, амплитуда мала и предельный цикл по-прежнему охватывает начало координат. Из этого рассуждения легко находим пороговое значение амплитуды  $C=1$ , поскольку в модели (2) радиус предельного цикла равен точно единице. Весьма существенный вывод состоит в том, что при  $C < 1$  одномерное отображение для фазы монотонно, при  $C=1$  имеет кусочно-линейный характер, а при  $C > 1$  становится бимодальным. (Для наглядности ниже, на рис. 2, б мы приводим плоскость параметров период - амплитуда воздействия для системы типа (3). Хорошо видна пороговая линия  $C=1$ . Выше этой линии каскад удвоений развивается при уменьшении амплитуды воздействия, в отличие от стандартного синус-отображения окружности. При этом окна периодичности, характерные для фейгенбаумовского сценария, оказываются продолжением соответствующих языков синхронизации в области  $C < 1$ .)

В последующей работе [12] Динг детально рассмотрел динамику одномерного отображения (3) в обеих областях. Было установлено много интересных закономерностей, для их изучения мы рекомендуем обратиться к оригинальной работе. Отметим лишь, что считающаяся классической для квазипериодики универсальность [2, 20] для системы с импульсным возбуждением типа (3) оказывается несправедливой. Действуют иные закономерности, связанные с кусочно-линейным характером отображения для фазы, в отличие от кубической точки перегиба в традиционном случае [22]. В более поздних работах Дингом с соавторами высказывалась гипотеза, что картина синхронизации, характерная для модели (3) и обладающая рядом особенностей, присуща всем системам, характеризующимся в автономном режиме предельным циклом (например, для броселлятора, системы Ван дер Поля и др.) [13, 14].

Отметим еще работу [15], в которой авторы также рассматривали систему уравнений (2). Однако они не только указали на наличие областей с различным поведением, но и детально рассмотрели переходы между областями с периодическими, квазипериодическими и хаотическими режимами.

К описанным исследованиям примыкает наша работа [19], в которой рассматривалась задача о динамике осциллятора Ван дер Поля с  $\delta$ -образным периодическим воздействием:

$$\ddot{x} - (\lambda - x^2)\dot{x} + x = B\sum \delta(t - nT), \quad (5)$$

где  $x$  - динамическая переменная,  $\lambda$  - управляющий параметр,  $T$  - период следования внешних импульсов,  $B$  - их амплитуда.

Для данной системы было получено двумерное отображение

$$z_{n+1} = z_n e^{\lambda T/2 - iT} / [1 + |z_n|^2 (e^{\lambda T} - 1) / 4\lambda]^{1/2} + iB, \quad (6)$$

где  $z = x + iy$ , и одномерное

$$\theta_{n+1} = \arctg((\sin\theta_n + C) / \cos\theta_n) - T. \quad (7)$$

Здесь

$$C = B / (2\lambda^{1/2}) \quad (8)$$

имеет смысл нормированной амплитуды внешнего воздействия. Хотя отображения (6) и (7) были получены ранее для модели «prototypical kicked oscillator» [11, 12, 15], но в этих работах не рассматривалась проблема соотношения дифференциальных уравнений и модельных отображений. Напомним, что для системы (2) отображение (6) является точным, а в рамках задачи (5) - это приближенное отображение, полученное методом медленно меняющихся амплитуд. Эффективность этих отображений в таком контексте и их взаимная связь тщательно изучены в работе [19]. С другой стороны, двумерное (6) и одномерное (7) отображения, если посмотреть на них формально, представляют самостоятельный интерес и приводят к новой, по сравнению со стандартным синус-отображением окружности, картине явления синхронизации. При этом метаморфозы языков синхронизации как в исходной дифференциальной системе (5), так и в двумерном отображении (6) с ростом управляющего параметра оказались нетривиальными и интересными.

### Синхронизация короткими импульсами в системе Ван дер Поля - Дуффинга

В данной работе мы рассматриваем систему Ван дер Поля - Дуффинга под импульсным воздействием

$$\ddot{x} - (\lambda - x^2)\dot{x} + x + \beta x^3 = B\sum \delta(t - nT), \quad (9)$$

где  $x$  - динамическая переменная,  $\lambda$  - управляющий параметр,  $T$  - период следования внешних импульсов,  $B$  - их амплитуда. Заметим, что система (9) представляет собой модификацию осциллятора Ван дер Поля, в который добавлено кубическое слагаемое  $\beta x^3$ ; таким образом,  $\beta$  - это параметр нелинейности осциллятора.

Получим сначала по аналогии с [19] для рассматриваемой системы аппроксимирующее двумерное отображение. Для этого применим метод медленно меняющихся амплитуд, так как в промежутке между импульсами правая часть уравнения (9) обращается в ноль, и оно принимает вид:

$$\ddot{x} - (\lambda - x^2)\dot{x} + x + \beta x^3 = 0. \quad (10)$$

Для решения последнего уравнения представим  $x$  в виде:

$$x = 1/2 a e^{it} + 1/2 a^* e^{-it}, \quad (11)$$

где  $a(t)$  и  $a^*(t)$  - комплексная и комплексно-сопряженная медленно меняющиеся амплитуды. Метод медленно меняющихся амплитуд - классический в нелинейной динамике. Его работоспособность определяется условием реализации квазигармонических колебаний в системе, что формально достигается за счет малости управляющего параметра  $\lambda$ . Однако, как показало численное исследование системы Ван дер Поля с импульсным возбуждением [19], метод медленно меняющихся амплитуд в промежутке между импульсами хорошо работает вплоть до  $\lambda \approx 1$ .

Подставив выражение для  $x$  в уравнение (10) и учитывая дополнительное условие

$$\dot{a} e^{it} + \dot{a}^* e^{-it} = 0, \quad (12)$$

после несложных преобразований относительно медленно меняющейся комплексной амплитуды  $a(t)$  получим «укороченное» уравнение следующего вида:

$$\dot{a} - 1/2 \lambda a + 1/8 |a|^2 a - i 3/8 \beta |a|^2 a = 0. \quad (13)$$

Введем теперь действительные амплитуду  $R(t)$  и фазу  $\varphi(t)$ , используя соотношение:

$$a(t) = R(t) e^{i\varphi(t)}. \quad (14)$$

Такая подстановка позволяет выделить в «укороченном» уравнении (13) действительную и мнимую части. В итоге получаем для действительных амплитуды и фазы систему обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\dot{R} = 1/2 \lambda R - 1/8 R^3, \quad (15)$$

$$\dot{\varphi} = 3/8 \beta R^2.$$

Решив систему (15) и учитывая начальные условия, которые состоят в том, что сразу после  $n$ -го импульса

$$R(t=0) = R_n, \quad (16)$$

$$\varphi(t=0) = \varphi_n,$$

получим выражения, задающие зависимость действительной амплитуды и фазы от времени в промежутке между  $n$  и  $(n+1)$ -м импульсами:

$$R(t) = R_n e^{\lambda t/2} / [1 + R_n^2 (e^{\lambda t} - 1) / (4\lambda)]^{1/2}, \quad (17)$$

$$\varphi(t) = \varphi_n + 3/2 \beta \ln |R_n^2 (e^{\lambda t} - 1) / (4\lambda) + 1|.$$

Согласно последнему соотношению мы получили, что в рамках метода медленно меняющихся амплитуд фаза системы зависит от времени нелинейно. Это позволяет говорить о наличии в системе *фазовой нелинейности*, а так как эта

зависимость характеризуется параметром  $\beta$ , то его можно назвать параметром фазовой нелинейности. Кроме того, из второго соотношения в (17) видно, что фаза зависит и от амплитуды колебаний, то есть рассматриваемая система *неизохронна* по сравнению с ранее исследованной Гласом, Дингом и их соавторами моделью (2). При этом следует иметь в виду, что эти утверждения относятся к случаю описания системы в терминах укороченных уравнений, так как сама исходная дифференциальная система Ван дер Поля при больших значениях управляющего параметра  $\lambda$  в области релаксационных колебаний становится неизохронной. Поэтому для дифференциальной системы мы будем называть  $\beta$  просто параметром нелинейности, имея тем не менее в виду, что для квазигармонических режимов он отвечает за неизохронность и фазовую нелинейность.

Соотношения (11), (12) позволяют найти зависимости динамической переменной  $x$  и скорости ее изменения  $\dot{x}$  от времени в промежутке между импульсами. Если учесть, что к моменту начала  $(n+1)$ -го импульса проходит время, равное периоду внешнего воздействия  $T$ , а внешнее воздействие носит  $\delta$ -образный характер, то величина  $x$  после импульса не изменится, а  $\dot{x}$  получит добавку, равную амплитуде внешнего воздействия  $B$ . Тогда для динамической переменной  $x$  и скорости ее изменения  $\dot{x}$  сразу после  $(n+1)$ -го импульса получаем:

$$x_{n+1} = R_n e^{\lambda T/2} \cos(T + \varphi_n + \psi_n) / [1 + R_n^2 (e^{\lambda T} - 1) / (4\lambda)]^{1/2}, \quad (18)$$

$$\dot{x}_{n+1} = -R_n e^{\lambda T/2} \sin(T + \varphi_n + \psi_n) / [1 + R_n^2 (e^{\lambda T} - 1) / (4\lambda)]^{1/2} + B,$$

где

$$\psi_n = 3/2 \beta \ln |R_n^2 (e^{\lambda T} - 1) / (4\lambda) + 1|. \quad (19)$$

Это и есть искомое двумерное отображение, задающее зависимости динамической переменной  $x$  и скорости ее изменения  $\dot{x}$  сразу после  $(n+1)$ -го импульса от их значений сразу после  $n$ -го импульса. Их удобнее переписать в комплексной форме, введя новую комплексную переменную

$$z = x + i\dot{x}. \quad (20)$$

Тогда, подставив выражения для  $x_{n+1}$  и  $\dot{x}_{n+1}$  в (20), после несложных преобразований для комплексной переменной  $z$  получаем искомое двумерное отображение:

$$z_{n+1} = z_n e^{(\lambda T/2) - iT} e^{-i\psi_n} / [1 + |z_n|^2 (e^{\lambda T} - 1) / (4\lambda)]^{1/2} + iB, \quad (21)$$

где  $\psi_n$  определяется выражением (19), в котором вместо  $R_n^2$  стоит  $|z_n|^2$ . Подчеркнем, что поскольку отображение (21) получено в рамках метода медленно меняющихся амплитуд, то можно говорить о том, что его отличие от системы (6) состоит в учете фазовой нелинейности и неизохронности колебаний. Более того, поскольку уравнения для амплитуды и фазы (15) представляют собой фактически полную нормальную форму для бифуркаций Андронова - Хопфа, то можно говорить о том, что полученные отображения обобщают модель «prototypical kicked oscillator» (2) Гласа и Динга на случай учета неизохронности колебаний.

Получим теперь аналог одномерного отображения Гласа (7) в исследуемом случае. Для этого предположим, что в промежутке между импульсами фазовая траектория успевает вернуться на предельный цикл. Это формально отвечает выполнению условия  $\lambda T \gg 1$  [19]. (Заметим, что оно не противоречит условию применимости метода медленно меняющихся амплитуд, поскольку может

достигаться за счет больших периодов воздействия  $T$ . При этом следует иметь в виду, что в силу принятой нормировки воздействие на собственной частоте осциллятора отвечает значению  $T=2\pi$ . Подробнее эффективность различных приближений обсуждается в [19].) Теперь от двумерного отображения можно перейти к одномерному. Для этого преобразуем выражения (18), умножая числитель и знаменатель на  $e^{\lambda T/2}$  и учитывая, что  $e^{-\lambda T} \rightarrow 0$  при  $\lambda T \gg 1$ . В итоге получим:

$$x_{n+1} = 2\lambda^{1/2} \cos(T + \varphi_n + 3/2 \beta \lambda T + 3/2 \beta \ln |R_n^2 / (4\lambda)|), \quad (22)$$

$$\dot{x}_{n+1} = -2\lambda^{1/2} \sin(T + \varphi_n + 3/2 \beta \lambda T + 3/2 \beta \ln |R_n^2 / (4\lambda)|) + B.$$

Заметим, что для комплексной переменной  $z$  справедливо

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_{n+1} = -\dot{x}_{n+1}/x_{n+1} = & [\sin(T + \varphi_n + 3/2 \beta \lambda T + 3/2 \beta \ln |R_n^2 / (4\lambda)|) - \\ & - C] / \cos(T + \varphi_n + 3/2 \beta \lambda T + 3/2 \beta \ln |R_n^2 / (4\lambda)|). \end{aligned} \quad (23)$$

Здесь введена новая переменная

$$C = B / (2\lambda^{1/2}), \quad (24)$$

имеющая смысл нормированной амплитуды внешнего воздействия. Теперь сделаем замену переменных, введя новую фазу

$$\theta = -\varphi - T - 3/2 \beta \lambda T - 3/2 \beta \ln |R_n^2 / (4\lambda)|. \quad (25)$$

(Заметим, что если «старая» фаза  $\varphi$  отсчитывается по часовой стрелке, то новая фаза  $\theta$  - против.) Тогда, учитывая, что

$$R_n^2 = x_n^2 + \dot{x}_n^2 = 4\lambda(1 + 2C \sin \theta_n + C^2), \quad (26)$$

для новой фазы  $\theta$  получаем следующее одномерное отображение:

$$\theta_{n+1} = \operatorname{arctg}((\sin \theta_n + C) / \cos \theta_n) - \Omega - 3/2 \beta \ln(1 + 2C \sin \theta_n + C^2), \quad (27)$$

где

$$\Omega = T(1 + 3/2 \beta \lambda) \quad (28)$$

имеет смысл нормированного периода. Это и есть обобщение отображения Гласа (7), полученного и исследованного в работах [11-13, 17, 18, 21, 22], на неизохронный случай. В этом случае  $\beta$  играет роль параметра неизохронности, так что при  $\beta=0$  приходим к отображению Гласа. Заметим также, что отображение (27) представляет собой новую разновидность отображения окружности.

При условии малой амплитуды воздействия  $C \ll 1$ , из (27) получаем

$$\theta_{n+1} = \theta_n + \Omega - (1 + 9\beta^2)^{1/2} C \sin \theta_n. \quad (29)$$

Это стандартное синус-отображение окружности [20]. Как известно, оно может демонстрировать нетривиальную динамику (перекрывание языков синхронизации, удвоения периода, хаос), если коэффициент перед синусом больше или порядка единицы. Легко видеть из (29), что при малой нелинейности, характеризуемой параметром  $\beta$ , и условии  $C \ll 1$  такая сложная динамика невозможна. В этом случае на плоскости период  $\Omega$  - амплитуда воздействия  $C$  наблюдаются

изолированные языки синхронизации, не имеющие внутреннего устройства. Если же нелинейность велика, то соотношение (29) можно переписать в виде

$$\theta_{n+1} = \theta_n + \Omega - 3\beta C \sin \theta_n. \quad (30)$$

Таким образом, в этом случае указанное выше условие нетривиальной динамики  $3\beta C \sim 1$  может быть обеспечено даже при малых  $C$ , если  $\beta$  достаточно велико. Соответственно, при  $C \approx 1/(1+9\beta^2)^{1/2}$  функция, задающая одномерное отображение (27), будет иметь кубическую точку перегиба. В этом случае в одномерном отображении будет наблюдаться перекрытие языков синхронизации и классическая универсальность [20].

Итак, замечательное свойство отображения (27) состоит в том, что по мере роста параметра нелинейности  $\beta$  оно демонстрирует переход от свойств отображения Гласа с присущей ему универсальностью [11-13] к стандартному синус-отображению окружности и классической универсальности [20].

Мы в этой работе сосредоточимся на описании устройства плоскости параметров период - амплитуда воздействия. Из приведенного выше рассуждения и из самих результатов компьютерных исследований вытекает, что имеет смысл рассмотреть наиболее детально два случая - малых и больших значений параметра нелинейности  $\beta$ .

### Картина синхронизации в случае небольших значений параметра нелинейности $\beta$

Начнем более подробное рассмотрение со случая небольших значений параметра нелинейности  $\beta$ . Пусть  $\beta=0.2$ .

Сначала рассмотрим особенности картины синхронизации в одномерном отображении (27). Функция  $f(\theta)$ , задающая это отображение, построенная для нескольких значений нормированной амплитуды внешнего воздействия  $C$  при фиксированном значении нормированного периода, представлена на рис. 1. Видно, что одномерное отображение (27) характеризуется следующим поведением.

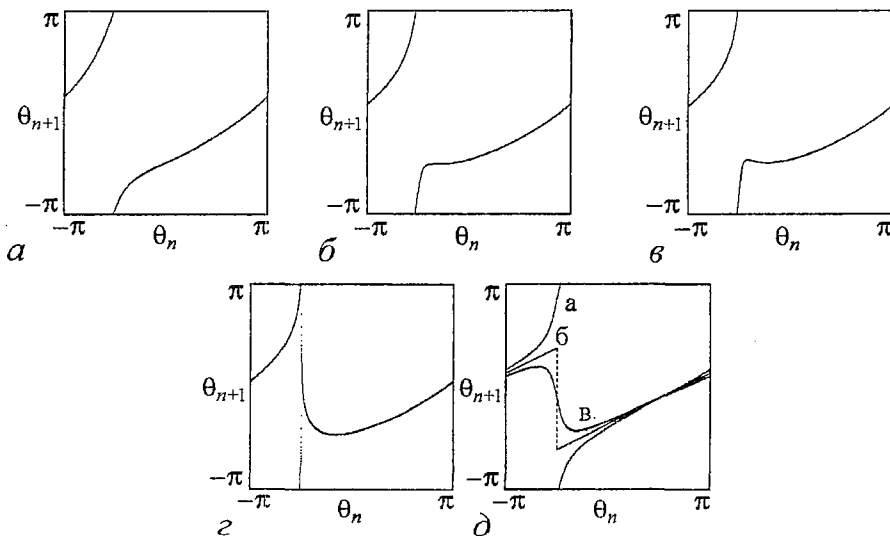


Рис. 1. Вид функции, задающей одномерное отображение (27) в случае небольших значений параметра нелинейности  $\beta=0,2$  (а-г) и в случае  $\beta=0,0$  (д). Рисунки построены при фиксированном значении нормированного периода внешнего воздействия. На рис.а-г нормированная амплитуда внешнего воздействия  $C$  принимает следующие значения: а - 0.6, б - 0.857, в - 0.9, г - 1.0; а на рис. д  $C=0.8$  (график а),  $C=1$  (график б) и  $C=1,2$  (график в)



1. При  $C < 1/(1+9\beta^2)^{1/2} \approx 0.8575$  оно монотонно возрастает и является обратимым (рис. 1, а).

2. При  $C \approx 1/(1+9\beta^2)^{1/2} \approx 0.8575$  одномерное отображение имеет кубическую точку перегиба и теряет обратимость (рис. 1, б). При этом в отображении должно наблюдаться перекрытие языков синхронизации.

3. При  $C > 1/(1+9\beta^2)^{1/2} \approx 0.8575$  оно становится необратимым и бимодальным (рис. 1, в).

4. При  $C=1$  отображение имеет особую точку нового типа (рис. 1, г). Если обратиться к виду отображения (27), то нетрудно понять, что эта особенность носит логарифмический характер - при  $C=1$  выражение под знаком логарифма может обратиться в ноль.

Таким образом, наличие даже малой нелинейности, задаваемой параметром  $\beta$ , существенно меняет свойства одномерного отображения. Для характерной линии перекрытия языков  $C=1$  меняется вид особенности - от кусочно-линейного разрыва в изохронном случае ( $\beta=0$ ) (рис. 1, д) к логарифмической особенности в неизохронном случае (рис. 1, з).

В то же время наличие такой нелинейности понижает по амплитуде воздействия  $C$  порог перекрытия языков (в нашем случае примерно до 0.85). Теперь это явление оказывается связанным с традиционной кубической точкой перегиба. (Из сказанного следует, что предельный переход к нулевой неизохронности  $\beta=0$  с позиций критических явлений и концепции универсальности, по-видимому, представляет собой самостоятельную и нетривиальную задачу, поскольку при этом встречаются два разных класса универсальности систем с квазипериодической динамикой.)

Более детальные выводы о картине синхронизации в одномерном отображении (27) можно сделать, если рассмотреть карты динамических режимов, построенные на плоскости параметров нормированные период  $\Omega$  - амплитуда  $C$  внешнего воздействия (рис. 2). На рис. 2, а представлена такая карта для значения параметра  $\beta=0.2$ , а на рис. 2, б представлена аналогичная карта в случае отсутствия нелинейности  $\beta=0$ .

Карта динамических режимов представляет собой плоскость параметров, на которой оттенками серого цвета обозначены области существования режимов различных периодов. Так, белый цвет отвечает режиму периода 1, светло серый - 2 и т.д., а черный цвет отвечает хаотическим и квазипериодическим режимам и режимам больших периодов. Для построения карты динамических режимов надо в каждой точке плоскости параметров сначала сделать предварительные итерации системы, необходимые для выхода на установившийся режим, а потом численно определить период режима [20]. Карты динамических режимов обычно строятся с

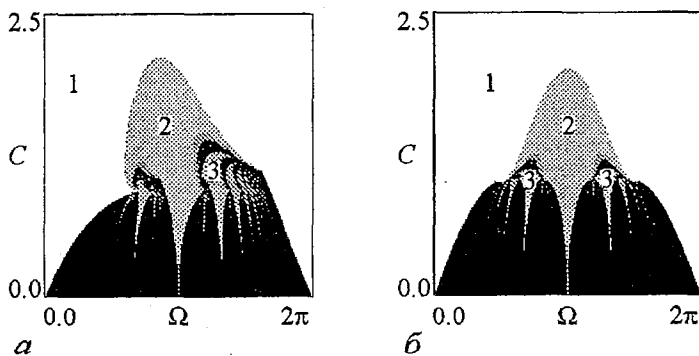


Рис. 2 Карты динамических режимов одномерного отображения (27). а - малые значения параметра нелинейности,  $\beta=0.2$ ; б -  $\beta=0.0$

наследованием начальных условий (в качестве начальных условий для динамических переменных берутся их значения, полученные в предыдущей точке), но возможно построение карт и без наследования. Это повлияет лишь на области мультистабильности. Они могут выглядеть по-разному в зависимости от того, строится ли карта с наследованием начальных условий или без. На вид областей мультистабильности влияет и направление движения по плоскости параметров. В данной работе все карты динамических режимов строились с наследованием начальных условий, а плоскость параметров сканировалась снизу вверх и слева направо.

Теперь вернемся к картам динамических режимов, представленным на рис. 2. Сопоставляя их, видим, что, как и следовало ожидать, наличие малой нелинейности, характеризуемой параметром  $\beta$ , не меняет устройство языков синхронизации у их основания. С другой стороны, даже такая малая нелинейность существенно трансформирует картину в области перекрытия языков синхронизации. Кроме того, наличие нелинейности ( $\beta \neq 0$ ) трансформирует и вершины языков синхронизации, расположенные в области  $C > 1$ : они теряют симметрию, наклоняясь в область меньших значений нормированного периода внешнего воздействия  $\Omega$ .

Теперь рассмотрим особенности картины синхронизации в двумерном отображении (21). Для него также построены карты динамических режимов на плоскости нормированные период  $\Omega$  – амплитуда  $C$  внешнего воздействия, но уже для нескольких значений управляющего параметра  $\lambda$  (рис. 3). Сравнивая их между собой и с картой динамических режимов одномерного отображения (27) (рис. 2, а), видим, что при небольших значениях параметра  $\lambda = 0.2$  (рис. 3, а) они не похожи. С ростом параметра  $\lambda$  соответствие между картами улучшается (рис. 3, б-д). Однако теперь даже при достаточно большом значении  $\lambda = 3.2$  карты для двумерного (21)

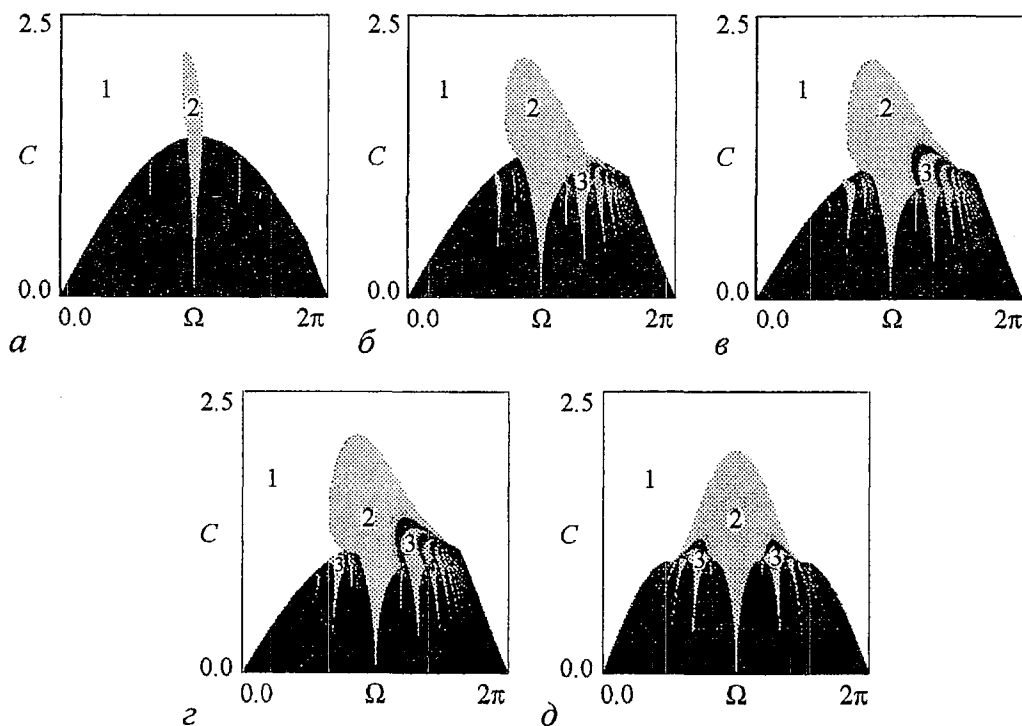


Рис. 3. Карты динамических режимов двумерного отображения (21) для случая малой нелинейности ( $\beta=0.2$ ), при следующих значениях управляющего параметра  $\lambda$ : а - 0.2, б - 1,2, в - 2.2, г - 3.2 и д - для случая  $\beta=0.0$  и  $\lambda=3.2$

(рис. 3, з) и одномерного (27) (рис. 2, а) отображений все еще отличаются, особенно в области небольших значений периода внешнего воздействия. Отметим, что в изохронном случае при больших значениях управляющего параметра их устройство одинаково во всей рассматриваемой области пространства параметров (рис. 2, б и 3, д).

Обратимся, наконец, к картине синхронизации в дифференциальной системе (9). Для нее на плоскости параметров нормированные период  $\Omega$  – амплитуда  $C$  внешнего воздействия построены карты динамических режимов (рис. 4) для тех же значений параметра  $\lambda$ , что и для двумерного отображения.

Отметим, что теперь диапазон изменения параметра  $\Omega$  увеличен. И это не случайно. Плоскости параметров всех рассматриваемых систем обладают  $2\pi$ -периодической структурой. Однако параметр, по которому наблюдается периодичность, у них разный. Так, в дифференциальной системе – это период внешнего воздействия  $T$ . В одномерном и двумерном отображениях – это нормированный период  $\Omega$ . А так как параметры  $\Omega$  и  $T$  связаны между собой соотношением (28), в которое входят параметры  $\beta$  и  $\lambda$ , то с ростом параметра  $\lambda$  для достижения одного и того же диапазона по  $T$  надо брать больший диапазон по  $\Omega$ . И действительно, число повторяющихся структур на картах дифференциальной системы (9) с ростом параметра  $\lambda$  уменьшается: при  $\lambda=0.2$  их было три (рис. 4 а), при  $\lambda=3.2$  – две (рис. 4, з). Подчеркнем, что, как видно из (28), эта особенность характерна для системы при  $\beta \neq 0$ , в случае  $\beta=0$  она исчезает и  $\Omega=T$ .

Другая особенность картины синхронизации дифференциальной системы (9) состоит в том, что если при небольших значениях управляющего параметра  $\lambda$  (рис. 4, а, б) устройство языков синхронизации и их эволюция аналогичны двумерному отображению (21) – языки несимметричны, слегка наклонены в область меньших значений периода, внутри языков появляются области удвоенного периода и хаоса и наблюдается тенденция к образованию структуры, характерной для одномерного отображения (27), то при больших значениях параметра  $\lambda$  (рис. 4, в, з) их устройство начинает отличаться – с ростом  $\lambda$  языки не только становятся уже и вытягиваются вдоль вертикальной оси, но и при этом уменьшаются области режимов удвоенного периода и хаоса внутри языков, и образование структуры, характерной для одномерного отображения, не происходит.

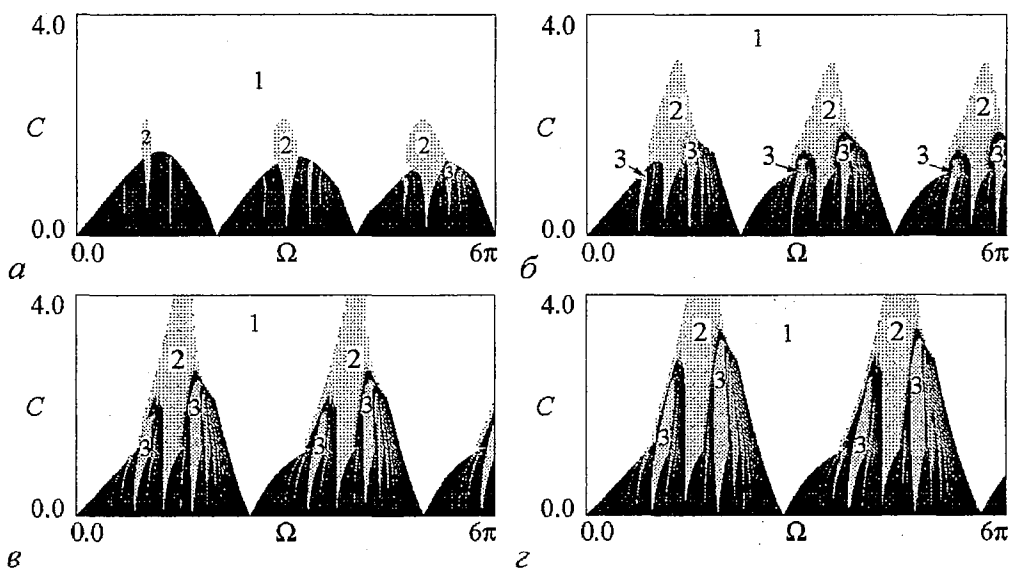


Рис. 4. Карты динамических режимов осциллятора Ван дер Поля – ДUFFинга (9) для  $\beta=0.2$  и следующих значений управляющего параметра  $\lambda$ : а - 0.2, б - 1.2, в - 2.2, з - 3.2

## Картина синхронизации в случае больших значений параметра нелинейности $\beta$

Теперь рассмотрим картину синхронизации в случае достаточно больших значений параметра нелинейности  $\beta$ . Пусть для определенности  $\beta=1$ .

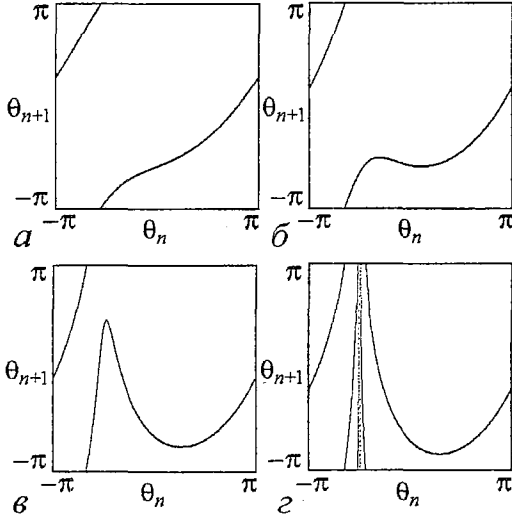
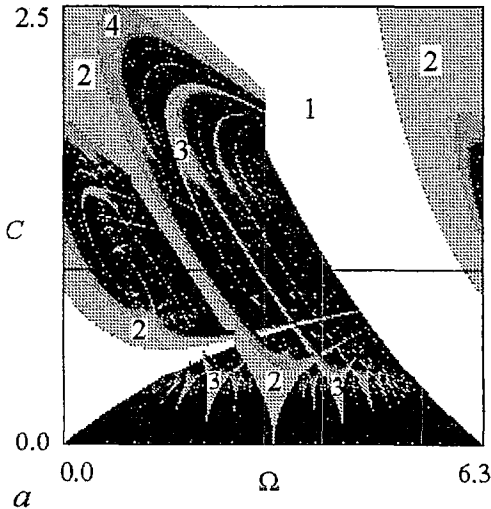


Рис. 5. Вид функции, задающей одномерное отображение (27) в случае больших значений параметра нелинейности ( $\beta=1$ ) для следующих значений нормированной амплитуды внешнего воздействия  $C$ : а - 0.2, б - 0.4, в - 0.8, г - 1.0. На всех рисунках величина нормированного периода фиксирована

таким же, как в стандартном синус-отображении окружности (рис. 6, б), и значительно трансформируется верхняя часть карты (см. рис. 6, а). Она становится более сложной: на ней теперь видны не только разнообразные по форме области режимов удвоенного периода, но и традиционные для двухпараметрических систем структуры типа «crossroad area».

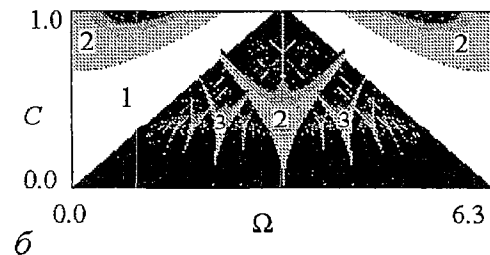
Мы теперь можем получить компьютерные подтверждения того, что в



Начнем, как и ранее, с одномерного отображения (27). На рис. 5 показан вид функции, задающей одномерное отображение (27). Видно, что с ростом параметра  $C$ , имеющего смысл нормированной амплитуды внешнего воздействия, кубическая точка перегиба появляется при меньших значениях  $C$  (см. рис. 1, б и 5, б); кроме этого, наблюдаемая при  $C=1$  логарифмическая особенность становится более выраженной (см. рис. 1, г и 5, г).

На рис. 6, а представлена карта динамических режимов одномерного отображения (27). Отметим, что теперь перекрытие языков синхронизации, а также развитие их внутренней структуры оказывается возможным уже при малых значениях нормированной амплитуды внешнего воздействия и связано с кубической точкой перегиба одномерного отображения. При этом трансформируются и языки синхронизации, устройство которых становится

Рис. 6. Карта динамических режимов: а - отображения (27) для больших значений параметра нелинейности  $\beta=1$ ; б - синус-отображения окружности (30)



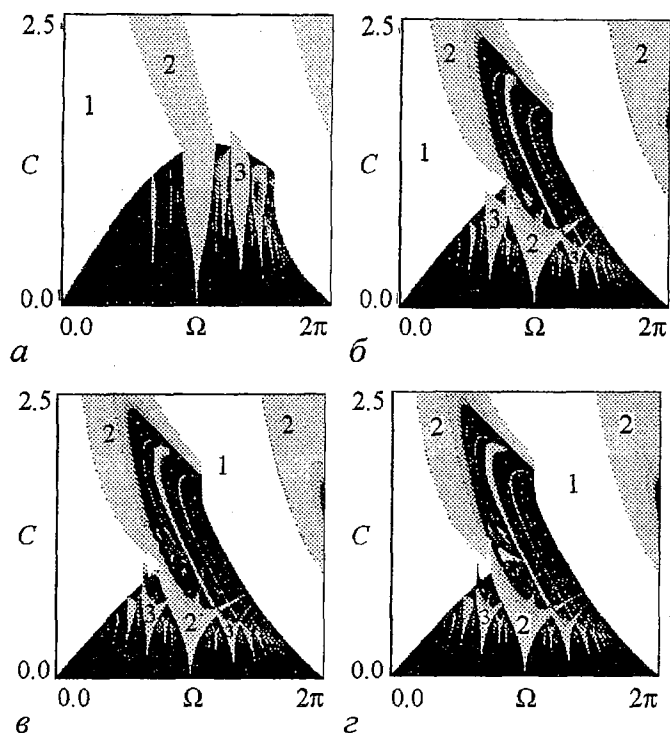


Рис. 7. Карты динамических режимов двумерного отображения (21) для  $\beta=1$  и следующих значений управляющего параметра  $\lambda$ : а - 0.2, б - 1.2, в - 2.2, г - 3.2

случае больших значений параметра  $\beta$  аппроксимация одномерного отображения (27) стандартным синус-отображением окружности (30) может дать классическую картину языков синхронизации в области их перекрытия. Это хорошо видно из сравнения рис. 6, а (карта общего отображения (27)) и рис. 6, б (карта стандартного синус-отображения (30)). Картинки построены так, чтобы сделать максимально наглядной эффективность стандартного отображения в определенной области умеренных амплитуд внешнего воздействия  $C$ . (Нам представляется, что рис. 6 имеет и определенный методический интерес, демонстрируя весьма наглядно возможную эффективность традиционного синус-отображения окружности для системы Ван дер Поля - Дуффинга для случая больших значений параметра нелинейности  $\beta$ .)

Теперь рассмотрим двумерное отображение (21). Карты динамических режимов для него на плоскости параметров нормированные период  $\Omega$  - амплитуда  $C$  внешнего воздействия представлены на рис. 7. Хорошо видно, что при небольших значениях  $\lambda=0.2$  (рис. 7, а) карта двумерного отображения (21) отличается от одномерного (27): внутри языков синхронизации не наблюдаются области удвоенного периода и хаоса, к тому же они сильнее вытянуты вдоль вертикальной оси, чем в одномерном отображении. С ростом  $\lambda$  (см. рис. 7, б-г) устройство языков синхронизации трансформируется к тому, которое наблюдается в одномерном отображении: внутри языков появились области удвоенного периода и хаоса. Однако важно отметить, что при всех значениях  $\lambda$  сходство между картами двумерного (см. рис. 7) и одномерного (см. рис. 6, а) отображений наблюдается лишь в области небольших значений нормированной амплитуды внешнего воздействия, то есть в области, где располагаются языки синхронизации.

В заключение, рассмотрим картину синхронизации в дифференциальной системе (9). Карты динамических режимов для нее на плоскости параметров нормированные период  $\Omega$  - амплитуда  $C$  внешнего воздействия для параметра

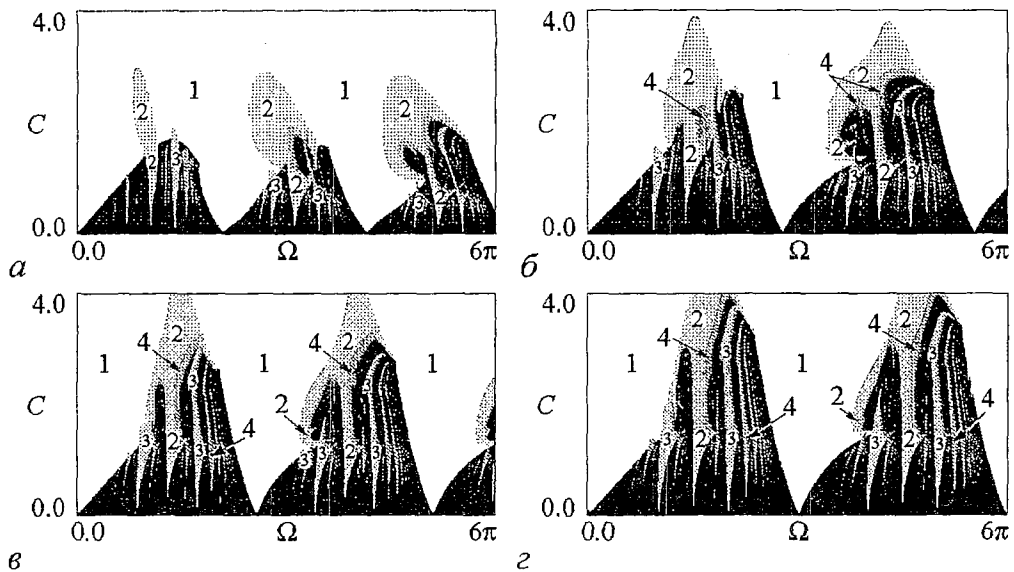


Рис. 8. Карты динамических режимов для осциллятора Ван дер Поля - Дуффинга (9) для  $\beta=1$  и следующих значений управляющего параметра  $\lambda$ : а - 0.2, б - 1.2, в - 2.2, г - 3.2

нелинейности  $\beta=1$  и нескольких значений управляющего параметра  $\lambda$  представлены на рис. 8. Сопоставляя их с картой для одномерного отображения (27) (см. рис. 6, а), можно заметить, что работоспособность одномерной аппроксимации весьма высока даже для небольших значений  $\lambda$  (особенно в области больших значений периода внешнего воздействия). Так, даже при очень малом  $\lambda=0.2$  (рис. 8, а), хотя большая часть карты дифференциальной системы и отличается от одномерного случая (см. рис. 6, а), тем не менее, для больших значений периодов воздействия между ними наблюдается неплохое сходство. При дальнейшем росте управляющего параметра  $\lambda$  (рис. 8, б) соответствие между картами улучшается. Различие состоит лишь в увеличении необходимой амплитуды воздействия, что связано с «вытягиванием» предельного цикла автономной дифференциальной системы по оси ординат в фазовом пространстве. Однако область перекрытия языков синхронизации даже в этом случае сохраняет традиционный для классической универсальности вид. Более того, при  $\lambda=2.2$  и  $\lambda=3.2$  соответствие между дифференциальной системой (9) (рис. 8, в, г) и одномерным отображением (27) (см. рис. 6, а) не ухудшается. Хотя внешне устройство языков синхронизации и выглядит иначе, но качественно оно такое же, как и в одномерном отображении.

## Выводы

В данной работе была рассмотрена синхронизация короткими импульсами в системе Ван дер Поля - Дуффинга и полученные для этой системы отображения. Представлен краткий обзор основных результатов, полученных ранее для неавтономных систем с предельным циклом в виде окружности, и системы Ван дер Поля под действием периодической последовательности дельта-импульсов. В этом случае картина синхронизации в одномерном отображении отличается от классической. Так, перекрытие языков синхронизации связано не с кубической точкой перегиба как в стандартном синус-отображении окружности, а с образованием кусочно-линейного разрыва.

Переход от системы Ван дер Поля к системе Ван дер Поля - Дуффинга позволяет получить соответствующие двумерное и одномерное модифицированные отображения. При этом параметр нелинейности осциллятора  $\beta$  в случае квазигармонических колебаний в промежутках между импульсами отвечает за неизохронность колебаний в системе. (Соответствующие уравнения для амплитуды и фазы имеют вид, отвечающий нормальной форме бифуркации Андронова - Хопфа.) Было проведено исследование полученных отображений и исходной дифференциальной системы. Показано, что в неизохронном случае даже при малом значении соответствующего параметра нелинейности  $\beta$  картина радикально меняется. При критическом значении нормированной амплитуды воздействия  $C=1$  меняется характер особенности в одномерном отображении для фазы - от кусочно-линейного разрыва к логарифмической особенности. А при несколько меньших значениях амплитуды  $C$  перекрытие языков синхронизации уже связано с кубической точкой перегиба, как и в традиционном синус-отображении окружности. Таким образом, случай малых значений параметра нелинейности  $\beta$  представляет некоторую самостоятельную задачу и требует специального анализа.

Заметим далее, что в изохронном случае переход от двумерного отображения к одномерному отображению Гласа с ростом управляющего параметра сопровождается нетривиальными метаморфозами языков синхронизации. Следствием этого является достаточно низкая эффективность одномерного отображения для описания исходной системы Ван дер Поля [19]. В случае  $\beta \neq 0$  при умеренных и больших значениях этого параметра работоспособность одномерного отображения намного выше. Оно хорошо описывает устройство языков синхронизации не только в двумерном отображении, но и в дифференциальной системе, даже при достаточно больших значениях управляющего параметра  $\lambda$ . Отметим, что при больших значениях параметра нелинейности  $\beta$  в качестве аппроксимации одномерного отображения в области небольших амплитуд внешнего воздействия эффективно стандартное синус-отображение окружности, которое правильно передает устройство плоскости параметров в области перекрытия языков синхронизации.

*Работа поддержана грантами АФГИР REC-006, № Y2-P-06-13 в рамках программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» и Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 03-02-16074.*

## Библиографический список

1. Берже П., Помо И., Видадь К. Порядок в хаосе. М.: Мир, 1991, 368с.
2. Шустер Г. Детерминированный хаос. М.: Мир, 1990. 240с.
3. Ott E. Chaos in Dynamical Systems. Cambridge University press, 1993.
4. Анищенко В.С. Сложные колебания в простых системах. М.: Наука, 1990.
5. Winfree A.T. The Geometry of Biological Time. Springer, Berlin, 1980.
6. Caldas I.L., Tasson H. Limit cycles of periodically forced oscillations // Phys. Lett. 1989. Vol. A135. P. 264.
7. Steeb W.H., Kunick A. Chaos in limit-cycle systems with external periodic excitation // Int. J. of Nonlinear Mechanics. 1987. № 22. P. 349.
8. Pikovsky A., Rosenblum M., Kurths J. Synchronization. Cambridge, 2001.
9. Pikovsky A.S., Rosenblum M.G., Osipov G.V., Kurths J. Phase synchronization of chaotic oscillators by external driving // Physica. 1997. Vol. D104. P. 219.
10. Gonzalez D.L. and Piro O. Chaos in a nonlinear driven oscillator with exact solution // Phys. Rev. Lett. 1983. Vol. 50, № 12. P. 870.

11. *Ding E.J.* Analytic treatment of periodic orbit systematics for a nonlinear driven oscillator // *Phys. Rev.* 1986. Vol. A34, № 4. P. 3547.
12. *Ding E.J.* Analytic treatment of a driven oscillator with a limit cycle // *Phys. Rev.* 1987. Vol. A35, № 6. P. 2669.
13. *Ding E.J.* Structure of parameter space for a prototype nonlinear oscillator // *Phys. Rev.* 1987. Vol. A36, № 3. P. 1488.
14. *Ding E.J.* Structure of the parameter space for the van der Pol oscillator // *Physica Scripta.* 1988. Vol.38. P. 9.
15. *Ullmann K. and Caldas I.L.* Transitions in the parameter space of a periodically forced dissipative system // *Chaos, Solitons & Fractals.* 1996. № 11. P. 1913.
16. *Keener J.P., Glass L.* Global bifurcation of a periodically forced nonlinear oscillator // *J Math. Biology.* 1984. № 21. P. 175.
17. *Glass L., Sun J.* Periodic forcing of a limit-cycle oscillator: Fixed points, Arnold tongues, and the global organization of bifurcations // *Phys. Rev.* 1994. Vol.50. № 6. P. 5077.
18. *Ding E.J. and Hemmer P.C.* Exact treatment of mode locking for a piecewise linear map // *Journal of Statistical Physics.* 1987. Vol.46, № 1-2. P. 99.
19. *А.П. Кузнецов, Л.В. Тюрюкина* Осциллятор Ван дер Поля с импульсным воздействием: от потока к отображениям // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика.* 2001. Т. 9, № 6. С. 69.
20. *Кузнецов С.П.* Динамический хаос. М.: Физматлит, 2001, 296 с.
21. *Glass L. et. al.* Global bifurcations of a periodically forced biological oscillator // *Phys. Rev. A.* 1983. № 29. P. 1348.
22. *Кузнецов А.П., Кузнецов С.П., Рыскин Н.М.* Нелинейные колебания. М.: Физматлит, 2002, 292с.

*Саратовское отделение ИРЭ РАН  
Саратовский государственный  
университет*

*Поступила в редакцию 26.01.2004  
после переработки 20.11.2004*

## SYNCHRONIZATION OF SELF-OSCILLATING VAN DER POL - DUFFING SYSTEM BY THE SHORT PULSES

*A.P. Kuznetsov, L.V. Turukina*

The brief review of the works devoted to features of dynamics of nonautonomous systems with a limit cycle as a circle and Van der Pol system under the periodic sequence of delta-pulses is given. Dynamics of Van der Pol - Duffing system under such sequence of pulses is considered. 2D and 1D maps are constructed using the method of slow amplitudes. Structure of the parameter space (period and amplitude of the pulses) of these maps and differential system is studied. The role of cubic nonlinearity typical for Van der Pol - Duffing system is discussed.





*Кузнецов Александр Петрович* - родился в 1957 году. Доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Саратовского отделения Института радиотехники и электроники РАН, профессор Саратовского госуниверситета, заведующий базовой кафедрой динамических систем СГУ в СО ИРЭ РАН. Специалист по нелинейной динамике, теории динамического хаоса и теории критических явлений. Занимается использованием идей теории катастроф и теории бифуркаций, а также развитием концепции сценариев перехода к хаосу применительно к многопараметрическим модельным и физическим нелинейным системам. Соросовский профессор (2000, 2001), научный руководитель студенческой лаборатории «Теоретическая нелинейная динамика» и заочной школы факультета нелинейных процессов. Опубликовал более 100 научных работ.

Автор нескольких оригинальных учебных курсов для факультета нелинейных процессов и лицея прикладных наук СГУ, шести учебных пособий и монографии «Нелинейные колебания» (совместно с С.П. Кузнецовым и Н.М. Рыскиным. М.: Физматлит, 2002). Член редколлегии журнала «Империя математики». E-mail: [alkuz@sgu.ru](mailto:alkuz@sgu.ru); [www.sgtn.d.tserv.ru](http://www.sgtn.d.tserv.ru)



*Тюрюкина Людмила Владимировна* – родилась в 1977 году. В 2000 году окончила факультет нелинейных процессов СГУ. Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Саратовского отделения Института радиотехники и электроники РАН, ассистент базовой кафедры динамических систем СГУ в СО ИРЭ РАН. Область научных интересов – динамический хаос, критические явления на пороге хаоса, сложная динамика нелинейных осцилляторов и автоколебательных систем с внешним периодическим воздействием в контексте сопоставления различных подходов к их описанию, синхронизация короткими импульсами и управление неустойчивыми режимами с посредством коротких импульсов. Автор 26 научных публикаций, в том числе 7 статей в российских и зарубежных журналах. Участвовала в 28 научных конференциях, в том числе в 14 международных.

Лауреат стипендии Президента РФ для студентов (1999-2000) и аспирантов (2001-2002). В 2001 и 2002 годах получила персональные гранты РФФИ для молодых исследователей (№ 01-02-06391, № 02-02-06469). Принимает участие в работе международных научных коллективов. Совершила пять научных визитов в Датский технический университет и научный визит в группу статистической физики и нелинейной динамики Потсдамского университета, Германия.



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОЖНОЙ ДИНАМИКИ НЕАВТОНОМНОГО МНОГОРЕЗОНАТОРНОГО КЛИСТРОННОГО АВТОГЕНЕРАТОРА С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

*Б.С. Дмитриев, Ю.Д. Жарков, Ю.И.Лёвин*

Исследована сложная динамика неавтономного резонансного СВЧ автогенератора на основе многорезонаторного клистрона с запаздывающей обратной связью. Показано, что с помощью внешнего гармонического сигнала возможно управление характером колебаний клистронного автогенератора. В зависимости от режима работы автономного генератора подбором частоты и мощности внешнего гармонического сигнала могут быть получены режимы динамического хаоса при одночастотных автономных колебаниях и, напротив, одночастотные колебания при хаотических автономных.

### Введение

Резонансные СВЧ автоколебательные системы с запаздывающей обратной связью (ЗОС), демонстрирующие сложную динамику и хаос, представляют интерес для целого ряда практических применений, таких как, например, СВЧ нагрев плазмы, ускорители заряженных частиц, системы передачи и обработки информации и др. Среди этих систем значительный интерес представляют СВЧ автогенераторы с ЗОС на основе многорезонаторных клистронов, отличающиеся высоким уровнем выходной мощности и КПД [1].

Наряду с исследованием сложной динамики и механизмов перехода к хаосу в автономных клистронных автоколебательных системах [2] важным представляется изучение неавтономных режимов таких систем, поскольку внешний сигнал оказывается удобным инструментом для управления сложной динамикой и хаосом [3-5].

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований неавтономной работы СВЧ автогенератора на многорезонаторном клистроне при внешнем гармоническом воздействии. Ранее подобные исследования для таких систем не проводились.

### Схема установки и результаты экспериментальных исследований

В качестве резонансной СВЧ колебательной системы с ЗОС был использован промышленный пятирезонаторный клистрон среднего уровня мощности, работающий на частоте 2800 МГц. В клистроне использованы

двухазорные объемные резонаторы с противофазным видом колебаний. Схема установки, примененной для проведения эксперимента, приведена на рис. 1. Входной и выходной резонаторы клистрона соединены коаксиальной линией обратной связи. Электрическая длина этой линии с учетом диэлектрического заполнения коаксиала составила 105 длин волн. Источники питания клистрона позволяют в широких пределах плавно менять ток и ускоряющее напряжение электронного пучка. В линию обратной связи через направленные ответвители включены кристаллический детектор для наблюдения на осциллографе огибающей сигнала, второй кристаллический детектор для наблюдения двумерной проекции фазового портрета (с помощью метода задержки), анализатор спектра для исследования полного спектра сигнала в широкой полосе частот, электронный цифровой частотомер для измерения частоты квазигармонических колебаний, поляризационный аттенюатор для измерения глубины обратной связи, термисторный измеритель мощности с дополнительным поляризационным аттенюатором и фазовращатель для плавного изменения длины цепи обратной связи. Внешнее гармоническое воздействие осуществлялось с помощью генератора стандартных сигналов (ГСС). Сигнал ГСС усиливался лампой бегущей волны и вводился в цепь обратной связи клистрона через ферритовый вентиль. За счет использования ферритовых вентилях осуществлялась подача внешнего сигнала только на входной резонатор клистрона. Нагруженная добротность входного объемного резонатора клистрона 120, выходного 112, собственная добротность резонаторов 400. Полное время запаздывания  $T$  вдоль кольца ОС, определенное с учетом длины линии ОС, времени пролета электронов в пространстве дрейфа и добротности резонаторов клистрона, составило величину порядка 0.3 мкс.

Собранная установка давала возможность изучать работу клистронного автогенератора при одновременном наблюдении огибающей сигнала, его полного

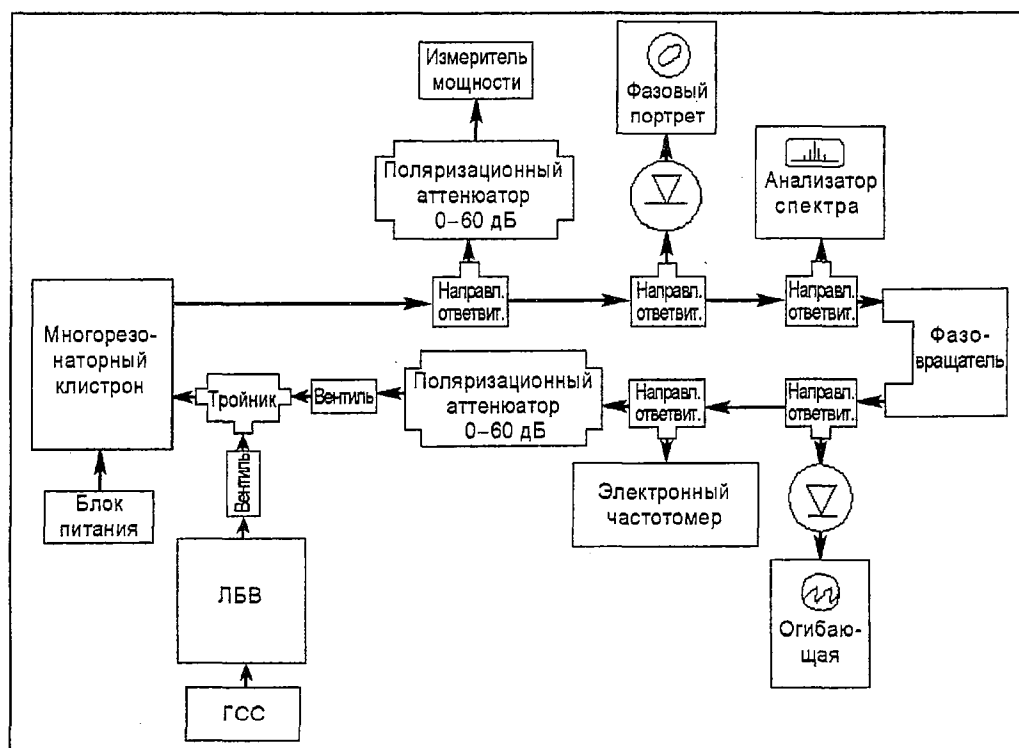


Рис. 1. Схема измерительной установки

спектра, проекции фазового портрета, измерении частоты и уровня выходной мощности как в автономном, так и в неавтономном режимах при различных частотах и уровнях мощности внешнего гармонического воздействия. Таким образом, имелась возможность идентифицировать характер колебаний в различных режимах работы автогенератора. В качестве управляющих параметров использовались ток электронного пучка, затухание в цепи ОС, амплитуда и частота внешнего сигнала. В автономном режиме работы клистронного автогенератора при увеличении тока пучка происходила последовательная смена режимов одночастотных колебаний, периодической автомодуляции, когда на фазовом портрете огибающей сигнала мягко возникал предельный цикл, а в спектре появлялись два сателлита, симметрично отстоящие от основной частоты на величину 4.2 МГц, и хаотической генерации. Переход к хаосу происходил через последовательность бифуркаций удвоения периода автомодуляции. Физической причиной возникновения автомодуляции и хаотических колебаний в клистронном автогенераторе с ЗОС, как и в других автогенераторах [6], является наличие крутого падающего участка на амплитудной характеристике, обусловленного перегруппировкой электронов при больших уровнях входного сигнала. Нелинейная перегруппировка электронов и запаздывание реакции резонансной автоколебательной системы на начало действия нелинейности и приводит к возникновению автомодуляции и к хаотизации колебаний.

Воздействие внешнего гармонического сигнала приводило к существенному изменению свойств и характера колебаний клистронного автогенератора с ЗОС в зависимости как от исходного режима автономной системы, так и от частоты и амплитуды внешнего воздействия.

Выбор исходного режима автономного генератора осуществлялся на основе амплитудной характеристики клистрона. На рис. 2 приведена экспериментально полученная зависимость выходной мощности  $P_{\text{вых}}$  (дБ) от входной мощности  $P_{\text{вх}}$  (дБ), построенная в логарифмическом масштабе. На этом же рисунке прямыми изображены линии обратной связи  $L = P_{\text{вых}} - P_{\text{вх}}$ , здесь  $L$  - затухание в цепи обратной связи в дБ. Точки пересечения прямых с амплитудной характеристикой соответствуют мощности в установившемся режиме генерации автономной системы.

Для исследования влияния внешнего гармонического сигнала на характер колебаний были выбраны следующие исходные режимы работы автономной системы.

1. Нелинейный режим, в котором еще происходит генерация простых одночастотных колебаний (при  $L = 9$  дБ и  $P_{\text{вых}} = 10$  Вт).

2. Нелинейный режим, в котором автономная система генерирует «развитой» хаос (при  $L = 0$  дБ и  $P_{\text{вых}} = 5$  Вт).

Выбор таких исходных режимов позволил наиболее наглядно продемонстрировать возможность управления характером возбужденных колебаний внешним гармоническим сигналом в клистронном автогенераторе с ЗОС.

На рис. 3 представлена карта динамических режимов неавтономного клистронного автогенератора с ЗОС на

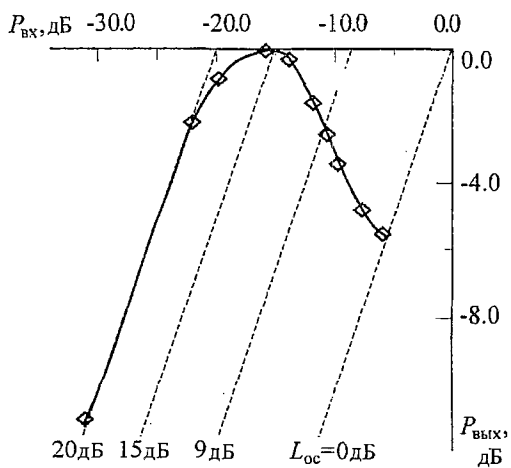


Рис. 2. Амплитудная характеристика клистрона

плоскости параметров: нормированная мощность внешнего гармонического сигнала  $P_{\text{внешн}}/P_{\text{авт}}$  ( $P_{\text{авт}}$  - мощность клистрона в автономном режиме) - нормированная частота внешнего сигнала, характеризуемая параметром  $\gamma = 2T\Delta f$ , где  $\Delta f$  - отстройка частоты внешнего сигнала от частоты автономного генератора для режима одночастотных колебаний автономной системы. Как видно из рисунка, в этом случае в результате воздействия внешнего гармонического сигнала при плавном изменении его частоты наблюдались чередование областей одиночной генерации и хаотических колебаний (темные области). Хаотические колебания возникали при целых значениях  $\gamma$  (-9,-7,-3,1,3,7,9), переход к хаосу происходил через каскад бифуркаций удвоения периода автомодуляции. На рис. 4 приведены фазовые портреты и спектры колебаний, демонстрирующие переход от одночастотных колебаний к хаотическим при изменении частоты внешнего гармонического воздействия.

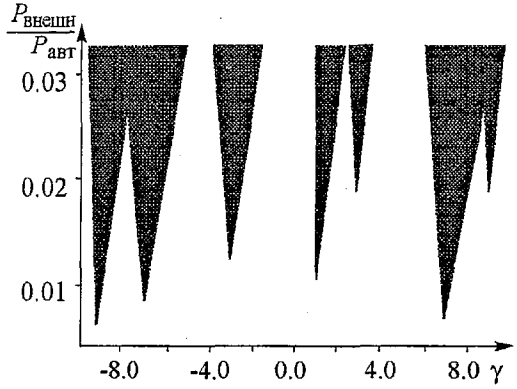


Рис. 3. Карта динамических режимов неавтономного клистронного автогенератора (автономный режим - одночастотные колебания)

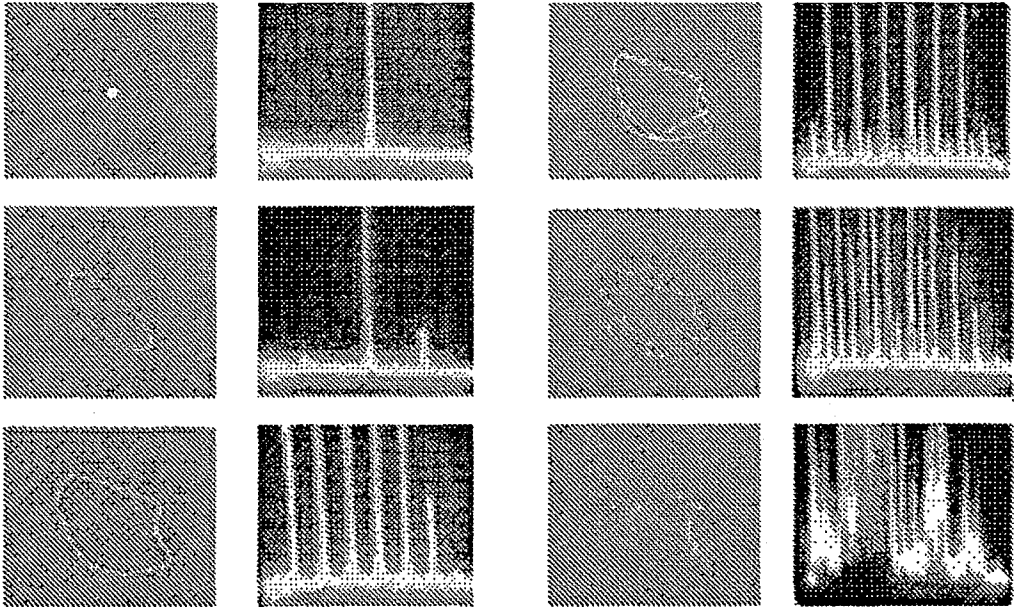


Рис. 4. Фазовые портреты и спектры колебаний клистронного автогенератора (переход от одночастотных колебаний к хаосу)

На рис. 5 показана карта динамических режимов неавтономной клистронной системы на той же плоскости параметров для режима, в котором автономная система генерирует хаотические колебания, соответствующие режиму «развитого» хаоса (рис. 6). В этом случае под воздействием внешнего гармонического сигнала при изменении его частоты возникали области одночастотной генерации (показаны на рисунке темным цветом), прежде всего, при целых значениях  $\gamma$  (-6,-5,-1,0,2,3). И в этом режиме переход от хаоса к регулярным колебаниям происходил по «обратному» сценарию - через

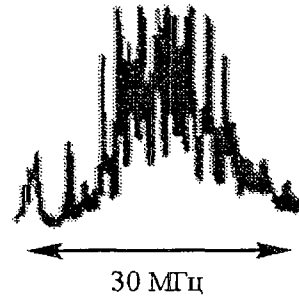
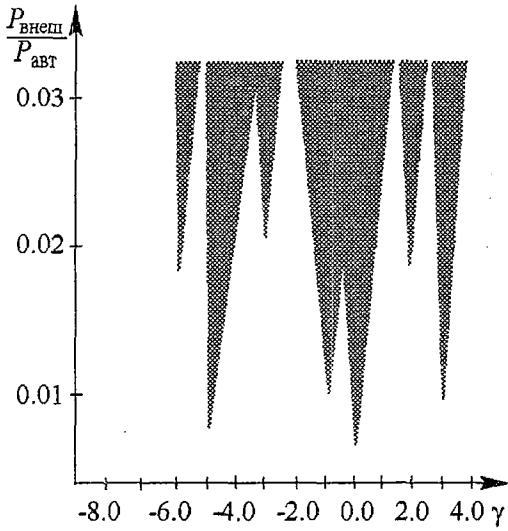


Рис. 5. Карта динамических режимов неавтономного клистронного автогенератора (автономный режим - хаотические колебания)

Рис. 6. Спектр хаотических колебаний клистронного автогенератора

последовательность бифуркаций изменения периода автомодуляции. Фазовые портреты и спектры колебаний, иллюстрирующие эти переходы, показаны на рис. 7.

Описанное поведение неавтономного клистронного автогенератора с ЗОС может быть объяснено, если принять во внимание следующие эффекты и явления: при больших входных сигналах электронный поток в клистроне перегруппирован, а реакция автоколебательной системы на начало действия нелинейности запаздывает из-за конечной длины линии обратной связи, поэтому амплитуда сигнала начинает осциллировать, и в спектре появляются сателлиты основной частоты. В этих режимах коэффициент усиления многорезонаторного клистрона оказывается сложной функцией амплитуд действующих одновременно входных

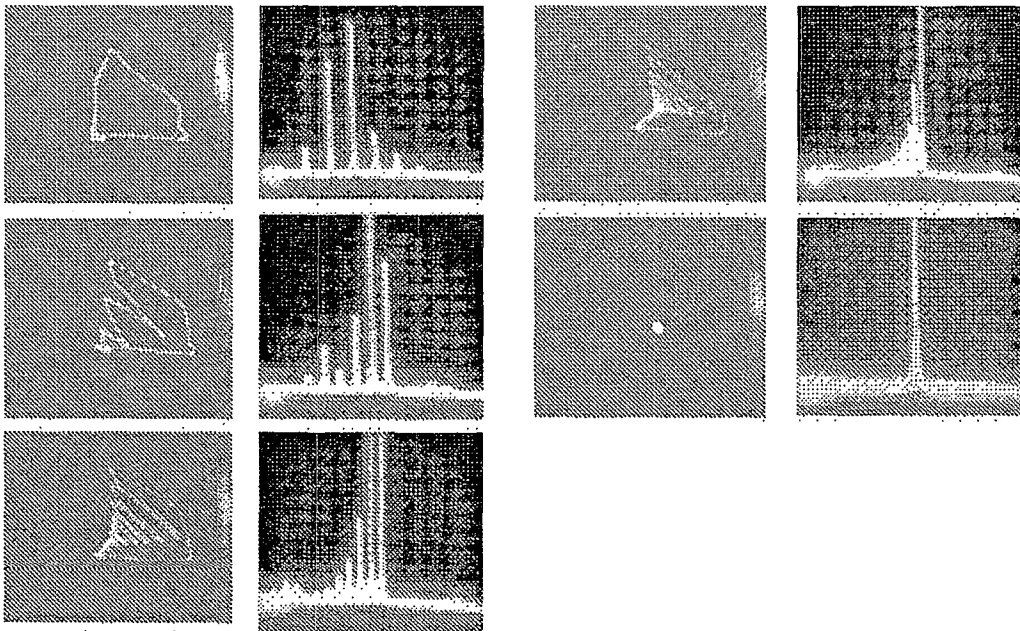


Рис. 7. Фазовые портреты и спектры колебаний клистронного автогенератора (переход от хаотических колебаний к одночастотным)

сигналов, их числа и частотных расстроек. Этот сложный режим, по-видимому, и приводит к эффектам «хаотизации» и «дехаотизации» под действием внешнего гармонического сигнала, когда частота этого воздействия оказывается в полосе пропускания резонансной системы клистрона.

### Заключение

Экспериментально показано, что в резонансных автогенераторах СВЧ с ЗОС за счет внешнего гармонического воздействия можно достичь «хаотизации» колебаний в режимах, когда автономная система генерирует одночастотные колебания. Переход к хаосу, инициированный внешним гармоническим сигналом, происходит по классическому сценарию удвоения периода автомодуляции. Наоборот, в случае, когда автономная система генерирует хаотические колебания, возможно получение простых одночастотных колебаний при подборе частоты и мощности внешнего гармонического воздействия. Таким образом, осуществляется своеобразное управление сложной динамикой клистронного автогенератора с запаздывающей обратной связью внешним гармоническим сигналом.

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проект 03-02-16269) и программы «Университеты России - Фундаментальные Исследования» (проект 01.01.049).*

### Библиографический список

1. Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Клокотов Д.В., Рыскин Н.М. Экспериментальное исследование сложной динамики в многорезонаторном клистронном автогенераторе с запаздывающей обратной связью // ЖТФ. 2003. Т.73. Вып. 7. С. 105.
2. Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Клокотов Д.В., Лёвин Ю.И. Нелинейный резонанс и переход к хаосу в резонансных СВЧ автоколебательных системах с запаздывающей обратной связью // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2004. Т. 12, № 1-2. С. 3.
3. Шалфеев В.Д., Осипов Г.В., Козлов А.К., Волковский А.Р. Хаотические колебания - генерация, синхронизация, управление // Зарубежная радиоэлектроника. 1997. № 10. С. 27.
4. Кальянов Э.В. Стохастизация и дестохастизация колебаний в неавтономных многомодовых автоколебательных системах // Радиотехника и электроника. 1982. № 12. С. 2448.
5. Козлов А.К., Шалфеев В.Д. Управление хаотическими колебаниями в генераторе с запаздывающей петлей фазовой автоподстройки // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1994. Т. 2, № 2. С.36.
6. Калинин В.И., Залогин Н.Н., Кислов В.Я. Нелинейный резонанс и стохастичность в автоколебательной системе с запаздыванием // Радиотехника и электроника. 1983. № 10. С. 2001.

Саратовский государственный  
университет

Поступила в редакцию 24.02.2004

# EXPERIMENTAL RESEARCH OF COMPLEX DYNAMICS OF ON-LINE MULTYCAVITY KLYSTRON OSCILLATOR WITH DELAY

*B.S. Dmitriev, Yu.D. Zharkov, Yu.I. Levin*

Complex dynamics of the on-line resonant microwave oscillator on a basis of multycavity klystron with delayed feedback is investigated. It is shown, that with the help of an external harmonic signal the control is probable of the klystron oscillations character. Depending on an operating mode of the autonomous generator by selection of frequency and power of an external harmonic signal the modes of dynamic chaos can be received at one-frequency autonomous oscillation and, on the contrary, one-frequency oscillation modes can be received at chaotic autonomous oscillation.



*Дмитриев Борис Савельевич* - родился в Саратове (1937), окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1959), защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1967). В настоящее время является профессором кафедры нелинейной физики СГУ. Ведет курсы общей физики (механика, молекулярная физика и термодинамика, электродинамика), радиофизики и электроники. Область научных интересов - микроволновая электроника и радиофизика, сложная динамика в СВЧ автогенераторах. Опубликовал более 120 научных и научно-методических работ и учебных пособий, 15 изобретений.



*Жарков Юрий Дмитриевич* - родился в селе Терса Еланского района Волгоградской области (1931). Окончил физический факультет СГУ (1953). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1961) и доктора (1987) в области радиофизики и электроники СВЧ. В настоящее время - профессор кафедры электроники, колебаний и волн СГУ. Область научных интересов - физическое моделирование процессов взаимодействия потоков заряженных частиц с СВЧ-полями, исследование сложной динамики в СВЧ-генераторах с запаздывающей обратной связью. Опубликовал свыше 100 работ, среди них несколько учебных пособий, 20 изобретений.



*Левин Юрий Иванович* родился в Саратове (1942), окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1965), защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1974). В настоящее время является профессором кафедры нелинейной физики СГУ, деканом факультета нелинейных процессов. Автор более 100 научных статей, научно-методических пособий и руководств.

E-mail: [levin@cas.ssu.runnet.ru](mailto:levin@cas.ssu.runnet.ru)





## **ВЛИЯНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ НА синхронизацию автоколебаний в РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОННО-ВОЛНОВОЙ СИСТЕМЕ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ВСТРЕЧНЫХ ВОЛН**

*П.В. Попов*

Рассматривается влияние флуктуаций различной интенсивности на синхронизацию колебаний в распределенной активной среде взаимодействующих встречных волн с кубичной фазовой нелинейностью. Исследуются характеристики режима синхронных колебаний и физические процессы, сопровождающие установление синхронных режимов в электронно-волновой системе со встречной волной и распределенным источником шума.

В последнее время проблема синхронизации автоколебаний в системах различной природы привлекает все большее внимание исследователей, и в связи с рядом приложений (например, при передаче информации с помощью хаотических колебаний) представляется весьма важной и актуальной [1,2]. Большинство исследований явления синхронизации автоколебаний посвящено изучению систем с малым числом степеней свободы (см., например, [1-4]). Меньше подобных работ посвящено анализу синхронизации в распределенных автоколебательных средах. Среди последних особый интерес вызывают электронно-волновые системы со встречной волной, которые являются эталонными моделями распределенных автоколебательных систем электронной природы [5].

Простейшей моделью электронно-волновой системы с обратной волной является модель, содержащая взаимодействующие встречные электронную и электромагнитную волны с кубичной фазовой нелинейностью. В электронике сверхвысоких частот такая модель описывает лампу обратной волны (ЛОВ) с поперечным полем [6]. Для ЛОВ с поперечным полем нелинейное ограничение роста амплитуд волн связано с нелинейным смещением фазы электронной волны. Отметим, что система взаимодействующих встречных волн с кубичной нелинейностью является одной из простейших нелинейных моделей электронных систем, в которых обнаруживаются сложные автоколебательные режимы [6]. Поэтому анализ явления синхронизации в такой системе важен для выяснения общих закономерностей неавтономной динамики распределенных активных сред различной природы. Отметим, что в работах [7] исследованы некоторые общие закономерности синхронизации автоколебаний в распределенных средах типа «электронный пучок - встречная (обратная) электромагнитная волна» (гирогенератор со встречной волной и ЛОВ типа О).

Однако в этих работах не изучено влияние флуктуаций на процессы в неавтономных электронно-волновых системах со встречной волной. Заметим, что все реальные системы подвержены влиянию флуктуаций различной природы и интенсивности, которые обусловлены как внешними факторами, так и свойствами самих систем. Поэтому весьма важно представлять, насколько присутствие шумов может повлиять на динамику системы и как будут изменяться характеристики синхронного режима колебаний в распределенной активной среде при изменении мощности шума.

В данной работе с помощью численного моделирования изучаются характеристики режима синхронных колебаний и физические процессы, сопровождающие установление синхронных режимов в простейшей электронно-волновой системе со встречной волной (ЛОВ с поперечным полем) и распределенным источником шума.

Взаимодействие двух встречных бездисперсных волн может быть описано в линейном приближении системой уравнений

$$\partial F/\partial \tau - \partial F/\partial \xi = -AI, \quad (1)$$

$$\partial I/\partial \tau + \partial I/\partial \xi = -AF, \quad (2)$$

где  $F=|F|\exp[j\varphi_r]$  и  $I=|I|\exp[j\varphi_l]$  - соответственно безразмерные медленно меняющиеся во времени и пространстве по сравнению с  $\exp(j(\hat{\omega}t - \hat{k}\xi))$  амплитуды электромагнитной и электронной волн;  $\tau$  и  $\xi$  - безразмерные время и координата;  $\hat{\omega}$  и  $\hat{k}$  - частота и волновое число, соответствующие точке пересечения дисперсионных кривых невзаимодействующих электронной и электромагнитной волн;  $A$  - безразмерный управляющий параметр, который можно рассматривать как безразмерную длину системы [6].

Предположим, что при изменении энергии волны  $W=\alpha I^2$  ( $\alpha$  - коэффициент пропорциональности) часть фазы электронной волны  $\varphi_r$ , пропорциональная продольной координате  $\xi$ , в первом приближении линейно зависит от энергии. Тогда уравнение (2) в системе координат со смещенным временем  $\tau'=(\tau-\xi)/2$ ,  $\xi'=\xi$  можно переписать в виде

$$\partial I/\partial \xi + jI^2 I = -AF, \quad (3)$$

где штрихи у новых переменных опущены.

Система уравнений (1) и (3) описывает процессы в системе взаимодействующих встречных волн с кубичной фазовой нелинейностью при отсутствии источника флуктуаций. В автономном режиме уравнения (1) и (3) необходимо дополнить стандартными граничными условиями  $F(\xi=1, \tau)=0$  и  $I(\xi=0, \tau)=0$ , которые отражают отсутствие соответственно электромагнитной и электронной волн на входе в систему. Анализ автономной динамики такой системы показывает, что при  $\pi/2 < A < 1.83$  в системе возбуждается одночастотный режим колебаний, который при  $A > 1.83$  сменяется многочастотными колебаниями.

Предположим теперь, что электронная волна возмущается шумом интенсивностью  $D$  распределенного шумового источника. Тогда для учета шума можно феноменологически заменить уравнение (3) на стохастическое дифференциальное уравнение с источником белого шума [8]

$$\partial I/\partial \xi + jI^2 I = -AF + (2D)^{1/2} \zeta(\xi, \tau), \quad (4)$$

где  $\langle \zeta(\xi, \tau) \rangle = 0$ ,  $\langle \zeta(\xi, \tau) \zeta(\xi', \tau') \rangle = \delta(\xi - \xi') \delta(\tau - \tau')$ .

Будем рассматривать систему под воздействием внешнего гармонического сигнала вида  $F(\xi=1, \tau) = F_0 \exp[j\Omega\tau]$  при  $A=1.7$  (в автономном случае в отсутствие шума в системе при данном значении  $A$  наблюдается режим одночастотной генерации). Внешний сигнал вводится на правой границе системы и характеризуется двумя параметрами: амплитудой  $F_0$  и отстройкой частоты  $\Omega$  от частоты  $\hat{\omega}$  «холодного» синхронизма между электромагнитной и электронной волнами [5].

Самосогласованная система уравнений (1) и (4) решалась численно. Для интегрирования уравнения возбуждения (1) использовалась разностная схема Лакса - Вендроффа второго порядка точности. При решении уравнения (4) для электронной волны использовался модифицированный метод Рунге - Кутты [9] для численного интегрирования стохастических дифференциальных уравнений. При моделировании использовалась пространственная сетка с количеством узлов  $N=500$ , что соответствует шагу по безразмерной пространственной координате  $\Delta\xi=0.002$ . Шаг по времени в соответствии с условием Куранта устойчивости разностной схемы выбирался равным  $\Delta t = \Delta\xi/2 = 0.001$ . Выбор параметров схемы подобным образом позволил корректно анализировать нестационарные режимы неавтономных колебаний при различной интенсивности  $D$  флуктуаций в пространстве взаимодействия исследуемой системы.

На рис. 1, а показаны зависимости разности частот входного управляющего сигнала  $\Omega$  и колебаний  $\omega$  электрического поля  $F$  на выходе  $\xi=0$  неавтономной активной среды, построенные для случая отсутствия ( $D=0.0$ ) и наличия флуктуаций в системе при амплитуде внешнего воздействия  $F_0/F_a=0.06$  ( $F_a$  - амплитуда выходного поля распределенной системы в автономном режиме), от нормированной отстройки частоты  $(\Omega - \omega_0)/\omega_0$  внешнего сигнала. Из рисунка следует, что при близости частоты внешнего воздействия к частоте колебаний в автономном режиме  $\omega_0$  в определенной полосе частот наблюдается режим синхронизации автоколебаний в электронной системе при наличии флуктуаций. Данный режим характеризуется условием  $\Omega = \omega$  и соответствует горизонтальному участку кривых. Отметим, что с увеличением интенсивности  $D$  флуктуаций частота  $\omega_0$  автономной генерации незначительно увеличивается, что отражается на рис. 1, а в сдвиге кривых в сторону меньших величин  $(\Omega - \omega_0)/\omega_0$ . Кроме того, изменение интенсивности флуктуаций приводит к изменению ширины полосы синхронизации распределенной активной среды.

Последнее иллюстрирует рис. 1, б, на котором показаны зависимости ширины полосы синхронизации при различных амплитудах  $F_0$  внешнего воздействия от интенсивности шума  $D$ . Во-первых, из представленных зависимостей следует, что с ростом амплитуды внешнего сигнала  $F_0$  (или мощности  $P_0 \sim |F_0|^2$ ) имеет место расширение полосы частот, в которой наблюдается режим синхронизации. Во-вторых, что более важно, ширина полосы синхронизации весьма сильно зависит от интенсивности флуктуаций  $D$  распределенного вдоль пространства взаимодействия волн источника шума. Рассмотрим данный вопрос более подробно.

При малых интенсивностях шума  $D < 0.5$  имеет место сужение области частот  $\Delta\omega$  внешнего сигнала, в которой существует синхронизация колебаний в распределенной активной среде. Последнее хорошо согласуется с результатами, описанными в литературе (см., например, [4,10]) для синхронизации систем с малым числом степеней свободы в присутствии флуктуаций. В этом случае сужение области синхронизации определяется динамикой разности фаз колебаний в исследуемой неавтономной системе и внешнего сигнала. Фаза колебаний  $\arg F(\tau)$  флуктуирует случайным образом под действием шума интенсивностью  $D$ , и с ростом величины  $D$  имеет место уменьшение области захвата частот [4,10].

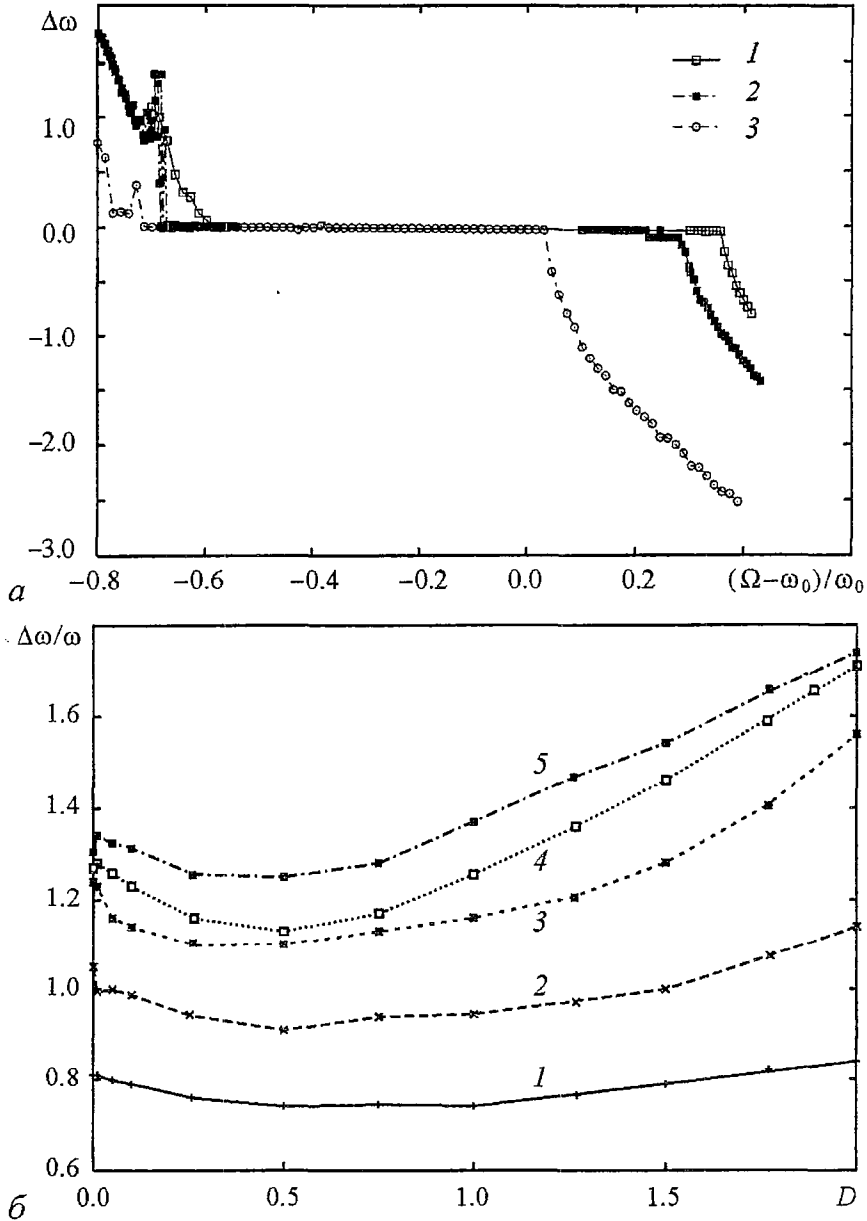


Рис. 1. а - зависимости разности частот  $\Delta\omega = \Omega - \omega$  внешнего воздействия и колебаний на выходе распределенной системы от нормированной отстройки частоты внешнего воздействия при различных интенсивностях шума  $D$ : 1 - 0,0, 2 - 0,05, 3 - 0,5; б - зависимости нормированной ширины полосы синхронизации от интенсивности шума при различных относительных амплитудах внешнего воздействия  $F_0/F_a$ : 1 - 0,06, 2 - 0,094, 3 - 0,125, 4 - 0,14, 5 - 0,16

Отметим, что воздействие шума также приводит к тому, что область синхронизации возникает только при конечной амплитуде внешнего воздействия  $F_0$  в отличие от системы без флуктуаций ( $D=0$ ), в которой синхронизация имеет место при сколь угодно малой амплитуде.

Однако с увеличением интенсивности флуктуаций ( $D > 0,5$ ) наблюдается расширение области частот, в которой имеет место синхронизация колебаний в распределенной активной системе. Такое поведение неавтономной системы представляется весьма нетипичным, так как из аналогии с поведением автоколебательных систем с малым числом степеней свободы следовало бы

ожидать с ростом интенсивности  $D$  флуктуаций дальнейшее сужение полосы захвата частот [1,4].

Рассмотрим, с чем связано такое «нетипичное» поведение распределенной неавтономной системы с ростом интенсивности  $D$  флуктуаций. На рис. 2 показаны усредненные по времени зависимости амплитуды выходного поля  $\langle |F(\xi=0, \tau)| \rangle_\tau$  от интенсивности шума  $D$  при различных амплитудах внешнего воздействия  $F_0$ , причем при построении зависимостей частота  $\Omega$  внешнего воздействия выбиралась равной частоте  $\omega_0$  автономных колебаний в системе. Кривая 1 соответствует случаю автономных колебаний в системе с флуктуациями (то есть  $F_0=0.0$ ). Из рисунка видно, что с ростом интенсивности  $D$  источника флуктуаций наблюдается уменьшение амплитуды выходного поля. Последнее означает, что с ростом интенсивности флуктуаций в системе имеет место ухудшение взаимодействия электронной и электромагнитной волн. Последнее характеризуется электронным к.п.д., который пропорционален мощности выходного сигнала:  $\eta_e \sim (|F(\xi=0)|^2 - |F_0|^2)$ . Поэтому с ростом интенсивности флуктуаций имеет место уменьшение амплитуды колебаний вдоль пространства взаимодействия системы, а следовательно, относительная мощность входного сигнала  $(F_0/|F(\xi=0)|)^2$  увеличивается. В результате в неавтономной системе с ростом интенсивности  $D$  флуктуаций наблюдается расширение полосы синхронизации, которая обусловлена не ростом мощности входного сигнала, а ухудшением взаимодействия между встречными электронной и электромагнитной волнами, и, как следствие, уменьшением амплитуды собственных колебаний в системе.

Таким образом, в работе проведен численный анализ влияния флуктуаций на синхронизацию регулярных автоколебаний в распределенной электронно-волновой среде двух встречных взаимодействующих волн с кубичной нелинейностью. Изученная система является простейшей моделью таких приборов электроники сверхвысоких частот как лампа обратной волны и гирогенератор (МЦР) со встречной волной. Поэтому можно ожидать, что полученные в работе результаты могут быть обобщены на процессы синхронизации колебаний внешним

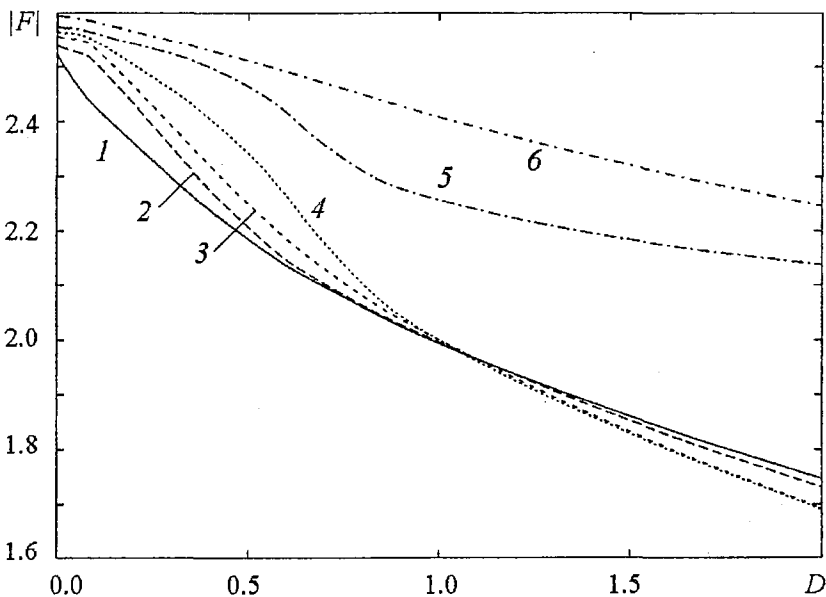


Рис. 2. Зависимости амплитуды выходного поля от интенсивности  $D$  шума при различных амплитудах  $F_0$  внешнего поля (частота внешнего поля равна частоте автономной генерации ЛОВ с поперечным полем - центр области синхронизации)  $F_0/F_a$ : 1 - 0.0, 2 - 0.03125, 3 - 0.0625, 4 - 0.078, 5 - 0.094, 6 - 0.125

сигналом в подобных электронных приборах в присутствии шумов. Среди важных особенностей поведения системы со встречной (обратной) волной и внешним источником шума следует отметить расширение полосы синхронизации при больших интенсивностях шума (с одновременным уменьшением амплитуды выходного поля).

Автор благодарит профессора А.П.Четверикова за полезные обсуждения и доцентов А.А.Короновского и А.Е.Храмова за помощь в выполнении работы.

*Работа выполнена при поддержке программы «Университеты России - Фундаментальные исследования».*

### **Библиографический список**

1. Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю. Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. М.: Техносфера, 2003.
2. Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002.
3. Блехман И.И. Синхронизация в природе и технике. М.: Наука, 1981.
4. Ланда П.С. Автоколебания в системах с конечным числом степеней свободы. М.: Наука, 1980.
5. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 1. М.: Физматлит, 2003.
6. Четвериков А.П. // Изв. РАН. Сер. физич. 1994. Т. 58, № 8. С. 171; Четвериков А.П. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1994. Т. 2, № 5. С. 46.
7. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28, № 18. С. 34; Короновский А.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е. // Изв.вузов. Радиофизика. 2002. Т. XLV, № 9. С. 773; Трубецков Д.И., Храмов А.Е. // Известия РАН. Сер. физич. 2002. Т. 66, № 12. С. 1761; Трубецков Д.И., Храмов А.Е. // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48, № 1. С. 116; Храмов А.Е. // Изв. РАН. Сер. физ. 2003. Т. 67, № 12. С. 1674; Grudiev A., Sch ünemann K. // Phys. Rev. E. 2003. Т. 68. С. 016501.
8. Фролова Н.Б., Четвериков А.П. // Изв.вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2002. Т. 10, № 5. С. 50.
9. Никитин Н.Н., Разевиг В.Д. Методы цифрового моделирования стохастических дифференциальных уравнений и оценка их погрешностей // ЖВМиМФ. 1978. Т. 18. С. 106.
10. Малахов А.Н. Флуктуации в автоколебательных системах. М.: Наука, 1968.
11. Anishchenko V.S. et al. // Int. J. Bifurc. Chaos. 2000. Т. 10. С. 2339.

Саратовский государственный  
университет

Поступила в редакцию 12.05.2004

## **INFLUENCE OF NOISE ON SYNCHRONIZATION OF AUTO-OSCILLATIONS IN ELECTRON-WAVE SYSTEM OF INTERACTING BACKWARD WAVES**

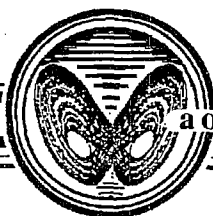
*P.V. Popov*

The influence of noise with different amplitude upon the auto-oscillations in active distributed electron-wave system with cubic phase nonlinearity is considered.

Characteristics of synchronous oscillations and physical processes, attended the establishment of synchronous oscillations in the electron-wave system with backward wave and distributed white noise, are analyzed.



*Попов Павел Вячеславович* - родился в 1984 году. Студент 4 курса факультета нелинейных процессов Саратовского государственного университета. Научные интересы: синхронизация в распределенных автоколебательных системах электронно-волновой природы. Лауреат Фонда некоммерческих программ "Династия" и Международного центра фундаментальной физики. Автор 3 статей в отечественных и зарубежных журналах.



## УСТРОЙСТВО ПРОСТРАНСТВА УПРАВЛЯЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ НЕИДЕНТИЧНЫХ СВЯЗАННЫХ СИСТЕМ С УДВОЕНИЯМИ ПЕРИОДА

*А.П. Кузнецов, Ю.В. Седова, И.Р. Сатаев*

Обсуждается устройство плоскости управляющих параметров неидентичных связанных логистических отображений. Найден критический размерности два, связанные с накоплениями бифуркационных ситуаций коразмерности два. Обсуждается также устройство плоскости управляющих параметров двух связанных осцилляторов Дуффинга.

### Введение

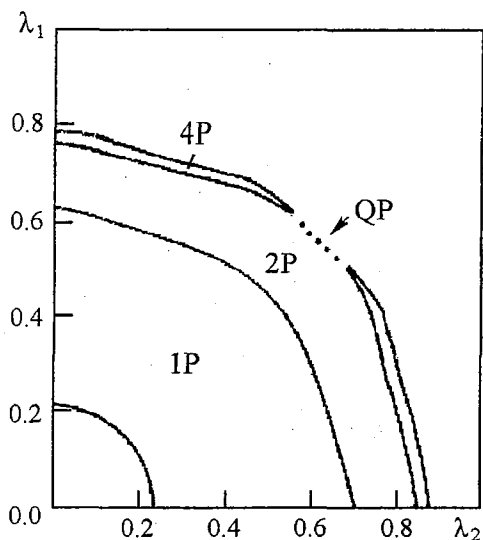
Большое количество работ, опубликованных в последнее время, посвящено сложной динамике связанных систем, демонстрирующих переход к хаосу через удвоения периода (см., например, монографии [1,2] и цитированную в них литературу). В подавляющем количестве работ, однако, рассматриваются идентичные подсистемы. Среди работ по динамике неидентичных подсистем имеется работа [3], которая нацелена именно на изучение устройства плоскости параметров, управляющих удвоениями периода. В работе [3] показано, что введение неидентичности в систему двух связанных логистических отображений следующего вида

$$\begin{cases} x_{n+1} = 4\lambda_1 x_n (1 - x_n) + \gamma y_n, \\ y_{n+1} = 4\lambda_2 y_n (\lambda - y_n) + \gamma x_n \end{cases} \quad (1)$$

( $x, y$  - динамические переменные,  $\lambda_1, \lambda_2$  - параметры, отвечающие за удвоения,  $\gamma$  - параметр связи) приводит к возможности сосуществования сценариев перехода к хаосу через каскад бифуркаций удвоения периода и через разрушение квазипериодического режима (рис. 1). Однако детального изучения возможных бифуркаций и весьма многообразных феноменов нелинейной динамики в такой системе проведено не было. В данной работе мы постарались, по крайней мере отчасти, восполнить этот пробел и более тщательно изучить устройство пространства управляющих параметров неидентичных связанных систем с удвоениями периода. В центре внимания следующие вопросы: как устроена область квазипериодики QR; каковы особенности устройства языков синхронизации на плоскости управляющих параметров подсистем и что происходит с ними при вариации величины связи; какие типы критического



Рис. 1. Границы бифуркационных линий для отображения вида (1) на плоскости параметров  $(\lambda_2, \lambda_1)$  [3]. Пунктирная линия указывает границу между областью существования цикла периода 2 и областью QP с квазипериодическим поведением. 1P, 2P и 4P - области существования циклов периода 1, 2 и 4, соответственно. Параметр связи  $\epsilon=0.4$



поведения характерны на плоскости параметров, где «встречаются» сценарии перехода к хаосу через удвоения периода и через разрушение квазипериодического движения; какие новые типы критичности возможны в такой системе? Еще один существенный вопрос, который затронут в настоящей работе, - что изменится, а что сохранится в картине нелинейных явлений при переходе от связанных отображений к дифференциальным уравнениям? С этой целью проведен сравнительный анализ устройства пространства параметров неидентичных связанных логистических отображений и связанных осцилляторов Дуффинга под внешним гармоническим воздействием.

## 1. Связанные логистические отображения

Первой частью работы является исследование плоскости управляющих параметров неидентичных связанных логистических отображений. Выберем систему для изучения в следующей форме:

$$\begin{cases} x_{n+1} = \lambda_1 - x_n^2 + \epsilon(x_n - y_n), \\ y_{n+1} = \lambda_2 - y_n^2 + \epsilon(y_n - x_n). \end{cases} \quad (2)$$

Здесь  $\epsilon$  - параметр связи. (Такой вид системы связанных отображений сейчас более принят, нежели эквивалентная ей система (1).)

В качестве основного инструмента для изучения устройства пространства параметров выберем достаточно популярный в настоящее время метод карт динамических режимов (см., например, [4]). Он состоит в том, что с помощью компьютера строится плоскость параметров системы, на которой оттенками серого цвета обозначаются области различных периодов. Нами выбран способ задания начальных условий, когда они «наследуются» - то есть при сканировании плоскости параметров новые начальные условия отвечают установившемуся режиму в предыдущей точке. Такие карты были построены для системы (2) при различных значениях параметра связи  $\epsilon$  (рис. 2). Увеличенные фрагменты карт представлены на рис. 3. Выбранная цветовая «палитра» приведена на рис. 2. Цифры обозначают период цикла. Периоды циклов некоторых наиболее крупных областей устойчивости отмечены непосредственно на картах.

Отметим, что система связанных отображений, вообще говоря, характеризуется мультистабильностью, и вид карт (в той или иной степени) может зависеть от выбора начальных условий и от способа сканирования плоскости параметров. В нашем случае направление сканирования при построении карт производится слева направо и далее снизу вверх. Заметим, что при изменении

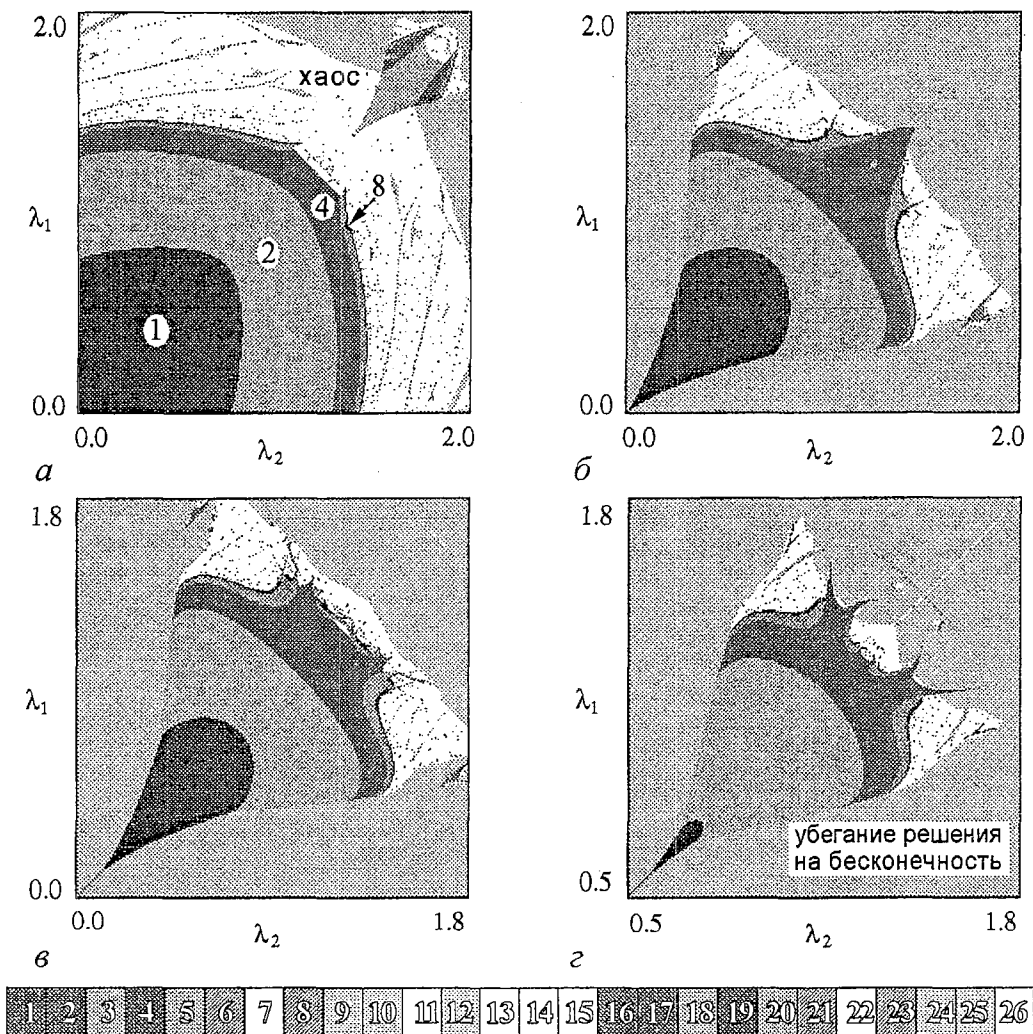


Рис. 2. Карты динамических режимов системы неидентичных связанных логистических отображений (2) на плоскости  $(\lambda_2, \lambda_1)$  при различных значениях параметра связи:  $a - 0.2$ ,  $б - 0.5$ ,  $в - 0.6$ ,  $г - 0.9$

порядка сканирования мы получали карту, визуально неотличимую от показанной на рис. 2. Это связано с выбранным способом построения - «наследование» начальных условий и «старт» из области периода 1.

Карты обладают рядом общих особенностей: они симметричны относительно главной диагонали, которой отвечает случай идентичных подсистем. Как и предсказано в работе [3], вблизи главной диагонали наблюдается переход к хаосу через разрушение квазипериодических режимов, а когда параметры  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  существенно отличаются друг от друга - по сценарию Фейгенбаума. Как уже отмечалось, особенно интересна для исследования область на плоскости параметров, где подходящие друг к другу критические линии Фейгенбаума терпят разрыв и образуют некоторую ограниченную слева и справа область квазипериодических режимов, содержащую внутри себя систему языков Арнольда (сравните рис. 1, 2 и 3). На рис. 2 видно, что эта область имеет некоторое достаточно сложное внутреннее устройство и испытывает существенные метаморфозы по мере увеличения параметра связи.

На рис. 3 она показана в увеличенном масштабе, что позволяет более

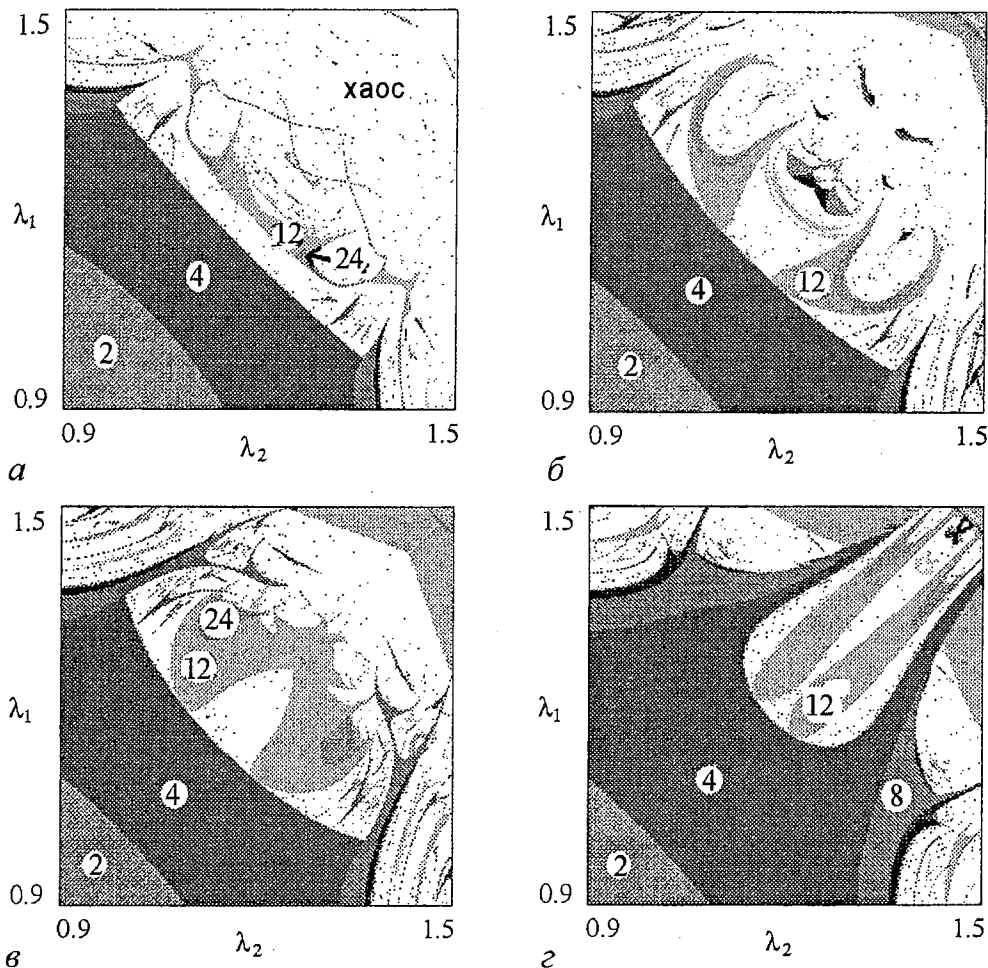


Рис. 3. Трансформация языков синхронизации системы (2) на плоскости  $(\lambda_2, \lambda_1)$  в диапазоне параметра диссипации  $\epsilon$  от 0.3 до 0.49: а - 0.3, б - 0.4, в - 0.44, г - 0.49

детально рассмотреть ее устройство при вариации параметра связи от значения  $\epsilon=0.3$  до  $\epsilon=0.49$ . Заметим, что снизу область квазипериодических режимов ограничена линией бифуркации Неймарка - Сакера (подробности см. ниже) на базе регулярного режима с периодом 4. При  $\epsilon=0.3$  вблизи левого и правого края области квазипериодических движений располагаются очень узкие языки синхронизации больших периодов. Вблизи же диагонали можно видеть некоторую сложно устроенную область с основным периодом 12, внутри которой, в свою очередь, просматривается область периода 24 (рис. 3, а). Эта область на рис. 3, а лежит выше линии бифуркации Неймарка - Сакера и целиком располагается в области квазипериодических режимов. По мере увеличения  $\epsilon$  она постепенно опускается вниз и, наконец, касается линии бифуркации Неймарка - Сакера, превращаясь в область резонанса 1:3. Затем она разрывается на две части, и возникают два языка синхронизации Арнольда периода 12, вершины которых скользят по границе существования цикла периода 4 (рис. 3, б). Кроме того, при  $\epsilon=0.4$  вблизи диагонали на рис. 3, б можно видеть целую систему областей долгопериодических циклов, по-прежнему лежащих внутри областей квазипериодических режимов. При дальнейшем увеличении  $\epsilon$  языки начинают деформироваться, как показано на рис. 3, в. Происходят существенные метаморфозы с краями области квазипериодических режимов. Резко удлиняются

образующие эти края линии периода 8, 16 и т.д. При  $\epsilon=0.49$  резко удлиняются и искривляются уже границы области периода 4, у которой возникают два отростка, охватывающие языки синхронизации (рис. 3, з). Область квазипериодических режимов превращается в почти замкнутую область. Мелкие языки синхронизации, наблюдавшиеся ранее у ее левого и правого края, исчезают (по крайней мере, становятся незаметными).

На рис. 4 приведены фазовые портреты аттракторов в различных точках плоскости параметров  $(\lambda_1, \lambda_2)$  для значения параметра связи  $\epsilon=0.4$ . Видно, что язык синхронизации устроен сложным образом. В точках, близких к точке касания языка Арнольда линии бифуркации Неймарка - Сакера, фазовые портреты представляют собой гладкие инвариантные кривые. По мере удаления от точки касания инвариантные кривые начинают искажаться и терять гладкость (фрагменты 2 и 5), а в точках, близких к двум концам языка, наблюдаются фазовые портреты аттракторов в виде сложных лентообразных образований. Внутри языка наблюдается каскад удвоений периода.

Заметим также, что на рис. 3, в хорошо видно «наложение» друг на друга (вблизи диагонали) двух основных языков Арнольда периода 12, что иллюстрирует существование мультистабильности в системе. Мы, однако, не будем детально описывать этот феномен динамики связанных систем, а далее сосредоточимся на анализе критических явлений.

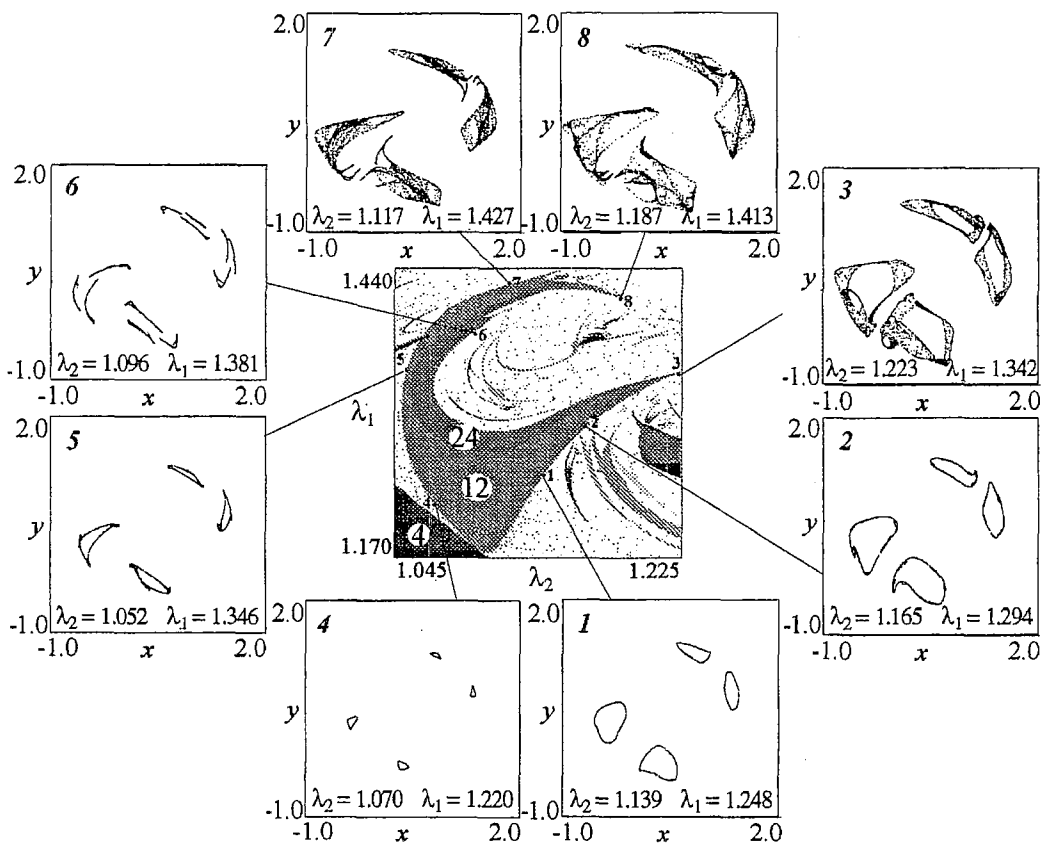


Рис. 4. Фазовые портреты аттракторов системы (2) в различных точках плоскости параметров  $(\lambda_2, \lambda_1)$  для значения параметра связи  $\epsilon=0.4$ . В центре представлена карта динамических режимов для  $\epsilon=0.4$ . Точные координаты  $(\lambda_2, \lambda_1)$  каждой выбранной точки на карте указаны в соответствующем фрагменте

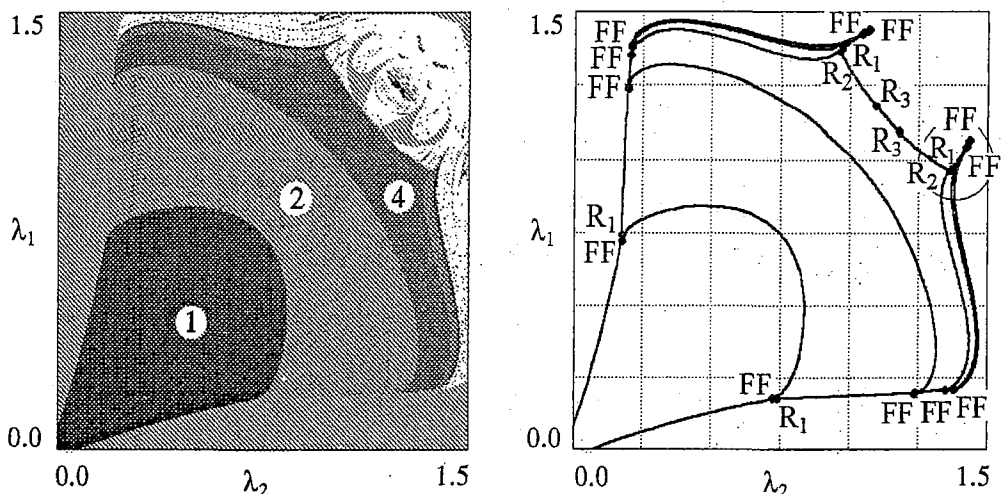


Рис. 5. Карта динамических режимов (а) системы (2) при  $\varepsilon=0.4$  и соответствующая ей плоскость параметров  $(\lambda_2, \lambda_1)$ , на которой изображены основные бифуркационные линии (б). FF - терминальная точка, R1 - точка резонанса 1:1, R2 - точка резонанса 1:2, R3 - точка резонанса 1:3. С помощью окружности на фрагменте (б) выделена область, которая в увеличенном масштабе показана на рис. 6

Как уже отмечалось, особый интерес вызывает область, где встречаются два разных сценария перехода к хаосу - через удвоения периода и через разрушение квазипериодических режимов. Это окрестность двух характерных острий, хорошо видных на рис. 3, б. Однако для более детального описания этих областей уже недостаточно построения карт режимов, а требуется более тщательный бифуркационный анализ. Для того чтобы проиллюстрировать оба этих метода для системы (2), на рис. 5 показаны в одном масштабе карта режимов (рис. 5, а) и бифуркационная диаграмма (рис. 5, б) для значения параметра связи  $\varepsilon=0.4^*$ . Более детально бифуркационные линии и точки в окрестности правого острия показаны в увеличенном виде на рис. 6. Окрестность левого острия устроена совершенно аналогично в силу симметрии системы.

При движении из области устойчивости цикла периода 1 в сторону увеличения параметра  $\lambda_1$  можно наблюдать каскад бифуркаций удвоения периода. Начиная с цикла периода 4, соответствующие линии бифуркации удвоения периода при увеличении параметра  $\lambda_2$  завершаются, не доходя до диагонали, в точках бифуркации коразмерности 2. Для цикла периода 4 - это точка резонанса 1:2 (на рисунке точка R2, оба мультипликатора цикла равны  $\mu_{1,2}=-1$ ), а для циклов большего периода это терминальные точки, в которых мультипликаторы  $\mu_1=-1$  и  $\mu_2=1$  (на рисунке точки FF, от Flip-Fold).

Заметим, что из точки R2 выходит линия бифуркации Неймарка - Сакера  $NS_1$  ( $|\mu_{1,2}|=1$ , выделена жирной линией), которая и образует край области квазипериодических режимов, описанной ранее с помощью карт динамических режимов. На нее опираются языки Арнольда различного периода (см. рис. 5, а), включая область резонанса 1:3 (точка резонанса R3 на рис. 5, б). Далее, из точки R2 выходит еще одна линия Неймарка - Сакера  $NS_2$ , также показанная жирной линией на рис. 6. Таким образом, область устойчивости цикла периода 8 ограничена сверху (см. рис. 6) участком бифуркационной линии Неймарка -

\* Расчеты проводились с помощью программы CONTENT [Yu.A. Kuznetsov and V.V. Levitin (1997) «CONTENT: A multiplatform environment for continuation and bifurcation analysis of dynamical systems» Centrum voor Wiskunde en Informatica, Kruislaan 413, 1098 SJ Amsterdam, The Netherland, ftp://ftp.cwi.nl/pub/content].

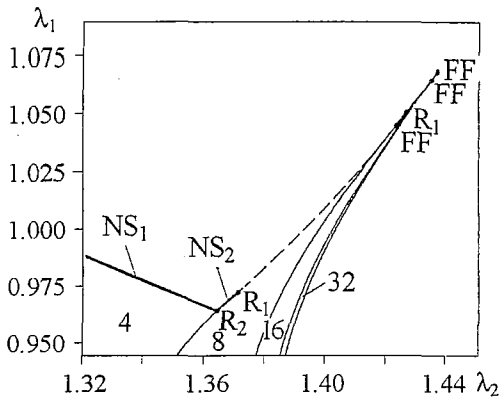


Рис. 6. Увеличенный фрагмент рис. 5,б. Цифрами отмечены области существования циклов периодов 4, 8, 16 и 32; сплошные линии соответствуют линиям бифуркаций удвоения периода, прерывистые - линиям жесткого перехода, жирные - линиям бифуркаций Неймарка - Сакера NS

Для циклов удвоенного периода на рис. 6 можно видеть последовательность терминальных точек FF (на рисунке указаны три такие точки). В Таблице приведены терминальные точки FF для линий бифуркации удвоения периода, начиная с цикла периода 8 до 1024. Можно видеть, что эта последовательность накапливается к некоторой предельной критической точке. Подобная последовательность бифуркаций типа терминальных точек FF исследовалась в работах [6-10], и было обнаружено, что соответствующая критическая точка этого типа ассоциируется с циклом периода 2 ренормгруппового преобразования удвоения (то есть с неподвижной точкой преобразования учетверения РГ). Эта точка является терминальной для фейгенбаумовской критической линии, то есть точкой, в которой фейгенбаумовская линия обрывается. Такой тип критичности получил наименование С-тип. Доказано, что в критической точке типа С критический квазиаттрактор состоит из бесконечного множества сосуществующих аттракторов - устойчивых циклов периодов  $2 \cdot 4^k$  и неустойчивых циклов периодов  $4^k$  ( $k=1,2,\dots,\infty$ ) [7-11].

Сакера NS<sub>2</sub> и линией жесткого перехода ( $\mu_1=1$ ,  $|\mu_2|<1$ , пунктирная линия), которые разделены точкой бифуркации коразмерности 2 (на рисунке обозначена R1 - точка резонанса 1:1,  $\mu_{1,2}=-1$ ).

Отметим, что список локальных бифуркаций, связанных с резонансом 1:2, исчерпывается приведенными на рис. 6. Следует, однако, подчеркнуть, что бифуркация Неймарка - Сакера на линии NS<sub>2</sub> является субкритической. В окрестности резонанса существует еще несколько линий глобальных бифуркаций, связанных с перестройками замкнутых инвариантных многообразий, возникающих в результате бифуркаций на линиях NS<sub>1</sub> и NS<sub>2</sub> (см., например, [5-6], где подробно описаны бифуркации в окрестности резонанса 1:2).

Таблица

Терминальные точки FF системы (2) для значения параметра связи  $\epsilon=0.4$

№ уровня	x	y	$\lambda_2$	$\lambda_1$
8	1.52748654438	0.832027050076	1.42211434872	1.04536723026
16	1.51924944092	0.925594316666	1.43342291359	1.06527796425
32	1.51549610195	0.944420633912	1.43540783724	1.06925872682
64	1.51462907469	0.947525094423	1.43560852092	1.06967100717
128	1.51448606773	0.948436165896	1.43574276220	1.06994764874
256	1.51444199033	0.948492315004	1.43572781554	1.06991681069
512	1.55015567623	0.691545135397	1.43574642151	1.06995521068
1024	1.55014968148	0.691536759962	1.43573942195	1.06994076322

Следует отметить, что в области малых значений параметра  $\lambda_2$  (а в силу симметрии и в области малых  $\lambda_1$ ) также наблюдается накопление терминальных точек линий удвоения периода, однако в данной работе мы подробно исследуем лишь интересующую нас область, в которой сходятся области квазипериодических движений и каскад удвоения периода.

## 2. Связанные осцилляторы Дуффинга под внешним гармоническим воздействием

Как мы видели, устройство плоскости управляющих параметров системы двух неидентичных связанных логистических отображений обладает достаточно тонкой структурой. Интересно выяснить, в какой мере соответствующие особенности характерны для более реалистичных моделей, в частности, для дифференциальных систем. Для ответа на этот вопрос мы обратились к системе связанных осцилляторов Дуффинга, находящихся под внешним гармоническим воздействием

$$\begin{aligned} d^2x/dt^2 + \gamma dx/dt + x + x^3 + \varepsilon(x - y) &= A \cos(\omega t), \\ d^2y/dt^2 + \gamma dy/dt + y + y^3 + \varepsilon(y - x) &= B \cos(\omega t). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $x, y$  - динамические переменные,  $t$  - время,  $\gamma$  - параметр затухания,  $\varepsilon$  - параметр связи,  $A, B$  - амплитуды внешнего воздействия,  $\omega$  - частота внешнего воздействия.

Автономный осциллятор Дуффинга при фиксированных параметре диссипации  $\gamma$  и частоте воздействия  $\omega$  с ростом амплитуды внешнего сигнала  $A$  демонстрирует каскад бифуркаций удвоения и переход к хаосу по сценарию Фейгенбаума. Поэтому можно ожидать, что два связанных осциллятора (3) относятся к рассматриваемому нами классу систем.

На рис. 7 изображены карты динамических режимов связанных осцилляторов Дуффинга на плоскости амплитуд воздействия отдельных осцилляторов ( $A, B$ ) для различных значений параметра связи  $\varepsilon$ . Значения параметра диссипации и частоты внешнего сигнала выбраны равными соответственно  $\gamma=0.2, \omega=1.46$ . Рассмотрение карт для потоковой системы (3) и их сравнение с аналогичными картами для связанных логистических отображений (2) выявляют ряд сходных черт.

Имеется также характерная область квазипериодических режимов, только теперь она ограничена областью цикла периода 2. На рис. 7, в-д можно видеть мелкие языки синхронизации у левого и правого краев области квазипериодических движений. В то же время, устройство плоскости параметров в окрестности диагонали может существенно отличаться. Резонанс 1:3, столь характерный для связанных логистических отображений и занимающий почти всю область в центре рис. 3, здесь отсутствует. Вместо него на рис. 7, в мы видим резонанс 1:5. (Язык Арнольда периода 10, опирающийся на линию бифуркации Неймарка - Сакера области устойчивости цикла периода 2.) Однако с ростом параметра связи  $\varepsilon$  эволюция карт происходит по-другому. Область квазипериодических режимов не замыкается, как на рис. 3, г, а наоборот, расширяется (рис. 7, г-е). Также определенные отличия наблюдаются и при уменьшении параметра связи  $\varepsilon$  (рис. 7, а-б). Так, на рис. 7, а мы видим, что долгопериодические циклы образовали области, свернутые в виде полукольца.

Итак, система связанных осцилляторов Дуффинга также демонстрирует сосуществование двух сценариев перехода к хаосу - через удвоения периода и через

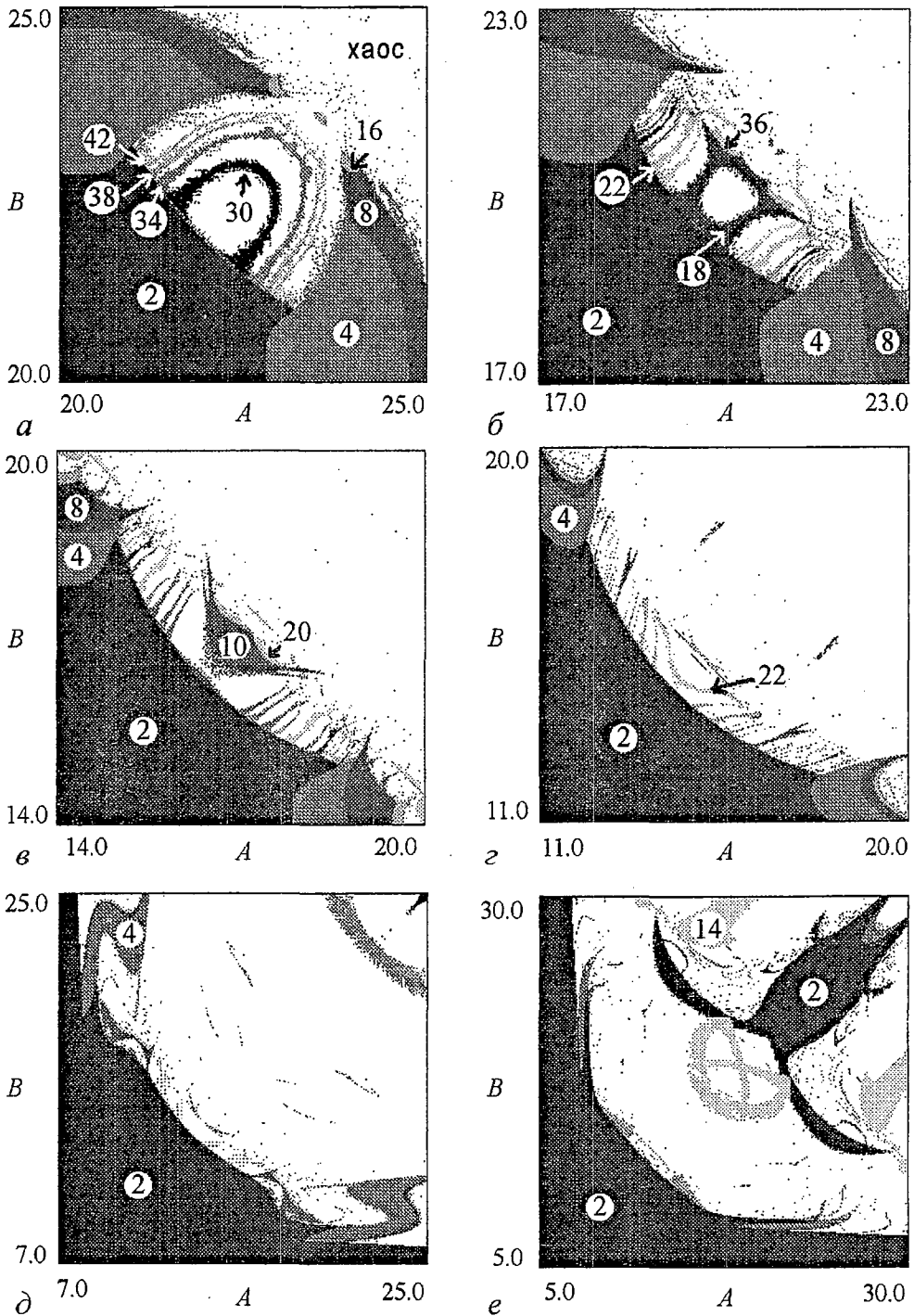


Рис. 7. Карты динамических режимов системы связанных осцилляторов Дuffинга (3) на плоскости  $(A, B)$  при различных значениях параметра связи:  $a - 0.2, б - 0.3, в - 0.5, г - 0.7, д - 0.8, e - 1.0$ . При построении карт рассматривались периоды, кратные двум. Параметры  $\gamma=0.2$  и  $\omega=1.46$ . Цифрами отмечены области существования циклов различных периодов

квазипериодические режимы, однако тонкие детали картины перехода могут отличаться от аналогичной картины для связанных логистических отображений. В то же время, на рис. 7, *в* можно видеть характерные острия в области, где встречаются эти сценарии. Это сигнализирует о возможности существования



соответствующего типа критичности коразмерности два. Однако его поиск и надежная идентификация для дифференциальной системы даже для современных компьютеров представляет слишком сложную задачу. Таким образом, пока приходится ограничиться визуальным сопоставлением карт режимов.

Заметим, наконец, что для системы (3) при  $\epsilon=0.3$  построены также фазовые портреты аттракторов в сечении Пуанкаре (рис. 8).

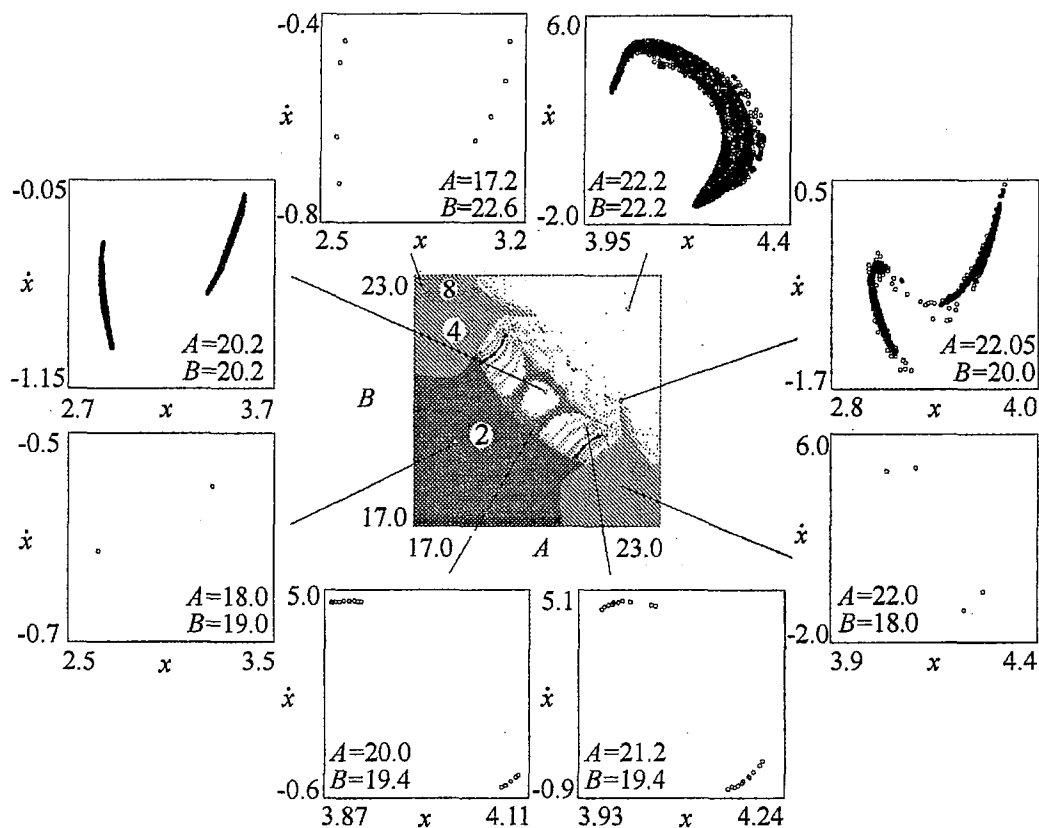


Рис. 8. Фазовые портреты аттракторов системы (3) в сечении Пуанкаре в различных точках плоскости параметров  $(A, B)$  для значения параметра связи  $\epsilon=0.3$  (в центре рисунка представлен фрагмент карты динамических режимов для  $\epsilon=0.3$ ). Точные координаты  $(A, B)$  каждой выбранной точки на карте режимов указаны рядом с соответствующим сечением Пуанкаре

### Заключение

Таким образом, пространство управляющих параметров простейших связанных неидентичных систем с удвоениями периода - логистических отображений - обладает очень тонким и сложным устройством. Оно характеризуется своеобразной картиной языков синхронизации и наличием критических точек коразмерности два, известных как С-тип критичности и представляющих собой концевые точки фейгенбаумовских линий. Для осцилляторов Дуффинга под гармоническим воздействием можно отметить сходство с такой картиной, но имеются и определенные отличия.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 03-02-16074), Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF, грант № REC-006) и фонда некоммерческих программ «Династия» при содействии МЦФФМ.*

## Библиографический список

1. Анищенко В.С., Вадивасова Т.Е., Астахов В.В. Нелинейная динамика хаотических и стохастических систем. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1999.
2. Mosekilde E., Maistrenko Y., Postnov D. Chaotic synchronization. Application to living systems// World Scientific Series on Nonlinear Science, 2002, Series A. Vol. 42, 440 p.
3. Jian-Min Yuan, Mingwei Tung, Da Hsuan Feng, and Lorenzo M. Narducci. Instability and irregular behavior of coupled logistic equations // Phys. Rev. A, 1983. Vol. 28, № 3. P. 1662.
4. Кузнецов С.П. Динамический хаос. М.: Физматлит, 2001. 296 с.
5. Арнольд В.И. Геометрические методы в теории обыкновенных дифференциальных уравнений. РХД, 1999.
6. Гукенхеймер Дж., Холмс Ф. Нелинейные колебания, динамические системы и бифуркации векторных полей. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002.
7. Kuznetsov A.P., Kuznetsov S.P., Sataev I.R. A variety of period-doubling universality classes in multi-parameter analysis of transition to chaos // Physica D. 1997. Vol. 109. P. 91.
8. Кузнецов С.П., Сатаев И.Р. Гибрид удвоений периода и касательной бифуркации: количественная универсальность и двухпараметрический скейлинг // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1995. Т. 3, № 4. С. 3.
9. Kuznetsov S.P., Sataev I.R. Period-doubling for two-dimensional non-invertible maps: Renormalization group analysis and quantitative universality // Physica D. 1997. Vol. 101. P. 249.
10. Kuznetsov S.P., Sataev I.R. Universality and scaling for the breakup of phase synchronization at the onset of chaos in a periodically driven Rossler oscillator // Phys. Rev. E. 2001. Vol. 64, № 4, 046214 (7 pages).
11. Кузнецов А.П., Кузнецова А.Ю., Сатаев И.Р. О критическом поведении отображения с бифуркацией Неймарка - Сакера при разрушении фазовой синхронизации в предельной точке фейгенбаумовского каскада // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2003. Т. 11, № 1. С. 12.

Саратовское отделение Института  
радиотехники и электронике РАН  
Саратовский государственный  
университет

Поступила в редакцию 19.11.03  
после доработки 21.09.04

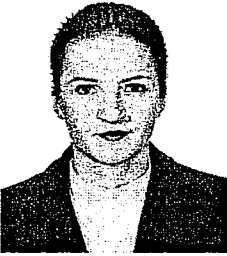
## STRUCTURE OF CONTROL PARAMETERS SPACE OF NONIDENTICAL COUPLED SYSTEMS WITH PERIOD-DOUBLINGS

A.P. Kuznetsov, J.V. Sedova, I.R. Sataev

The structure of control parameters space of nonidentical coupled logistic maps is discussed. The critical points of codimension two connected with accumulation of bifurcation situations of codimension two are found. The structure of control parameters space of two coupled Duffing oscillators is discussed.



*Сатаев Игорь Рустамович* – родился в 1959 году. Окончил Московский физико-технический институт (1982). Кандидат физико-математических наук (1998, СГУ), старший научный сотрудник Саратовского филиала Института радиотехники и электроники РАН. Область научных интересов – критические явления в нелинейной динамике, моделирование динамики на пороге хаоса, применение численных методов для решения ренормгрупповых уравнений. Автор более 30 научных публикаций в отечественных и зарубежных журналах.



*Седова Юлия Викторовна* – родилась в 1979 году. Окончила Саратовский государственный университет (2001). Кандидат физико-математических наук (СГУ, 2004), научный сотрудник Саратовского филиала Института радиотехники и электроники РАН. Научные интересы – влияние шума на динамические системы, дискретные отображения, связанные системы, динамический хаос. Автор 6 статей в отечественной и зарубежной печати.



## РЕЗОНАНСНЫЙ МЕХАНИЗМ ВОЗБУЖДЕНИЯ В ДИНАМИКЕ СВЯЗАННЫХ НЕЙРОНОВ

*Д.Э. Постнов, Д.В. Сецинский, Л.С. Рязанова*

С помощью численного моделирования исследуются особенности динамики нейронных моделей различного типа. Рассмотрены различия в механизмах возбуждения внешним периодическим сигналом, показаны обусловленные этим особенности детерминированной динамики ансамбля из двух связанных систем. Обсуждаются индуцируемые шумом эффекты в ансамбле двух нейронов.

### Введение

Парадигма возбудимой системы - одна из важнейших в нейродинамике. Различные эффекты как в малых, так и в больших нейронных ансамблях принято объяснять, исходя из понятий «порог возбуждения», «состояние покоя», «потенциал действия». Основное свойство возбудимой системы заключается в том, что она остается в состоянии покоя до тех пор, пока воздействие на нее не превысит некоторый (определяемый параметрами системы) порог. Когда это происходит, возбудимая система генерирует отклик определенной формы и длительности уже вне зависимости от того, прекратился ли сигнал возбуждения или же все еще длится. Однако такое описание полностью справедливо лишь в простейшем случае, когда воздействие представлено одиночным толчком, либо предыдущий импульс воздействия давно закончился, и система успела «забыть» о нем. Если воздействие длится во времени, то картина существенно меняется. Поведение возбудимой системы становится зависимым как от формы сигнала воздействия, так и от его ритма. Еще более все усложняется при наличии флуктуаций.

Особенности таких режимов возбудимых систем в последние годы все чаще привлекают внимание исследователей. Так, в работах [1-3] было, в частности, показано, что при периодическом внешнем воздействии на возбудимую систему типа ФитцХью - Нагумо зоны резонансных режимов на плоскости параметров «амплитуда - частота воздействия» имеют V-образную форму, подобно классическому языку Арнольда в случае синхронизации автоколебаний. Особенности отклика возбудимой системы на воздействие цуга возбуждающих импульсов исследованы в [4], где особое внимание уделено области параметров, соответствующей переходу к автоколебательному режиму нейрона. В [5] исследуется отклик модели типа «накопление - сброс» на периодический стимул

различной формы. В работе [6] переход к моделям возбудимой системы с дискретным временем использован для изучения вариантов отклика на периодическую стимуляцию пугами импульсов. Показано, что характер реакции такой модели нейрона может быть различным для сигналов различной структуры, обеспечивая, тем самым, принципиальную возможность различных способов обработки информации. В работах [7, 8] особое внимание уделено предложенной более 40 лет назад Аланом Ходжкином (и практически забытой в последние десятилетия) классификации нейронов, согласно которой они разделяются на «интеграторы» и «резонаторы» по типу их реакции на подпороговый сигнал. Возбудимые системы этих двух типов имеют различное устройство векторного поля вблизи состояния равновесия. У системы-резонатора оно устроено таким образом, что возможна ее активация с помощью последовательности импульсов воздействия, меньших по амплитуде, чем порог возбуждения системы, в том случае, если они следуют с некоторой «подходящей» частотой. В противоположность этому система-интегратор будет «накапливать» возбуждающее воздействие, производимое через любые промежутки времени, пока не произойдет генерация импульса.

Известно также, что резонансный характер отклика нейронов определяет ряд существенных особенностей при функционировании живых нейронных систем. В частности, характерной особенностью систем-резонаторов является их реакция на пары - «дублеты» спайков. Дублет с определенным временным интервалом между импульсами способен активировать нейрон-резонатор даже при небольшой амплитуде воздействия. Таким образом становится возможным выделение сигнала одного нейрона из множества других. Возможен также эффект мультиплексирования: при передаче нескольких информационных сигналов по одному каналу каждый из нейронов-приемников откликается только на характерную для него частоту следования импульсов.

Таким образом, к настоящему времени выявлен ряд важных закономерностей в формировании отклика нейронов различных типов. Однако остается неисследованным целый ряд аспектов проблемы, которые представляются важными. Сохраняются ли все особенности поведения нейронов-резонаторов при характерной для реальных нейронов синаптической связи, которая сама по себе обладает интегрирующими свойствами? Как проявит себя резонансный характер отклика при возбуждении другим нейроном-пейсмейкером? Наконец, что произойдет при активации системы шумовым сигналом? Наша работа посвящена поиску ответа на эти вопросы.

## 1. Исследуемые модели

В качестве модельных систем были выбраны две широко известные двумерные модели нейронов, первая из которых (Моррис - Лекар, [9]) обладает выраженными свойствами нейрона-интегратора, а вторая (ФитцХью - Нагумо, [10, 11]) - при типичных значениях управляющих параметров обладает свойствами нейрона-резонатора.

**1.1. Модель Морриса - Лекара.** Модель Морриса - Лекара [9] является одним из упрощенных вариантов модели Ходжкина - Хаксли [12] и описывает процесс генерации спайков нейроном в терминах ионных токов и трансмембранного потенциала. Эта модель демонстрирует все основные свойства модели Ходжкина - Хаксли, включая возбудимую и автоколебательную динамику. Ее уравнения имеют вид

$$dv/dt = -J_{\text{ion}}(v, w) + J, \quad (1)$$

$$dw/dt = \varepsilon(w_{\infty}(v) - w)/\tau_w(v).$$

Здесь

$$J_{\text{ion}}(v, w) = \bar{g}_{\text{Ca}} m_{\infty}(v) (v - v_{\text{Ca}}) + \bar{g}_{\text{K}} w (v - v_{\text{K}}) + \bar{g}_{\text{L}} (v - v_{\text{L}}),$$

$$m_{\infty}(v) = 0.5 [1 + \tanh\{(v - v_a)/v_b\}],$$

$$w_{\infty}(v) = 0.5 [1 + \tanh\{(v - v_c)/v_d\}],$$

$$\tau_w(v) = 1/\cosh\{(v - v_c)/(2 v_d)\}.$$

Уравнения включают быстрый кальциевый ток  $\bar{g}_{\text{Ca}} m_{\infty}(v) (v - v_{\text{Ca}})$  и медленный калиевый ток  $\bar{g}_{\text{K}} w (v - v_{\text{K}})$ , а также ток утечки  $\bar{g}_{\text{L}} (v - v_{\text{L}})$ . Переменная  $v$  системы описывает трансмембранный потенциал нейрона, а переменная  $w$  - активацию калиевого тока.  $J$  - управляющий параметр, соответствующий внешнему приложенному току. В нашей работе мы использовали следующие параметры модели:  $v_a = -0.01$ ,  $v_b = 0.15$ ,  $v_c = 0.1$ ,  $v_d = 0.145$ ,  $\bar{g}_{\text{Ca}} = 1.0$ ,  $\bar{g}_{\text{K}} = 2.0$ ,  $\bar{g}_{\text{L}} = 0.5$ ,  $v_{\text{Ca}} = 1.0$ ,  $v_{\text{K}} = -0.7$ ,  $v_{\text{L}} = -0.5$ ,  $f = 1.15$ . Эта система была детально исследована в работе [13], где показано, что при больших и малых значениях внешнего тока  $J$  она имеет единственное состояние равновесия. При промежуточных значениях  $J$  в модели (1) существует предельный цикл как в качестве единственного аттрактора системы, так и сосуществующий с устойчивым состоянием равновесия типа узел. При уменьшении  $J$  до  $J = 0.0730$  предельный цикл претерпевает гомоклиническую бифуркацию и исчезает, а система (1) переходит в возбуждимый режим.

**1.2. Модель ФитцХью - Нагумо.** Эта двумерная нейроподобная модель [10, 11] является результатом упрощения четырехмерных уравнений Ходжкина - Хаксли и сведения их к форме двумерного осциллятора с кубической нелинейностью, одной быстрой и одной медленной переменными. Мы используем модель ФитцХью - Нагумо в форме:

$$\begin{aligned} \varepsilon \dot{x} &= x - x^3/3 - y, \\ \dot{y} &= x + a + D\xi(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $x$  и  $y$  - переменные, качественно соответствующие трансмембранному напряжению и переменной активации ионного тока соответственно;  $\varepsilon$  - параметр соотношения временных масштабов, характеризующий относительную скорость активации (деактивации) ионного тока;  $a$  - управляющий параметр, ответственный за порог возбуждения. В случае возбуждения шумовым сигналом  $D$  - интенсивность белого гауссова шума  $\xi(t)$  с нулевым средним значением  $\langle \xi(t) \rangle = 0$ .

В детерминированном режиме (при  $D=0$ ) значениям  $|a| > 1.0$  соответствует возбуждимый режим, а значениям  $|a| < 1.0$  - автоколебательная динамика (предельный цикл), возникающая через суперкритическую бифуркацию Андронова - Хопфа.

## 2. Апериодический и резонансный механизмы возбуждения нейрона

Рассмотрим в деталях, как происходит возбуждение из состояния устойчивого равновесия для нейронов обоих типов. В качестве возбуждающего

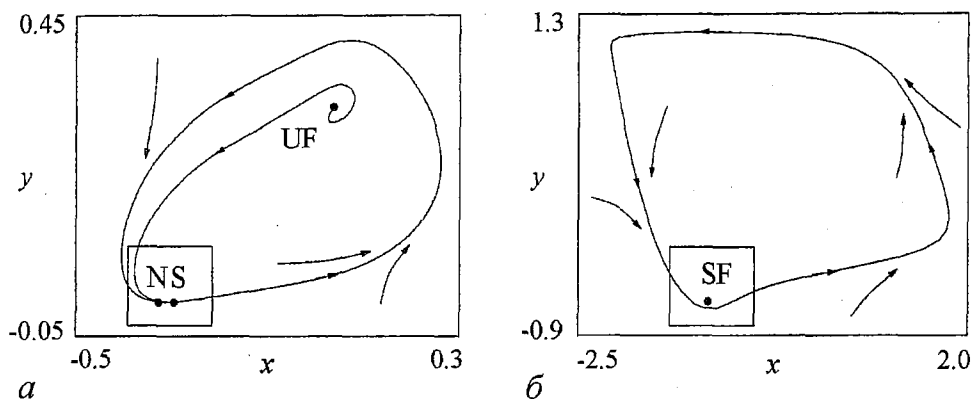


Рис. 1. Фазовые портреты моделей нейронов: а - модель Морриса - Лекара при  $J=0.083$ ,  $\epsilon=0.3$ ; б - модель ФитцХью - Нагумо  $\epsilon=0.07$ ,  $a=1.01$

воздействия используем последовательность частотой  $f$  коротких импульсов с предельно малой длительностью<sup>1</sup> и небольшой (менее порога возбуждения) амплитудой  $B$ . В зависимости от типа нейрона и от частоты возбуждающего сигнала, результат воздействия может существенно различаться.

На рис. 1 даны фазовые портреты для систем Морриса - Лекара и ФитцХью - Нагумо, на которых можно видеть траекторию генерации спайка, а также точки состояний равновесия. Интересующие нас события происходят в окрестности устойчивого состояния равновесия, выделенной прямоугольником. Фазовые траектории и временные реализации для этой области при возбуждении из положения устойчивого равновесия периодической последовательностью импульсов даны на рис. 2.

Для системы Морриса - Лекара устойчивое состояние равновесия представляет собой устойчивый узел N, а порог возбуждения образован устойчивым многообразием седла S. При возбуждении такого нейрона-интегратора последовательностью коротких импульсов небольшой амплитуды наблюдается постепенное смещение потенциала нейрона в сторону порогового значения, как показано на рис. 2.а. В перерыве между возбуждающими импульсами трансмембранный потенциал  $v$  медленно релаксирует к состоянию равновесия системы. Как только уровень потенциала повысится настолько, что достигнет порога возбуждения, происходит быстрая генерация импульса. Таким образом, время, прошедшее от начала возбуждения нейрона до момента генерации спайка, обратно пропорционально как амплитуде импульсов воздействия  $B$ , так и частоте их следования  $f$ . Однако, если амплитуда или частота воздействия будет недостаточна, то, вследствие постоянной релаксации системы к состоянию равновесия, генерация спайка не произойдет.

Принципиально иная картина наблюдается при периодическом возбуждении нейрона-резонатора (рис. 2, б и в). В модели ФитцХью - Нагумо в рассматриваемой области параметров имеется единственное состояние равновесия, представляющее собой устойчивый фокус SF. Заметим, что эта модель, как и ее прообраз - система уравнений Ходжкина - Хаксли, не имеет четко определенного порога возбуждения, образованного каким-либо многообразием [7]. Фазовые траектории в окрестности устойчивого состояния равновесия SF разбегаются веерообразно, таким образом, что небольшое смещение начальных условий вниз выводит на траекторию генерации спайка, тогда как невозмущенная траектория

<sup>1</sup> При численном эксперименте это условие означает, что импульс длится один шаг численного интегрирования уравнений динамической системы.

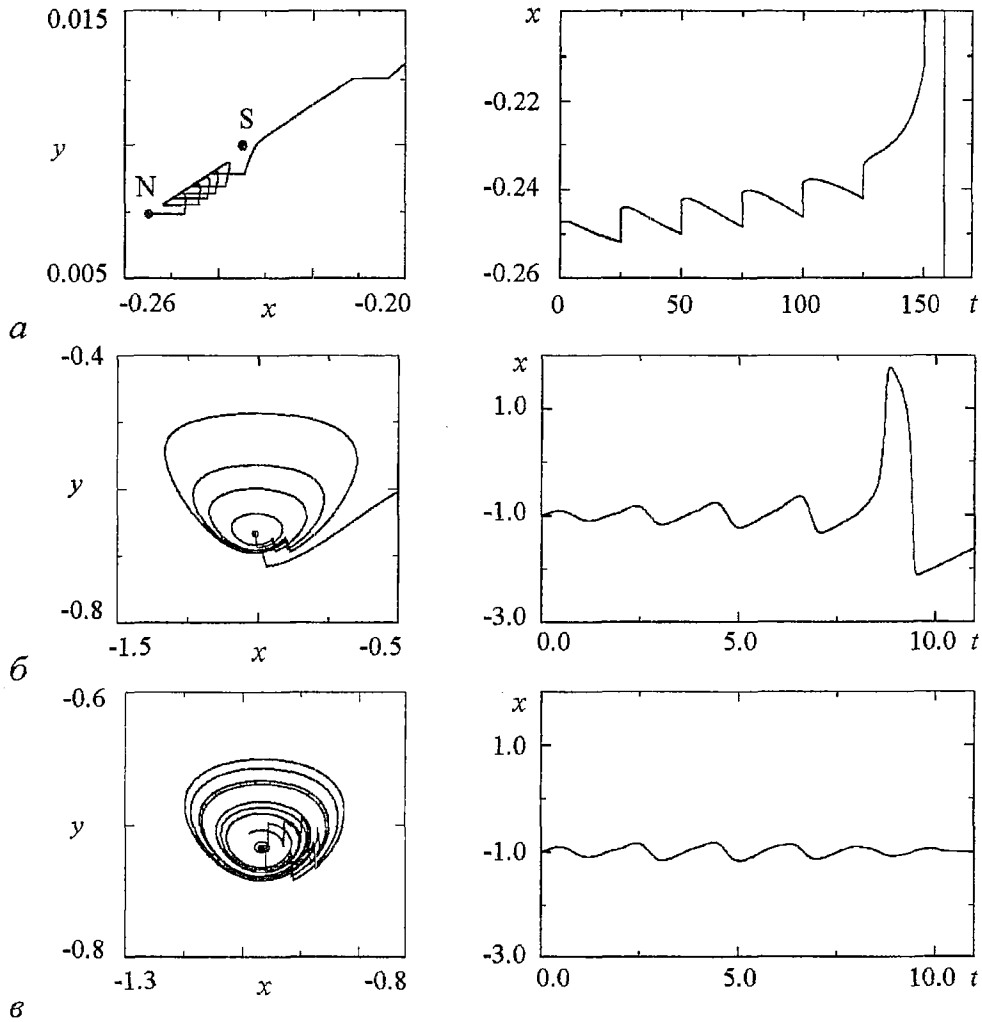


Рис. 2. Фазовые траектории в окрестности устойчивого состояния равновесия (слева) и временные реализации при возбуждении нейрона периодической последовательностью импульсов с амплитудой  $B$  и частотой  $f$  (справа):  $a$  - модель Морриса - Лекара,  $B=1.5$ ,  $f=0.04$ ;  $b$  - модель ФитцХью - Нагумо,  $B=4.2$ ,  $f=0.5$ , спайк генерируется на пятом импульсе;  $v$  - модель ФитцХью - Нагумо,  $B=4.2$ ,  $f=0.49$ , спайк не генерируется. Остальные параметры моделей те же, что и на рис.1

скручивается к устойчивому фокусу. Промежуточные траектории считаются крайне нетипичными для нейрона и наблюдаются лишь в узкой области параметров так называемых канард-колебаний [14-16].

Небольшое отклонение от положения равновесия вызывает вращение изображающей точки вокруг него, поэтому решающее значение имеет момент воздействия следующего импульса. На рис. 2,б показан случай воздействия коротких импульсов с частотой следования  $f=0.50$ , близкой к частоте вращения вокруг фокуса. Для выбранных значений параметров спайк генерируется на пятом импульсе воздействия. Можно видеть, как каждый последующий импульс усиливает результат предыдущего толчка, в результате чего система накапливает потенциал, как это было и для нейрона-интегратора.

На рис. 2,в проиллюстрирована ситуация, когда частота возбуждения  $f=0.49$  лишь немного не попадает в такт вращению изображающей точки вокруг фокуса. Как можно видеть, в этом случае генерация спайка не происходит. Более того, потенциал нейрона-резонатора может даже убывать, когда очередной импульс «заталкивает» систему обратно к состоянию равновесия.



Из вышесказанного очевидно, что порог возбуждения периодическим сигналом заданной формы зависит от его частоты  $f$  для обоих типов нейронных моделей: как для интеграторов, так и для резонаторов. Однако для резонаторов эта зависимость должна быть существенно сложнее.

На рис. 3 приведены двухпараметрические диаграммы зоны генерации спайков на плоскости параметров ( $f, B$ ) сигнала воздействия. Они построены следующим образом. Для каждого значения частоты  $f$  начальные условия задавались в устойчивом состоянии равновесия, после чего подавался возбуждающий сигнал малой амплитуды. Если в течение достаточно длительного промежутка времени (порядка 100 импульсов воздействия) генерация спайка не наблюдалась<sup>2</sup>, то амплитуде  $B$  давалось небольшое приращение и процедура повторялась. Таким образом определялось пороговое значение амплитуды, при котором на данной частоте воздействия возможна генерация спайков нейроном.

Выше линии пороговых значений амплитуды воздействия (сплошная черная кривая на рисунке) для обоих типов нейронов серым цветом дана характеристика режима генерации спайков для каждого значения  $f$  и  $B$ . Градации серого цвета отвечают различным отношениям частоты импульсов воздействия к частоте генерации спайков нейроном  $f/f_s$ .

Для нейрона-интегратора (рис. 3а) зона инактивированного состояния нейрона соответствует недостаточной амплитуде или частоте внешнего воздействия, когда релаксация системы к состоянию равновесия происходит быстрее, чем ее возбуждение внешним сигналом. Пороговое значение амплитуды  $B$  воздействия монотонно падает с ростом  $f$  таким образом, что их произведение остается примерно постоянным. Выше линии пороговых значений с ростом  $B$  для генерации одного спайка возбуждаемой системы требуется все меньше импульсов воздействия, тогда как по мере уменьшения амплитуды воздействия их требуется все больше. В целях читаемости диаграммы все режимы с отношением  $f/f_s$  более 50 даны черным цветом.

В случае нейрона-резонатора (рис. 3б) характер диаграммы существенно

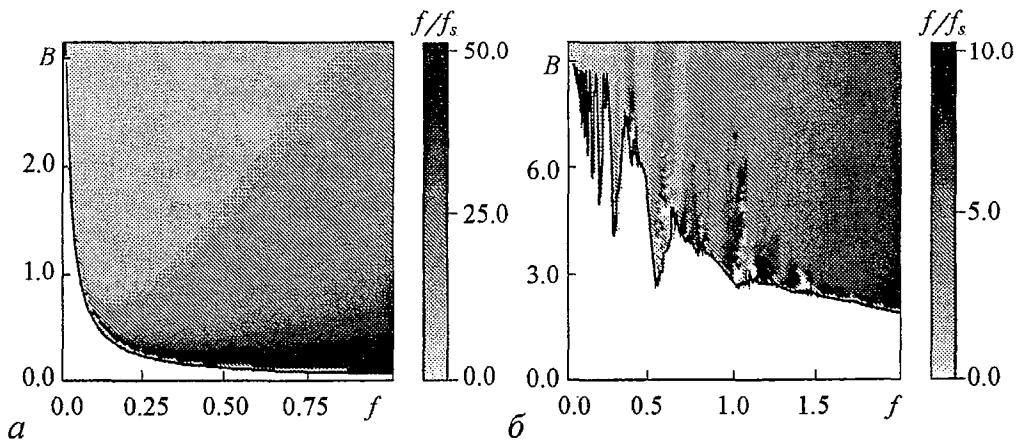


Рис. 3. Зона инактивированного состояния нейрона (белый цвет) отделена от зоны генерации спайков сплошной черной кривой на плоскости параметров частота - амплитуда воздействия для модели Морриса - Лекара (а) и для модели ФитцХью - Нагумо (б). Структура зоны генерации спайков представлена в виде отношения частоты импульсов воздействия к средней частоте генерации спайков  $f/f_s$  градациями серого цвета

<sup>2</sup> В качестве критерия для определения факта генерации спайка проверялось достижение фазовой переменной условного порогового значения ( $x \geq 1.0$  для модели ФитцХью - Нагумо и  $v \geq 0.1$  для модели Морриса - Лекара).

иной. Граница зоны генерации спайков выглядит изрезанной, с V-образными провалами на частотах, кратных частоте вращения вокруг состояния равновесия. Однако, как видно из рисунка, сохраняется общая тенденция к уменьшению порога генерации при увеличении частоты воздействия  $f$ , при этом кривая пороговых значений амплитуды  $V$  становится гладкой. Это можно объяснить тем, что на частотах возбуждения, существенно больших частоты вращения вокруг устойчивого фокуса, нейрон обретает свойства интегратора - импульсов воздействия за период так много, что они не дают проявиться собственной динамике модели нейрона, в среднем подталкивая ее к преодолению порога возбуждения. На малых частотах, напротив, временной интервал между импульсами столь велик, что система успевает релаксировать к состоянию равновесия и при каждом возбуждающем импульсе процесс как бы начинается сначала. В результате пороговое значение амплитуды воздействия  $V$  достигает некоторого постоянного уровня, определяемого параметрами нейрона.

Зона выше линии критических значений  $V$  также устроена существенно сложнее, чем в случае нейрона-интегратора. Как можно видеть из рис. 3, б, она содержит вертикально ориентированные зоны, соответствующие различному соотношению  $f/f_s$ . В целях читаемости диаграммы все режимы с отношением  $f/f_s$  более 10 даны черным цветом. Отметим, что иное расположение зон связано с тем, что в случае нейрона ФитцХью - Нагумо следует, видимо, говорить о резонансах различного порядка частоты воздействия по отношению к характерному временному масштабу генерации спайков нейроном. Этот характерный временной масштаб определяется как частотой вращения вокруг фокуса (что влияет на процесс возбуждения, как уже говорилось выше), так и временем движения изображающей точки по траектории генерации спайка.

Детальное устройство диаграммы режимов для модели ФитцХью - Нагумо довольно сложно и его подробный анализ в настоящей работе не предусмотрен. Общее представление о ее структуре, однако, важно для понимания результатов раздела 4.

### 3. Резонансное возбуждение при синаптической связи

Как было показано в предыдущем разделе, характер возбуждения нейрона-резонатора существенно зависит от частоты воздействующего сигнала, что может играть важную роль в функционировании нейронных ансамблей, когда каждый из нейронов получает сигнал сразу от многих других нейронов. Однако использованная нами модель аддитивного воздействия на нейрон последовательностью коротких импульсов мало похожа на типичную для нейронных систем связь через синапсы, важнейшим свойством которых является инерционность действия, то есть те же интегрирующие свойства. Возникает естественный вопрос, сохраняются ли, и если да - то в какой степени, специфические свойства нейрона-резонатора при воздействии на него тем же импульсным сигналом, но через синаптическую связь?

На качественном уровне синаптическую связь принято моделировать отдельным дифференциальным уравнением первого порядка со специфическим видом нелинейности, обеспечивающим «переключательный» характер преобразования сигнала воздействия [17, 18]. Уравнения системы ФитцХью - Нагумо, дополненные такой синаптической связью, выглядят следующим образом:

$$\epsilon \dot{x} = x - x^3/3 - y,$$

$$y = x + a + \gamma x_s, \quad (3)$$

$$\tau \dot{x}_s = (1 + \tanh(v(t)))(1 - x_s) - x_s/3.$$

Здесь  $v(t)$  - потенциал пресинаптического нейрона (или просто воздействующего сигнала);  $x_s$  характеризует возникший в результате воздействия синаптический ток, входя во второе уравнение с масштабным коэффициентом  $\gamma$ ; а  $\tau$  - параметр, характеризующий степень инерционности синапса.

На рис. 4 показано, как преобразуется типичная для нейронов последовательность спайков такой синаптической связью при различных значениях  $\tau$ .

Как видно из рисунка, синаптическая связь обладает интегрирующим эффектом, реализующимся в большей степени при увеличении ее характерного временного масштаба  $\tau$ . Для малых значений  $\tau$  сигнал  $x_s(t)$  передает быстрые изменения потенциала пресинаптического нейрона, а при больших  $\tau$  действие связи фактически сводится к интегрированию его сигнала и выработке некоторого постоянного смещения.

На рис. 5 показаны кривые пороговых значений  $\gamma$  нейрона типа ФитцХью - Нагумо при возбуждении его той же последовательностью коротких импульсов, что и на рис. 3, но посредством синаптической связи. Различные кривые на рисунке соответствуют различным значениям  $\tau$ . Видно (см. вставку), что при достаточно малом  $\tau$  форма границы активации в значительной степени сходна со случаем прямого воздействия возбуждающих импульсов (см. рис. 3, б), поскольку в этом случае сигнал синаптической связи практически повторяет импульсы воздействия. При больших  $\tau$  сигнал воздействия сильно интегрируется синаптической связью и представляет из себя воздействие почти постоянным потенциалом. Форма кривой возбуждения становится близка к кривой возбуждения нейрона-интегратора (см. рис. 3, а). Для нашего исследования важно, что изрезанный характер зависимости, обусловленный проявлением свойств нейрона-резонатора, сохраняется до значений  $\tau$  порядка 2.0. Это означает, что исследуемые нами закономерности сохраняют свое значение в условиях синаптической связи, как минимум в два раза более медленной, чем сам нейрон.

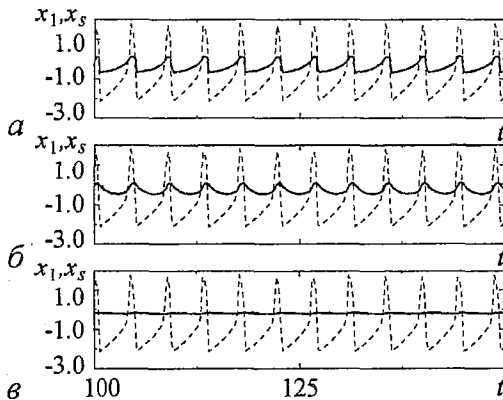


Рис. 4. Временные реализации активности нейрона типа ФитцХью - Нагумо  $v(t)$  (пунктирная линия) и соответствующие им реализации сигнала синаптической связи  $x_s(t)$  для различных значений параметра  $\tau$ : 0.01 (а), 0.5 (б), 10.0 (в)

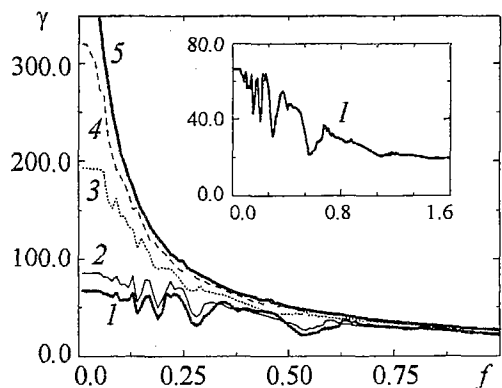


Рис. 5. Эволюция зависимости пороговой амплитуды возбуждающего сигнала от частоты воздействия при нарастании степени инерционности синаптической связи  $\tau$ : 0.01 (кривая 1); 0.5 (2); 2.0 (3); 5.0 (4); 10.0 (5)

#### 4. Резонансные эффекты в ансамбле двух нейронов

Направленная передача возбуждения от одного нейрона другому представляет собой одну из наиболее типичных ситуаций, рассмотрение которой интересно с точки зрения свойств нейронов-резонаторов. Первый нейрон в этом случае играет роль генератора импульсов - пейсмейкера, тогда как второй, находясь в возбудимом режиме, может тем или иным способом реагировать на сигнал первого нейрона.

Так как второй нейрон находится, по сути, под воздействием внешнего сигнала, то задача в принципе эквивалентна уже рассмотренной в разделе 2, и приведенные на рис. 3 диаграммы в значительной степени отвечают на вопрос, какие режимы возбуждаемого нейрона вообще возможны. Однако далеко не все они реализуются в ансамбле двух нейронов. Во-первых, частота генерации импульсов нейроном-пейсмейкером при вариации его параметров меняется определенным образом и в более узких пределах, чем это представлено на диаграммах рис. 3. Во-вторых, длительность и форма генерируемых первым нейроном импульсов также зависит от значений управляющих параметров, а это существенно влияет на процесс возбуждения второго нейрона. В частности, длительность импульса воздействия может быть сопоставима с характерным временем реакции второго нейрона (период вращения вокруг фокуса). По этой причине представление о мгновенном сдвиге состояния нейрона за счет воздействия - «толчка» (как это проиллюстрировано на рис. 2) может оказаться некорректным.

В численном эксперименте в качестве первого нейрона-пейсмейкера использовалась система ФитцХью - Нагумо (2). Параметр  $a$  был выбран меньшим единицы,  $a=0.9$ , что соответствует автоколебательному режиму. Частота генерируемых импульсов  $f_1$  менялась изменением параметра  $\epsilon_1$ , большие значения которого соответствовали более редкой генерации более коротких импульсов - спайков. Воздействие на второй нейрон было аддитивным, так же, как и в разделе 2, но вместо амплитуды сигнала воздействия  $B$  был использован коэффициент связи  $\gamma$ , масштабирующий сигнал первого нейрона.

В качестве возбудимого нейрона рассматривались обе модели, Морриса - Лекара и ФитцХью - Нагумо. При этом в первом случае для согласования уровней потенциала в отсутствие спайков величина внешнего тока  $J$  корректировалась как  $J \rightarrow J-a$ .

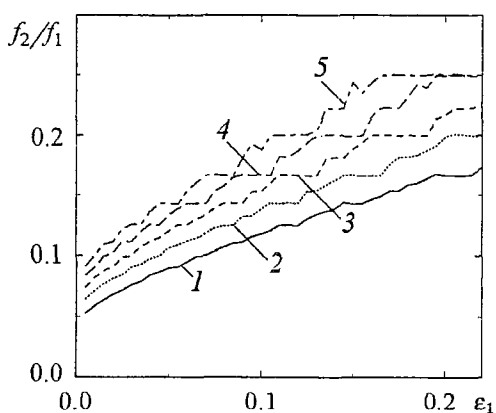


Рис. 6. Соотношение частот генерации спайков при воздействии на нейрон Морриса - Лекара в зависимости от параметра  $\epsilon_1$  первого нейрона при различных значениях параметра связи  $\gamma$ : 0.05 (1); 0.06 (2); 0.07 (3); 0.08 (4); 0.09 (5)

На рис. 6 приведен график отношения частот при воздействии на нейрон Морриса - Лекара. Как видно из рисунка, увеличение параметра  $\epsilon_1$  меняет соотношение частот генерации спайков двумя нейронами. В целом, второй нейрон «отстает» от первого,  $f_2/f_1 < 1$ , что согласуется с результатами раздела 2. Однако на графике имеются «полочки», соответствующие фиксированному соотношению между генерацией импульсов вторым и первым нейронами как  $1/7, 1/6, 1/5, 1/4$ . Заметим, что, несмотря на внешнюю схожесть графика рис. 6 с так называемой «чертовой лестницей», в данном случае нельзя говорить о синхронизации, так

как одна из двух систем не является автоколебательной. Устройство подобных областей резонанса для возбудимой системы под внешним воздействием изучалось в [1, 2]. Характерной особенностью является возбуждение второго нейрона во всем диапазоне частоты  $f_1$  воздействующего сигнала, что хорошо соотносится со свойствами нейрона-интегратора.

На рис. 7 приведены результаты аналогичного эксперимента для двух нейронов-резонаторов типа ФитцХью - Нагумо. Обращает на себя внимание немонотонность зависимости для отношения частот. Можно сказать, что нейрон-резонатор либо «находит» удачный режим генерации спайков, и на графике отношения частот наблюдается полочка, либо нет - и на графике наблюдается провал. Более того, при небольших значениях коэффициента связи  $\gamma$  второй нейрон генерирует спайки только в ограниченной области значений параметра  $\varepsilon_1$  воздействующего нейрона (см. кривые для  $\gamma=0.040, 0.043$ ). При увеличении  $\gamma$  наблюдается расширение области активного состояния второго нейрона, что качественно соответствует одному из кльвов на рис. 3, б. Наконец, можно отметить, что для разных  $\gamma$  могут наблюдаться различные резонансные соотношения при одном и том же значении  $\varepsilon_1$ . На рис. 7 хорошо видно, что режим  $1/3$  при  $\gamma=0.04$  и  $\varepsilon_1=0.09$  сменяется режимом  $1/2$  при увеличении  $\gamma$  до 0.043. Такое поведение также не наблюдается для нейронов-интеграторов.

Введение синаптической связи между нейронами-резонаторами меняет картину синхронных режимов. На рис. 8 приведены результаты расчета отношения частот генерации спайков первым и вторым нейронами для различных значений коэффициента связи  $\gamma$  при  $\tau=0.5$ . Как видно из графика, во всех случаях зона генерации второго нейрона ограничена и имеет форму плато. При небольших значениях  $\gamma$  отношение частот достигает значения  $1/3$ . При больших  $\gamma$  преобладающим является режим резонанса  $1/2$ .

При увеличении коэффициента связи наблюдается смещение области синхронного поведения в сторону больших значений  $\varepsilon_1$ , а затем ее исчезновение. Результат во многом парадоксален: при увеличении силы воздействия на нейрон он перестает генерировать спайки! Ситуация разъясняется, если учесть свойства синаптической связи. С одной стороны,

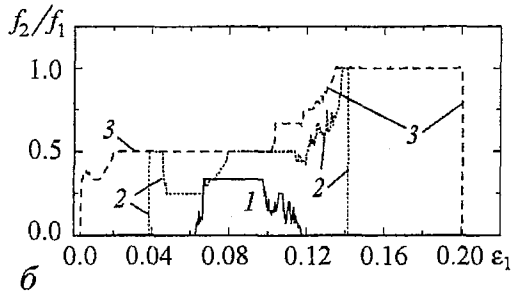
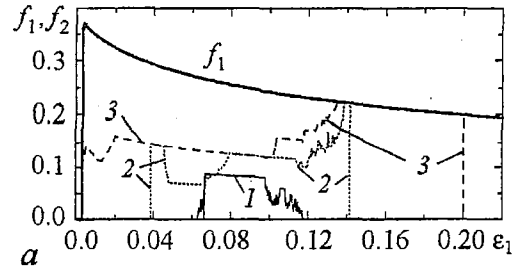


Рис. 7. Частоты генерации спайков  $f_1, f_2$  двумя нейронами типа ФитцХью - Нагумо (а) и их соотношение  $f_2/f_1$  (б) в зависимости от параметра  $\varepsilon_1$  первого нейрона при различных значениях параметра связи  $\gamma$ : 0.040 (1); 0.043 (2); 0.050 (3)

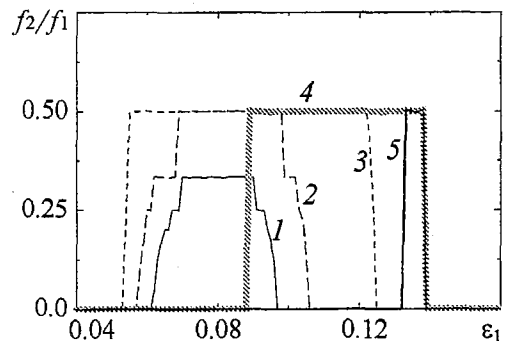


Рис. 8. Случай однонаправленной синаптической связи двух нейронов типа ФитцХью - Нагумо. Соотношение частот генерации спайков  $f_2/f_1$  в зависимости от параметра  $\varepsilon_1$  воздействующего нейрона при различных значениях параметра связи  $\gamma$ : 0.45 (1); 0.46 (2); 0.50 (3); 1.00 (4); 1.40 (5)

увеличение  $\epsilon_1$  ведет к уменьшению степени релаксационности колебаний воздействующего нейрона, и они лучше сглаживаются за счет интегрирующих свойств синаптической связи. С другой стороны, увеличение силы воздействия приводит и к увеличению действующей на него постоянной составляющей сигнала синаптической связи, что сдвигает рабочую точку второго нейрона таким образом, что при заданной амплитуде воздействия его возбуждение становится невозможным.

## 5. Индуцированные шумом ритмы в ансамбле двух нейронов

Очевидно, что описанные выше особенности функционирования ансамбля из двух нейронов должны проявить себя и в другом важном случае, когда первый нейрон находится в возбудимом режиме, но испытывает воздействие шумового сигнала. Как было показано, в этом случае существует некоторый оптимальный диапазон интенсивности шума, в пределах которого одиночный нейрон генерирует наиболее регулярную последовательность спайков, что обусловлено эффектом когерентного резонанса [19-22]. В этих условиях шум выступает в роли нового параметра, управляющего режимом функционирования нейрона. Было показано, что есть все основания рассматривать возбудимую систему в режиме когерентного резонанса как род стохастического осциллятора, генерирующего колебания достаточно высокой степени когерентности. В рамках решаемой нами задачи о сопоставлении динамики нейронов-интеграторов и нейронов-резонаторов представляет несомненный интерес выяснение того, какие отличия между ними могут быть выявлены в условиях нерегулярной во времени последовательности спайков, когда интервал их следования подвержен заметным флуктуациям.

Очевидно, для нейронов-интеграторов принципиальных отличий быть не должно, тогда как реакция нейрона-резонатора на такой возбуждающий сигнал не ясна.

На рис. 9 показаны временные реализации двух однонаправленно связанных нейронов типа ФитцХью - Нагумо. Оба нейрона находятся в возбудимом режиме, причем в уравнения первого из них добавлено внешнее шумовое воздействие (гауссов белый шум)  $\xi(t)$  интенсивностью  $D$ . Сигнал первого нейрона воздействует на второй нейрон с коэффициентом связи  $\gamma$ . Хорошо видно, что случайный входной сигнал преобразуется первым нейроном в относительно регулярную последовательность спайков. Второй нейрон реагирует на эту последовательность соответственно свойствам нейрона-резонатора: потенциал действия генерируется в

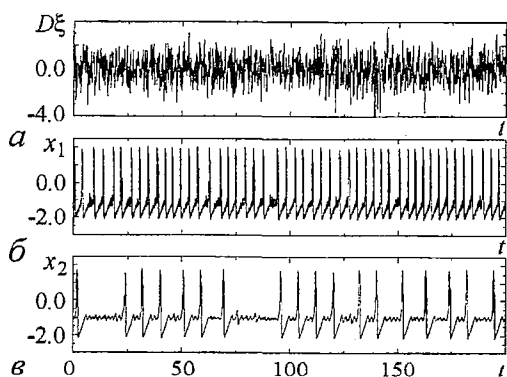


Рис. 9. Сигнал шумового воздействия на первый нейрон  $D\xi(t)$  (а), отклик первого  $x_1$  (б) и второго  $x_2$  (в) нейронов. Параметры системы:  $\epsilon_1=0.01$ ,  $a_1=1.1$ ,  $\epsilon_2=0.07$ ,  $a_2=1.01$ ,  $\gamma=0.12$ ,  $D=1.1$

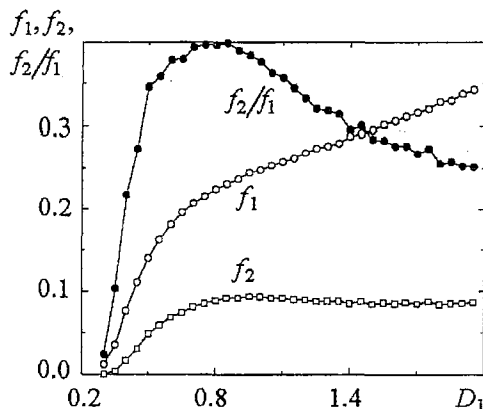
том случае, если спайки первого нейрона следуют через «удачный» интервал времени. Соответственно средняя частота генерации второго нейрона много ниже, чем первого.

На рис. 10 показаны результаты расчета отношения средних частот  $f_1$  и  $f_2$  генерирования спайков первым и вторым нейроном в зависимости от интенсивности шума  $D$ . Как видно из графика, это отношение имеет выраженный максимум при интенсивности шума  $D \approx 0.8$ . Причину этого можно уяснить из графиков для частот обоих нейронов: в то время как  $f_1$  продолжает монотонно расти с

Рис. 10. Зависимость средних частот  $f_1$ ,  $f_2$  генерирования спайков первым и вторым нейроном и их отношения  $f_2/f_1$  от интенсивности воздействующего на первый нейрон шума  $D_1$ . Параметры системы:  $\epsilon_1=0.01$ ,  $a_1=1.10$ ,  $\epsilon_2=0.07$ ,  $a_2=1.01$ ,  $\gamma=0.12$

увеличением интенсивности шума,  $f_2$  достигает максимума, а затем спадает. Очевидно, этот эффект связан с достижением средним интервалом между спайками первого нейрона некоторого оптимального значения, которому и соответствует максимум отношения частот.

Дальнейшее увеличение  $D$  увеличивает не только частоту следования спайков, но и разброс интервалов между ними. Как следствие, условия для генерации второго нейрона ухудшаются.



### Заключение

В рамках данной работы мы показали, что особенности механизмов возбуждения двух типов нейронов, слабо проявляющиеся при возбуждении одиночным импульсом, приводят к различному поведению как при внешнем возбуждении подпороговым периодическим сигналом, так и при функционировании нейронов в составе малого ансамбля.

Для обоих типов нейронов понятие «порог возбуждения» может применяться лишь в контексте конкретной частоты воздействия и формы воздействующего импульса. При этом, для нейронов-резонаторов зависимость процесса возбуждения от этих параметров носит весьма сложный характер.

В условиях синаптической связи нейронов указанная особенность резонаторов сохраняется в значительном диапазоне величин инерционности синаптической связи. Медленная синаптическая связь переводит нейрон-резонатор в режим интегратора.

Для ансамбля двух нейронов свойства нейронов-резонаторов обуславливают ряд особенностей при их взаимодействии. В частности, типична ситуация, когда второй нейрон генерирует спайки в ограниченном диапазоне частот сигнала, генерируемого первым нейроном.

Наконец, резонансный механизм возбуждения проявляет себя и при возбуждении ансамбля из двух возбудимых нейронов шумовым сигналом, результатом чего является немонотонная зависимость отношения их частот от интенсивности шума.

Как было установлено ранее, проявление эффекта когерентного резонанса в одиночных возбудимых системах обоих типов весьма сходно, и проводить какое-либо деление по типу поведения детерминированной модели не имеет смысла. Полученные нами результаты показывают, что для ансамблей возбудимых систем это не так. Очевидно, что режимы функционирования, например, модели нейронной сети Копелли и ей подобных [17, 18, 23] при возбуждении шумовым сигналом должны существенно меняться при изменении свойств составляющих ее нейронов и временных характеристик синаптических связей. Данное обстоятельство открывает обширное поле для дальнейших исследований.

*Работа была частично поддержана грантами РФФИ 04-02-16769, INTAS 01-2061, NOC REC-006, а также грантом Министерства образования РФ А03-2.9-362.*

## Библиографический список

1. Longtin A., Chialvo D.R. Stochastic and deterministic resonances for excitable systems // *Phys. Rev. Lett.* 1998. Vol. 81, № 18. P. 4012.
2. Longtin A. Effect of noise on the tuning properties of excitable systems // *Chaos, Solitons and Fractals J.* 2000. Vol. 11. P. 1835.
3. Longtin A. Phase locking and resonances for stochastic excitable systems // *Fluctuation and Noise Letters.* 2002. Vol. 2, № 3. P. L183.
4. Yoshino K., Nomura T., Pakdaman K., and Sato S. Synthetic analysis of periodically stimulated excitable and oscillatory membrane models // *Phys. Rev. E.* 1999. Vol. 59, № 1.
5. Pakdaman K. Periodically forced leaky integrate-and-fire model // *Phys. Rev. E.* 2001. Vol. 63. P. 041907.
6. Kazantsev V.B. Selective communication and information processing by excitable systems // *Phys. Rev. E.* 2001. Vol. 64. P. 056210.
7. Izhikevich E.M. Neural excitability, spiking and bursting // *Int. J. of Bifurcation and Chaos.* 2000. Vol. 10, № 6. P. 1171.
8. Izhikevich E.M. Resonate-and-fire neurons // *Neural Networks J.* 2001. Vol. 14. P. 883.
9. Morris C. and Lecar H. Voltage oscillations in the barnacle giant muscle fiber // *Biophys. J.* 1981. Vol. 35. P. 193.
10. Scott A.C. // *Rev. Mod. Phys.* 1975. Vol. 47. P. 487.
11. Keener James, Sneyd James, *Mathematical Physiology*, Springer, 594-607 (1998).
12. Hodgkin A.L., Huxley A.F. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve // *J. Physiol. London.* 1952. Vol. 117. P. 500.
13. Rinzel J. and Ermentrout G.B. *Methods in Neuronal Modeling*, edited by C. Koch and I. Segev (MIT Press, Cambridge, 1989).
14. Wang X.-J. Genesis of bursting oscillations in the Hindmarsh-Rose model and homoclinicity to a chaotic saddle // *Physica D.* 1993. Vol. 62. P. 263.
15. Mochlis J. Canards in a surface oxidation reaction // *Nonlinear Science.* 2002. Vol. 12. P. 319.
16. Постнов Д.Э., Шишкин А.В., Сецинский Д.В. Стохастическая динамика возбудимой системы в области подпороговых колебаний // *Изв. вузов. ПНД.* 2003. Т. 11, № 6. С. 104.
17. Kopell N., Ermentrout G.B., Whittington M.A. and Traub R.D. Gamma rhythms and beta rhythms have different synchronization properties // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.* 2000. Vol. 97. P. 1867.
18. Postnov D., Sosnovtseva O. and Setskiny D. Rhythmic activity of noisy neural circuits // *Fluctuation and Noise Letters.* Vol. 3, № 3. P. L275.
19. Pikovsky A., Kurths J. Coherent resonance in a noise driving excitable system // *Phys. Rev. Lett.* 1997. Vol. 78. P. 775.
20. Longtin A. Autonomous stochastic resonance in bursting neurons // *Phys. Rev. E.* 1997. Vol. 55. P. 868.
21. Neiman A., Saporin P.I. and Stone L. Coherence resonance at noisy precursors of bifurcations in nonlinear systems // *Phys. Rev. E.* 1997. Vol. 56. P. 270; Lee S.-G., Neiman A. and Kim S. Coherence resonance in a Hodgkin-Huxley neuron // *Phys. Rev. E.* 1998. Vol. 57. P. 3292.
22. Постнов Д.Э., Сосновцева О.В., Сецинский Д.В., Борисов В.С. Генерация и синхронизация стохастических колебаний в связанных возбудимых системах // *Изв. вузов. ПНД.* 2001 Т. 9, № 3. С. 15.



23. *Sosnovtseva O.V., Setsinsky D., Fausboll A., Mosekilde E.* Transitions between beta and gamma rhythms in neural systems // *Phys. Rev. E.* 2002. Vol. 66. P. 041901.

*Саратовский государственный университет*

*Поступила в редакцию 15.03.2004  
после доработки 27.10.2004*

## RESONANCE MECHANISM OF EXCITABILITY IN DYNAMICS OF COUPLED NEURONS

*D.E. Postnov, D.V. Setsinsky, L.S. Ryazanova*

Dynamical features of different type neural models are investigated. We explore the difference in excitability mechanisms with external periodic signal. We show features of deterministic dynamics of ensemble of two coupled systems. We study noise-induced effects in ensemble of two neurons.



*Постнов Дмитрий Энгелевич* - профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики СГУ. Доктор физико-математических наук (2001). Область научных интересов - сложная динамика математических моделей биологических систем, индуцированные шумом эффекты в нелинейных динамических системах. Автор 56 научных статей и книги «Chaotic Synchronization. Application to Living Systems» (World Scientific, 2002).

E-mail: [postnov@chaos.ssu.runnet.ru](mailto:postnov@chaos.ssu.runnet.ru)



*Сецинский Дмитрий Вячеславович* родился в 1978 году. Окончил физический факультет СГУ (2000). Кандидат физико-математических наук (2004), ассистент кафедры радиофизики и нелинейной динамики СГУ. Область научных интересов - нелинейная динамика стохастических систем. Имеет 7 публикаций



*Рязанова Людмила Сергеевна* окончила физический факультет Саратовского государственного университета в 2004, в этом же году поступила в очную аспирантуру. Область научных интересов - нелинейная динамика биологических систем. Имеет 2 публикации.



## ХАРИЗМА: РЕПЛИКАЦИЯ ВОСПРИЯТИЯ

*Б.Н. Пойзнер*

Почему феномен харизмы заслуживает внимания социосинергетики? Как изменилось содержание понятия «харизма» от античности до наших дней? В чем особенность восприятия харизмы в русской культуре? Как выглядит окружение харизматика через призму нелинейной динамики? Автор стремится ответить на подобные вопросы, исходя из положения: распространение мнения о некой личности как харизматической - типичный случай репликации культурного образца. Автор опирается на работы по синергетике, культурологии, социологии, лингвистике, истории науки, философской антропологии, примеры стиля публицистов.

В предыдущих частях статьи харизма описана как психологическое явление, восходящее к первобытному обществу. Раскрыта этимология, константы и переменные смысла понятия «харизма». Затронуты контексты, в которых оно используется в христианстве, иудаизме, восточной философии. Отмечены некоторые семантические особенности его в русском, французском, английском языках. Сопоставлены трактовки харизмы в шаманизме, христианстве, современной культурной практике (отличающейся вульгаризацией этого слова). Сопоставлены понятия «харизматик» и «гений». Репликация структур человеческой активности интерпретирована как динамический аспект культуры и механизм ее самообновления.

### Часть 3

В третьей части описаны этапы нелинейного взаимодействия массы, харизматика и его промоутеров. Привлечена схема «порядок из хаоса», дополненная понятием репликации. Предложенный синергетический подход используется для интерпретации восприятия советскими гуманитариями академика Н.Я. Марра и его «нового учения о языке». Отношение к харизматику обсуждается как одно из проявлений духа народа.

### 5. Динамика отношения к харизме и ее собственнику

Ныне массы воздействуют  
не отступничеством, а заражением  
*J. Baudrillard*

А вот пророк - провокатор  
*Л. Капридова [Анаграмма]*

Еще в 1930-е гг. К.Г. Юнг указывал: в современном обществе отдельная личность ничтожна и бессильна, она испытывает неуверенность в правоте собственных суждений. На языке синергетики подобное состояние можно назвать

далеким от равновесия. Стараясь преодолеть свое бессилие, человек отождествляет (идентифицирует) себя с какой-нибудь организацией: государством, церковью, партией *etc.* Вступление в нее приносит облегчение вследствие коллективизации ответственности за социальные действия: сняв ее с себя, индивид перекладывает ее на корпорацию. В новом состоянии личность обречена на когерентность: ей предписано мыслить и вести себя в социальном плане так, как этого требует ее организация. Массовый человек все больше теряет свою индивидуальность, способность критически мыслить и все менее склонен самостоятельно принимать моральные решения. «Для компенсации своей хаотичной бесформенности масса творит себе “фюреров”, а они неизбежно впадают в инфляцию собственного “Я”», - считал К.Г. Юнг [7, с. 119].

Напротив, любой индивид, хоть чуть-чуть видимый на мировой сцене, способен показаться не критичной публике выразителем массового движения и носителем общественного мнения, то есть собственником харизмы. И лишь на этом основании сообщество его приемлет либо ведет с ним борьбу. «Массовое внушение тут обычно преобладает, а потому остается неясным: является ли его послание собственным его деянием, за которое он несет личную ответственность, либо он просто функционирует как некий мегафон, передающий коллективные мнения» [7, с. 120-121].

Вдумываясь в интерпретации социальных ролей харизматика и его последователей, выполненные М. Вебером, К.Г. Юнгом, Э. Шилзом, П. Бурдые, можно предположить, что на протяжении истории последовательность стадий эволюции харизматика остается почти неизменной. Рискнем наметить этапы деятельности харизматика по структурированию массы и его взаимоотношений с ней, а также с социокультурным «фоном». На рис. построена упрощенная схема,

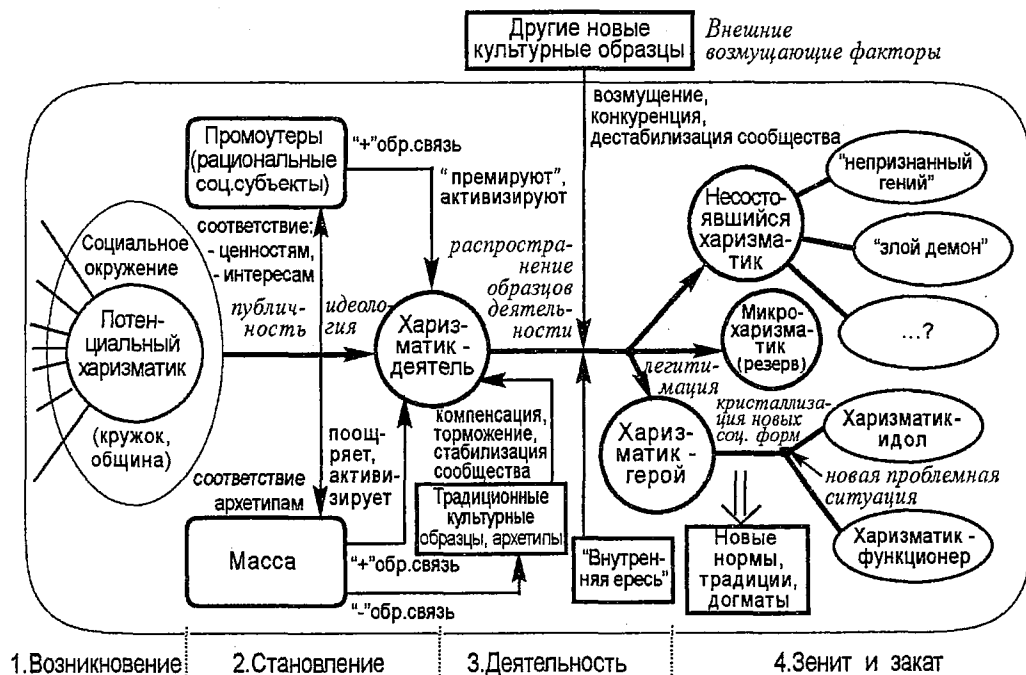


Рис. Этапы взаимодействия массы, харизматического лидера и его промоуторов

\* Ссылки с [1-232] см. в библиографических списках статьи Б.Н. Пойзнер. Харизма: репликация восприятия. Часть 1 // Изв. вузов. ПНД. 2004. Т. 12, № 1-2. С. 80 и Часть 2 // Изв. вузов. ПНД. 2004. Т. 12, № 3. С. 84

напоминающую бифуркационную диаграмму возможных ситуаций. (Схема разработана с участием С.В. Земцовой и В.В. Негруля.) Достаточно условно можно выделить четыре стадии жизненного цикла харизматика: возникновение, становление, активная деятельность, зенит и закат.

**А. Возникновение.** Мнение о некоторой персоне как о потенциальном харизматике обычно зарождается в небольшом сообществе: кружке, общине. Потребность в харизматике обостряется с приближением к точке бифуркации в развитии социокультурной системы [72, с. 335-359; 74, с. 65-73; 75, с. 127-135; 77, с. 82-84; 176, с. 216-265; 179, с. 12-25], то есть с углублением кризиса в (со) обществе. Для исторических периодов, когда рушатся основания социального порядка и система находится на развилке дорог в свое будущее, Ю.М. Лотман нашел запоминающийся образ: «Клио на распутье» [233]. Функцией харизматика здесь является выдвигание и проведение в жизнь новых (или «хорошо забытых» старых) ценностей и ориентиров, которым должны следовать массы и которые могут определить облик иного («исправленного» [200, с. 104-113]) социального порядка.

Чем в этой ситуации выделяется наша культура? Ответим обобщением, принадлежащим Н.А. Хренову: «<...> мы имеем дело со специфическим типом культуры, в которой состояние переходности представляет не просто один из сменяющихся друг друга исторических переходов, а период исключительный, определяющий логику русской истории вообще <...> Переходность оказывается определяющим состоянием, по отношению к которому остальные состояния воспринимаются второстепенными, в том числе, и стационарное состояние. Иначе говоря, в России история оказывается историей перманентного перехода» [179, с. 25]. В стране «вечной» бифуркации харизматик, очевидно, всегда - *persona grata*. Но, может быть, русской натуре переходность эта чужда? Г.В. Флоровский (в «Путь русского богословия») опровергает такое предположение. «Слишком привыкли русские люди, - свидетельствует историк, - праздно томиться на роковых перекрестках, у перепутных крестов... И есть в русской душе даже какая-то особенная страсть и притяжение к таким перепутьям и перекресткам. Нет решимости сделать выбор. Нет воли принять ответственность» (цит. по [179, с. 25]).

Надо признать, что анализ взаимоотношений харизматика и его сторонников в нашем отечестве предполагает обращение к довольно критическим суждениям. Поэтому от читателя можно ожидать упрека в «такой провинциальной, безнадежно провинциальной эмоции, как русская русофобия». Здесь процитированы слова С.С. Аверинцева [234, с. 8]. Однако автор не отбирал специально ни «русофобские», ни «русофильские» оценки, а работал с тем материалом, который оказался доступен. Один из мотивов подготовки данной статьи можно выразить афористическим тезисом С.С. Аверинцева: «Не последний смысл истории - в том, что она освобождает ум от собственной фатальности: история как знание - от истории как претерпевания» [234, с. 14].

**Б. Становление.** Очередной этап жизни харизматика начинается, когда его деятельность становится публичной (см. рисунок). Объективно харизматик (особенно в политике) несет в себе как иррациональное (и потому в некотором смысле хаотическое [71]) начало, базирующееся на эмоциях, так и логическое, рациональное, упорядочивающее начало. Такой двойственности на рисунке соответствует пара социальных субъектов. Во-первых, это масса, то есть пассивная и инертная совокупность людей, в восприятии и мышлении которых (незаметно для них) господствуют юнговские архетипы. Во-вторых, это «промоутеры» (от англ. *promoter* - букв. «помогающий», «способствующий») харизматика, действующие в его поддержку рационально, исходя из своих ценностей и интересов. Таковы, скажем, представители образованных сословий [30].

Потенциальный харизматик, претендующий на статус харизматика - общественного деятеля со своей идеологией, должен соответствовать как архетипальным ожиданиям массы, так и запросам своих промоутеров с немассовым сознанием. Чем выше степень соответствия, тем эффективнее оба социальных субъекта активизируют, поощряют, психологически «премируют» харизматического вождя. В свою очередь, тем быстрее он, улавливая общественные настроения, набирает силу, тем успешней становится его деятельность. То есть имеет место положительная обратная связь с обоими субъектами. Связь проявляется в таких формах, как массовое обожание, идеологическая, информационная и даже финансовая поддержка промоутерами.

Как уже отмечалось, приписывание харизмы обусловлено не столько объективными качествами человека, сколько мнением о них, которое тесно связано с *представлениями*, бытующими в данном сообществе. А их подоплеку составляют универсальные структуры: архетипы (по К.Г. Юнгу), парные оппозиции (по К. Леви-Стросу), ядерные культурные образцы (по Н.С. Розову). Все эти структуры суть репликаторы, и именно они лежат в основе общераспространенных представлений о мире, где мы живем. Поэтому социосинергетическую схему (см. рисунок) следует рассмотреть в плане языкового сознания массы. Заметим, что успешность харизматика (измеряемая числом его приверженцев) зависит от психологических особенностей репликации некоторых базовых структур восприятия. Речь идет прежде всего о типичных для данного сообщества структурах восприятия словесных форм.

Известно, что слово есть знак, то есть означающее, которое соответствует некоторому означаемому. Причем, как подчеркивает Р. Барт (1965), «означающее есть “нечто”, подразумеваемое субъектом, употребляющим данный знак <...> Означающее является не “вещью”, а нашим представлением этой вещи». Так, в слове бык означаемым является не животное бык, но психический образ этого животного [235, с. 132]. Кроме того, согласно Н. Хомскому, человек как вид наследует правила языка («лингвистические универсалии»). Будучи немногочисленными, они, тем не менее, позволяют генерировать неограниченное количество предложений. Н. Хомский показал возможность выделять «глубинные структуры», смысл которых сохраняется в синтаксически различных предложениях (то есть в речевых единицах, созданных различными средствами) [236, с. 948].

Согласно положениям социологии и социальной психологии (Э. Дюркгейм, Л. Леви-Брюль, С. Московичи), сознание человека двойственно. Будучи носителем коллективного (социального) сознания, он оперирует верованиями и представлениями, которыми владеет совместно с другими членами сообщества по традиции либо по соглашению. А будучи носителем индивидуального сознания, он оперирует идеями и образами, полученными из опыта или с помощью рассудка. Очевидно, что коллективные представления, общие для членов сообщества, подвергаются репликации. В частности, они передаются в социальной группе «из поколения в поколение, они навязываются в ней отдельным личностям, пробуждая в них, подобно обстоятельствам, чувства уважения, страха, поклонения и т.д. в отношении своих объектов, они не зависят в своем бытии от отдельной личности». Так, «язык навязывает себя каждой из этих личностей, он предшествует ей и переживает ее». При этом, естественно, «коллективные представления имеют свои собственные законы» [237, с. 9].

Отсюда ясно, что достижение цели харизматическим лидером - наращивать ресурс репликации признания своей персоны (конкурируя в обществе с другими харизматиками) - требует от него не просто «выбирать слова». Чтобы добиться эффективной коммуникации с возможно более широкой аудиторией, ему надлежит

пользоваться лексикой, выражающей специфику картины мира данной субкультуры (скажем, любителей творчества «бардов», прихожанок православных храмов, пенсионеров, в прошлом работавших на заводах, и т.п.). Для описания соответствующего механизма целесообразно, на наш взгляд, обратиться к терминам лингвокультурологии.

Она исследует живые процессы коммуникации и связь используемых там языковых единиц (например, фразеологизмов, пословиц, цитат, имен исторических и фольклорных персонажей) с современным менталитетом народа как национально-лингво-культурного единства. Совокупность таких единиц принято рассматривать как культурный минимум. Он отражает «представления, модели восприятия, способы действия и их символы, за которыми в данном обществе закреплён статус “правильных” и “необходимых для запоминания”». Одновременно такой минимум, «предлагая данные феномены в качестве образцовых, эталонных, задаёт ориентиры для “правильного” поведения в этом социуме». Указанные языковые единицы восходят к фактам материальной, социальной или духовной культуры народа. А некоторые образы, стоящие за языковыми единицами, интерпретируются его «“коллективным бессознательным” в пространстве категорий или установок культуры» [238, с. 9-10]. В этом кроется один из механизмов воздействия харизматического вождя на массы.

В сознании человека национальная культура существует в форме так называемого национального культурного пространства. Иначе говоря, на практике мы имеем дело «с массовым сознанием представителей того или иного национально-лингво-культурного сообщества». «Ядро» культурного пространства составляет когнитивная база - «структурированная совокупность знаний и национально маркированных и культурно детерминированных представлений, необходимо обязательных для всех представителей данного национально-лингво-культурного сообщества». Владение когнитивной базой предопределяет адекватность общения между носителями данного языка [238, с. 10-11], в частности, харизматика с его приверженцами. Среди репликаторов различных типов, содержащихся в когнитивной базе, имеются так называемые прецедентные (от лат. *praecedens* - «предшествующий») феномены, хорошо известные всем, кто составляет национально-лингво-культурное единство: прецедентные тексты, ситуации, имена и высказывания. По определению, прецедентный текст - это законченный и самодостаточный продукт речемыслительной деятельности; сложный знак, сумма значений компонентов которого не равна его смыслу. Он знаком любому среднему члену национально-лингво-культурного сообщества. Таковы произведения художественной литературы («школьная классика»), тексты песен, рекламы, анекдотов, политическая публицистика и т.п. Прецедентная ситуация есть некая «эталонная», «модельная» ситуация, отличительные признаки которой входят в когнитивную базу (скажем, «Изгнание из Рая», «Превращение из Савла в Павла», «Лобное место»). Прецедентное имя - индивидуальное имя, связанное или с широко известным текстом (например, «Печорин», «Баба Яга»), или с прецедентной ситуацией («Иван Сусанин», «Смутное время»). К прецедентным высказываниям относятся пословицы, цитаты из текстов различного характера и другие коммуникативные единицы, подобно прецедентным текстам, постоянно воспроизводящиеся в речи носителей языка («Кто виноват?», «Хотели, как лучше, а вышло, как всегда» и т.п.). Обратим внимание, что прецедентные высказывания по своей структуре и функции ориентированы не на передачу сообщения, а на эмоции адресата.

В репликационном плане важно то, что прецедентный феномен, присутствуя в когнитивной базе, выступает как общий, обязательный для всех представителей национально-лингво-культурного сообщества, *инвариант восприятия*. То есть за

прецедентным феноменом всегда стоит некое представление о нем, и каждому носителю данного этнокультурного менталитета вменяется в обязанность понимать прецедентный феномен однозначно. (Вспомним плакат 1941 года «Родина-мать зовет!» У людей, (пере)воспитанных в советском духе, он не вызывал вопроса: куда? Как минимум - на войну, как максимум - на гибель.) Это именно инвариант восприятия, поскольку он делает все - многократно возобновляемые - обращения к прецедентному феномену (в речи, в тексте) «прозрачными», понятными всем без расшифровки и комментария. И в плане понимания механизмов восприятия харизмы принципиально то, что «функция, которую выполняют прецедентные феномены в целом, близка функции мифа в традиционном обществе. Представление, стоящее за прецедентным именем, по сути, и является «свернутым мифом»». Прецедентные имена, как и другие феномены, «определяют шкалу ценностных ориентаций национально-лингвокультурного сообщества, формируют набор “героев” и “злодеев”», то есть «отражают и одновременно задают определенную парадигму поведения» [238, с. 16-18, 26, 38]. Очевидно, если имя харизматика становится прецедентным феноменом, то это - в режиме положительной обратной связи - увеличивает количество его приверженцев. Как известно, человеческое имя и акт именованья в целом - сложные по происхождению и функциям репликаторы. Разностороннее обсуждение этих вопросов предпринято в трудах [90; 125-128; 198; 212]. Так, продуманный выбор имен для персонажей художественного произведения обеспечивает их семиотическую функцию, но значение таких «сигналов» нередко ускользает от читательского сознания. Несмотря на кажущуюся произвольность, именование обычно обусловлено социокультурными факторами и ценностными предпочтениями автора (например, [239; 240]). Добавим, что моделью для приписывания харизмы тому или иному деятелю невольно служит концепт национального героя. (Во время выборных кампаний PR-технологи во всю эксплуатируют его.) Причем в нашей культуре он сложился сравнительно поздно - к первой трети XIX в. [241], а официально одобренные национальные герои еще каких-нибудь 15 лет назад были персонажами анекдотов [21; 175].

Наряду с прецедентными феноменами (восходящими к определенному прототипу) в когнитивной базе имеются коммуникативные единицы, называемые стереотипами (для них нельзя указать конкретного прототипа). Таковы стереотипные образы «восход», «путь», стереотипные ситуации «пауки в банке», «экзамен» и пр. В качестве образа-представления стереотип есть результат отражения в сознании личности «типового» фрагмента реального мира. В качестве сценария ситуации стереотип побуждает человека к стандартным (в данном сообществе) актам речевого поведения в ходе общения [238, с. 18-19].

Нетрудно видеть, что благодаря усвоению людьми содержания когнитивной базы в ходе социализации (прежде всего - в средней школе) обеспечивается когерентное приписывание ими некоему лицу харизмы, равно как и когерентность восприятия ими посланий от него. Разумеется, культурное пространство (как форма существования культуры в сознании) обладателя дара и культурное пространство его почитателей могут совпадать лишь частично, более или менее широко пересекаясь. В этом отношении показательны диалоги московского филолога В.Д. Дувакина (1909-1982) с Анной Ахматовой (1889-1966) [242], актрисой и театральной деятельницей А.В. Азарх-Грановской (1892-1980) [243], философом культуры М.М. Бахтиным (1895-1975) [244]. Будучи профессионалом, В.Д. Дувакин адекватно оценивает масштаб личности своих собеседников, их место в истории отечественной культуры *etc.* Но порой и он, и другой участник разговора, называя одни и те же известные события или фигуры, то есть прецедентные феномены, оперируют существенно не совпадающими

коллективными представлениями. А не совпадают они потому, что сформированы «коллективами», принципиально различающимися по своему историческому опыту и ценностям: советским образованным сообществом и досоветским, продолжавшимся в режиме «внутренней эмиграции». Чтобы выявлять и анализировать разрыв русского культурного пространства, проявляющийся в подобных диалогах (но, естественно, не только в них), и его последствия, применима методология М.М. Бахтина. Ее продуктивность для решения этой задачи доказывает на материале книги [244] В.Л. Махлин, исследователь бахтинского творчества. В частности, он предлагает емкую формулировку: «люди разобщенных русской революцией смежных поколений» (например, М.М. Бахтин и В.Д. Дувакин) [245, с. 5]. Продолжая его мысль, логично допустить, что достаточно мощная социокультурная бифуркация неизбежно влечет разобщенность, размежевание поколений: они оказываются, если прибегнуть к профессиональному термину, на расходящихся ветвях бифуркационной диаграммы. В наши дни разрывы национального культурного (а с ним - и ценностного) пространства вызываются не только социально-политическими событиями. По своим социокультурным последствиям все более влиятельными становятся научно-технические достижения. Растущей частоте их появления соответствует бифуркационная диаграмма типа «поваленное дерево» со сгущением ветвей. Видимо, в такой ситуации «средний» человек особенно уязвим для атак поклонников чьей-то харизмы.

**В. Деятельность.** С ростом активности или радикализма харизматика, распространяющего новые образцы деятельности, в цепи обратной связи между ним и массой может проявляться ограничение консервативного типа. Масса, руководствующаяся определенными традициями и архетипами, отвергает некоторые новации, предпочитая в обстановке углубляющегося кризиса обратиться (иногда неявно) к опыту предков. Ограничение это создает отрицательную обратную связь (см. рисунок). Ее неблагоприятные для лидера проявления, видимо, можно описывать в терминах: торможение, компенсация, диссипация, стабилизация сообщества, запаздывания и пр. Вклад в усиление либо ослабление отрицательной обратной связи способны внести и архетипы, скажем, разделение свои/чужие. Между тем, «харизма живет новизной», а отсутствие новых идей убийственно для вождя [9, с. 89].

Зависимость харизматика от архетипов и традиции - в данном сюжете антифеминистской (от лат. *femina* - «женщина») - тонко смоделировал Д.Н. Садовников (1847-1883) в стихотворении «Из-за острова на стрежень...» [246, с. 33-35]. Народ переделал его в песню. Не потому ли, что поэт выразил в нем архетипальные мотивы? Вдумаемся, как - согласно сюжету (легенде) - Степан Разин, почувствовав ущерб харизме в глазах сотоварищей («Насмешки, шепот слышит пьяный атаман...»), восстановил ее. Во-первых, ритуальным обращением: «Эх, кормилица родная, / Волга, матушка-река!» - он актуализировал в соотечественниках эмоцию хтонического (от др.-греч. *χθονιος* - «земной», «туземный», «подземный») мистицизма. Во-вторых, своему отказу от «полоненной княжны» (чего и добивалось его мужское окружение) атаман придал фундаментальный смысл искупительной жертвы. А с нею связан архетип, существенный и для языческого, и для христианского мировосприятия. Их сочетание, надо полагать, было типично для приверженцев Разина [36]. В-третьих, он безошибочно выбрал содержание символа, с которым ассоциировался его поступок. Ведь княжну он мог бы лишит жизни и на суше. Но почти во всех мифологиях вода - символ первородного Хаоса. Разинский бунт - торжество хаоса социального. Лишь благодаря хаосу случилась (и его семиотически выразила) «свадьба» княжны и «донского мужика», в условиях социального порядка никак



невозможная. В этом смысле Степан принес княжну в жертву не только водяной стихии, но и «общему делу» своей корпорации. Поэтому его «ребята» готовы включиться в ритуал, признав правоту лидера, то есть грянуть «хоровую / За помин ее души».

Как утверждает американский социолог Э. Шилз в статье «*Charisma, order and status*» (1965), «склонность приписывать кому-либо харизму имеет глубокую связь с потребностью в социальном порядке. Приписывание харизматических качеств происходит при непосредственном проявлении силы как таковой - силы, создающей порядок, разоблачающий порядок, раскрывающей суть порядка. Это приписывание есть реакция на превосходящую упорядочивающую силу другого» (цит. по [247, с. 426]). Но желанный порядок достигается через слом существующего. В 1917 г. вождь революции выбрал самое экономичное решение - привести в действие разрушительные инстинкты массы. А предложенный им порядок имел в основе культурный архетип разбоя. Между тем, многие русские мыслители понимали рискованность развязывания дионисийского, хаотического начала в обществе. Например, поэт-мистагог Вячеслав Иванов изучал культ Диониса [248] и стремился возродить некоторые формы мистерии для удовлетворения запросов современников [249], то есть актуализировать юнговские архетипы, архаичные формы искусства *etc.*, проявляющиеся и в следовании харизматику. За полвека до работ Э. Шилза Иванов в цикле «Спорады» (от др.-греч. *олораδος* - «отдельный», «одиночный») с горечью писал: «Отрицательный полюс человеческой объективирующей способности, кажется, лежит в сердце нашего народа: этот отрицательный полюс есть нигилизм. Нигилизм - пафос обесценения и обесформления, - характерный признак отрицательной, нетворческой, косной, дурной стихии варварства (составляющей противоположность его положительной, самопроизвольно творческой стихии) <...> Истинный русский нигилизм охотно покорствуется, чтобы послушанием только пассивным отрицать внутреннюю ценность повеления. Дионис в России опасен: ему легко явиться у нас гибельною силою, неистовством только разрушительным» [250, с. 125-126]. Так и вышло.

Социокультурный фон, на котором складываются взаимоотношения харизматика с социальными субъектами, включает в себя действие внешних возмущающих факторов (в первую очередь - экономических и политических), способных препятствовать репликации положительного отношения к харизматику. Естественно, у него тем больше конкурентов, чем многочисленнее сообщество. Ситуацию может усугублять интервенция других (спонтанно возникающих в общем культурном пространстве) культурных образцов. Возмущая умы приверженцев, они - на рынке идей - создают конкуренцию тем, какие распространяет лидер и его единомышленники, дополнительно дестабилизируя сообщество. Не исключены и флуктуации внутрисистемного происхождения. По отношению к программе харизматика такие репликаторы обычно выступают как «внутренняя ересь», как источник раскола в стане его приверженцев. А уверенный в себе харизматик иногда не прочь организовать хорошо темперированный хаос в обществе - вспомним ленинский лозунг: «чем хуже, тем лучше». Вспомним, что 1917 год в России это последовательные стадии солдатского бунта, когда хуже - некуда. Трезвое свидетельство о той бифуркации можно найти, например, в воспоминаниях М.М. Бахтина.

«Что старый режим разлагается, это было всем ясно. Вообще, эта вот история с Распутиным, она... как сказать... роковая и пророческая история <...> Я не приветствовал Февральскую революцию. Более того, я, вернее, наш круг считали, что все это кончится очень плохо <...> Мы знали как раз близко людей, <...> которые выдвинулись Февральской революцией. Мы считали, что все эти

интеллигенты совершенно неспособны управлять государством, неспособны защитить революцию Февральскую. (Если ее нужно защищать.) И поэтому неизбежно возьмут верх самые крайние, самые левые элементы, большевики <...> Я тогда считал, что придет самая крайняя партия, что в России или монархия, или совершенно крайняя охлократия <...> Мы были настроены очень пессимистически: мы считали, что дело кончено. Конечно, монархию нельзя восстановить, да и некому, да и им не на что опереться совершенно, неизбежно победят вот эти самые массы солдат, солдаты и крестьяне в солдатских шинелях, которым ничего не дорого, пролетариат, который не исторический класс, у него нет никаких ценностей - собственно, ничего у него нет. Всю жизнь он боролся только за очень узкие материальные блага. И что именно они захватят власть. И сбросить их некому будет, потому что вся эта вот интеллигенция - она на это неспособна» [244, с. 132-134, 136].

Возмущения наиболее опасны непосредственно перед бифуркацией (черная точка на рисунке), когда культурный образец позитивного отношения к харизматике еще не имеет достаточного ресурса репликации, еще не обогнал конкурирующие культурные образцы по темпу самовоспроизведения. Согласно схеме «порядок из хаоса» [168, с. 216-265], исход бифуркации непредсказуем. Если процесс самоорганизации в системе инициируется преимущественно репликатором признания харизматика, то он становится победителем (воспроизводится архэ культурного героя).

Например, в Теософском обществе (основано в 1875 г., теософия - форма вневероисповедной мистики, ориентирующая человека на достижение оккультного «знания») и связанном с ним движении к началу XX в. возник кризис. В итоге выделилось новое учение - антропософия (опирающаяся, в частности, на христианскую мистическую традицию, трактуемую неортодоксально). Во главе ее встал Р. Штейнер, австрийский мыслитель, мистик-духовидец, исследователь творчества Гете. Личность и педагогическая деятельность Р. Штейнера создали ему широкий круг почитателей, в том числе - в предреволюционной России (так, влияние антропософии испытали Андрей Белый, М. Волошин, В. Кандинский) [2, с. 31-32, 390-391, 451]. Вот такую характеристику, дал ему религиозный философ Н.А. Бердяев: «Штейнер <...> произвел на меня сложное впечатление и довольно мучительное. Но он не произвел на меня впечатления шарлатана. Это человек, который убеждал и гипнотизировал не только других, но и самого себя. У него были разные лица, то лицо добродушного пастора, - он и одет был, как пастор, - то лицо мага, владеющего душами. В нем было что-то аскетическое и страдальческое. Вероятно, его главным соблазном была власть над душами. Редко, кто производил на меня впечатление столь безблагодатного человека, как Штейнер. Ни одного луча, падающего сверху. Все хотел он добыть снизу, страстным усилием прорваться к духовному миру» (цит. по [251, с. 115]).

**Г. Зенит и закат.** После бифуркации в сообществе устанавливается новый порядок, но вовсе не обязательно тот, какой обещал вождь (см., скажем, [31; 32; 38-40; 64; 65]). Теперь вторжение «чужих» культурных образцов не столь опасно, а порой даже на руку лидеру: образ врага усиливает харизму и повышает акции ее собственника.

Описывая период после бифуркации, привлечем теорию М. Вебера: харизматический тип господства отличается отсутствием установленных (рационально или по традиции) правил, то есть решения выносятся иррационально; на основании откровения или творчества, деяния и личного примера. Отношения между харизматиком и его последователями основаны на чувстве эмоциональной общности. Но постепенно община или группа сторонников формируется как объединение на базе твердых правил и обязанностей. Община

складывается теперь как продукт повседневности, рутинных форм. Универсальный процесс, с помощью которого учение харизматика проникает в повседневность в рамках постоянного учреждения, - это преобразование личной приверженности пророку в следование его учению внутри общины. В итоге для динамики отношения к харизматической личности характерна рутинизация («оповседневнивание», или «обудничивание», по М. Веберу) [6, с. 129].

После бифуркации (см. рисунок) воцаряется новый порядок: идеологемы, которые провозглашает харизматик-герой, легитимируются и превращаются в социальные нормы сообщества. Они выражаются в конкретных образцах мышления и поведения (иллюстрации из нашей истории даны в [16-18; 21; 27; 40; 41; 45, 60; 63; 186; 252; 253]). Деятельность харизматика утрачивает новизну, поскольку идет кристаллизация новых форм социального порядка. Некогда маргинальные культурные образцы становятся ядерными и повсеместными, (вос)принимаясь как само собой разумеющиеся. Поэтому харизма удачливого лидера может убывать синхронно этим процессам (см. сюжеты в [17; 29; 32]). Ее судьба в глазах сторонников вождя зависит от того, как он решит новую проблемную ситуацию (вторая точка бифуркации на рисунке). В случае очередной победы харизматик может сделаться идолом, то есть предметом культа (посмертно или при жизни [28]). Либо - верховным функционером, как Б.Н. Ельцин (об этой поре пишут в [46; 48-50; 52; 53; 146]).

Но бифуркация (первая точка на рисунке) может оказаться и не столь успешной для харизматика-деятели. Воздействие внешних или внутренних флуктуаций способно повлечь процессы, из-за которых провозглашаемые им ценности воспримет только незначительная часть публики. Либо он останется в узком кругу верных последователей (*à la* Троцкий в изгнании) и т.п. В этом качестве микрохаризматик - наряду с десятками подобных - пополняет резерв будущих претендентов на гегемонию в сообществе. То есть он замыкает цикл: с чего начинал, тем и кончил.

Читателю, размышляющему над моральными сторонами деятельности носителя благодати, здесь, возможно, вспомнится строчка Федора Сологуба: «расточитель дарованных благ». А, возможно, - теория *потлача* (от фр. *potlash* < сев. индейск. - «дар соперничества»; праздник у индейцев американского Северо-запада, на котором в состязании честолюбий собственное имущество полностью уничтожается [254, с. 362]), разработанная Марселем Моссом (1925) и Жоржем Батаем (1933, 1949). Последний считал, что *потлач* - столь же важный феномен культуры, как и принцип экономии ради накопления, который устанавливает запреты на потребление, но обязывает их нарушать в контекстах, связанных с отправлением религиозного культа и с искусством (расходы на театральные и иные представления, на произведения художников, меценатство *etc.*). Более того, «мы плохо пойдем смысл войны и славы, - заявлял Ж. Батай, - если не соотнесем его с приобретением *ранга* путем необдуманной траты жизненных ресурсов, чьей наиболее отчетливой формой представляется *потлач*» [255, с. 63]. Причем то, что лежит в основе *ранга*, - «сакрально, а общая упорядоченность *рангов* называется *иерархией*» [255, с. 65-66].

Еще менее удачный вариант для харизматика-деятели: испытание в точке бифуркации оказалось роковым, и несостоявшийся на все 100% вождь сходит с главной общественной сцены. Позднее он может воспроизводить подходящий культурный архетип, изображая, допустим, непризнанного гения. Более удачливые претенденты либо доминирующая группа могут (из тактических соображений) приписывать ему некую мифическую роль, например злого демона данного массового движения. Так, на показательном процессе 1922 г., устроенном

большевиками над лидерами партии эсеров, им в частности инкриминировали преступления, действительно совершенные эсерами, но ... против царского режима [27].

Опасный недуг харизматика (например, частичный паралич и утрата речи у Ленина 10 марта 1923 г.) способен привести к новой бифуркации. Предчувствие ее - в ситуации раздела власти между большевистскими бонзами - и понимание роли случая выразил Валерий Брюсов. Его позиция противоположна поведению М.М. Бахтина. Брюсов, в знаменитом стихотворении «Грядущие гунны» (1905) предвидевший революцию как победу варварской стихии, пошел к ним на службу (летом 1918 г., в Наркомпрос), вскоре вступил в РКП(б) и был осведомлен о кремлевских делах. В стихотворении «Диადхи» (12 марта 1923 г.), повествующем о полководцах Александра Македонского, наследниках его империи, поэт, возможно, вспоминая также дни октябрьского переворота, писал: «<...> Народ? он - ставка. На-кон брошен, / Да ждет, чья кость решит игру! / Как сметь судить? кто в споре спрошен? / Рок тысяч - у царя в шатру!» (цит. по [256, с. 44]). По ассоциации вспоминается стихотворение Пушкина «Была пора...» (1836). Ключевым для него тоже служит стохастический (от др.-греч. *στοχαστικός* - «догадка», «предположение») аспект, но у Пушкина историческая бифуркация, кажется, получает ценностное оправдание: «Игралища таинственной игры, / Металися смущенные народы; / И высились и падали цари; / И кровь людей то славы, то свободы, / То гордости багрила алтари». Мышление Пушкина сегодня квалифицируют как синергетическое до синергетики (Г.Г. Малинецкий, например). Действительно, он настаивал на том, что «ум человеческий <...> видит общий ход вещей и может выводить из одного глубокие предположения, часто оправданные временем, но невозможно ему предвидеть случая - мощного, мгновенного орудия Провидения» [257, с. 147].

## 6. Советская технология производства харизмы: casus Марра

Для победы дела необходимы соответствующие условия, а вожди найдутся.

*И. Сталин*

Иллюзия: единственная реальность, на которую можно рассчитывать.

*Sardonicus*

Взаимное влияние науки и социокультурных факторов, включая идеологию, обсуждалось широко (см. библиографию в [38; 39; 51; 60; 61; 63; 66; 72; 73; 77; 79; 82; 117; 159; 162; 179; 202; 207; 209; 258-268]). Естественно, это влияние не может не проявиться и в судьбе харизматической личности, возглавляющей научное направление. Обратившись к антологии [264] и монографии В.М. Алпатова [269], интересующийся читатель выяснит все детали классического сюжета: как находят друг друга потребность некоторого сообщества в харизматике (возникшая в силу конкретных социокультурных причин) и образ носителя харизмы, сконструированный вовремя, а главное - по правилам мифотворчества.

Речь пойдет об отношении советских лингвистов к трудам и экстраординарной фигуре академика Н.Я. Марра (1864-1934), археолога, историка культуры и лингвиста. Еще до революции он имел бесспорные заслуги перед кавказоведением и лингвистикой, поскольку открыл важные факты, организовал ряд экспедиций и т.д. Но при этом, тяготея к глобальным обобщениям, он нередко выдвигал абсурдные идеи [270, с. 475]. Будучи полиглотом, он опирался на богатую языковедческую интуицию, нередко подводившую его, но порой опережавшую

достижения современной ему науки. «Мне кажется, что Марр был в языкознании подобием Чюрлениса в живописи», - читаем у Вяч. Вс. Иванова [271, с. 434]. По его мнению, «среди марровских построений наряду с полностью ошибочными есть и такие, которые теперь заново открываются наукой, иногда, правда, с точностью до наоборот» (цит. по [269, с. 25]).

Одно из подобных прозрений относится, по-видимому, к компетенции синергетики. Характеризуя его, укажем, во-первых, на такой масштаб поисков Н.Я. Марром «единой теории языка и культуры, универсальной эволюции всех языков мира», какой позволяет сравнить его замысел с проектом новой полидисциплинарной науки евразийцев 1920-1930-х гг. [272, с. 19]. (К сожалению, в обоих случаях силен привкус радикальной утопии: «речь идет, по сути, об отвержении европейского научного мира, о глубокой враждебности к тому, что, быть может, существует лишь в их воображении - к “западной науке”» [273, с. 171-172].)

Во-вторых, догадки Н.Я. Марра о стадиях «скачков» в развитии языков следуют во времени за обоснованиями возможности возникновения макромутаций и вероятности вызываемого ими сальтационного (от лат. *saltus* - «скачок, прыжок») образования видов. Положения эти начали обосновывать ботаник С.И. Коржинский (в конце 1890-х гг.) и нидерландский биолог Х. Де Фриз (в начале XX в.). Зоолог и биогеограф Л.С. Берг в книгах «Номогенез, или Эволюция на основе закономерностей» (1922) и «Теория эволюции» (1922) выдвинул на первый план - вразрез с теорией Дарвина - категорию конвергенции, то есть независимого приобретения сходных признаков генетически неродственными организмами [273, с. 202], скачкообразность и целесообразность эволюции [274, с. 182]. Причем эта изначальная целесообразность, определяющая грань между косной и живой материей, близка по смыслу к понятию энтелехии у Аристотеля [275, с. 436-438], то есть полной оформленности, завершенности процесса установления (например, самоорганизации [276]). Кстати говоря, Н.Я. Марр привлек Л.С. Берга (наряду с выдающимися отечественными гуманитариями) к деятельности открытого им в Петрограде академического Института яфетидологических изысканий (1921) [269, с. 29]. «Но эти идеи не были восприняты систематиками растений». Ныне же сальтационное происхождение резко обособленных видов «не вызывает сомнения» [277, с. 35]. Скачкообразный характер эволюции признает и объясняет современная генетика развития [278, с. 57]. «В последние десятилетия все больше разнообразных фактов, свидетельствующих, что быстрая, взрывная эволюция служит не исключением, а скорее правилом, по крайней мере, на первых этапах, когда происходит расщепление древней предковой формы на целый верер производных» [279, с. 37].

В-третьих, сегодня ясна параллель между утверждениями Н.Я. Марра и идеями Пражского лингвистического кружка. Среди его участников в 1920-1930-е гг. были географ П.Н. Савицкий, европейски известные языковеды Н.С. Трубецкой и Р.О. Якобсон. Исследователь деятельности кружка отмечает: согласно известной теории Дарвина «“природа не делает скачков”, тогда как для Берга и Якобсона, но также и для Марра существуют “скачки”, “конвульсии”» [273, с. 229].

В-четвертых, сальтационные механизмы эволюции сегодня активно интерпретируют и моделируют, исходя из представлений нелинейной динамики [74-77; 177; 280; 281, с. 140-150], опираясь на модели детерминированного хаоса [282] и самоорганизованной критичности [283]. Учитывая колоссальный объем наблюдений, систематизированных лингвистикой (см., например, [13; 284]), вероятно, имело бы смысл поставить проблему обоснования, разработки, верификации моделей (аналогичных [282; 283]) взрывных процессов в эволюции языков. Разумеется - не впадая в грех редуccionизма и физикализма.

Воздавая должное ряду крупных достижений Н.Я. Марра, его биограф, тем не менее, подчеркивает, что «по складу характера ему было противопоказано заниматься наукой: подход к материалу с заранее готовыми идеями для ученого абсолютно неприемлем» [270, с. 475]. Именно таким подходом отличается *magnus opus* Н.Я. Марра - выдвинутое в конце 1923 г. «новое учение о языке», или «яфетическая теория». Динамика отношения сообщества гуманитариев к этому труду весьма показательна. Попытаемся описать ее, оперируя схемой «порядок из хаоса» [176, с. 216-265] и выделяя некоторые стадии.

**1. Вдали от точки бифуркации.** Еще в 1908 г. Н.Я. Марр объявил, что «к известным к тому времени «семитической» и «хамитической» семьям языков надо добавить третью, которую Марр назвал «яфетической» по имени Яфета, третьего сына библейского Ноя».

**2. Появление нового репликатора.** К 1922 г. ученый утвердился в идее яфетического праязыка как основы всех языков мира. Но его идея была несовместима с постулатами сравнительно-исторического языкознания и не нашла поддержки у профессионалов [269, с. 31]. По разным причинам гипотеза Н.Я. Марра (вначале разрабатываемая им лишь на материале кавказских языков) не была подвергнута современниками сколько-нибудь глубокой критике, что, естественно, укрепило честолюбивого автора в своей правоте [269, с. 17]. Это - субъективные обстоятельства.

**3. Особенности социокультурного хаоса.** Объективные же обстоятельства проявились и в том, что начало 1920-х гг. оказалось для гуманитарных наук в нашей стране точкой бифуркации. С естественным опозданием она последовала за грандиозной бифуркацией, изменившей государственно-политическую эволюцию России. По наблюдениям культурфилософа, революциями и послереволюционной разрухой востребована специфическая личность - «люди игрового, авантюрного типа, легко ориентирующиеся в хаосе жизни и без труда приспособляющиеся к тому, что из этого хаоса структурируется. Вошедшие в правящее сословие, они сами устанавливают правила всеобщей игры» [252, с. 322].

Едва ли не главным правилом всеобщей игры и приметой нового социокультурного порядка (ядерным культурным образцом, по Н.С. Розову) стала идеологическая парадигма. Она утверждала всемогущество науки, а в ней - почти сакральное значение экономико-материалистической доктрины К. Маркса и вмняла ее как основу генеральной картины мира. Переход от хаоса к послереволюционному порядку в обществе осуществлялся посредством все более массовой и ускоряющейся репликации определенной системы культурных образцов (в ущерб всем другим образцам-конкурентам), включая нормы научных исследований. Тем самым осуществлялась принудительная самоорганизация в рамках тех или иных социальных групп. А что касается радикальных новаций в науке, то прецедент революции убеждал простую душу: оказывается, «и невозможное возможно». Такое умонастроение благоприятно для формирования глобального культа верховного вождя и локальных культов вождей местного значения.

В свою очередь, неравновесность социокультурного состояния усиливалась повышенной театральностью общественной жизни. Особенность эта генетически связана, вероятно, с обилием праздников в православном календаре (их в полтора раза больше, чем у представителей других конфессий, живущих по соседству с русскими [55, с. 300-301]). Упомянем также страсть к светским развлечениям, поразившую А. де Кюстина («Россия в 1839 году»). Карнавальность ярко проявилась в период Серебряного века, когда на первый план выдвинулось актерско-игровое начало. Недаром поздний Вячеслав Иванов сравнивал свою жизнь с кинолентой - «прямой уликой» «мною сыгранного бытия» [285, с. 609]. По

характеристике русского философа Ф.А. Степуна, свойственная нашему народу и русской культуре готовность к театрализации жизни «есть не только природное, но социально-возрастное явление» (цит. по [253, с. 316]). А потому народ воспринял большевистский призыв к революции как желанную возможность участвовать в грандиозном разбойно-балаганном действе. Массы с энтузиазмом разыграли его, предвкушая наживу, обещанную режиссерами, тоже склонными к лицедейству (в большинстве своем они нравственно сложились в атмосфере Серебряного века) [253, с. 313, 319-322]. «Двенадцать» Александра Блока и «Конармия» Исаака Бабеля передают дух социальной оргии, народные чувства, связанные с воплощением воровского идеала.

Вовсе не случайно, что партийные предводители и комиссары так пристально следили за ситуацией в театрах [33]. Не забудем, что театр ведет свою родословную от древнейшего ритуала и мистерии. В эпоху Перикла (V в. до н.э.) и последующее время древнегреческий театр принял формы и стал выполнять функции, которые - с теми или иными вариациями - самовоспроизводятся и в наши дни. Одна из функций - познание существенных свойств мира и человека, предъявляемых публике на углубленное рассмотрение. Здесь показательна (подчеркнутая М. Хайдеггером) общая этимология двух слов: театр (от др.-греч. *θεατρον* - «место для зрелищ», «зрелище» < *θεα* - «облик, лик, в котором вещь является»; «вид, под которым вещь выступает»; а также «взгляд», «зрелище») и теория (от др.-греч. *θεωρία* - «наблюдение», «исследование»), которое происходит от глагола *θεωρεῖν*, образованного сращением корней *θεα* и *οραω* - «видеть», в переносном смысле - «замечать», «понимать». Соответственно, *θεατής* - «зритель», *θεωρος* - «созерцатель» [286, с. 41, 42].

И привычка быть зрителем, а не лезть на сцену, желая играть роль главного героя [253, с. 323], оказывается одним из базовых регулятивов, фундаментальных культурных образцов, рожденных древнегреческой цивилизацией. Видимо, чем сильнее эта привычка, тем успешней сопротивляется общество шармовым атакам самозванцев. Напротив, публичные акции харизматика, несмотря на часто присутствующий компонент театральности (скажем, в описаниях итальянского фашизма и выступлений Б. Муссолини почти всегда встречается эпитет «опереточный»), ориентированы на создание атмосферы мистерии. В противоположность древнегреческому театру она предполагает полное вовлечение участника в действие, а отнюдь не наблюдение со стороны. То есть мистерия, фактически, исключает роль зрителя, тем более - исследователя. В связи с этим приведем «диагноз духовного недуга нашей эпохи», сделанный культурологом Й. Хейзингой (1935): «Самым существенным признаком всякой настоящей игры, будь то культ, представление, состязание, празднество, является то, что она к определенному моменту *кончается*. Зрители идут домой, исполнители снимают маски, представление кончилось. И здесь выявляется зло нашего времени: игра теперь во многих случаях *никогда не кончается*, а потому она не есть настоящая игра» [287, с. 332].

Какова же миссия театра в обстановке бифуркации? По мнению культурфилософа Т.А. Апиная, «театральность переходных периодов предстает как поиск и компенсация утраченной целостности мира. Смоделированные общественные роли служат установлению новой социальной системы, во многом искусственной и планируемой идеологами, тогда как естественные роли еще не определились. Тем важнее формы публичной демонстрации таких ролей. «Пионер», «ударник», «передовой советский человек», «спортсмен» - <...> социокультурные роли, которые нужны новому обществу» [252, с. 322]. Ради симметрии врагам тоже поручают декретированные роли. Для удобства распознавания (когда будет дана команда) им соответствуют «имена-клички:

скажем, «буржуй», «кулак», «вредитель», «попутчик» и т.п.» [253, с. 320]. Очевидно, к первому списку следует добавить амплуа «советский носитель харизмы». И дело встает лишь за подбором кандидатуры, подходящей для конкретной сферы деятельности.

**4. Появление ресурса репликации.** Лингвистика не стала исключением [264]. К началу 1920-х гг. в ней, как и в других традиционных гуманитарных науках, назрел методологический кризис: «было мало новых идей, а многие проблемы не поддавались решению» [270, с. 476]. А «яфетическая теория» предлагала или обещала неожиданные решения. Важно подчеркнуть - пишет историк этого феномена, - что поклонниками Н.Я. Марра были в основном люди, готовые принимать его построения на веру. Это были либо представители смежных наук - востоковеды-нелингвисты, историки, литературоведы, - либо лингвисты, далекие от Н.Я. Марра по проблематике, либо люди, в большинстве очень молодые, смотревшие на него с большой дистанции. Так начал складываться механизм создания притягательного мифа, ядро которого составляла недоказанная гипотеза («яфетическая теория») [269, с. 30].

Кроме того, у Н.Я. Марра стали появляться новые ученики. Они происходили из студентов послереволюционного времени. Как позднее признавался один из них, они шли к нему «движимые жаждой новых идей и неповторимой силой неповторимой личности Марра» (цит. по [269, с. 29]). То есть специфическое (по отсутствию критического начала) окружение импозантного ученого, - словно иллюстрируя теории М. Вебера и К.Г. Юнга, - наделило его харизмой, связав с ним свою профессиональную судьбу. Чем же были примечательны новые питомцы *alma mater*? По нашему мнению, ментальность подавляющей части советского студенчества адекватно представил Ф.А. Степун: «В России сейчас растет пафос практицизма и техницизма, но смысл этого пафоса не простая карьеристическая деловитость; его смысл: хозяйствование на весь мир. Отсюда и растущий в СССР национализм. Учитывая происходящее в России, нельзя забывать, что для мужика, попадающего от сохи в вуз, физиология так же не наука, а вера, как для его прадеда в глухой деревне - автомобиль - не автомобиль, а нечистая сила. Наука - это прежде всего возраст духа. Никакой науки в вузах и комсомолах не процветает и процветать не может; там насаждается не наука, а догматическое науковерие, необходимое для большевистского политического обихода» (1928) [288, с. 85].

**5. Первая бифуркация.** Достаточно ли было энтузиазма одних, некомпетентности других и ученического послушания (*magister dixit!*) третьих для преимущественной репликации этого культурного образца? Думается, решающим для торжества мифа стал смелый стратегический ход его автора, чтобы добиться монопольного положения в лингвистике. «Марр после неудачных попыток противостоять советским властям пошел на сделку с ними и окружил себя сомнительными личностями и проходимцами», - полагает Вяч. Вс. Иванов [208, с. 672]. Показательно, что из всех академиков с дореволюционным стажем один только Н.Я. Марр вступил в коммунистическую партию (1930) [270, с. 476]. Благодаря такому ходу, академик сделался фаворитом партийной власти. Он получил орден Ленина, в 1931 г. его избрали членом Всероссийского Центрального Исполнительного Комитета и т.п. [264; 289].

В качестве союзника он вполне отвечал интересам верхов. Увеличение числа симпатизантов марксистской идеологии в академической среде усиливало ее раскол. А новый статус Н.Я. Марра укреплял творимую верхами «государственную легенду» (выражение писателя М.М. Пришвина, 1932 - цит. по [245, с. 27]), предназначенную и для внутреннего употребления наивными патриотами, и для экспорта. Стремительное вознесение Н.Я. Марра фактически



повлекло бифуркацию в развитии отечественного языкознания. Стоит напомнить, что советская жизнь постоянно требовала от человека либо максимальной социокультурной и даже бытовой когерентности, либо экстраординарного поступка с непредсказуемым исходом. Сущность такого бытия помогает понять афоризм 1930-х гг. О.М. Фрейденберг, выдающегося филолога-античника из марровского окружения: «Каждого человека у нас ежечасно ожидает виселица или орден» (цит. по [290, с. 421]). Добавим к ее формуле сегодняшнюю оценку: «Наука в период О.М. Фрейденберг шла в жесткой сцепке с идеологией, когда обвинения в тех или иных научных ошибках автоматически становились обвинением в антигосударственной измене» [291, с. 582].

**6. Дирижирование самоорганизацией и устранение репликаторов-конкурентов.** После демарша Н.Я. Марра «новое учение о языке» приобрело официальный статус и начало повсюду внедряться как «единственно правильное» лингвистическое учение (в Ленинграде, где жил Н.Я. Марр, этот процесс шел быстрее, чем в Москве, где оппозиция ему существовала до 1933 г.). Ученым старой школы не давали работать, ряд отраслей языкознания (славистика, индоевропеистика и пр.) были запрещены», - констатирует его биограф [270, с. 477]. Н.Я. Марр «сам выдвигал сволочей и ничтожества», - без обиняков разъясняла ситуацию знавшая ее изнутри О.М. Фрейденберг (в письме Л.О. Пастернаку - цит. по [290, с. 423]). Самовоспроизводство последователей Н.Я. Марра заметно ускорилося. И среди них все чаще встречались «так называемые “подмарки”: малокомпетентные люди, усвоившие из “нового учения о языке” главным образом лишь идеологические формулировки. Их деятельность заключалась в восхвалении Н.Я. Марра и борьбе с его противниками, получившими общее название “индоевропеистов”» [270, с. 477]. «Марр и его клеветы по сути отменили сравнительно-исторические исследования, заменив их фантастической идеей происхождения всех слов любого языка из четырех элементов», - резюмирует Вяч. Вс. Иванов [208, с. 672].

Высшая политическая санкция, которую теперь получила научная деятельность Н.Я. Марра, увеличила его харизматический потенциал. Апофеозом марризма (за десятилетие он превратился в *mainstream* гуманитарных исследований) стал выпуск пятитомника избранных трудов ученого (1933-1937), а в 1935 г. - шестистотстраничного сборника статей «Академия наук СССР академику Н.Я. Марру». Его авторы развивали мысли метра либо декорировали, а то и маскировали ими свои идеи. Тем не менее, через несколько лет после кончины Н.Я. Марра жертвами террора, проводимого НКВД, стали не только оппоненты академика (в их числе лингвисты-востоковеды Е.Д. Поливанов [208, с. 775-789] и Л.Г. Башинджагян [292]), но и его одиозные соратники по борьбе с «буржуазной наукой» [270, с. 477]. Кто же занял вакансию, возникшую после ухода харизматика-идола? Человек не менее удачливый, но *in sui generis* его антипод. «И.И. Мещанинов всегда вел себя настолько скромно, корректно и задумчиво, что его образ как-то не связался с невероятной концентрацией административной власти в одних руках. Он был академиком с 1932 г., директором двух академических институтов - Археологии и Языка и мышления; с 1937 г. - деканом филфака ЛГУ; с 1939 г. - академиком-секретарем Отдела языка и литературы (ОЛЯ) АН СССР, впоследствии и главным редактором «Известий ОЛЯ». Почти все должности он сохранял до 1950 г., прибавив к ним звезду Героя Труда и Сталинскую премию. После смерти Марра он получил его наследство и ни с кем не собирался его делить. Право трактовать Марра должно было принадлежать одному» [290, с. 432].

**7. Вторая бифуркация.** С культом Н.Я. Марра в СССР было покончено в одночасье мановением руки другого харизматика (тоже родом с таинственного

Кавказа) по кличке Сталин. Его цинично-лицемерную статью, осуждавшую «аракчеевщину в науке», то есть насаждение «нового учения о языке», напечатала «Правда» 20 июня 1950 г. [293]. (Описание сложной динамики противоборства как научных, так и партийно-бюрократических группировок в 1946-1953 гг. и анализ литературных источников сочинений Сталина на темы языкознания даны в [264; 269, с. 143-213; 290; 294].) Разумеется, сколько-нибудь вдумчивый анализ доктрины покойного академика был весьма затруднен раболепным отношением большинства участников «свободной дискуссии в “Правде”» к сталинской критике Н.Я. Марра.

**8. Директивная ликвидация ресурса репликации.** Теперь его идеи носили столь же горячо и поверхностно, как их превозносили лет 20 назад (пример - лекция [295]).

Рискнем предположить, что к критике отвергнутой гипотезы Марра о четырех комбинируемых элементах, лежащих в основе всех языков, возможно, стоило бы обратиться, привлекая в этот раз представления синергетики. (Отрицательное заключение Вяч. Вс. Иванова, вынесенное марровской идее [208, с. 672], цитировалось выше.) Такое обращение, вероятно, породило бы дополнительные аргументы против *idee fixe* Н.Я. Марра. Но не исключено, что оно побудило бы провести исследования математическими методами. Возможно, что результат их применения навсегда похоронил бы «учение о четырех элементах». В противном же случае он выявил бы наличие конечного множества элементов (вряд ли состоящего из постулированной академиком четверицы: «Сал», «Бер», «Йон», «Рош»), удовлетворяющих строгим статистическим критериям, то есть служащих «лингвистическими кирпичиками» для тех или иных групп языков. Что склоняет к такой еретической догадке? Во-первых, обобщение закономерностей процессов эволюции с учетом ее единой системно-физической подоплеки [75, с. 16-18]. Во-вторых, логично допустить, что упоминавшиеся ранее модели детерминированного хаоса [282] и самоорганизованной критичности [283], пригодные для описания селекционных механизмов биологической эволюции, удастся адаптировать для задач сравнительно-исторического языкознания. В-третьих, нашей догадке не противоречит эволюционная интерпретация кажущейся избыточности человеческого генома, мозга и социокультурных структур [206].

Управляемая (партийными органами) самоорганизация положительного отношения в сообществе естественников к «революциям» в биологии, провозглашенным Т.Д. Лысенко, О.Б. Лепешинской *etc.* в конце 1940 - начале 1950-х гг., осуществлялась по тому же шаблону. Но эти фигуры - в отличие от Н.Я. Марра - никогда не были сколько-нибудь значительными исследователями, а их «ретроновации» воспроизводили старинные идеи, уже отброшенные наукой [63; 261; 267]. Восстанавливая обстоятельства, определявшие динамику численности энтузиастов, видевших в Н.Я. Марре обладателя харизмы, нельзя не задуматься об аналогичных сюжетах в гуманитарных науках сегодня. Первой на ум приходит «новая хронология» академика А.Т. Фоменко и его соавторов. Этот показательный эпизод из истории постнеклассической науки (в ряде пунктов несопоставимой с «советской наукой») породил довольно обширную литературу *pro et contra* (см., например, [296]). Правомерно ли квалифицировать академика А.Т. Фоменко как харизматического лидера когорты историков-радикалов? Наверное, судить об этом рано: жизнь его идей продолжается. А вот рассмотреть с позиций социосинергетики, почему и как изменялось с начала 1980-х гг. восприятие читающей публикой его доктрины, возможно, было бы полезно для самосознания научного сообщества.

## Заключение. О духе народа

Нужен новый ментальный потенциал. Нужны и харизматические личности, готовые его воплотить.

*M. Heidegger*

Я сознавал, что получаю неожиданный дар, и не мог понять, почему выпала мне эта милость.

*Cz. Milosz*

Итак, мы проследили, как менялось значение слова «харизма», начиная с античности, коснулись его этнокультурной окрашенности и связи с понятием «гений». Рассматривая харизму как знаковую структуру, мы использовали социосинергетический подход, дополнив его понятием репликации культурных образцов и архетипов. Обращение к категориям социологии и нелинейной динамики позволило описать взаимодействие харизматика с социальными субъектами на разных этапах (см. рисунок). Из истории науки выбран эпизод с академиком Н.Я. Марром. В его идеях мы стремились выявить аспекты, интересные для синергетики. Осталось взглянуть на восприятие харизматика сообществом как на диагноз его состояния и прогноз развития.

Сегодня (в период постинтеллектуализма - термин американского культуролога Дональда Вуда) понятие харизмы употребляется широко и часто всуе. В последнем случае оказывается, что это - симулякр (фр., англ. *simulacre* от лат. *simulacrum* - «образ», «подобие»), то есть явление, не соотносимое с реальностью, но воспринимаемое гораздо убедительнее, чем сама реальность [297, с. 257]. Терпимость, присущая постмодерну, и массовость социокультурных явлений позволяют сформировать харизматический оттенок практически по любому, как угодно малоценному в культурном отношении поводу. Вот и мастер афоризма А.Г. Круглов дает определение: «Харизма - способность зажигать неизвестно чем неизвестно кого. Вдохновлять тех, кого ни ум, ни добро не вдохновляют: будить стадное» [298, с. 117].

Очевидно, искусству «будить стадное» люди покоряются тем быстрее и послушней, чем больше в них самих стадного начала. Ему подыскали много возвышающих синонимов: чувство коллективизма, феномен соборности, голос крови и почвы, магия толпы, коллективное бессознательное. Видимо, способность (не) устоять перед искусством будить стадное оказывается одной из ведущих характеристик и определенных сословий различных народов, и так называемого национального характера каждого из них. Разумеется, преклонение перед носителем редкого дара - одна из древнейших культурных традиций. Но отечественная история, начиная с террористов-цареубийц, показала, насколько опасен харизматик, учение которого составляет «ощетинившийся кровавый гуманизм» (категория введена М.М. Бахтиным - цит. по [245, с. 29]). Дискуссионные соображения о русском народе в этом аспекте можно найти в [23-26; 29; 34; 38; 40-44; 55; 253; 288]. Со- и противопоставление духовно-исторических истоков русского коммунизма и германского национал-социализма как стадных движений проведено, например, в [44; 48; 69; 179; 253; 266; 299]. Силу этой стихии лаконично выразил Игорь Холин (1920-1999), поэт лианозовской школы [300, с. 113]:

Человечество	Гения	Своим потом
Никем не руководимо	Идея гения	Молодые всходы
Как нива	Позволяет	Расцветают
Солнцем	Половину людей	Народы
Палима	Превратить	Вывод
Но вот появляется	В удобрение	Вожди
Привидение	Другая половина	Нужны
В образе	Орошает	Как дожди

Предпринятый выше разбор обстоятельств, в которых самовоспроизводится позитивное отношение к харизматику, побуждает спросить: как может отдельный человек противостоять стадному началу, сохраняя свою неповторимость, и пр.? Подобным вопросом задавались еще древнегреческие мыслители. Начиная с Сократа, они развивали идею эпимелии (от др.-греч. ἐπιμελία σεαυτου - «забота, попечение о себе самом»). В Древнем Риме эта морально-этическая программа называлась *cura sui* («забота о себе»). Императив «проявляй заботу о самом себе» был включен в александрийскую духовную традицию (в виде концепции ἐπιμελία у Филона и Плотина), а богослов Григорий Нисский использовал его, разрабатывая христианское учение об аскезе. В начале 1980-х гг. французский философ Мишель Фуко доказывал, что самопознание есть частный случай эпимелии, а принцип заботы о себе «является основой рационального поведения в любой форме активной жизни, стремящейся отвечать принципу духовной рациональности». Духовность он понимал как «тот поиск, ту практическую деятельность, тот опыт, посредством которых субъект осуществляет в самом себе преобразования, необходимые для постижения истины» [301, с. 284-286].

Этой проблеме затрагивает и американский философ Р. Рорти, развивая тезис о человеке как существе творческом и не нуждающемся в абсолютах [236, с. 680]. Раздумывая о призвании западного интеллектуала, он обращается к тому, что М. Хайдеггер называл «жаждой подлинности». Этот термин означает стремление человека быть самим собой, а не просто продуктом образования или своего окружения, иначе говоря, стремление не оказаться лишь ресурсом репликации когда-то сформированных культурных образцов. «Достичь подлинности (в этом смысле), - пишет Р. Рорти, - значит увидеть альтернативы тем целям и смыслам жизни, которые большинство людей принимают без критики, как единственно данные, и сделать свой выбор из увиденных альтернатив - тем самым, до некоторой степени, самостоятельно создав самого себя» [302, с. 31].

Далее он приводит суждение упоминавшегося ранее Г. Блума: смысл чтения многих разных книг заключается в том, чтобы узнать о существовании многих разных целей и смыслов жизни. Такое знание позволяет человеку стать автономной личностью - *an autonomous self*. (Здесь приходит на память принцип Каббалы «Сотворил Творец для выполнения» [107, с. 176], но Р. Рорти трудно заподозрить в симпатиях к иудаистскому мистицизму: он, скорее уж, опирается на антропологические установки Ренессанса.) Согласно Р. Рорти, для интеллектуалов Запада как раз и характерно чтение книг, чтобы узнать, к каким целям имеет смысл стремиться, как следует обходиться со своей жизнью, и т.п. [302, с. 31, 34]. Трудно представить себе, что в свите харизматического дуче отыщется автономная личность, полагающаяся только на себя и терпимая к ценностям других, то есть антипод массового человека. Заметим также, что диагностированные выше разрывы русского культурного пространства (как следствие советской поры и иных причин) возможно - в принципе - сократить, культивируя чтение как терапию, предлагаемую Г. Блумом и Р. Рорти. Если допустить, что русский литературоцентризм [13, 16, 21, 29, 38, 41, 42, 47, 52, 53, 57, 71, 104, 146, 162, 167, 179, 198], проявляющийся также в почтении к писателю и его занятию, в

многочисленности литераторов-профессионалов и дилетантов *etc.*, сохраняет свою силу сегодня, то стоило бы оценить утраты и ресурсы отечественной книжной культуры [303-306], видя в ней оздоравливающее средство.

Только ли для западных интеллектуалов пригоден критерий Р. Рорти? Нет, и в родной традиции присутствует пафос ценности духовно самостоятельной, ответственной личности. Ранее уже цитировалась пушкинская мысль о возможном пути к человеческому величию. Приведем также энергичное суждение В.В. Розанова. В начале 1910-х гг. он доказывал: «*Индивидуум* начался там, где вдруг сказано закону природы: «*стоп! не пускаю сюда!*» Тот, кто его не пустил, - и был первым «духом», *не*-«природою», *не*-«механикою». Итак, лицо в мире появилось там, где впервые произошло «нарушение закона». Нарушение его как единообразия и постоянства, как нормы и «обыкновенного», как «естественного» и «всеобще-ожидаемого». Тогда нам понятны будут «противоборства» в «котле», как такой процесс, в котором «от века» залагалось такое важное, универсально-значительное для космоса, универсально-нужное миру начало, как *лицо, личность*, индивидуализм, как «я» в мире» [307, с. 30]. И заключал: «Без лица мир не имел бы сиянья - шли бы «облака» людей, народов, поколений... И, словом, без «лица» нет *духа и гения*» [307, с. 31].

Гений, тем более тот, в ком признают носителя духа сообщества, обычно оказывается именно харизматиком, хотя обратное утверждение неверно. Можно думать, что самоопределяющийся индивид, на которого надеялся В.В. Розанов и рассчитывает Р. Рорти, чтит гения постольку, поскольку его присутствие в культуре возбуждает и поддерживает в людях хайдеггеровскую «жажду подлинности». Но вовсе не обязательно, что все сообщество так же воспринимает гения. С позиций же социосинергетики, отличительной чертой сообщества служит динамика отношения к гению: богатство спектра его оценок сообществом, темп самовоспроизводства этого отношения как культурного образца, степень его изменчивости, (не)устойчивость ресурса репликации отношения к гению в ходе культуронаследования, особенно в периоды его кризиса, и т.п. Подтверждение этому тезису мы находим у философа Г.Г. Шпета, выделявшего нелинейным стилем мышления [219].

В 1920 г. Г.Г. Шпет (ставший позднее основателем этнокультурной психологии), размышляя о Пушкине, поставил вопрос: «Где в нем *русский дух*?» [308]. Сразу отметим, что ответ философа противоположен по смыслу юнговскому определению харизматика («мегафон, передающий коллективные мнения» [7, с. 121]). Г.Г. Шпет высказался о Пушкине нетрадиционно: «Его творчество есть именно *его* творчество, - гения, не выросшего из русского духа, а лишь *воспринимавшего* в себя этот дух, и что он сказал бы, если бы *воспринял* его до конца?» [308].

С помощью чего следует характеризовать такой интегральный, но трудноопределимый параметр общества, как дух народа, и его эволюцию? Г.Г. Шпет предложил критерий, который фактически исходит из отношения к харизматике: «А вот где подлинный *русский дух*: как Пушкина у нас воспринимали?». Развивая свое суждение и обратившись к истории отечественной мысли, он подчеркнул: «Пушкин - такая же случайность, как и Петр. И дух наш определяется не Петром и Пушкиным, а *отношением к ним*» [308]. Очевидно, двойной вывод этот вполне корректен с точки зрения схем «порядок из хаоса» и «Клио на распутье». Он также свидетельствует о том, что репликацию отношения к харизматике правомерно представлять как фактор социокультурной динамики.

Существенной чертой нынешней ситуации по-прежнему видится антропологический вакуум (то есть острая нехватка автономных личностей с высоким творческим потенциалом, чьи ценности не подверглись варваризации),

обусловленный послереволюционным периодом истории. Особенно показательное положение в отечественной литературе. Скажем, нашу прозу конца XX в. филолог оценивает как «сложную, разветвленную систему стилевых течений, тенденций, феноменов, которые развиваются и угасают, трансформируются и саморазрушаются» [309, с. 303]. Безусловно, так, и динамизм этот воодушевляет. Но ведь цитированный вывод приложим, допустим, и к ленинградскому литературному андеграунду [67], и к авторам, творившим под гнетом советской цензуры, - даже с учетом продукции бездарей и лизоблюдов [21]. По нашему мнению, важнее другой аспект: какова эволюция вершинных достижений прозы в XX в., сохранились ли в ней властители дум? А о направлении эволюции свидетельствует любая деталь литературного быта - хотя бы история петербургского кабаре «Бродячая собака» [310]. Частность эта позволяет сравнить состав его посетителей в начале 1910-х и 2000-х гг. И сравнение - не в пользу последних лет, бедных фигурами, явно отмеченных дарами благодати.

Однако и социальная *natura abhorret vacuum*. Поэтому культурное пространство плотно заполняется репликаторами, подходящими для невзыскательного и простодушного человека массы. За столетие, протекшее после «Восстания масс» Х. Ортеги-и-Гассета, человек этот, кажется, стал пообразованней и помоложе. Сегодня он не только ходит на выборы, но даже исполняет культурный канон (сделавшийся массовым): посещает концерты, театр, шоу. С расчетом на его запросы и вкус, а в случае нашего отечества - еще и с расчетом на фольклорную структуру сознания трудятся творцы искусства, организаторы спортивных игр, строители религиозных праздников, рекламисты, политехнологи и пр. (Нет места обсуждать особенности восприятия харизматика в ситуации игры, стихии досуга и т.д. См. дополнение «Игра и сакральное» к книге Р. Кайуа [311, с. 266-275].) Человек массы задает масштаб многим явлениям современности, в том числе - своим харизматикам. Насколько же он велик?

Здесь наблюдение Бориса Парамонова вспоминается. Словно находясь в полемике с Розановым, Шпетом, Тютчевым, он заявляет: «Вот кратчайшая формула современности: это мир, в котором невозможен Пушкин». И повторяет, настаивая: «Пушкин невозможен сегодня даже как случайность. Сегодня эпоха хлеба, а не зрелищ, а если и зрелищ, то не высоких. Всеблагих нынче нет. Тенора есть, но кто сравнит Паваротти с Пушкиным?» [312, с. 6, 8].

Автор благодарен Светлане Валерьевне Земцовой за консультации по вопросам социологии власти и за участие - совместно с Владимиром Вячеславовичем Негрулем - в разработке схемы на рисунке. Автор особо признателен рецензенту (*non enim nescio*) за его текст, насыщенный идеями и (не)высказанными рекомендациями, часть которых, кажется, удалось учесть - с пользой для статьи.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобразования РФ. грант № Г02-1.4-377.*

## Библиографический список

233. Лотман Ю.М. Клио на распутье // Лотман Ю.М. Избранные статьи в трех томах. Таллинн, 1992. Т. 1. С. 464-471
234. Аверинцев С.С. «Скворещиц вольных граждан...» Вячеслав Иванов: путь поэта между мирами. СПб.: Алетей, 2001. 167 с.
235. Барт Р. Основы семиологии // Структурализм: «за» и «против»: Сб. ст. / Под ред. Е.Я. Басина и М.Я. Полякова. М.: Прогресс, 1975. С. 114-163.

236. Постмодернизм: Энциклопедия. Минск: Интерпрессервис; Книжный Дом, 2001. 1040 с.
237. *Леви-Брюль Л.* Сверхъестественное в первобытном мышлении. М.: Педагогика-Пресс, 1994. 608 с.
238. *Красных В.В., Гудков Д.Б., Захаренко И.В.* Теоретические положения. Принципы описания // Русское культурное пространство: Лингвокультурологический словарь: Вып. 1 / И.С. Брилева, Н.П. Вольская, Д.Б. Гудков и др. М.: Гнозис, 2004. С. 7-56.
239. *Троицкий В.П.* «Как наречешь, так и обречешь» (Ономатодоксия в творческой биографии Вячеслава Иванова) // Вячеслав Иванов - творчество и судьба: К 135-летию со дня рождения / Сост. Е.А. Тахо-Годи. М.: Наука, 2002. С. 81-87.
240. *Осват А.* Именование героя «Капитанской дочки» // Лотмановский сборник. 3 / Под ред. Л.Н. Киселевой, Р.Г. Лейбова, Т.Н. Фрайман. М.: ОГИ, 2003. С. 261-269.
241. *Киселева Л.* К формированию концепта национального героя в русской культуре первой трети XIX в. // Лотмановский сборник. 3 / Под ред. Л.Н. Киселевой, Р.Г. Лейбова, Т.Н. Фрайман. М.: ОГИ, 2003. С. 63-92.
242. Анна Ахматова в записях Дувакина / Сост. О.С. Фигурнова. М.: Наталис, 1999. 368 с.
243. А.В. Азарх-Грановская: беседы с В.Д. Дувакиным / Предисл., комм.: В. Хазан, Г. Казовский. М.; Иерусалим: Мосты культуры, 2001. 200 с.
244. М.М. Бахтин: беседы с В.Д. Дувакиным / Предисл., послесл., комм.: С.Г. Бочаров, В. Радзишевский, В.Ф. Тейдер, В.В. Кожин, Ф.Д. Ашнин, А.М. Кузнецов, Л.С. Мелихова, Н.И. Николаев, А.С. Шатских. М.: Согласие, 2002. 400 с.
245. *Махлин В.Л.* Тоже разговор // Вопросы литературы. 2004. Май - Июнь. С. 3-45.
246. *Садовников Д.Н.* Избранные произведения / Сост. В.Н. Болдырев. Саратов: Приволжское кн. изд-во, 1989. 224 с.
247. *Гофман И.* Анализ фреймов: эссе об организации повседневного опыта. М.: Ин-т социологии РАН, 2004. 752 с.
248. *Забудская Я.Л.* Дионисийство и трагедия: Эсхил в переводах Вячеслава Иванова // Вячеслав Иванов - творчество и судьба: К 135-летию со дня рождения / Сост. Е.А. Тахо-Годи. М.: Наука, 2002. С. 141-147.
249. *Тиме Г.А.* Лики дионисийства (Вяч. Иванов и Г. Гауптман) // Вячеслав Иванов - Петербург - мировая культура: Матер. междунар. науч. конф. (9-11 сентября 2002 г.). Томск-М.: Водолей Publishers, 2003. С. 95-104.
250. *Иванов Вяч.* Спорады // Иванов Вяч. Собр. соч. Т. 3. Брюссель: Foyer Oriental Chretien, 1979. С. 111-135.
251. *Бонецкая Н.К.* Русские странники // Вопросы философии. 2004. № 5. С. 111-117.
252. *Апинян Т.А.* Игра в пространстве серьезного. Игра, миф, ритуал, сон, искусство и другие. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2003. 400 с.
253. *Кантор В.К.* Расцвет и падение эпохи артистизма // Кануны и рубежи. Типы пограничных эпох - типы пограничного сознания. В 2-х частях. Ч. 2. С. 300-327.
254. Лексикон неклассики. Художественно-эстетическая культура XX века / Под ред. В.В. Бычкова. М.: РОССПЭН, 2003. 607 с.
255. *Батай Ж.* Проклятая доля. М.: Гнозис; Логос, 2003. 208 с.
256. *Молодяков В.Э.* Валерий Брюсов: политический портрет // Валерий Брюсов. Мировое состязание: Политические комментарии. 1902-1924 / Сост. В.Э. Молодяков. М.: АИРО-XX, 2003. 224 с.
257. *Пушкин А.С.* Второй том «Истории русского народа» Полевого //

Пушкин А.С. Полное собр. соч. в 10-ти томах. Т. 7: Критика и публицистика. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1949. С. 143-147.

258. *Пэко П.Ф.* Элементы философии наук / Пер. с франц. под ред. Б. Яковенко. М.: АО «Универсальная библиотека», 1915. 224 с.

259. *Мартиншина Н.И.* Когнитивные основания паранауки. Омск: Изд-во ОмГТУ, 1996. 187 с.

260. *Дубнищева Т.Я.* Ретрофизика в зеркале философской рефлексии: Учеб. пособие. М.: ИНФРА-М, 1997. 334 с.

261. *Сойфер В.Н.* Красная биология: Псевдонаука в СССР. М.: Моск. психолого-соц. ин-т, 1998. 264 с.

262. *Низовцев В.В.* Время и место физики XX века. М.: Эдиториал УРСС, 2000. 308 с.

263. *Сокулер З.А.* Знание и власть: наука в обществе модерна. СПб.: РХГИ, 2001. 240 с.

264. Сумерки лингвистики. Из истории отечественного языкознания. Антология / Сост. и ком. В.Н. Базылева и В.П. Нерознака. М.: Academia, 2001. 576 с.

265. За «железным занавесом»: мифы и реалии советской науки. СПб.: Дмитрий Буланин, 2002. 526 с.

266. *Кара-Мурза С.Г.* Идеология и мать ее наука. М.: Алгоритм, 2002. 256 с.

267. *Берг Р.Л.* Суховой: Воспоминания генетика. М.: Памятники исторической мысли, 2003. 527 с.

268. *Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н., Раводин В.О.* Синергия, конкуренция, хаос в модели взаимодействия двух научных направлений. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. 100 с.

269. *Алпатов В.М.* История одного мифа: Марр и марризм. М.: Наука, 1991. 240 с.

270. *Алпатов В.М.* Послесловие ко второму изданию // Марр Н.Я. Яфетидология. - Жуковский; М.: Кучково поле, 2002. С. 475-478.

271. *Иванов Вяч. Вс.* Нечет и чет // Иванов Вяч. Вс. Избр. тр. по семиотике и истории культуры. Т. 1. М.: Языки русской культуры, 1999. С. 381-604.

272. *Автономова Н.А.* Актуальное прошлое: структурализм и евразийство // Серю П. Структура и целостность: Об интеллектуальных истоках структурализма в Центральной и Восточной Европе. 1920-30-е гг. М.: Языки славянской культуры, 2001. С. 9-30.

273. *Серю П.* Структура и целостность: Об интеллектуальных истоках структурализма в Центральной и Восточной Европе. 1920-30-е гг. М.: Языки славянской культуры, 2001. 360 с.

274. *Корочкин Л.И.* К проблемам биофилософии: некоторые общие принципы организации и функционирования биологического материала // Методология биологии: новые идеи (синергетика, семиотика, коэволюция) / Под ред. О.Е. Баксанского. М.: Эдиториал УРСС, 2001. С. 177-189.

275. *Берг Р.Л.* Лев Семенович Берг // Берг Р.Л. Суховой: Воспоминания генетика. М.: Памятники исторической мысли, 2003. С. 431-440.

276. *Пойзнер Б.Н.* От Пригожина к Аристотелю: самоорганизация и энтелехия // Журнал проблем эволюции открытых систем (Алматы, РК). 2003. Т. 1. Вып. 5. С. 233-240.

277. *Положий А.В.* История формирования понятия о виде высших растений / Эволюционная биология / Под ред. В.Н. Стегния. Томск: ТГУ. Т. 1. 2001. С. 29-36.

278. *Корочкин Л.И.* Гены, онтогенез и проблемы эволюционного развития // Эволюционная биология / Под ред. В.Н. Стегния. Томск: ТГУ. Т. 1. 2001. С. 49-72.

279. Инвазия мобильных элементов - причина взрывного сальтационного видообразования / М.Б. Евгенев, Е.С. Зеленцова, Е.С. Полуэктова, К.И. Пятков и



др. // Эволюционная биология / Под ред. В.Н. Стегния. Томск: ТГУ. Т. 1. 2001. С. 37-48.

280. *Мелик-Гайказян И.В.* Информационные процессы и реальность. М.: Наука, 1998. 192 с.

281. *Чернавский Д.С.* Синергетика и информация. Динамическая теория информации. М.: Наука, 2001. 244 с.

282. *Евдокимов Е.В., Шаповалов А.В.* Детерминированный хаос в динамике популяций как эволюционный фактор // Эволюционная биология / Под ред. В.Н. Стегния. Томск: ТГУ. Т. 1. 2001. С. 245-263.

283. *Подлазов А.В.* Самоорганизованная критичность и анализ риска // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2001. Т. 9, № 1. С. 49-88.

284. *Кибрик А.Е.* Константы и переменные языка. СПб.: Алетейя, 2003. 720 с.

285. *Иванов Вяч.* Римский дневник 1944 года // Иванов Вяч. Собр. соч. Т. 3. Брюссель: Foyer Oriental Chretien, 1979. С. 583-644.

286. *Павленко А.Н.* Театр как «оптический прибор» представления // Человек. 2004. № 1. С. 34-42.

287. *Хейзинга Й.* В тени завтрашнего дня // Хейзинга Й. Homo ludens. В тени завтрашнего дня. М.: ИГ «Прогресс», «Прогресс - Академия», 1992. С. 241-402.

288. *Степун Ф.А.* Мысли о России // Степун Ф.А. Чаемая Россия / Сост. и послесл. А.А. Ермичева. СПб.: РХГИ, 1999. С. 5-91.

289. *Горбаневский М.* Конспект по корифею // Литературная газета. 1988. 25 мая. С. 12.

290. *Брагинская Н.В.* «...Имеют свою судьбу» // Фрейдентберг О.М. Поэтика сюжета и жанра / Подготовка текста Н.В. Брагинской. М.: Лабиринт, 1997. С. 421-433.

291. *Почепцов Г.Г.* Русская семиотика. М. Рефл-бук; Киев: Ваклер, 2001. 768 с.

292. *Башинджаган Л.* Воспоминание о будущем: Кавказский дневник поручика Л.Б. // Независимая газета. 1994. 8 сентября. С. 5.

293. [Сталин И.В.] Относительно марксизма в языкознании // Марр Н.Я. Яфетидология. - Жуковский; М.: Кучково поле, 2002. С. 451-465.

294. *Витенберг Б.М.* По направлению к Сталину // Новое лит. обозрение. 2003. № 3 (61). С. 344-355.

295. *Серебрянников Б.А.* Сравнительно-исторический метод и критика так называемого четырехэлементного анализа Н.Я. Марра // Вопросы языкознания в свете трудов И.В. Сталина: Лекции, прочитанные для преподавателей высших учебных заведений в августе 1950 г. в московском университете. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1950. С. 171-186.

296. История и антиистория: Критика «новой хронологии» академика А.Т. Фоменко: Анализ ответа А.Т. Фоменко. М.: Языки славянской культуры, 2001. 576 с.

297. *Ильин И.П.* Постмодернизм: Словарь терминов. М.: ИНИОН РАН; Intrada, 2001. 384 с.

298. *Круглов А.Г.* Первые приближения: Словарь афоризмов-определений / Послесл. В. Кротова. М.: Гнозис, 1997. 128 с.

299. *Дымерская Л.* Томас Манн и Николай Бердяев о духовно-исторических истоках большевизма и национал-социализма // Вопросы философии. 2001. № 5. С. 62-77.

300. *Холин И.* Стихи и поэмы. М.: Новое лит. обозрение, 1999. 320 с.

301. *Фуко М.* Герменевтика субъекта: Курс лекций в Коллеж де Франс, 1982. Выдержки // Социо-Логос. Вып. 1 / Сост., общ. ред и предисл.: В.В. Винокуров, А.Ф. Филиппов. М.: Прогресс, 1991. С. 284-312.

302. *Рорти Р.* От религии через философию к литературе: путь западных интеллектуалов // Вопросы философии. 2003. № 3. С. 30-41.

303. *Куфаев М.Н.* Проблемы философии книги. Книга в процессе общения. М.: Наука, 2004. 188 с.

304. *Петрицкий В.А.* Социальное значение библиофильства // Книга и социальный прогресс: Сб. ст. М.: Книга, 1986. С. 71-78.

305. *Рац М.В.* О собирательстве. М.: Новое лит. обозрение, 2002. 350 с.

306. *Пойзнер Б.Н.* Надежда на исправление мира, книга и библиофильство // Актуальные вопросы теории и истории библиофильства. СПб.: Изд-во Российской национальной библиотеки, 2001. С. 20-24.

307. *Розанов В.В.* Люди лунного света: Метафизика христианства. СПб. [б. и.], 1913. 297 с.

308. Из переписки Густава Шпета / Публ. М. Шторх // Русская мысль (Париж). 13-19 мая 1999 (№ 4269). С. 19.

309. *Нефагина Г.Л.* Русская проза конца XX века: Учеб. пособие. М.: Флинта: Наука, 2003. 320 с.

310. *Шульц мл. С.С., Склярский В.А.* Бродячая собака. СПб.: Белое и Черное, 2003. 206 с.

311. *Кайуа Р.* Человек и сакральное // Кайуа Р. Миф и человек. Человек и сакральное / Вступ. ст. С.Н. Зенкина. М.: ОГИ, 2003. С. 141-291.

312. *Парамонов Б.* Пушкин сегодня (к проблеме мультикультурализма) // Urbі: Лит. альманах. Материалы XXIV вып. СПб.: Журнал «Звезда», 2000. С. 6-12.

*Томский государственный  
университет*

*Поступила в редакцию 03.09.2003  
после переработки 14.05.2004*

## CHARISMA: REPLICATION OF RECEPTION

*B.N. Poizner*

Why the phenomenon of charisma deserves attention of social synergetics? How the sense of «charisma» concept has varied from antiquity up to now? What is a peculiarity of the charisma reception in Russian culture? How the midst of charismatic looks through the prism of nonlinear dynamics? The author aspires to answer similar questions proceeding from following thesis: propagation of the judgement about some person as a charismatic is typical case of a cultural pattern replication. The author bases on works on synergetics, theory of culture, sociology, linguistics, history of science, philosophical anthropology, examples of publicist style.

In preceding parts of the paper characteristics of charisma as a psychological phenomenon starting in primeval society is done. Etymology of «charisma», meaning constants and variables of the word are shown. Contexts in which concept of charisma is used in Christianity, Judaism, East philosophy are touched. Some semantic peculiarities of the concept in Russian, French, English languages are noted. Interpretations of charisma in Shamanism, Christianity, modern cultural practice (the last is distinguished by vulgarization of the word) are compared. Concepts of charismatic and genius are compared. Replication of human activity structures is interpreted as a dynamical aspect of culture and a mechanism of culture self-renewal.

### Part 3

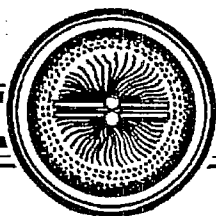
In third part non-linear interaction stages of the masses, charismatic and his promoters are described. The scheme known as «order out of chaos» and the concept of the replication are used. The suggested synergetic approach is applied to interpretation of

soviet scholars' perception of academician N. Marr and his «new doctrine on language». An attitude to a charismatic is discussed as one of manifestation of the people spirit.



*Пойзнер Борис Николаевич* - родился в Томске (1941), окончил радиофизический факультет Томского государственного университета. Защитил кандидатскую диссертацию по теории колебаний и волн (1970), доцент кафедры квантовой электроники и фотоники ТГУ. Читает лекции по нелинейной оптике, физике, физике лазеров, принципам управления лазерным излучением, основам синергетики. Область научных интересов: квантовая электроника, применение нелинейной динамики в оптике и материаловедении, прикладная наукометрия, культурологическая теория образования. Имеет много статей по указанной тематике. Инициатор подготовки и редактор семи библиографических указателей (в том числе «Синергетика и сопредельные науки», «Университетское образование и его социальная роль», «Интеллигенция в российском обществе и университете», «Психика и интеллект обучаемого»). Действительный член Всероссийского общества библиофилов.

E-mail: Pznr@elefot.tsu.ru



*Серия : «След вдохновений и трудов упорных»  
Приложение к журналу  
«Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика»*

## **ПРИЧУДЛИВЫЙ МИР НАУКИ**

*Ю.А. Данилов*

© А.Г.Шадтина, составитель  
© Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 2004  
© Д.В.Соколов, 2004

Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 228 с., ил.  
ISBN 5-94409-039-1

Сборник посвящается памяти Юлия Александровича Данилова, известного ученого, переводчика, писателя, популяризатора науки. В сборник включены избранные научно-популярные статьи Ю.А. Данилова и обширная библиография его научных, научно-популярных работ, переводов научных статей и книг, авторами которых являются ученые-физики с мировыми именами. Сборник содержит воспоминания об этом замечательном человеке и рассчитан на широкий круг читателей, интересующихся жизнью науки.

### **Мне хочется рассказать о Человеке...**

*А.Г. Шадтина*

Мне хочется рассказать о Человеке, с которым я, благодарная судьбе, была рядом последние 30 лет. Мне хочется рассказать только об одной грани его жизни: что-то я знаю по рассказам, остальное - как я это видела.

В школьные годы Он был отличником. В классе пятом, непродолжительно позанимавшись с учителем музыки, стал учеником сразу четвертого класса музыкальной школы при Московской консерватории по классу скрипки. Учеба продолжалась недолго. Его учителя после окончания аспирантуры направили работать в Воронеж, а с другим преподавателем отношения не сложились. Кумиром юного музыканта был Д.Ф. Ойстрах. В домашней фонотеке были все записи музыканта, какие только можно было приобрести в те времена. Однажды его учитель предложил зайти в класс Ойстраха, послушать его урок, на что был

твердый отказ. Не из робости, а из-за трепетного отношения к Великому Музыканту.

На лето, как было принято, давали задание по музыке. Живя летом в снимаемой комнатке дачного поселка, он играл пьесы и радовался, когда мальчишка, идущий с ведрами по воду, насвистывает мотив этих пьес. А ночью с фонарем он бродил по окрестным болотам. Конечно, окружающая природа и днем его интересовала, но ночью было таинственнее и интереснее. Свои наблюдения он записывал и даже опубликовал. Заметка называлась «Личинка стрекозы, улитка и физика». Она появилась в газете «Пионерская правда» 25 сентября 1951 года. Свои заметки он послал и в редакцию передачи «Клуба знаменитых капитанов». И вот, через 50 лет, в юбилейные дни редакции друзья Юлия Александровича Данилова услышали о первом призере передачи - Юлике Данилове. И не было у них сомнения, что это их Юлик.

В школьные годы он много читал. Его знали библиотекари Исторической, Некрасовской, Ленинской библиотек. В юношеском зале Ленинской библиотеки обратили внимание на постоянного посетителя читального зала и предложили научить пользоваться картотеккой. И как он был благодарен все последующие годы за ту доброту, внимание и науку, что подарили ему тихие библиотекари, проверяющие при выдаче книг чистоту рук и требующие тишины в зале.

Ю.А. не мечтал быть математиком. Он собирался стать биологом, потом - офицером, чтобы быть защитником Родины, воспитывал себя в лучших традициях офицеров русской армии. И по окончании школы он сначала поступил в Военную академию химической защиты, но через два года понял, что выбранный путь - ошибка. В течение года Ю.А. подавал рапорт за рапортом об увольнении из армии. И только через год пришел приказ о демобилизации из академии, однако путь к свободе лежал через строевую службу в армии. Ю.А. попадает в военный лагерь, где, будучи солдатом, выполнял работы офицеров, составляя план военной подготовки и работая со штрафниками, которые проходили кратковременную военную подготовку.

Ю.А. поступает на механико-математический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. То, что математика красивая наука, Ю.А. понял, посещая лекции для старшеклассников в Политехническом музее. Четырнадцать лекций, прослушанных в музее, бережно хранились в доме все последующие 50 лет. Учился Ю.А. в университете легко, с радостью, не ограничивая себя рамками стандартного курса. Он перечитал имеющиеся в студенческой библиотеке учебные курсы Кембриджского и Геттингенского университетов. Уже на младших курсах посещал семинары Г.И. Баренблатта, В.М. Алексеева, который впоследствии стал профессором университета и очень близким другом для него. Профессор Баренблатт, объявивший семинар для аспирантов, обратил внимание на студентов, посещающих заседания, и, когда встречались «трудные места», после семинара еще раз им обстоятельно их пояснял.

Перед поступлением в университет после демобилизации из армии у него появилось незапланированное свободное время: он опоздал к вступительным экзаменам. И тогда он берется за перевод книги А.Тьюринга «Может ли машина мыслить?» Книга вызвала бурную дискуссию в математических кругах. Так начиналась его жизнь переводчика. В дальнейшем выбор книг для перевода зависел от интереса к автору, новизны темы, исторической ценности книги. Язык, на котором писал автор, не был препятствием к чтению и переводу. Конечно, препятствие было, но оно преодолевалось тщательным освоением грамматики языка, превосходной памятью и фантастической работоспособностью Ю.А. И еще, конечно, любовью к авторам книг, которые становились для него мудрыми собеседниками и учителями.

Переводы Ю.А. очень часто отмечали критики, появлялись одобрительные рецензии. И так же часто рецензенты отмечали необыкновенную индивидуальность языка авторов переводимых книг. Но каждый автор писал на своем родном языке, со своей ритмикой и музыкой языка, и в каждом случае эта индивидуальность была сохранена. Эта потрясающая способность, можно даже сказать артистичность переводчика, сохранить нюансировку языка автора, как мне кажется, была сродни той музыкальной культуре, которую он получил в детские годы. И только в статьях Ю.А. слышен его собственный голос, особенно узнаваемый с первых строк его научно-популярных статей. Стиль его статей отличается лаконичностью, свойственной, наверное, любому хорошему математику, строгостью и красотой изложения. Он писал не так много, как хотелось и как мог. Но постепенно появилась новая цель. Математика развивалась и обогащалась новыми понятиями. Было интересно. И обладая даром читать практически с любого языка, он стремился насытить себя и современников, ограниченных в прочтении книг и статей языковым барьером, новостями науки, не забывая при этом прошлых великих мыслителей. Ю.А. следил за развитием современной научной мысли и мгновенно реагировал на выход новых книг, предлагая их к изданию. Как часто приходилось слышать от случайных знакомых, что книги с переводом Ю.А. покупаются без раздумий, так как они не могут быть плохими по определению.

Работал Ю.А. в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова сначала в лаборатории приборов теплового контроля, а затем в теоретическом отделе под руководством Я.А. Смородинского, который его воспитал своей эрудицией, любовью к книге и умением объяснять физику «на пальцах». Ю.А. умел и хотел учиться. И через некоторое время участники многих научных семинаров и конференций были уверены, что они беседуют с выпускником физического факультета. Так, М.А. Леонтович на последнем семинаре, где Ю.А. рассказывал по его просьбе о брюссельской физико-химической школе Пригожина, заметил: «Вы... разговариваете так, как будто всю жизнь были физиком».

Темы семинаров в теоретическом отделе были разные. Кроме физических задач были темы об истории Российского государства, о гармонии Баха. Конечно о Бахе рассказывал Юлий Александрович. А на «Кикоинских чтениях» в институте он уже читал лекцию о «Математических началах натуральной философии И. Ньютона» и об открытии урана и связанных с ним последующих разработках. Кому рассказывал? Тем, кто непосредственно работал по этой тематике. И они согласно кивали: «Да, да, именно так». Но все факты Ю.А. были получены не из уст участников, они были добыты кропотливым трудом из немецких научных журналов 30-х годов XX века.

Ю.А. много выступал на семинарах, конференциях, рассказывал о групповых свойствах дифференциальных уравнений. Предложил свой метод решения нелинейных дифференциальных уравнений, который назвал методом линейных «доноров». Этот метод значительно облегчает получение решения задач. Его общение в научном мире было обширным. И многие герои и авторы воспоминаний об А.П. Александрове, А.Д. Сахарове, М.Л. Левине могли назвать Ю.А. коллегой, а некоторые - другом, разделяющим с ними и радость и боль за современное состояние науки.

Ю.А. был членом многих редакций журналов и издательств, помогая своими знаниями в формировании идейного направления изданий.

На конференции в Таллине профессор Климонтович и Ю.А. задумали организовать семинар на физфаке МГУ - «Синергетика», посвященный эффектам самоорганизации. И в течение 20 лет Ю.А. был «завучем» семинара, приглашая докладчиков, и откликаясь на просьбы других выступить на заседании семинара.

Это было место, где коллеги могли обсудить возникающие новые идеи, обсудить новые работы перед тем, как отдать их в печать, и просто пообщаться, так как многие выпускники университета, МИФИ и Физтеха были разобщены и отдалены от научных центров. А научные конференции в последнее время ограничивались «состоянием экономики».

Ю.А. обладал потрясающей способностью аккумулировать знания, видеть развитие науки «с птичьего полета». Его волновало развитие научных идей и судьбы людей, которые рождали эти идеи. И когда он рассказывал о них, то научные проблемы не были абстрактными, холодными, они у него «дышали», были «живыми».

Последние годы жизни Ю.А. занимался и педагогической деятельностью. Он читал спецкурс в МИФИ о современных методах математической физики, статистических методах обработки экспериментальных данных. Читал лекции по просьбе дирекции института в те годы, когда институт зимой не отапливался, все по той же причине - экономики. Читал курс лекции «Основные идеи современного естествознания» в колледже ИНЕСЭКа. Десять лет читал спецкурс «Введение в нелинейную динамику» на химфаке МГУ в 90-е годы, когда профессора вынуждены были работать за рубежом, так как им платили за труд много меньше, чем дворникам. А Ю.А. считал своим долгом в этот период поддерживать научный интерес у студентов. Некоторые слушатели не один год посещали эти лекции и были восхищены тем многообразием оттенков в темах, которые появлялись в лекциях. Ю.А. радовался, когда при сдаче зачетов студенты умели решать задачи по его спецкурсу. (Теперь по этому спецкурсу аспиранты сдают «минимум».) Требования к студентам у него были тоже не традиционные. На экзаменах Ю.А. разрешал пользоваться конспектами лекций и любой литературой, считая, что незачем детям читать под партой шпаргалки, портить глаза. А проверить знания мог «по штрихам» и по всему курсу, и снисхождения можно было не ждать.

Ю.А. читал лекции и ученым собратьям, и школьникам, и просто заинтересованным слушателям. Взрослые дивились эрудиции лектора, точности фактов, а школьники - тому, что математика оказывается рядом с ними. Они слушали так, что даже мальшши не ерзали на местах. Занятия с детьми у Ю.А. не имели ограничения по возрасту и ничто не останавливало его - ни занятость, ни плохое самочувствие, если надо было идти к детям. Занимаясь с детьми второго класса, где училась его дочь, он так сочинял задачки, что дети делали «самостоятельные открытия», и не было лучшего подарка за его труд, чем «эти открытия».

В жизни у Ю.А. было много планов. Он планировал перевести с латинского языка «Географию Птолемея», издать опыты Тома Гита, написать учебник об интегральных уравнениях, создать словарь переводчика «трудных мест». Мечтал воссоздать «Дом занимательной науки». Страстно пропагандировал книги по физике Я.И. Перельмана, стараясь сохранить память об этом человеке в следующих поколениях многократными предложениями издательствам о переиздании его трудов. Он скорбил о гибели Я.И. Перельмана от голода в блокадном Ленинграде во время Второй мировой войны. Обнаружив, что при формировании словаря-энциклопедии по педагогике не включили в него Учителя, Пропагандиста научных знаний Я.И. Перельмана, Ю.А. привел немало доводов о необходимости включения этого имени в энциклопедию, хотя по каким-то формальным признакам Перельман и «не подходил».

Так и Ю.А. не подходил по формальным признакам ни к каким званиям. Но как можно оценить труд человека-просветителя, переведшего на русский язык сто книг и сто статей со всех языков европейского сообщества, написавшего более ста своих статей, половина из которых посвящена математическим исследованиям, а

другая - философским проблемам, истории науки и популяризации математики? Этот вопрос задаю я сама себе. Ю.А. никогда не стремился «обзавестись» ни званиями, ни наградами, не стремился вверх к руководящим постам. Он хотел только работать и работать, желая, чтобы в стране было больше прежних Сытинских, искренних любителей литературы и желающих просвещать Народ.

Последними работами Ю.А. были статьи памяти И. Пригожина, с которым у Ю.А. были очень теплые отношения и взаимное уважение, и перевод книги В. Мазья, Т. Шапошниковой «Жак Адамар. Универсальный математик». Я переписывала текст перевода на компьютере. Мы читали, радовались, восхищались человеком, сохранившим Разум и способность работать даже после 90 лет.

Юлию Александровичу не посчастливилось. Он прожил только 67 лет.

Но очень хочется надеяться, что тот огромный труд, проделанный Юлием Александровичем, еще долгие годы будет пробуждать интерес к знаниям. Книги, подготовленные Ю.А. к изданию, переиздаются. И надеждой служит то, что первая выбранная для перевода Юлием Александровичем книжечка А.М. Тьюринга «Может ли машина мыслить?» переиздается через сорок с лишним лет после первого выхода в русском переводе.

Москва, май 2004

## СОДЕРЖАНИЕ

### Воспоминания

*Шадтина А.Г.* Мне хочется рассказать о Человеке...

*Трубецков Д.И.* Быть собой и остаться собой

*Гурия Георгий.* Юлий Александрович Данилов, каким я его знал

*Пойзнер Б.Н.* Одухотворенность мышления: феномен Юлия Данилова

### Синергетика

*Данилов Ю.А., Кадомцев Б.Б.* Что такое синергетика?

*Данилов Ю.А.* Синергетика лицом к человеку

*Данилов Ю.А.* Синергетика - наука о самоорганизации

*Данилов Ю.А.* Сложность

*Данилов Ю.А.* Нелинейность

*Данилов Ю.А.* Нелинейная динамика: Пуанкаре и Мандельштам

*Данилов Ю.А.* Фрактальность

*Данилов Ю.А.* Красота фракталов

### Портреты

*Данилов Ю.А.* Льюис Кэрролл как нелинейное явление

*Данилов Ю.А.* Джеймс Клерк Максвелл

*Данилов Ю.А.* Майкл Фарадей

*Данилов Ю.А.* Гармония и астрология в трудах Кеплера

*Данилов Ю.А.* На далеких Гёделевых островах

### Переводы. Предисловия. Разное

*Данилов Ю.А., Смородинский Я.А.* Физик читает Кэрролла

*Данилов Ю.А.* Галилей: Образец научной прозы. Сказка как аргумент в научном споре



*Галилей Галилео.* Притча о человеке, пытавшемся познать многообразие природы  
*Данилов Ю.А.* Мы будем знать!  
*Гильберт Давид.* Познание природы и логика  
*Данилов Ю.А.* Приглашение на Хофштадтера  
*Данилов Ю.А.* Забытое старое

**Библиография работ Ю.А.Данилова**

Научные и научно-популярные статьи и книги  
Переводы научных статей  
Переводы книг



Изв. вузов «ПНД», т.12, № 5, 2004



**Юрий Михайлович Романовский  
К 75-летию со дня рождения**

31 октября 2004 года известному в нашей стране и за рубежом ученому радиофизику и биофизику профессору Юрию Михайловичу Романовскому исполнилось 75 лет.

Юрий Михайлович выпускник физического факультета МГУ 1952 года. Будучи аспирантом известного профессора С.П. Стрелкова, он успешно защитил кандидатскую диссертацию на тему «Колебания упругого самолета под действием атмосферной турбулентности». С 1958 года по настоящее время Ю.М. Романовский работает на физическом факультете МГУ. В 1975 году он успешно защитил докторскую диссертацию на тему «Автоколебательные системы с диффузионными связями».

Ю.М. Романовский крупный радиофизик. Среди его научных результатов как радиофизика можно назвать определение условий потери устойчивости колебательных систем с флуктуирующими параметрами и создание теории синхронизации распределенных колебательных систем. Эти общие результаты он последовательно рассматривал в их приложении к описанию химических и биологических систем. Некоторые результаты его радиофизических исследований и возможность их приложения к биологическим системам представлены в известной монографии: В.А. Васильев, Ю.М. Романовский, В.Г. Яхно, «Автоволновые процессы», Москва, «Наука», 1987.

Профессор Романовский является также одним из создателей математической биофизики, им разработана теория распределенных автоколебательных систем с

диффузионными связями, описывающая автоволновые процессы в периодических биохимических реакциях и коллективах живых клеток. Основные идеи и научные результаты обобщены в монографиях и учебниках, являющихся настольными книгами и учебными пособиями многих поколений биофизиков: Ю.М. Романовский, Н.В. Степанова, Д.С. Чернавский, «Что такое математическая биофизика (кинетические модели в биофизике)», Москва, «Просвещение», 1971 (перевод издан также в Польше); Yu. M. Romanovsky, N.V. Stepanova, D.S. Chernavsky, «Kineticische Modelle in der Biophysik», VEB Gustav Fischer Verlag, Jena, 1974; Ю.М. Романовский, Н.В. Степанова, Д.С. Чернавский, «Математическое моделирование в биофизике», Москва, «Наука», 1975 (перевод издан также в Польше); Ю.М. Романовский, Н.В. Степанова, Д.С. Чернавский, «Математическая биофизика», Москва, «Наука», 1984.

Многие годы Ю.М. Романовский руководит лабораторией лазерной и математической биофизики на кафедре общей физики и волновых процессов МГУ. Коллектив лаборатории под его руководством выполнил ряд блестящих работ, направленных на развитие методов лазерной спектроскопии для исследования биологической подвижности на молекулярном и клеточном уровнях, на изучение нестационарных колебательных и автоволновых процессов в живых клетках и построение математических моделей автоволновой внутриклеточной подвижности, а также на изучение реакции живых клеток на световые и тепловые воздействия. В частности, в последние годы им и его учениками выполнен ряд пионерских исследований бегущих биопотенциалов в зеленых растениях, инициируемых локальным воздействием на их листья электромагнитного излучения в диапазоне от ультрафиолетовых до миллиметровых волн.

Юрий Михайлович является одним из пионеров синергетики в части изучения стохастической динамики и самоорганизации в открытых системах (V.A. Vasiliev, Yu.M. Romanovskii, D.S. Chernavskii, V.G. Yakhno, «Autowave Processes in Kinetic Systems. Spatial and Temporal Self-Organization in Physics, Chemistry, Biology and Medicine», D. Reidel Publishing Company, Dordrecht-Boston-Lancaster-Tokyo, 1987 (см. также другое издание - VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1987); W. Ebeling, L. Schimansky-Geier, Yu. Romanovsky (eds.), «Stochastics Dynamics of Reacting Biomolecules», World Scientific, Singapore, 2002.

Последние годы он уделяет огромное внимание изучению молекулярной динамики (см. например, Ю.М. Романовский, В. Эбелинг (редакторы), «Молекулярная динамика ферментов», Москва, Изд-во Московского университета, 2000). На основе исследования функционально значимых конформационных изменений, которые претерпевает молекула белка в целом как единая механическая система, им совместно с его учениками создан ряд кластерных моделей динамики макромолекул, которые подтверждают концепцию «белки-машины», разработан ряд математических моделей, объединяющих подходы нелинейного броуновского движения для описания диффузии молекул и квантовой механики для учета процессов внутри активных центров ферментов.

Профессор Романовский известен как один из создателей и руководителей семинара «Синергетика» и руководитель гранта Президента РФ «Ведущие научные школы» по биофизике (совместно с Д.С. Чернавским). Его многочисленные ученики работают во многих университетах нашей страны, ближнего и дальнего зарубежья.

Юрий Михайлович энтузиаст в науке и ее активный пропагандист, многие университеты нашей страны и мира регулярно приглашают его прочитать лекции и курсы лекций по проблемам биофизики и теории автоволновых процессов. Не исключение и Саратовский университет. На протяжении многих лет Юрий Михайлович желанный гость физического факультета и факультета нелинейных процессов СГУ, многих российских и международных конференций и школ, проводимых в СГУ по радиофизике, нелинейной динамике, оптике и биофизике.

Много сил и творческой энергии Ю.М. Романовский отдает как член редколлегии журнала «Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика».

Дорогой Юрий Михайлович, мы искренне ценим и любим Вас, примите наши сердечные поздравления с Вашим славным юбилеем. Желаем Вам крепкого здоровья и многих лет жизни и творческой работы.

*Редколлегия и редакция журнала*

## ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ

Рукописи, объемом не более 16 стр. и 8 рис. принимаются в редакцию в 2-х вариантах: бумажном и электронном.

1. **Бумажный вариант** должен быть напечатан через 1.5 интервала и распечатан в 2-х экз. Если рисунки (только черно-белые!) не вставлены в текст, то они выполняются на отдельных страницах также в 2-х экз. Под рисунком указывается его номер, фамилии авторов, название статьи; подрисовочные подписи печатаются на отдельном листе и не должны дублировать внутритекстовое описание рисунка.

### *Требования к оформлению текста.*

На первой странице перед текстом статьи должны быть напечатаны: индекс УДК, название статьи, инициалы и фамилии авторов, краткая аннотация статьи, составленная по форме, удобной для непосредственного включения ее в РЖ, издаваемые ВИНТИ.

### *К статье прилагаются в 1 экз.:*

- перевод на английский язык названия статьи, инициалов и фамилий авторов, аннотации;
- краткие сведения об авторах с фотографиями; фотографии присылать четкие, контрастные или в электронном варианте, сканированные с разрешением не менее 300dpi без дополнительной компьютерной обработки в графических форматах JPG, TIFF, GIF.

### *Краткие сведения об авторах составляются по следующей форме:*

Сидоров Петр Иванович - родился в 1938 году в Москве, окончил Московский физико-технический институт в 1961 году. После окончания МФТИ работает в ФИАН. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в МГУ (1964) и доктора физико-математических наук (1977) в области теории колебаний и волн, радиофизика и электроника, применение нелинейной динамики в различных областях науки. Автор монографии «Детерминированный хаос и экономика» и учебника «Волны в экологии» (в соавторстве с ...). Опубликовал 120 научных статей по направлениям, указанным выше. Лауреат Государственной премии СССР. Редактор журнала International Journal of Chaos Theory и член редакционной коллегии журнала «Физика и жизнь».

В библиографическом списке нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок на них в тексте. В списке указываются:

- а) для книг - фамилия автора, инициалы, название книги, город, издательство, год издания, том;
- б) для журнальных статей - фамилия автора, инициалы, название статьи, название журнала, серия, год, том, номер, выпуск, первая страница статьи;
- в) для депонированных статей - название статьи, инициалы, фамилия автора, название организации, в которой выполнена работа, город, год, объем статьи, название депонирующей организации, дата депонирования, регистрационный номер;
- г) для препринта - фамилия автора, инициалы, название издания, полное название издающей организации, год, количество страниц;
- д) для материалов конференций, школ, семинаров - фамилия автора, инициалы, название статьи, название издания, время и место проведения конференции, город, издательство, год, первая страница статьи.

В конце статьи авторы должны указать наименование программы, в рамках которой выполнена работа, или наименование фонда поддержки.

2. **Электронный вариант.** Статья оформляется с использованием макропакета LATEX 2 $\epsilon$ . Рекомендуется пользоваться компилятором MiKTeX (MiKTeX2.4), так как именно им пользуются в редакции. В виде исключения принимаются статьи, подготовленные с помощью текстового редактора Microsoft Word (все формулы должны быть набраны при помощи Equation или MathType).

Все иллюстрации, включенные в оригинал-макет, предоставляются в виде отдельных файлов, записанных в формате EPS, TIFF, GIF, JPEG.

## Шаблон статьи

```
\documentclass[11pt,twoside]{article}
\usepackage{mathtext,amssymb,amsmath}
\usepackage[cp866]{inputenc}           % кодировка входного документа;
\usepackage[T2A]{fontenc}             % кодировка для шрифтов LN
\usepackage[english,russian]{babel}   % включение русификации, русских и
                                       % английских стилей и переносов
\usepackage{graphicx}                 % включение графических изображений
\usepackage{cite}
\begin{document}
УДК
\begin{center}
  {\bf НАЗВАНИЕ СТАТЬИ}           % Название статьи прописными буквами
  {\it И.О. Фамилия1, И.О. Фамилия2}
\end{center}
\begin{abstract}
  Текст аннотации
\end{abstract}
                                       % Основной текст статьи
\section*{Введение}                  % Введение и Заключение не нумеруются
\section{Формирование заголовка секции}
\subsection{Формирование заголовка подсекции}
\section*{Заключение}
  % Пример ссылок на литературу \cite{famil_1}, \cite{famil_2,famil_3,famil_4}.
  % Кавычки в тексте должны быть угловыми («авгд»).
  % Автор самостоятельно определяет способ нумерации окружений и
  % математических выражений, следит за работой соответствующих счетчиков.
  % При переносе математических формул знак математической операции
  % в выключных формулах указывается в верхней и нижней строках разбиваемой
  % формулы.
  % Рисунки должны быть черно-белыми, в формате *.eps (Encapsulated PostScript).

  % Библиография оформляется с использованием окружения ltrtr:
\newenvironment{ltrtr}{
\vspace{0.5\baselineskip} \noindent {\bf{Библиографический список}} \vspace{-0.5\baselineskip}
\begin{enumerate}
\partopsep=0pt\topsep=0pt\itemsep=1pt\parsep=0pt\parskip=0pt}
{\end{enumerate}}

\begin{ltrtr}
\bibitem{Abarbanel} Абарбанель Г.Д., Рабинович М.И., Селверстон А. и др. Синхронизация
в нейронных ансамблях // Усп. Физ. Наук. 1996. Т.~166, №~4. С.~363.
\bibitem{Postnov1999} Postnov D., Han S. K., Kook H. Synchronization of diffusively coupled
oscillators near the homoclinic bifurcation // Phys. Rev. E. 1999. Vol.~60. P.~2799.
\bibitem{Landa1980} Ланда П.С. Автоколебательные системы с конечным числом степеней
свободы. М.: Наука, 1980.
\end{ltrtr}

{\it Полное название организации, город, e-mail}

\end{document}
```

Зав. редакцией *Н.Н. Левина*  
Редакторы *Л.А. Сидорова, Н.Н. Левина*  
Обложка художника *Д.В. Соколова*  
Оригинал-макет подготовлен  
*Г.А. Суминой, И.А. Пономаревой*  
на компьютерной системе Apple Macintosh

**Подписка на 2005 год**  
осуществляется Саратовским государственным университетом  
по заключению договора между подписчиком и издателем

**Стоимость подписки на 2005 год 390 руб. (6 номеров)**  
Заявки на заключение договора принимаются  
по почте, по телефону редакции, по эл. почте редакции  
e-mail:and@cas.ssu.runnet.ru

Оплата подписки физическими лицами  
на расчетный счет Саратовского государственного университета:  
ИНН 6452022089, р/с 40503810800001000431  
ГРКЦ ГУ банка России по Саратовской обл. г. Саратов  
л/с 06073075430 БИК 046311001 КПП 645201001  
Адрес: 410012, Саратов, Астраханская, 83, СГУ  
Тел. (845-2)51-46-88, 51-51-95

**Распространение журнала осуществляется редакцией журнала**  
**по представлению копии платежного поручения**  
**и почтового адреса подписчика на адрес редакции**  
410012, Саратов, Астраханская, 83  
Тел./факс: (845-2) 52-38-64; e-mail:and@cas.ssu.runnet.ru

Сдано в набор 01.03.05. Подписано к печати 23.03.05. Формат 70x108/16  
Бумага «Снегурочка». Печать трафаретная. Гарнитура Латинская  
Усл. печ. л. 9,45(6,75). Уч.-изд. л. 9,4. Тираж 200. Заказ 355

Отпечатано на ризографе GR 3750  
редакции журнала

© Редакция журнала  
«Известия вузов ПНД»  
© Оформление художника  
Д.В. Соколова, 2005



EDITOR-IN-CHIEF

*Yu.V. Gulyaev*, Member of the Russian Academy of Sciences, Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Moscow

EDITORS

*D.I. Trubetskov*, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Saratov University

*D.A. Usanov*, Member of the International Academy of Sciences of High School, Saratov University

SECRETARY-IN-CHIEF

*B.P. Bezruchko*, Professor, Saratov University, Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Saratov Branch

EDITORIAL BOARD

*V.S. Anishchenko*, Professor, Saratov University

*A.S. Dmitriev*, Professor, Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Moscow

*S.P. Kuznetsov*, Professor, Saratov University, Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Saratov Branch

*P. S. Landa*, Professor, Moscow University

*G.G. Malinetskii*, Professor, Institute of Applied Mathematics of RAS, Moscow

*O.V. Rudenko*, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Moscow University

*Yu.M. Romanovsky*, Professor, Moscow University

*E.E. Son*, Professor, Institute of Physics and Technics, Dolgoprudny

*V.D. Shalfeev*, Corresponding Member of the Russian Academy of Engineer Sciences, Nizhny Novgorod University

*V.V. Tuchin*, Professor, Saratov University

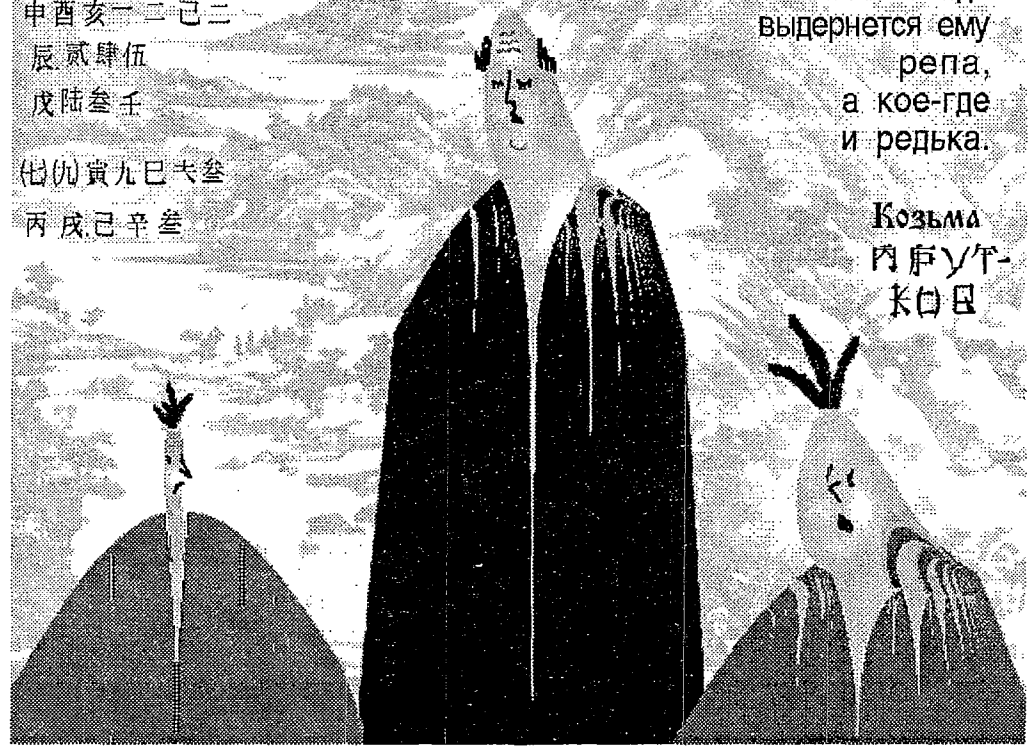
*V.K. Yulpatov*, PhD, Institute of Applied Physics of RAS, Nizhny Novgorod

*V.G. Yakhno*, Professor, Institute of Applied Physics of RAS, Nizhny Novgorod

申(三)庚酉亥(五)子  
 壬癸丑寅卯七掘  
 掘(六)四戊丁  
 柒捌玖拾甲乙  
 七叁十伍壹肆五六  
 申酉亥一二己二  
 辰贰肆伍  
 戊陆叁壬  
 七(八)寅九巳未叁  
 丙戌己辛叁

Глупец гадает;  
 напротив того,  
 мудрец  
 проходит жизнь  
 как огород,  
 наперед зная,  
 что кой-где  
 выдернется ему  
 репа,  
 а кое-где  
 и редька.

Козьма  
 丙申УГ-  
 庚申



При оформлении обложки использован рис. 3 из статьи А.П.Кузнецова, Л.В.Тюрюкиной (стр.24)