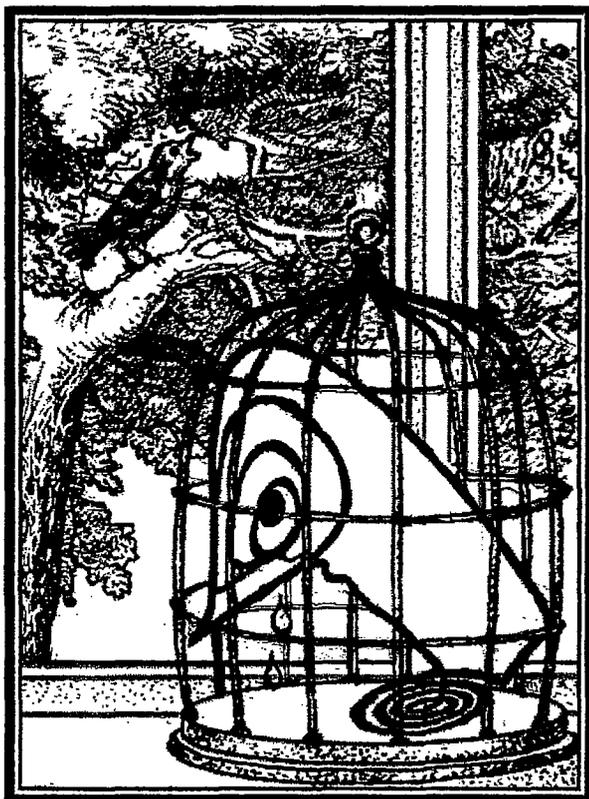


ISSN 0869-6632

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Трикладная Делпнейная инамика



ИЗДАНИЕ САРАТОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА



**Бифуркации
в динамических
системах различной природы**



**Обзоры актуальных проблем
нелинейной
динамики**



Конференции, семинары, симпозиумы



Детерминированный хаос



Авто-волны, самоорганизация



**Прикладные задачи
нелинейной
теории
колебаний
и волн**



**Нелинейная динамика
в лицах. История. Personalities**

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, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники РАН

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

В.С. Анищенко, профессор, Саратовский государственный университет

Ю.А. Данилов, старший научный сотрудник, Курчатовский научный центр, Москва

Б.А. Калинин, профессор, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

В.И. Кринский, профессор, Институт экспериментальной и теоретической биофизики, Пущино

С.П. Кузнецов, профессор, ведущий научный сотрудник, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники РАН

П.С. Ланда, профессор, Московский государственный университет

Ю.М. Романовский, профессор, Московский государственный университет

Л.А. Островский, профессор, Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

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

В.В. Тучин, профессор, Саратовский государственный университет

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

ПРИКЛАДНАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА

научно-технический журнал

издается с 1993 года

Выходит 6 раз в год

Том 4, № 1, 1996, Саратов

СОДЕРЖАНИЕ**ОБЗОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ***Ораевский А.Н.* Динамика одномодовых лазеров и динамический хаос. 3**БИФУРКАЦИИ В ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ***Баженов М.В., Рабинович М.И., Рубчинский Л.Л.* Простая модель нейрона, обладающего сложной осцилляторной активностью 33**АВТОВОЛНЫ. САМООРГАНИЗАЦИЯ***Короновский А.А.* Об одной модели распространения эпидемии 40**ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ КОЛЕБАНИЙ И ВОЛН***Зимняков Д.А., Тучин В.В., Мишин А.А.* Визуализация фрактальных структур биотканей с использованием метода пространственной спекл-коррелометрии 49**ЖУРНАЛ В ЖУРНАЛЕ***Агаджанян Н.А.* От редактора 60*Зацепина Г.Н., Горюнов Н.Н., Тульский С.В., Мальшев Д.К., Елисеева Т.О.* Развитие методов дифференциальной диагностики болезней людей посредством исследований изменений тонкой структуры постоянного электрического поля по коже человека 66*Иванов П.С., Бутылин А.А.* Непараметрический анализ коллективных состояний системы ионных каналов 71*Кудряшов Ю.И., Розанов В.В., Сысоев Н.Н., Усков Л.Ф.* Численное исследование нелинейных задач взрывных технологий 81*Акимов А.И., Баранов А.Н., Салецкий А.М.* Влияние слабых магнитных полей на рост и фотосинтетическую активность листьев бобов 91*Пивоваров Ю.П., Королик В.В.* Современное состояние вопроса о гигиеническом регламентировании биотехнологических штаммов в объектах окружающей среды 96*Воробьева Т.Н.* Динамический гомеостаз: равновесие, стационарное состояние, хаос? 102*Крейнес М.Г.* Моделирующие системы представления знаний для задач классификации: новая информационная технология для работы с плохо формализованными знаниями 109**НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА В ЛИЦАХ. ИСТОРИЯ. PERSONALIA***Данилов Ю.А.* Льюис Кэрролл как нелинейное явление 119**КНИЖНАЯ ПОЛКА СТУДЕНТА***Короновский А.А., Трубецков Д.И.* Нелинейная динамика в действии 126

АНОНС 58, 118, 129

CONTENTS

REVIEWS OF ACTUAL PROBLEMS OF NONLINEAR DYNAMICS

Dynamics of single-mode lasers and dynamical chaos. *A.N. Oraevsky* 3

BIFURCATIONS IN DYNAMICAL SYSTEMS

A simple model for a neuron with complex oscillatory activity. *M.V. Bazhenov, M.I. Rabinovich, and L.L. Rubchinsky* 33

AUTOWAVES. SELFORGANIZATION

About one model of epidemic spread. *A.A. Koronovskiy* 40

APPLIED PROBLEMS OF NONLINEAR OSCILLATION AND WAVE THEORY

Imaging of the biotissues fractal structures using spatial speckle-correlometry technique. *D.A. Zimnyakov, V.V. Tuchin, A.A. Mishin* 49

JOURNAL IN JOURNAL

Editorial. *N.A. Agadzhanian* 60Measuring of the constant electric field fine structure changes as a method for the differential diagnostic of different diseases. *G.N. Zatsepina, N.N. Gorynov, S.V. Tylskii, D.K. Malyshev, T.O. Yeliseeva* 66Non-parametric analysis of collective effects in the ensemble of ionic channels. *P.S. Ivanov, A.A. Butylin* 71Numerical investigation for nonlinear problems of explosive technologies. *Y.I. Kudryashov, V.V. Rozanov, N.N. Sysoev, L.F. Uskov* 81Weak magnetic fields influence on growth and leaves photosynthesis activity of beans. *A.I. Akimov, A.N. Baranov, A.M. Saletsky* 91A modern consideration of the problem of hygienic norms of biotechnological bacteria cultures in environment. *Y.P. Pivovarov, V.V. Korolik* 96Dynamic homeostasis: equilibrium, steady state, chaos? *T.N. Vorobjeva* 102Modelling knowledge based systems for classification problems: new information technology for insufficiently formalized knowledge. *M. Kreines* 109

HISTORY OF NONLINEAR DYNAMICS. PERSONALIA

Lewis Carroll as nonlinear phenomenon. *Yu.A. Danilov* 119

STUDENT'S BOOKSHELF

Nonlinear dynamics in action. *A.A. Koronovskiy, D.I. Trubetskov* 126

ANNOUNCEMENTS 58, 118, 129



ДИНАМИКА ОДНОМОДОВЫХ ЛАЗЕРОВ И ДИНАМИЧЕСКИЙ ХАОС

А. Н. Ораевский

Дан обзор работ по динамике одномодового лазера. Особое внимание уделено свойствам странного аттрактора, соответствующего режиму динамического хаоса в одномодовом лазере. Приведен перечень основных направлений исследований по динамике лазеров. Список литературы: 160 наименований.

1. Мазерный (лазерный) аттрактор

С точки зрения теории колебаний квантовый генератор (мазер или лазер) является автоколебательной системой, описываемой нелинейными дифференциальными уравнениями. Это диссипативная система, потери в которой обусловлены поглощением излучения различными конструктивными элементами (зеркалами резонатора и др.), релаксационными процессами, происходящими в активной среде, и, наконец, выводом генерируемого луча из резонатора для его использования потребителем. Потери компенсируются энергией накачки, вводимой в активную среду квантового генератора. Различным режимам генерации соответствуют различные решения описывающих их уравнений. Эти решения наглядно могут быть представлены в виде траекторий в фазовом пространстве [1]. Установившимся режимам генерации в фазовом пространстве уравнений соответствуют состояния равновесия или предельные циклы-траектории, относящиеся к классу «особых».

До начала 60-х годов считалось, что разнообразие особых траекторий сводится к следующему перечню: узел-фокус, седло, сепаратриса и предельный цикл. Остальные траектории - неособые, асимптотически приближающиеся к особым или удаляющиеся от них. Неособые траектории описывают переходные процессы в реальном приборе.

Те особые траектории, которые «притягивают» к себе неособые траектории, получили название аттракторов. Все эти хорошо известные обстоятельства подробно изложены в монографиях и учебниках (см., например, [1,2]).

До 60-х годов топологический образ фазового пространства нелинейных дифференциальных уравнений формировался главным образом на основе уравнений второго порядка, фазовое пространство для которых двумерно. Для описания режимов работы многих приборов зачастую такой системы оказывалось достаточно. Но в середине 50-х - начале 60-х годов появились приборы и возрос интерес к процессам, описание которых принципиально не укладывалось в рамки уравнений второго порядка. При исследовании этих процессов и анализе работы

этих приборов был выявлен особый класс решений нелинейных дифференциальных уравнений. Впоследствии эти решения получили название «странных аттракторов» [3].

Открытие странного аттрактора справедливо связывается с работой Э. Лоренца [4]. Однако «странные» нерегулярные решения нелинейных уравнений примерно в это же время были также обнаружены в работах [5-8], посвященных исследованию процессов генерации в квантовых генераторах¹.

Следует отметить, что работа [4] была связана с анализом процессов конвекции в атмосфере, так что в работах [4] и [5] речь шла о явлениях совершенно различной природы. Но удивительно, что в этих работах анализировались совершенно одинаковые уравнения [8].

В данной статье особенности возникновения и свойства фазовых траекторий типа странного аттрактора рассмотрены в рамках исследования динамических режимов в квантовых генераторах.

Процесс генерации в квантовом генераторе описывается уравнениями Максвелла, которые в одномодовом приближении (возбуждается один тип колебаний в резонаторе генератора) сводятся к уравнению осциллятора с затуханием, возбуждаемого поляризацией активной среды [7,9,10],

$$\frac{d^2E}{dt^2} + \frac{\omega_c}{Q} \frac{dE}{dt} + \omega_c^2 E = -4\pi \frac{d^2P}{dt^2}. \quad (1)$$

Здесь E - электрическая компонента электромагнитного поля в резонаторе; Q - добротность; ω_c - собственная частота резонатора; P - поляризация активной среды, подчиняющаяся уравнениям

$$\frac{d^2P}{dt^2} + \frac{2}{\tau_2} \frac{dP}{dt} + \omega_0^2 P = -2\omega_0 \frac{|\mu|^2}{\hbar} NE, \quad (2a)$$

$$\frac{dN}{dt} + \frac{1}{\tau_1} N = I + \frac{2}{\hbar\omega_0} E \frac{dP}{dt}, \quad (2б)$$

где N - разность населенностей верхнего и нижнего рабочих уровней в активной среде; I - интенсивность накачки; τ_2 - время релаксации поляризации, определяющее ширину спектральной линии; τ_1 - время релаксации населенности уровней; μ -матричный элемент дипольного момента частиц среды, взаимодействующих с излучением; ω_0 - резонансная частота спектральной линии.

Система уравнений (1) и (2) широко применяется для исследования динамики квантовых генераторов, начиная с работ [9,10]. Их анализ может быть проведен методом медленных комплексных амплитуд, когда входящие в уравнения (1) и (2) величины представляются в виде

$$E = Ee^{-i\omega_c t}, \quad P = Pe^{-i\omega_c t}, \quad (3)$$

где E , P и далее N - медленные функции времени по сравнению с высокочастотной экспонентой. Они удовлетворяют уравнениям [7]

$$\frac{dE}{dt} + \frac{\omega_c}{2Q} E = i2\pi\omega_c P, \quad (4a)$$

$$\frac{dP}{dt} + \left[\frac{1}{\tau_2} + i(\omega_0 - \omega_c) \right] P = -i \frac{|\mu|^2}{\hbar} NE, \quad (4б)$$

¹ Работа [5] поступила в редакцию журнала 28 июня 1962 года и была доложена в сентябре того же года на 4-м Международном конгрессе по приборам СВЧ. Работа [4] поступила в редакцию журнала 18 ноября 1962 года.

$$\frac{dN}{dt} + \frac{1}{\tau_1} N = I + \frac{i}{2\hbar} (EP^* - E^*P), \quad (4в)$$

которые получаются из (1), (2) с помощью стандартной процедуры [1]. Система уравнений (4) имеет следующие стационарные решения:

$$E = P = 0, \quad N = I\tau_1 \quad (5)$$

и

$$|E|^2 = 4\pi\hbar Q \left\{ I - \frac{\hbar[1 + (\Omega - \omega_0)^2\tau_2^2]}{4Q|\mu|^2\tau_1\tau_2} \right\}, \quad (6а)$$

$$(\Omega - \omega_0)\left(1 + \frac{\omega_c\tau_2}{2Q}\right) = \frac{\omega_c\tau_2}{2Q} (\omega_c - \omega_0), \quad (6б)$$

где $\Omega = \omega_c - d\phi/dt$ - частота генерируемого излучения. Стационарное состояние (5) неустойчиво, если

$$4\pi \frac{|\mu|^2}{\hbar} I\tau_1\tau_2 Q > 1 + (\Omega - \omega_0)^2\tau_2^2. \quad (7)$$

В этом случае условие возбуждения колебаний в лазере выполнены, и он генерирует излучение, амплитуда и частота которого определяется соотношениями (6). Выяснение устойчивости состояния (6) мы проведем в два этапа.

Введем новую динамическую переменную $EP^* + E^*P$. Из системы (4) следует, что [11]

$$\left(\frac{d}{dt} + \frac{\omega_c}{2Q} + \frac{1}{\tau_2}\right)(EP^* + E^*P) = i(\omega_0 - \omega_c)(EP^* - E^*P). \quad (8)$$

Для упрощения дальнейшего анализа предположим, что резонансные частоты резонатора и спектральной линии совпадают. Тогда правая часть уравнения (8) равна нулю, и видно, что с течением времени величина $EP^* + E^*P$ экспоненциально затухает, стремясь к нулевому значению. В амплитудно-фазовом представлении ($E = Ae^{i\phi}$, $P = Be^{i\psi}$) это означает, что система стремится к состоянию, в котором либо $A=B=0$, либо

$$\cos(\phi - \psi) = 0, \quad \sin(\phi - \psi) = \pm 1. \quad (9)$$

При выполнении условия самовозбуждения (7) состояние $A=B=0$ неустойчиво, так что траектории лазера в фазовом пространстве стремятся в такую его область, где имеют место соотношения (9). В этом случае система уравнений (4) распадается на две

$$\frac{dA}{dt} + \frac{\omega_c}{2Q} A = \pm 2\pi\omega_c B, \quad (10а)$$

$$\frac{dB}{dt} + \frac{1}{\tau_2} B = \pm \frac{|\mu|^2}{\hbar} NA, \quad (10б)$$

$$\frac{dN}{dt} + \frac{1}{\tau_1} N = I \mp \frac{1}{\hbar} AB, \quad (10в)$$

а область фазовых траекторий - на две подобласти, в одной из которых $\sin(\phi - \psi) = 1$, а в другой $\sin(\phi - \psi) = -1$. Эти подобласти соприкасаются в тех местах, где обращаются в нуль либо A , либо B . В местах соприкосновения система может перейти из одной области в другую без энергетического «катаклизма». При таком

переходе разность фаз меняется на π . Хотя по своему физическому смыслу амплитуды A и B - положительные величины, изменение знака $\sin(\varphi - \psi)$ при переходе между подобластями можно приписать изменению знака амплитуды, формально допустив существование как положительных, так и отрицательных значений A и B . При таком предположении две подсистемы уравнений сливаются в одну систему

$$\frac{dA}{dt} + \frac{\omega_c}{2Q} A = 2\pi\omega_c B, \quad (11a)$$

$$\frac{dB}{dt} + \frac{1}{\tau_2} B = \frac{|\mu|^2}{\hbar} NA, \quad (11б)$$

$$\frac{dN}{dt} + \frac{1}{\tau_1} N = I - \frac{1}{\hbar} AB. \quad (11в)$$

Уравнения (11), исследование которых впервые было проведено в [5], с точностью до обозначений совпадают с системой уравнений, использованной в работе [4].

Для анализа уравнений (11) их удобно записать в безразмерных переменных: x - амплитуда колебаний поля; y - поляризация; z - число частиц, нормированных так, что в стационарном состоянии $x=y=\pm 1$, $z=1$. Введем также безразмерное время $\tau=t/\tau_2$. Тогда система уравнений (11) примет вид

$$dx/d\tau = -\sigma(x - y), \quad (12a)$$

$$dy/d\tau = -y + xz, \quad (12б)$$

$$dz/d\tau = -b(z - r) - b(r - 1)xy, \quad (12в)$$

где

$$\sigma = \omega_c \tau_2 / 2Q, \quad b = \tau_2 / \tau_1, \quad r = 4\pi I \tau_1 \tau_2 Q |\mu|^2 / \hbar. \quad (13)$$

По своему физическому смыслу коэффициент r есть отношение мощности накачки к ее пороговому значению. Стационарные решения этой системы суть: а) $x=y=0$, $z=r$; б) $x=\pm 1$, $y=\pm 1$, $z=1$. Это нормированный вид решений (5) и (6). Очевидно, что решение «а» соответствует отсутствию генерации. Оно устойчиво по Ляпунову, если $r < 1$, то есть пороговое условие генерации не выполнено, и теряет устойчивость при выполнении порогового условия $r > 1$. Решение «б» соответствует стационарной генерации с постоянной амплитудой. Из (6) видно, что оно существует, если $r > 1$. Анализ решений «б» на устойчивость по Ляпунову [5-7] приводит к следующему характеристическому уравнению

$$\lambda^3 + \lambda^2(1 + b + \sigma) + \lambda(r + \sigma)b + 2b\sigma(r - 1) = 0 \quad (14)$$

для показателей Ляпунова λ . Из этого уравнения следует, что при $\sigma < 1 + b$ стационарные решения «б» устойчивы, если $r > 1$, то есть если выполнено условие самовозбуждения квантового генератора. При $\sigma > 1 + b$ стационарные решения устойчивы лишь в интервале

$$1 < r < r^*, \quad r^* = \frac{\sigma(\sigma + b + 3)}{\sigma - b - 1}. \quad (15)$$

Чтобы ответить на вопрос, что же происходит при $r > r^*$, необходим численный анализ. Такой анализ показал [5-7], что при $r > r^*$ стационарный режим генерации сменяется сложным автомодуляционным процессом, характер которого передает рис. 1, взятый из работы [5]. Видно, что в системе происходят постепенно

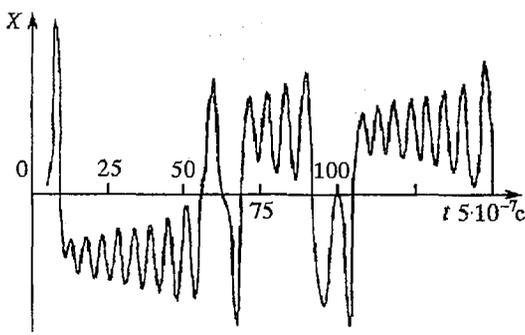


Рис. 1. Вид хаотического автомодуляционного процесса при $r > r^*$: $r=20$, $\sigma=4$, $b=1$ [5]

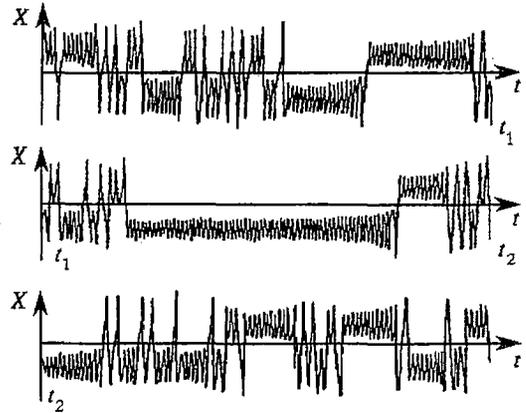


Рис. 2. Развитая во времени картина хаотического автомодуляционного процесса при $r > r^*$ [4]

нарастающие пульсации вокруг одной из стационарных точек: $C_1(x=y=1, z=1)$ или $C_2(x=y=-1, z=1)$, а затем система совершает перескок в область другого положения равновесия и т.д. На рис. 2 представлена развитая во времени картина автомодуляционного процесса. Время пребывания системы в окрестности той или другой стационарной точки является случайной величиной. Поэтому весь процесс в целом носит случайный характер. Посмотрим на поведение системы в амплитудно-фазовом представлении. На рис. 3 показано изменение во времени синуса разности фаз и интенсивности излучения [11]. Обращают на себя внимание обсуждавшиеся ранее резкие скачки разности фаз. Из рисунка видно, что скачки фаз происходят при обращении интенсивности в нуль. В этой части фазовой траектории существенную роль могут играть даже небольшие шумы, которые всегда присутствуют в любой системе, но которые не учтены при выводе уравнений (12). Введение таких шумов в уравнения (4) в качестве ланжевеновских сил и численное исследование их при прежнем условии $\omega_0 - \omega_c = 0$ показало, что небольшие по интенсивности шумы заметно сказываются на динамике разности фаз. Переходы разности фаз от значений $\pi/2$ к значениям $-\pi/2$ теряют характер перескоков, становясь более плавными (рис. 4). Отметим, что использование системы уравнений (4) в этом случае принципиально, так как в присутствии шумов тождественного обращения величины $E_R^* + E^*P$ в нуль не происходит никогда. Можно ожидать, что в переходном режиме, когда $E_R^* + E^*P$ еще не равно нулю, изменения фазы будут носить характер относительно плавного перехода, а не

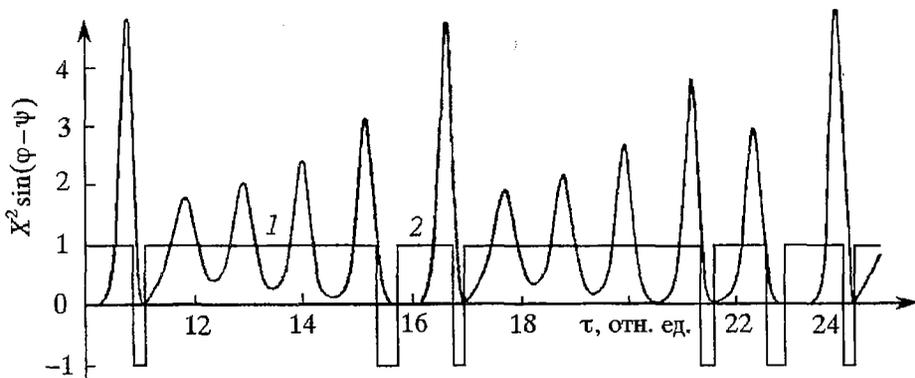


Рис. 3. Изменение во времени синуса разности фаз (1) и интенсивности излучения (2) в области хаотического движения [11]

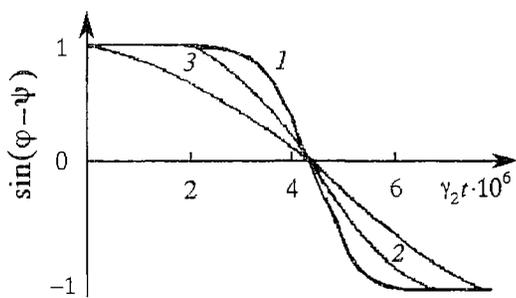


Рис. 4. Переход $\pi/2 \leftrightarrow -\pi/2$ разности фаз поля и поляризации в присутствии внешних флуктуаций при начальном состоянии, соответствующем области странного аттрактора: 1 - дисперсия шума 10^{-4} ; 2 - 10^{-3} ; 3 - $5 \cdot 10^{-3}$

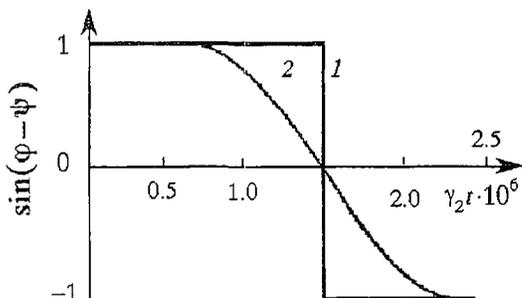


Рис. 5. Переход $\pi/2 \leftrightarrow -\pi/2$ разности фаз поля и поляризации в случае начального состояния, отвечающего странному аттрактору (1), и произвольного начального состояния

характер скачка, даже в отсутствие шума. Численный расчет подтверждает это предположение. Если выбрать начальные условия, удовлетворяющими соотношению (9), то изменение разности фаз происходит скачком. При выборе начальных условий, не удовлетворяющих условию (9), фаза изменяется плавно (рис. 5). По мере того, как система приближается к области аттрактора, крутизна изменения фазы возрастает.

2. Фазовый портрет лазера

Первая попытка проанализировать фазовый портрет хаотических решений уравнений (12) была предпринята в работе [4] для $\sigma=10$, $b=8/3$. Рис. 6 дает две плоские проекции трехмерного фазового портрета решения, полученные численным интегрированием уравнений (12). Числа на траекториях означают

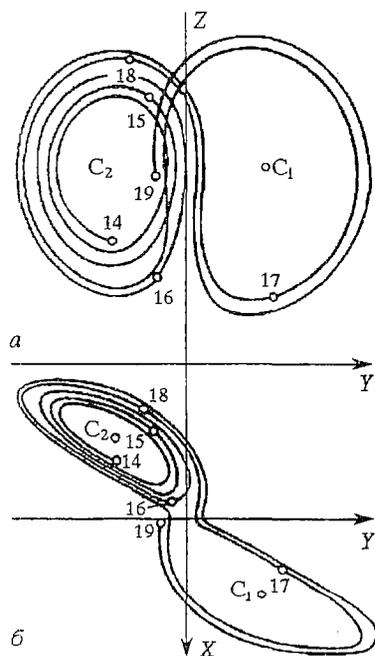


Рис. 6. Проекция фазового портрета хаотического процесса [4]

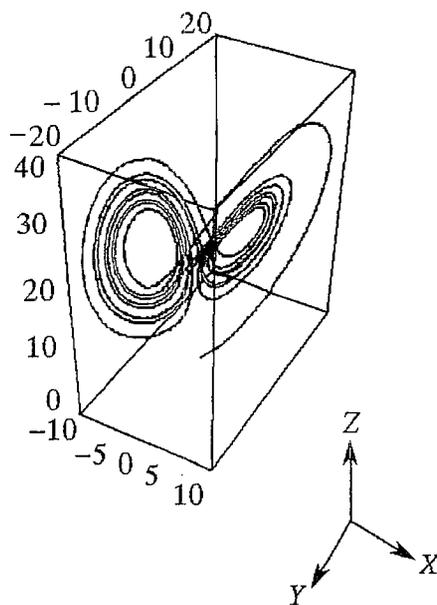


Рис. 7. Трехмерный портрет странного аттрактора уравнений (12)

последовательность движения системы по этим траекториям. В соответствии с рисунком фазовая траектория раскручивается по спирали вокруг состояния равновесия C_2 , а затем перескакивает на спираль в окрестности состояния равновесия C_1 (точка 17), после чего вновь возвращается в окрестность точки C_2 и т.д. Казалось бы, как это возможно? Ведь оставаясь в плоскости $Z=1$, траектории должны пересечься при переходе из области C_1 в область C_2 . «Вырывает» трехмерность фазового пространства. Раскручиваясь около состояния равновесия C_1 или C_2 , траектория смещается по оси Z , так что при переходе к другому центру притяжения пересечения траекторий не происходит. Таким образом, мы видим, что существование сложного ансамбля непересекающихся траекторий возможно лишь в фазовом пространстве, размерность которого больше двух.

Трехмерный вид фазового портрета уравнений (12) представлен на рис.7. Впервые для параметров $\sigma=10$, $b=8/3$ он был вычислен в работе [12]. Это один из примеров странного аттрактора - притягивающей сложной траектории, существенно отличающейся от квазипериодических орбит или замкнутых орбит типа предельного цикла.

Странный аттрактор уравнений (12) в настоящее время достаточно глубоко изучен с помощью численных методов (см. [13-23] и цитируемую в них литературу). На рис. 8 построены особые траектории системы (12) в трехмерном фазовом пространстве XYZ для $\sigma=10$, $b=8/3$ [20-22]. Плоскость Σ проведена через состояния равновесия C_1 и C_2 перпендикулярно оси Z . Уравнения (12) имеют плоскость - сепаратрису, проходящую через состояние равновесия $C_0(0,0,r)$ и пересекающую плоскость Σ по линии AB . Движение по любой траектории, лежащей в этой плоскости, направлено в сторону состояния равновесия C_0 и оканчивается в этой точке. Из точки C_0 выходят две сепаратрисы - «усы» S_1 и S_2 , идущие либо в «свои» собственные состояния равновесия C_0 и C_2 , либо в смежные, в зависимости от значения параметра r . На серии рис. 9 представлено поведение траекторий, соответствующих решениям уравнения (12), в проекции на плоскость, проходящую через точки C_0 , C_1 и C_2 . Координата U на плоскости этой проекции откладывается в направлении прямой, соединяющей состояния равновесия C_1 и C_2 .

Как уже отмечалось, при $r>1$ в квантовом генераторе возникают автоколебания. Из неустойчивого состояния равновесия $(0,0,r)$ (см. рисунок) в зависимости от начальных условий система по «усам», сепаратрисам, стремится к одному из состояний равновесия C_1 или C_2 (напомним, что C_1 и C_2 представляют собой автоколебания с постоянной амплитудой). Оказывается, что кроме критических значений параметра r , равных 1 и r^* , существуют еще два значения, которые мы назовем r_1 и r_2 . При $r>r_1$ происходит качественное изменение фазового портрета: появляются неустойчивые предельные циклы (штриховая линия), а сепаратрисы S_1 и S_2 «меняются» фокусами.

Увеличение r приводит к тому, что при $r>r_2$ рождается странный аттрактор. Он заполняет всю область вне предельных циклов. Сепаратрисы S_1 и S_2 стремятся уже не к состояниям равновесия, а оканчиваются на неустойчивых предельных циклах. Поведение системы в этом случае качественно различно в зависимости от начальных условий. Если начальные условия таковы, что стартовая точка лежит в пределах фазовой поверхности, ограниченной циклами, то система, совершая осцилляции, приходит в

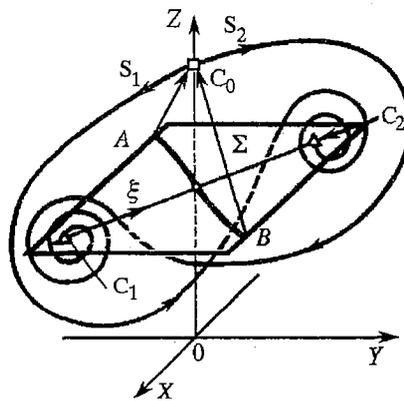


Рис. 8. Особые траектории уравнений (12) в трехмерном пространстве

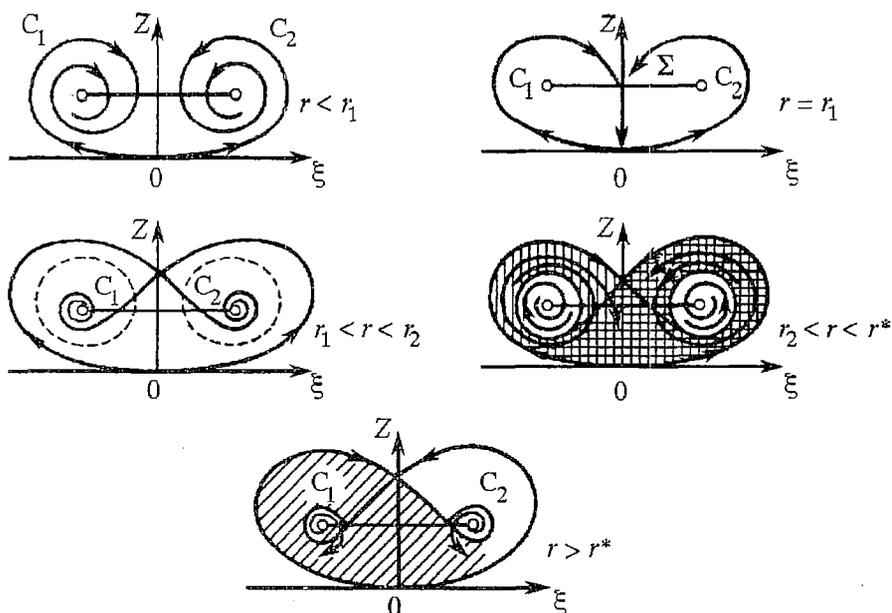


Рис. 9. Группа Z - ξ проекций фазового пространства уравнений (12) при различных r

состояние C_1 или C_2 . В этом случае установившимся режимом является генерация излучения с постоянной амплитудой. Другие начальные условия приводят к стохастическим колебаниям.

При дальнейшем увеличении r радиус циклов уменьшается, и при $r > r^*$ они сливаются с состояниями равновесия C_1 и C_2 , передавая им свою неустойчивость; вся область, ограниченная сепаратрисами S_1 и S_2 , становится странным аттрактором. Система ведет себя непредсказуемо независимо от начальных условий.

Анализ устойчивости в малом позволяет отыскать лишь r^* ; r_1 и r_2 найдены методом численного анализа [22]. Зависимости $r_1(\sigma)$, $r_2(\sigma)$ и $r^*(\sigma)$ представлены на рис. 10. При дальнейшем увеличении r вблизи $r = 220$ странный аттрактор переходит в предельный цикл [22]. Численный анализ в [22] проведен для $\sigma = 10$ и $b = 8/3$, так что бифуркационное значение $r = 220$ относится к конкретным величинам σ и b . При уменьшении r от r^* система остается в фазовом пространстве странного аттрактора вплоть до $r = r_2$, когда странный аттрактор исчезает [11]. В области $r < r_2$ точка в фазовом пространстве устремляется к устойчивым

состояниям равновесия C_1 или C_2 . Таким образом, имеет место гистерезисное поведение точки в фазовом пространстве при возрастании r от 1 до $r > r^*$ и обратном уменьшении до 1.

Значение $b = 8/3$ используется в различных расчетах традиционно, начиная с работы [4], хотя в расчетах, проведенных в работах [5-8], параметр $b = 1$. Физика лазеров не допускает значений $b > 1$, но описанные выше особенности фазовых траекторий остаются в силе и при $b \leq 1$. Тем не менее, динамика лазера чувствительна к изменению параметра b . На рис. 11 представлен характер амплитудных

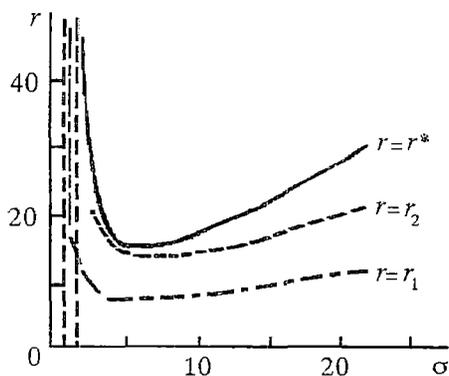


Рис. 10. Зависимость критических значений r_1 , r_2 , r^* от параметра σ при $b = 1$

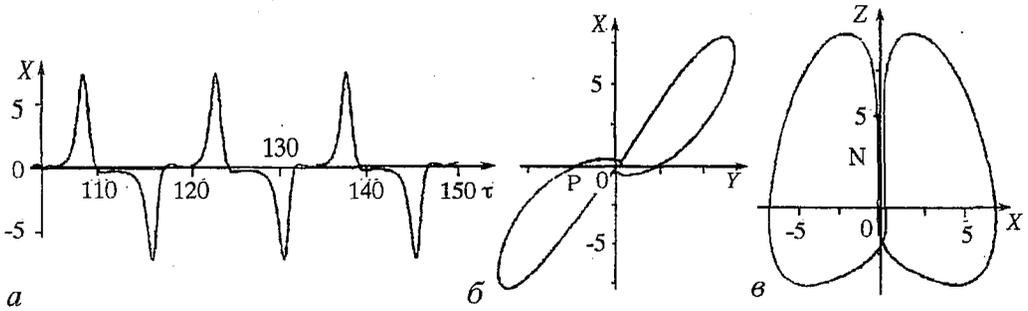


Рис. 11. Периодические пульсации амплитуды поля (а) и проекции предельного цикла (б, в) системы (12) при $b=0.05$; $\sigma=5$; $r=28$

пульсаций и фазовый портрет лазера при малом значении b [23]. В этом случае $r^* \approx 10$, так что выбранное значение $r > r^*$. Однако, лазер не находится в режиме хаотических пульсаций: имеют место регулярные пульсации, соответствующие симметричному предельному циклу типа восьмерки. Рис. 12 демонстрирует сценарий перехода к хаосу при увеличении параметра b [23]. Сначала предельный цикл теряет симметрию (рис.12, а) и при дальнейшем увеличении b хаотизируется, проходя через стадии удвоения периода (рис.12, б, в). Затем колебания становятся

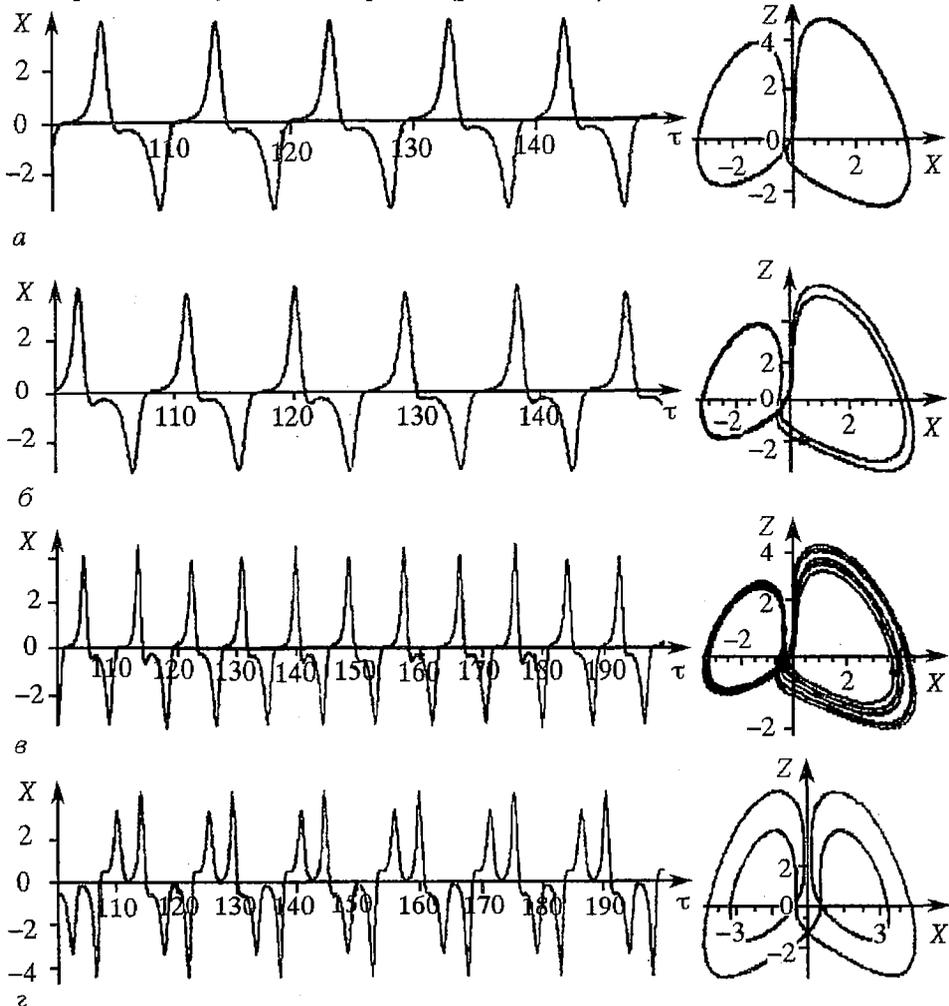


Рис. 12. Последовательность режимов системы (12), соответствующая увеличению параметра b от 0.05 до 0.1; $\sigma=5$; $r=28$

вновь регулярными, а предельный цикл опять приобретает симметрию, но уже в виде удвоенной восьмерки. Этот сценарий повторяется несколько раз со все уменьшающимися интервалами изменения b . Наконец, при $b \approx 0.15$ очередная серия удвоения периода приводит к возникновению развитого странного аттрактора типа аттрактора Лоренца. Отметим, что удвоение периода - один из характерных сценариев перехода к странному аттрактору. По-видимому, он тесно связан с механизмом вырожденного параметрического возбуждения колебаний с частотой, равной половине частоты модуляции параметра (о параметрическом возбуждении см., например, [2]).

3. Размерность странного аттрактора

Изучение странного аттрактора как топологического образования показывает, что это замкнутая совокупность взаимно *неустойчивых* траекторий, несмотря на то, что совокупность траекторий как целое является притягивающей, то есть *устойчивой*. Это оказывается возможным, поскольку в различных точках фазового пространства каждая из траекторий неустойчива не по всем направлениям. В некоторых направлениях малые отклонения от траектории нарастают, в других - убывают.

Предположим, что в начальный момент времени некоторый объем этого фазового пространства заполнен точками с плотностью ρ_0 ; пусть эти точки соответствуют различным начальным значениям величин x, y, z . Рассматривая движение точек в фазовом пространстве как гидродинамическое [2], можно написать уравнение сохранения плотности

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (16)$$

где \mathbf{v} - вектор скорости точек с компонентами (x', y', z') . Если в начальный момент распределение точек в выбранном объеме фазового пространства равномерно (ρ_0 не зависит от x, y, z), то в этот момент

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} = -\rho_0 \text{div} \mathbf{v}. \quad (17)$$

Из уравнений (12) следует, что

$$\text{div} \mathbf{v} = -(\sigma + b + 1) < 0 \quad (18)$$

не зависит от положения точки в фазовом пространстве. Поэтому изменение плотности со временем происходит равномерно во всем пространстве. Если в начальный момент ρ_0 не зависит от координат, то такое положение сохранится и в дальнейшем, так что уравнение

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \rho \text{div} \mathbf{v} = 0 \quad (19)$$

описывает изменение плотности точек в фазовом пространстве в течение всего времени. Из (18) и (19) следует, что

$$\rho = \rho_0 \exp(\sigma + b + 1)\tau, \quad (20)$$

то есть плотность точек в фазовом пространстве растет со временем, а обратная ей величина - объем, занимаемый траекториями движений, сжимается. Сжатие фазового объема типично для диссипативных автоколебательных систем, потери в которых восполняются за счет внешних источников. Сжатие не означает, что

фазовый объем непременно стягивается в точку. «Фазовая жидкость» может растекаться по поверхности. Как уже отмечалось в разделе 2, в случае уравнений (12) она растекается по многим плоскостям, не представляющим в сумме континуум (канторово множество). Таким образом, размерность странного аттрактора меньше размерности фазового пространства уравнений, решением которых он является. Но как ей дать разумное определение?

Для того, чтобы соотнести конфигурацию странного аттрактора со всем объемом фазового пространства, оказалось удобным ввести размерность странного аттрактора. Чтобы ввести ее наиболее естественным образом, рассмотрим, как связана обычная размерность фазового пространства с числом точек, заполняющих некоторый его объем V . Для этого заполним выбранный объем d -мерного фазового пространства d -мерными кубиками со стороной a . Если число этих кубиков $N(a)$, то очевидно соотношение $V \approx a^d N(a)$. При бесконечном уменьшении стороны кубика a число $N(a)$ будет бесконечно расти, а равенство истинного объема и общего объема всех кубиков будет выполняться все точнее. Введем безразмерную сторону кубика $\epsilon = aV^{-1/d}$ и запишем выражение для объема в форме

$$\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \epsilon^d N(\epsilon) = 1. \quad (21)$$

Из этого соотношения сразу следует выражение для размерности фазового пространства

$$d = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\epsilon)}{\ln(1/\epsilon)}. \quad (22)$$

Уберем теперь из объема все кубики, в которых не содержится точек, принадлежащих странному аттрактору. Оставшееся число точек странного аттрактора обозначим $N_A(\epsilon)$. Тогда по аналогии с (22) можно определить размерность странного аттрактора

$$D = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\epsilon)}{\ln(1/\epsilon)}, \quad (23)$$

которая может быть дробным числом. Поэтому размерность получила название дробной, или фрактальной. Удалось связать размерность D странного аттрактора с показателями Ляпунова [24,2], что упрощает ее вычисление. Определенная таким образом размерность странного аттрактора всегда меньше полной размерности фазового пространства. В частности, для уравнений (12) имеем $2 < D < 3$.

4. Системы с широкой линией усиления. Неавтономные системы

Для лазера видимого и ближнего инфракрасного диапазонов типична широкая линия активного вещества ($\sigma \ll 1$, $b \ll 1$). В этом случае критического параметра r^* не существует. Однако, и такие системы обладают интересной динамикой.

При $\sigma \ll 1$, $b \ll 1$ ($\tau_2 \ll \tau_c, \tau_1$) и умеренном значении параметра самовозбуждения r можно в уравнении (46) пренебречь производной и исключить из уравнений поляризацию. Тогда систему (4) нетрудно преобразовать к виду

$$\frac{dW}{dt} + \frac{1}{\tau_c} W = \sigma N W, \quad (24a)$$

$$\frac{dN}{dt} + \frac{1}{\tau_1} N = I - 2\sigma N W, \quad (24б)$$

где $\tau_c = Q/\omega_c$; $W = A^2/(8\pi\hbar\omega)$; $\sigma = 4\pi\omega|\mu|^2c/(\hbar(1+(\omega_0 - \omega_c)^2\tau_2^2))$. К системе (24) следует присоединить еще уравнение для фазы поля

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{2} \sigma(\omega_c - \omega_0)\tau_2 N. \quad (25)$$

Но оно в этом случае является сопутствующим, не оказывая прямого влияния на динамику лазера. Казалось бы, динамические возможности системы (24) примитивны: нетривиальное состояние равновесия

$$W = W_s(r-1), \quad N = 1/(\sigma\tau_c), \quad W_s = 1/(2\sigma\tau_1), \quad r = \sigma\tau_c\tau_1 I \quad (26)$$

всегда устойчиво, если $r > 1$. Однако, как показывает нижеследующий анализ, такой простой одномодовый лазер обладает «скрытыми» динамическими резервами.

Введем безразмерные величины $X = W/(W_s(r-1))$, $\tau = \Omega_0 t$, где $\Omega_0 = ((r-1)/\tau_1\tau_c)^{1/2}$, и исключим из уравнений (24) динамическую переменную N . Получим

$$X'' - (X')^2/X + X(X-1) = \varepsilon f(X', X; \tau), \quad (27)$$

где

$$f(X', X; \tau) = -X'[1 + (r-1)X], \quad \varepsilon = 1/(\Omega_0\tau_1), \quad (') = d/d\tau. \quad (28)$$

Хотя в данном случае правая часть (27) явно не зависит от времени, мы ввели время в качестве одного из аргументов функции f для придания уравнению (27) более общего вида.

Если $\tau_1 \gg \tau_c$, что для многих лазеров имеет место, то $\varepsilon \ll 1$. Поэтому уравнение (27) можно решать методом разложения в ряд по параметру ε

$$X(\tau) = X_0(\tau) + \varepsilon X_1(\tau) + \varepsilon^2 X_2(\tau) + \dots \quad (29)$$

Очевидно, что функция X_0 удовлетворяет уравнению

$$X_0'' - (X_0')^2/X_0 + X_0(X_0 - 1) = 0. \quad (30)$$

Введением переменной $Y = \ln X_0$ этому уравнению можно придать форму [25]

$$Y'' + e^Y - 1 = 0. \quad (31)$$

Уравнение (31) может быть истолковано, как движение материальной точки в поле потенциала $U(Y) = e^Y - Y$. В некоторых случаях такая запись является более удобной. Уравнение (30) имеет интегрирующий множитель $2X_0'/X_0^2$ и может быть сведено к полному дифференциалу

$$d\left[\frac{1}{X_0^2}(X_0')^2 + 2X_0 - 2\ln X_0\right] = 0, \quad (32)$$

откуда

$$\frac{1}{X_0^2}(X_0')^2 + 2X_0 - 2\ln X_0 = C, \quad (33)$$

C - произвольная постоянная интегрирования. Теперь задача сводится к интегрированию уравнения

$$X_0' = \pm X_0 (C - 2X_0 + 2\ln X_0). \quad (34)$$

Очевидно, что его интегрирование сводится к квадратуре, но получающийся интеграл не берется в элементарных функциях. Поскольку функции $X_0(\tau; C)$ играют важную роль в динамике лазеров (и ряда других автоколебательных систем), они заслуживают специального внимания и могут быть названы

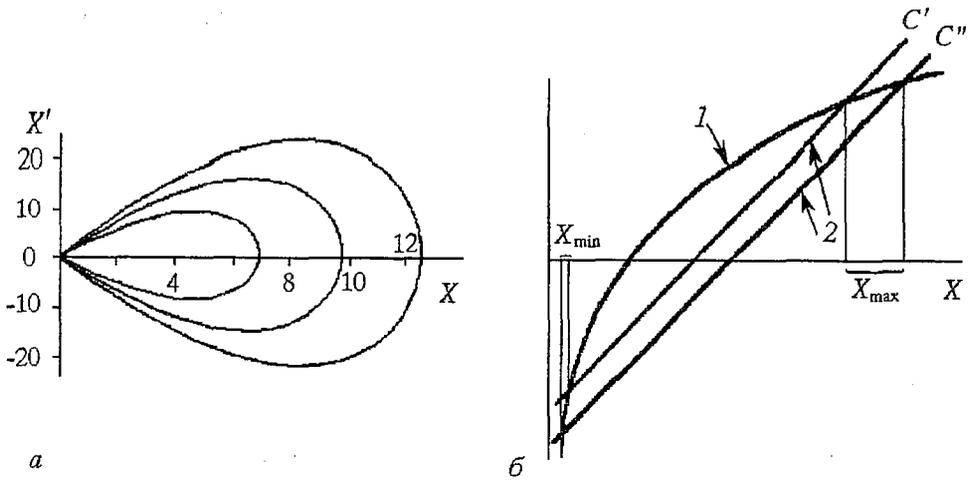


Рис. 13. *a* - траектории, соответствующие решениям уравнения (34), на фазовой плоскости (X', X) для значений C : 1 - 10, 2 - 15, 3 - 20; *б* - графическое представление решений уравнения $C/2 - X - \ln X = 0$: 1-график $\ln X$, 2- график $C/2 - X$ для двух разных значений C ($C'' > C'$)

лазерными функциями. Для них можно ввести обозначение $La(x; C)$ и на основе уравнения (33) составить алгоритм для расчета. Оказывается, однако, что для достаточно больших C можно найти приближенное решение уравнений (34), выраженное через элементарные функции [25].

Заметим прежде всего, что $X_0(\tau; C)$ - периодические функции времени; это следует из уравнения (34), которое в фазовой плоскости имеет решением две траектории, соответствующие знаку (+) и знаку (-). Эти траектории являются взаимными зеркальными отражениями относительно оси абсцисс, замыкающимися друг на друга в точках $X_0' = 0$ (рис.13, *a*). Очевидно, что эти точки определяются уравнением

$$C - 2X_0 + 2\ln X_0 = 0. \quad (35)$$

Для наглядности это уравнение представлено графически (рис. 13, *б*). Из рисунка видно, что X_{\max} растет с ростом C , асимптотически стремясь к $C/2$ при больших C . X_{\min} убывает с ростом C и асимптотически стремится к значению $\exp(-C/2)$. Таким образом можно представить себе, что $X_0(\tau; C)$ при больших C имеет вид периодически повторяющихся импульсов с достаточно большой амплитудой в максимуме и малым значением в минимуме (рис. 14). Этим можно воспользоваться для вычисления асимптотических значений этих функций в окрестностях максимума и минимума импульса.

Область $X_0 \ll 1$. В этом случае $|\ln X_0| \gg X_0$ и (34) переходит в следующее уравнение:

$$X_0' = \pm X_0 (C + 2\ln X_0)^{1/2}. \quad (36)$$

Решение этого уравнения выражается в элементарных функциях

$$X_0 = \exp^{1/2}[(\tau \pm \theta_1)^2 - C], \quad (37)$$

θ_1 - произвольная константа интегрирования.

Область $X_0 \gg 1$. В этом случае $|\ln X_0| \ll X_0$, так что

$$X_0' = \pm X_0 (C - 2X_0)^{1/2}. \quad (38)$$

Это уравнение тоже интегрируется в элементарных функциях

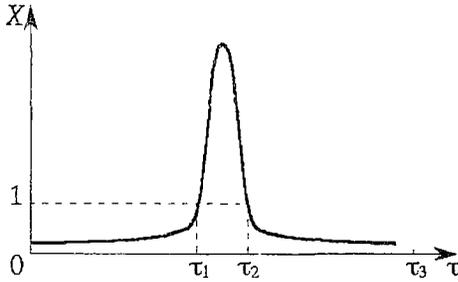


Рис. 14. К расчету параметров релаксационных пульсаций лазера

выбора функции в этой области мало скажется на описании динамики системы в целом. Тогда из этих функций можно построить решение уравнения (34), для чего их необходимо приравнять («сшить») в точках τ_1 и τ_2 (рис. 14). Такое сшивание определит как значения τ_1, τ_2, τ_3 , так и значения неопределенных констант $\theta_{1,2}$. Отметим, что при больших C функции сшиваются не только по величине, но и по производной. Выполняя процедуру сшивания, находим приближенное значение $X_0(\tau - \theta; C)$

$$X_0(\tau - \theta; C) = \begin{cases} \exp^{1/2}[(\tau - \theta)^2 - C], & 0 \leq \tau - \theta \leq \tau_1, \\ C/2[\text{ch}(C^{1/2}/2)(\tau - \theta - \theta_1)]^{-2}, & \tau_1 \leq \tau - \theta \leq \tau_2, \\ \exp^{1/2}[(\tau - \theta - \theta_2)^2 - C], & \tau_2 \leq \tau - \theta \leq \tau_3, \end{cases} \quad (40)$$

где

$$\theta_1 = C^{1/2} + 2/C^{1/2} \text{arcch}(C/2)^{1/2}, \quad \theta_2 = 2\theta_1, \quad (41)$$

а

$$\tau_1 = \theta + C^{1/2}, \quad \tau_2 = \theta + C^{1/2} + (4/C^{1/2}) \text{arcch}(C/2)^{1/2}, \quad \tau_3 = \theta + 2\theta_1. \quad (42)$$

Величина θ произвольный параметр, который в автономной системе остается неопределенным.

Теперь можно определить период пульсаций T и длительность импульса. Нетрудно видеть (см. рис.14), что

$$T = \tau_3 - \theta = 2C^{1/2} + (4/C^{1/2}) \text{arcch}(C/2)^{1/2}. \quad (43)$$

Период растет с ростом максимального значения импульса $X_{\max} = C/2$. Длительность импульса, определяемая по его полувисоте,

$$\tau_{1/2} = (4/C^{1/2}) \text{arcch} 2^{1/2} \approx 3.525/C^{1/2} \quad (44)$$

убывает с ростом C . Таким образом, с ростом интенсивности импульса его длительность уменьшается, а интервал между импульсами увеличивается. В итоге средняя интенсивность почти сохраняется. Более строгий численный расчет показывает, что она медленно растет с ростом X_{\max} .

Очевидно, что полное решение уравнения (33) определяется функцией (40), повторяемой с периодом (43). Описываемые таким образом периодические пульсации мощности излучения лазера обычно называют релаксационными, а соответствующий им предельный цикл - релаксационным.

Поскольку параметр C в функции $X_0(\tau; C)$ может принимать любые положительные значения, эта функция определяет континуум периодических решений уравнения (30). Реальное нелинейное уравнение (27), в отличие от (30), имеет конечное число периодических решений, то есть константа C должна принимать конечное число значений. Оказывается, что эти значения C являются решением уравнения

$$X_0 = C/2[\text{ch}(C^{1/2}/2)(\tau \pm \theta_2)]^{-2}. \quad (39)$$

θ_2 - произвольная константа интегрирования.

Теперь предположим, что (37) описывает решение не только для $X_0 \ll 1$, но и во всем интервале $0 < X_0 \leq 1$, а (39) представляет собой решение на всем интервале $X_{\max} \leq X_0 \leq 1$. Основанием для такого предположения служит тот факт, что область около $X_0 = 1$ система

проходит быстро, и некорректность выбора функции в этой области мало скажется на описании динамики системы в целом. Тогда из этих функций можно построить решение уравнения (34), для чего их необходимо приравнять («сшить») в точках τ_1 и τ_2 (рис. 14). Такое сшивание определит как значения τ_1, τ_2, τ_3 , так и значения неопределенных констант $\theta_{1,2}$.

Отметим, что при больших C функции сшиваются не только по величине, но и по производной. Выполняя процедуру сшивания, находим приближенное значение $X_0(\tau - \theta; C)$

$$X_0(\tau - \theta; C) = \begin{cases} \exp^{1/2}[(\tau - \theta)^2 - C], & 0 \leq \tau - \theta \leq \tau_1, \\ C/2[\text{ch}(C^{1/2}/2)(\tau - \theta - \theta_1)]^{-2}, & \tau_1 \leq \tau - \theta \leq \tau_2, \\ \exp^{1/2}[(\tau - \theta - \theta_2)^2 - C], & \tau_2 \leq \tau - \theta \leq \tau_3, \end{cases} \quad (40)$$

где

$$\theta_1 = C^{1/2} + 2/C^{1/2} \text{arcch}(C/2)^{1/2}, \quad \theta_2 = 2\theta_1, \quad (41)$$

а

$$\tau_1 = \theta + C^{1/2}, \quad \tau_2 = \theta + C^{1/2} + (4/C^{1/2}) \text{arcch}(C/2)^{1/2}, \quad \tau_3 = \theta + 2\theta_1. \quad (42)$$

Величина θ произвольный параметр, который в автономной системе остается неопределенным.

Теперь можно определить период пульсаций T и длительность импульса. Нетрудно видеть (см. рис.14), что

$$T = \tau_3 - \theta = 2C^{1/2} + (4/C^{1/2}) \text{arcch}(C/2)^{1/2}. \quad (43)$$

Период растет с ростом максимального значения импульса $X_{\max} = C/2$. Длительность импульса, определяемая по его полувисоте,

$$\tau_{1/2} = (4/C^{1/2}) \text{arcch} 2^{1/2} \approx 3.525/C^{1/2} \quad (44)$$

убывает с ростом C . Таким образом, с ростом интенсивности импульса его длительность уменьшается, а интервал между импульсами увеличивается. В итоге средняя интенсивность почти сохраняется. Более строгий численный расчет показывает, что она медленно растет с ростом X_{\max} .

Очевидно, что полное решение уравнения (33) определяется функцией (40), повторяемой с периодом (43). Описываемые таким образом периодические пульсации мощности излучения лазера обычно называют релаксационными, а соответствующий им предельный цикл - релаксационным.

Поскольку параметр C в функции $X_0(\tau; C)$ может принимать любые положительные значения, эта функция определяет континуум периодических решений уравнения (30). Реальное нелинейное уравнение (27), в отличие от (30), имеет конечное число периодических решений, то есть константа C должна принимать конечное число значений. Оказывается, что эти значения C являются решением уравнения

$$F(C) = \int_0^T f(X_0', X_0; \tau)(X_0'/X_0^2) d\tau = 0. \quad (45)$$

Мы не будем здесь приводить достаточно длинного вывода этого соотношения, отсылая читателя к литературе [26]. Заметим лишь, что идея его вывода восходит к А. Пуанкаре и состоит в следующем. Ищется X_1 , следующий член разложения решения в ряд по малому параметру ε . В этом приближении в правой части уравнений будет стоять известная уже функция времени с неопределенным значением константы C , а в левой части - линейризованное относительно X_1 уравнение (30). Если мы ищем периодические решения исходной системы уравнений, то X_1 тоже должно быть периодическим. Оказывается, однако, что решение линейризованного уравнения при произвольном C имеет неперриодические члены. Для того, чтобы решение стало периодическим, необходимо потребовать обращения неперриодических членов в нуль, что и приводит к уравнению (45).

Если в соотношение (45) подставить значение функции $f(X_0', X_0; \tau)$ из (28), то в результате мы получим тривиальное решение $C=0$. Таким образом, сама по себе система уравнений (24) обладает скудной динамикой. Но ситуация резко меняется даже при небольшом изменении функции $f(X_0', X_0; \tau)$. Продемонстрируем это утверждение на примере задачи о малой модуляции добротности одномодового лазера. Исследуем решения уравнений

$$\frac{dW}{dt} + \frac{1}{\tau_c} [1 + m \cos \Omega(t - \vartheta)] W = \sigma N W, \quad (46a)$$

$$\frac{dN}{dt} + \frac{1}{\tau_1} N = I - 2\sigma N W. \quad (46b)$$

От системы (24) они отличаются введением периодического изменения параметра, описывающего затухание фотонов в резонаторе. Коэффициент модуляции потерь предполагаем малым. Тогда можно показать, что

$$f(X', X; \tau) = -X' [1 + (r - 1)X] + m(\Omega \tau_1) / (\Omega_0 \tau_c) X \sin[\Omega / \Omega_0 (\tau - \vartheta)]. \quad (47)$$

Для упрощения математических выкладок мы выбираем систему отсчета времени такой, что ее начало ($\tau=0$) совпадает с минимумом импульсов, генерируемых в установившемся режиме, и $\vartheta = \Omega_0 \vartheta$ - постоянная величина, описывающая фазовый сдвиг между сигналом модуляции и генерируемым излучением (рис.15).

Будем искать периодические решения уравнений (46), с периодом $T=2\pi/\Omega$. В соответствии с (43) задание периода однозначно определяет константу C . Поэтому при заданном m уравнение (45) определит значение параметра ϑ . Для определения $F(C)$ необходимо вычислить соответствующий интеграл по периоду T . Разбивая весь путь интегрирования на три интервала: от 0 до τ_1 , от τ_1 до τ_2 и от τ_2 до τ_3 , мы можем в качестве X_0 использовать функцию, заданную соотношениями (40). В результате получаем

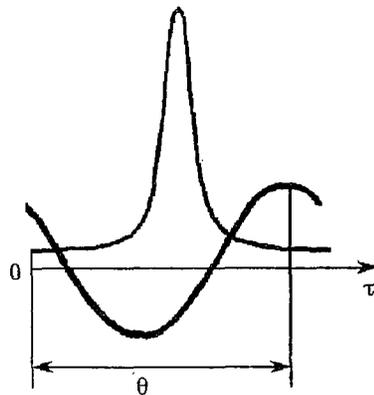


Рис. 15. К расчету возбуждения релаксационных пульсаций лазера методом модуляции потерь в резонаторе

$$F(C) = -r[2/3C^{3/2} + 2C^{1/2}(\ln 2C - 2)] - 4m(\sin\theta)(\Omega\tau_1)/(\Omega_0\tau_c)\ln C. \quad (48)$$

При достаточно больших значениях C период пульсаций практически равен $2C^{1/2}$ (или в размерном времени $2C^{1/2}/\Omega_0$). Поэтому в рассматриваемом случае $C = \pi^2\Omega^2/\Omega_0^2$, и из условия $F(C)=0$ получаем соотношение

$$m\sin\theta = -\frac{r}{6\pi} \frac{\tau_c}{\tau_1} \frac{C^2 + 3C(\ln 2C - 2)}{\ln C}. \quad (49)$$

Поскольку $|\sin\theta| < 1$, то из соотношения (49) вытекает пороговое условие на глубину модуляции

$$m \geq \frac{r}{6\pi} \frac{\tau_c}{\tau_1} \frac{C^2 + 3C(\ln 2C - 2)}{\ln C}. \quad (50)$$

Так как $\tau_c/\tau_1 \ll 1$, то очень неглубокой модуляции добротности достаточно, чтобы возбудить глубокие пульсации лазерного излучения.

Численные исследования показывают, что при постепенном увеличении глубины модуляции система проходит через серию бифуркаций удвоения периода и, в конечном счете, входит в режим динамического хаоса.

Переход к хаосу в лазере с модуляцией добротности возможен не только при увеличении глубины модуляции, но и при изменении ее частоты. В работе [27] исследовалась система уравнений (24) при следующих параметрах: $\tau_1=10^{-3}$ с; $\tau_c=1.4 \cdot 10^{-8}$ с; $\sigma I=2 \cdot 10^{11}$ с⁻². При фиксированной глубине модуляции и изменении ее частоты наблюдался переход от регулярных пульсаций к хаосу через удвоение периода осцилляций. Наиболее интересный результат этих расчетов состоит в том, что при $\Omega/2\pi \equiv f=119$ кГц и $m=2\%$ возникают два сосуществующих аттрактора, соответствующих субгармоникам $f/2$ и $f/3$. Это обстоятельство демонстрирует рис.16. В зависимости от начальных условий лазер генерирует пульсации либо с периодом $2/f$ либо с периодом $3/f$. В частности, на рис. 16 при начальном условии

$W_0=4 \cdot 10^8$, $\dot{W}_0=0$ система выходит на штриховой цикл, а при $W_0=2 \cdot 10^5$, $\dot{W}_0=-2 \cdot 10^6$ - на цикл, нарисованный сплошной линией. В работе [27] утверждается также, что подбором начальных условий удается выйти на третий цикл с периодом равным $10/f$.

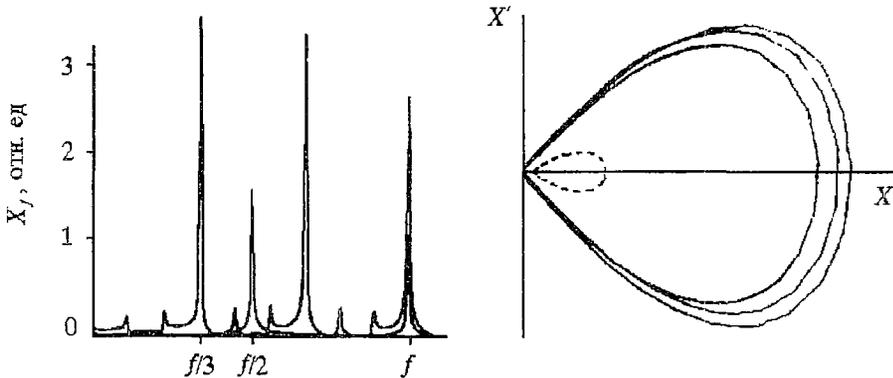


Рис. 16. Спектр пульсаций X_f и вид предельных циклов в фазовом пространстве лазера (X, X') с периодически модулируемыми потерями резонатора (расчет)

5. Модель неоднородного уширения

В основе уравнений (2) лежит двухуровневая модель вещества. Уравнения, описывающие режимы генерации в реальном лазере, могут заметно отличаться от

уравнений (2). Одно из таких отличий состоит в необходимости учета неоднородности (для газовых лазеров - доплеровского) уширения спектральной линии. Неоднородное уширение можно учесть в рамках двухуровневой модели активного вещества, считая, что в резонаторе с полем взаимодействует большое (в пределе - бесконечно большое) количество двухуровневых систем с различными резонансными частотами ω . В таком случае уравнения (4) для поляризации и числа частиц останутся неизменными, а в уравнении для поля в правой части должна стоять сумма поляризаций, соответствующих переходам с различными резонансными частотами,

$$\left[\frac{d}{dt} + \frac{\omega_c}{2Q} \right] E = i2\pi\omega_c \int P(\omega) g(\omega, \omega_0) d\omega, \quad (51a)$$

$$\left[\frac{d}{dt} + \frac{1}{\tau_2} + i(\omega - \omega_c) \right] P(\omega) = -i \frac{|\mu|^2}{\hbar} N(\omega) E, \quad (51б)$$

$$\left[\frac{d}{dt} + \frac{1}{\tau_2} \right] N(\omega) = I(\omega) + \frac{i}{2\hbar} [EP^*(\omega) - E^*P(\omega)], \quad (51в)$$

где $g(\omega, \omega_0)$ - нормированная на единицу форма контура неоднородно уширенной линии с центром в точке ω_0 , $I(\omega)$ - спектральная плотность накачки.

Уравнения (51) трудны для анализа. Модель простейшего приближения к неоднородно уширенной линии состоит в предположении, что с полем определенной моды резонатора взаимодействуют две совершенно одинаковые линии активного вещества, собственные частоты которых ω_+ и ω_- расположены симметрично по обе стороны от собственной частоты моды. Это соответствует случаю совпадения резонансной частоты неоднородно уширенной спектральной линии ω_0 с собственной частотой резонатора. Частотный интервал $\omega_+ - \omega_-$ предполагается равным неоднородной ширине линии. Уравнения, описывающие динамику генерации в рамках такой модели, имеют вид

$$dx/d\tau = -\sigma(x - y), \quad (52a)$$

$$dy/d\tau = -y - i\xi v + (1 + \xi^2)xz, \quad (52б)$$

$$dz/d\tau = -b(z - R) - b/2(R - 1)(x^*y + xy^*), \quad (52в)$$

$$dv/d\tau = -v + i\xi y + (1 + \xi^2)xw, \quad (52г)$$

$$dw/d\tau = -bw - b/2(R - 1)(x^*v + xv^*). \quad (52д)$$

В этих уравнениях

$$i \frac{P(\omega_+) + P(\omega_-)}{P_s} = y, \quad i \frac{P(\omega_+) - P(\omega_-)}{P_s} = v,$$

$$\frac{N(\omega_+) + N(\omega_-)}{N_s} = z; \quad \frac{N(\omega_+) - N(\omega_-)}{N_s} = w;$$

$$\xi = \frac{\omega_+ - \omega_-}{2} \tau_2, \quad R = \frac{2r}{1 + \xi^2},$$

P_s - значение суммарной поляризации, а N_s - значение суммарного числа частиц в режиме стационарной генерации. Остальные обозначения те же, что и в уравнениях (12).

Система уравнений (52) имеет стационарные решения: а) $x=y=v=w=0$, $z=r$; б) $x=y=\pm 1$, $v=-i\xi$, $z=1$, $w=0$. Устойчивость их проанализирована в работах [19,27-29]. Режим «а» соответствует отсутствию генерации и устойчив, если $R < 1$. Режим «б» соответствует генерации с постоянной амплитудой и фазой. Он устойчив, если $1 < R < R^*$, причем для $b=1$ [28, 29]

$$R^* = \sigma \frac{\sigma(1 - \xi^2) + 4}{\sigma - 2}. \quad (53)$$

Как и в случае однородной линии R^* существует лишь для «плохого» резонатора: $\sigma > 2$. Заметим, что (53) переходит в (15), если $\xi=0$. В то же время видно, что в зависимости от ξ параметр R^* может принимать различные, в том числе достаточно малые значения, если $\xi > 1$. Это облегчает экспериментальное наблюдение режимов динамического хаоса в лазерах с неоднородно уширенной линией активного вещества. Однако в рамках рассматриваемой модели диапазон увеличения параметра ξ ограничен. Дело в том, что при $\xi^2 > (\sigma+1)^2/[(\sigma+1)^2-2]$ коэффициент самовозбуждения $r/[1+(\Omega-\omega_0)^2\tau_2^2]$ для каждой отдельной линии (см. формулу (7)) превышает значение R , и режим генерации на одной центральной частоте становится неустойчивым. Очевидно, что этого не должно быть в случае континуума линий. Такой вывод побуждает предпринять более строгое исследование стационарных решений системы (51) и их устойчивости. Оно может быть выполнено аналитически в предположении, что $g(\omega, \omega_0)$ - функция Лоренца [30-32]. Проведенные исследования качественно подтверждают основной вывод теории двух линий: при достаточно большой неоднородной ширине параметр R^* может быть существенно меньше r^* . Количественные отличия состоят в том, что для $b=1$ условие плохого резонатора для неоднородно уширенной линии $\sigma > 1$, а не $\sigma > 2$, как это предсказывает теория двух линий. Одним из наиболее замечательных результатов работы [30] является предсказание бистабильного поведения режимов генерации в лазере с неоднородно уширенной линией при наличии расстройки между частотой резонатора и резонансной частотой линии активного вещества. В некотором интервале изменения параметра R генерируемая лазером мощность может иметь два значения в зависимости от предыстории. Ограниченный объем данной статьи не позволяет углубляться в эту и другие интересные проблемы, связанные с лазером на основе неоднородно уширенной линии активного вещества. Читатель может ознакомиться с ними по оригинальным и обзорным публикациям [30-41,19,23].

Поскольку спектральные компоненты поляризации активного вещества входят в уравнение для поля (51а) интегрально, возникает идея написать уравнения для интегральных динамических переменных активной среды и свести всю систему (51) к конечному числу обыкновенных уравнений. В работах [23,41] показано, что приближенно такие уравнения могут быть написаны. Результаты исследований динамики лазера на основе этих уравнений можно найти в [23].

6. Экспериментальные результаты

Предыдущий анализ показывает, что экспериментальное наблюдение динамического хаоса в лазерах - не простая задача. Главная проблема состоит в том, что практически в любом из широко применяемых лазеров ширина линии люминесценции активной среды превосходит ширину моды в резонаторе, так что для регулярного лазера $\sigma < 1$. Как следует из материала предыдущих разделов, динамический хаос в таких лазерах может возникать лишь при модуляции параметра лазера (неавтономный режим работы).

Трудность наблюдения хаоса в лазере с однородно уширенной линией не

только в требовании $\sigma > 1 + b$, но и в том, что при этом параметр самовозбуждения r должен быть большим. Напомним, что $r_{\min}^* \approx 15$ при $b=1$. Как мы видели, положение в отношении r смягчается, если использовать лазер с неоднородно уширенной линией активного вещества, но при этом требование плохого резонатора остается.

Изложенные обстоятельства определили историческую хронологию экспериментального наблюдения динамического хаоса в лазерах.

6.1. Неавтономный CO_2 -лазер. В работе [27] экспериментально исследовано возникновение режима хаотических пульсаций мощности в CO_2 -лазере, работающем на длине волны излучения 10.6 мкм. Параметры лазера, исследованного в работе [27], были следующими: $\tau_1 = 0.4$ мс; $\tau_2 \approx 10$ нс; длина резонатора 2 м; потери в резонаторе на проход 20%, чему соответствует $\tau_c = 3 \cdot 10^{-8}$ с; $\Omega_0/2\pi = 43$ кГц. Накачка лазера обеспечивала выходную мощность 50 мкВт. Время жизни фотонов в резонаторе изменялось по закону $(1/\tau_c)(1 + m \cos \Omega t)$ с помощью электрооптического модулятора. Частота модуляции $f = \Omega/2\pi$ могла перестраиваться от 40 до 100 кГц. Выходная мощность лазера детектировалась пьезоэлектрическим детектором с временным разрешением 2.5 нс. Ток пьезоэлектрического детектора пропорционален числу фотонов в резонаторе W . Этот сигнал подавался на X-ось осциллографа. На Y-ось подавался сигнал, пропорциональный W' , так что на осциллографе регистрировалась фазовая диаграмма колебаний интенсивности лазера. Наряду с этим с помощью спектроанализатора регистрировался спектр функции $W(t)$ (спектр мощности генерации).

Изменение глубины модуляции в пределах от 1 до 5% не приводило к появлению каких-либо особенностей в режиме генерации. Поэтому были детально изучены режимы генерации при фиксированной глубине модуляции $m=0.01$ и различных частотах модуляции.

На рис. 17 представлены спектры мощности и фазовые портреты колебаний при изменении частоты f . При частоте модуляции $f < 62.75$ кГц лазер генерирует импульсы излучения с периодом $T = 1/f$ (на рисунке не показано). Рис. 17, а соответствует частоте $f=62.75$ кГц. При этой частоте модуляции возникает движение с удвоенным периодом, что отражено присутствием в спектре субгармоники с частотой $1/2f$. Рис. 17, б соответствует частоте модуляции $f = 63.80$ кГц. При этой частоте возникает следующее удвоение периода, что отражено портретом предельного цикла и наличием в спектре субгармоники $1/4f$. При $f = 64.00$ кГц наблюдается странный аттрактор (см. рис. 17, в). Осциллограф не разрешает отдельные витки траекторий. Спектр мощности непрерывный с одним небольшим пиком на частоте модуляции (следует обратить внимание на изменение масштаба оси ординат в сравнении с другими картинками этого рисунка). Дальнейшее небольшое увеличение частоты до значения $f=64.13$ кГц приводит к исчезновению странного аттрактора и возникновению цикла,

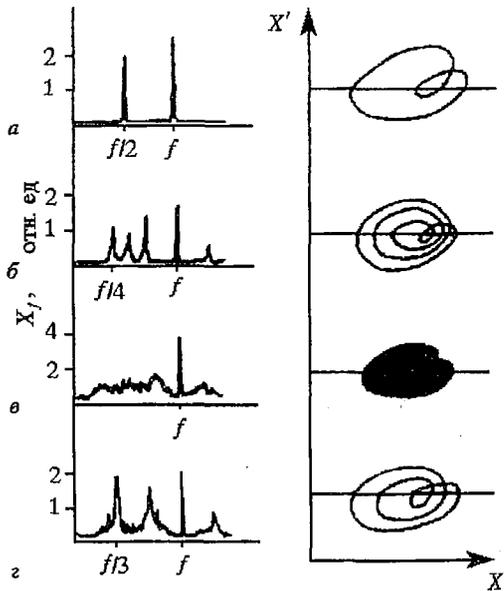


Рис. 17. Спектр пульсаций X_f и вид предельных циклов в фазовом пространстве лазера (X', X) с периодически модулируемыми потерями резонатора (эксперимент)

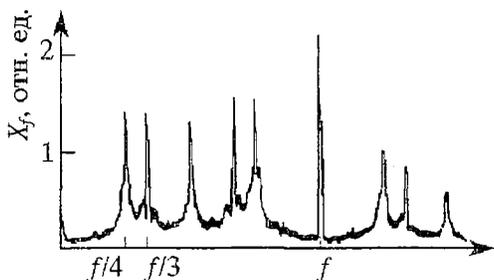


Рис. 18. Спектр пульсаций X_f лазера с периодически модулируемыми потерями резонатора: видно возникновение двух предельных циклов с периодами $3/f$ и $4/f$ (эксперимент)

Как видно из приведенного выше перечня параметров CO_2 -лазера, исследованного в работе [27], ширина спектральной линии активного вещества примерно в три раза больше полосы пропускания резонатора. Поэтому можно надеяться, что модель (46) качественно применима для описания режимов генерации в таком лазере. Численное моделирование, изложенное в разделе 4, было проделано в связи с описанными экспериментами с CO_2 -лазером. Как мы видели, расчет показывает возникновение второго цикла уже в области удвоения периода, а не учетверения, как показывает эксперимент. Возможно, это связано с тем, что, строго говоря, CO_2 -лазер - многоуровневая система. Сведение модели, описывающей его динамику, к двухуровневой представляет собой сравнительно грубое приближение. Тем не менее, предсказания, основанные на двухуровневой модели, находят хорошее качественное подтверждение экспериментом: в лазере на основе появления четной и нечетной субгармоник возникают по крайней мере два устойчивых предельных цикла, слияние которых приводит к рождению странного аттрактора.

Экспериментальные исследования CO_2 -лазера с модулируемыми параметрами нашли свое развитие в последующих работах. В частности, в [42] исследованы CO_2 -лазеры с модулированной накачкой.

Эксперименты, близкие по духу к исследованиям CO_2 -лазеров, были проведены с лазером бегущих волн на основе активированного неодимом алюмоиттриевого граната (YAG) [43]. Авторам этой работы удалось проследить переход от режима генерации с постоянной амплитудой к хаотическим пульсациям путем изменения глубины модуляции добротности резонатора при фиксированной частоте модуляции. Этому эксперименту предшествовали теоретические изыскания [44,45], результаты которых качественно подтвердились опытными данными.

6.2. Автономная система. Неоднородное уширение. Первые эксперименты по наблюдению стохастических режимов генерации в лазерах с неоднородно уширенной линией удалось провести авторам работы [46]. Предтечей этой работы можно считать эксперименты, описанные в [47 - 49]. В работе [47] исследовался полупроводниковый лазер при гелиевой температуре. Авторы экспериментально обнаружили существование второго порога по r , при котором возникали периодические пульсации амплитуды генерируемого излучения. Соответствующее условиям эксперимента значение параметра b было значительно меньше единицы. Хотя достичь условий хаоса в работе [47] не удалось, это была первая экспериментальная работа, посвященная целенаправленному поиску нестабильности, предсказанной теорией одномодового лазера.

Авторам работ [48, 49] удалось впервые наблюдать режим регулярных пульсаций в газовом лазере.

Эксперименты [46] были проведены с электроразрядным He-Xe-лазером, причем принимались специальные меры для того, чтобы добиться превышения полосы пропускания резонатора над однородной шириной линии и достичь

соответствующего третьей субгармонике возбуждающей частоты (см. рис. 17, з). При $f > 64.25$ кГц наблюдается устойчивый предельный цикл, период которого точно соответствует частоте модуляции. Было экспериментально обнаружено, что при частоте модуляции $f = 63.85$ кГц рождается второй предельный цикл утроенного периода, сосуществующий с ранее появившимся циклом учетверенного периода (рис.18). Переход от режима учетверения периода (см. рис.17, б) к хаосу (см. рис.17, в) происходит путем слияния этих циклов.

значения параметра $\sigma > 2$. Наблюдались три сценария перехода от стационарной генерации к стохастическому режиму.

1. Переход через удвоение периода регулярных пульсаций мощности наблюдался при перестройке частоты резонатора для следующих параметров лазера. Состав рабочего газа: [Xe]-175мТорр; [He]-0.7Торр. Общая однородная ширина линии за счет спонтанного излучения и соударений $1/\tau_2 = (6.1 \pm 0.3)10^7 \text{ с}^{-1}$. Затухание моды резонатора $\omega/2Q = (3.3 \pm 0.5)10^8 \text{ с}^{-1}$, чему соответствует значение $\sigma = 5.4$. Максимальный коэффициент самовозбуждения $r_{\text{max}} = 2.3$.

При перестройке частоты резонатора по мере приближения ее к значению, соответствующему максимуму усиления, параметр r возрастает и лазер через серию бифуркаций удвоения периода пульсаций переходит в режим генерации с широким спектром излучения, соответствующим хаотическим пульсациям мощности.

2. Двухчастотный переход к режиму хаотических пульсаций мощности наблюдался при постепенном увеличении разрядного тока. Параметры лазера при этом были следующими: [Xe]-175мТорр; [He]-0.3Торр, $1/\tau_2 = (3.8 \pm 0.3)10^7 \text{ с}^{-1}$, $\omega/2Q = (3.3 \pm 0.5)10^8 \text{ с}^{-1}$, $\sigma = 8.7$. Важно, чтобы расстройка между частотой генерируемой моды резонатора и вершиной спектральной линии попадала в определенную область. К сожалению, в работе [46] не приводится конкретного значения расстройки. Режим хаотических пульсаций возникал при $r = 2.2$.

3. Переход к хаосу через перемежаемость режимов возникал при следующих параметрах лазера: [Xe]-175мТорр; гелий в смеси отсутствовал; $1/\tau_2 = (2.0 \pm 0.1)10^7 \text{ с}^{-1}$, $\omega/2Q = (3.3 \pm 0.5)10^8 \text{ с}^{-1}$, $\sigma = 16.5$. В этом случае с ростом возбуждающего тока (или параметра r) регулярные пульсации мощности все чаще перемежаются нерегулярностями в колебаниях; спектр пульсаций постепенно уширяется. При $r = 2.2$ пульсации мощности полностью теряют регулярность, а спектр становится сплошным в пределах от 0 до примерно 50 МГц.

6.3. Однородно уширенная спектральная линия. Как мы видели (см. раздел 1), для наблюдения динамического хаоса в лазере с однородно уширенной линией активного вещества необходима линия усиления с шириной, меньшей полосы пропускания моды резонатора ($\sigma > 1 + b$) и большой коэффициент возбуждения r . Удовлетворить этим условиям удалось путем создания лазера на основе молекул NH_3 [50-52]. Мы обсудим более подробно результаты работы [52]. В этой работе газ молекул $^{15}\text{NH}_3$ возбуждался излучением $^{13}\text{CO}_2$ -лазера. Для генерации использовался чисто вращательный переход $aR(4,4)$ с длиной волны 153 мкм. Априори можно было надеяться, что при сравнительно больших давлениях газа в активной среде линия усиления будет однородно уширена, и режимы генерации в лазере будут следовать теории, описанной в разделе 1. Эти ожидания полностью подтвердились. На рис. 19 показаны пульсации, наблюдавшиеся в $^{15}\text{NH}_3$ -лазере при следующих параметрах: $\sigma = 4.5$; $b = 0.25$; $r > 10.5$; отсутствовала

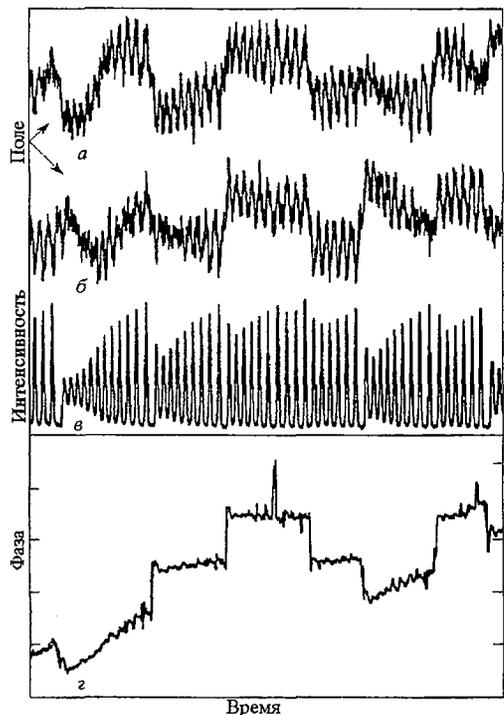


Рис. 19. Пульсации амплитуды, интенсивности и фазы в лазере с однородно уширенной линией (эксперимент)

расстройка между резонансами линий усиления и моды. Как видно, картина хаотических пульсаций находится в полном соответствии с теоретическими предсказаниями (см. рис.1 - 3).

При сравнительно низких давлениях наблюдались заметные отклонения от предсказаний двухуровневой модели с однородно уширенной линией усиления. В частности, при низких давлениях и расстройке наблюдался несимметричный гомоклинический странный аттрактор Шильникова. За подробностями мы отсылаем читателя к оригинальным работам [52,53] и цитируемой в них литературе.

Вместо заключения

Настоящая заметка - это своего рода историческое эссе, а не последовательный обзор по динамике лазеров: слишком много информации, полученной к настоящему времени, осталось «за кадром». Имеющиеся монографии помогут значительно расширить кругозор читателя [54-65]. Но монографиям трудно поспеть за быстро бегущим временем. Поэтому, не имея реальной возможности дать развернутый обзор нелинейной динамики лазеров, я сделал попытку в заключение перечислить основные направления исследований, ведущихся в этой обширной области.

Одномодовые системы. 1. *Лазеры с инжектируемым сигналом* [10,66-76]. Воздействие на лазер производится путем прямого введения внешнего излучения в резонатор. Лазер в этом случае часто используется, как сверхрегенеративный усилитель. Но интерес к нему обусловлен также и тем, что он демонстрирует сложную динамику.

2. *Резонансный насыщающийся поглотитель в резонаторе*, возбуждаемом внешним сигналом. Такая система внешне напоминает лазер с инжектируемым сигналом. Она проявляет бистабильные свойства и в настоящее время является наиболее популярной моделью бистабильного оптического элемента [77-83].

3. *Лазеры с насыщающимся фильтром* [84-99]. Такого типа лазеры часто используются как генераторы коротких импульсов. В свое время он был «популярен» как бистабильный оптический элемент и в полупроводниковом исполнении рассматривался как основной кандидат на место логического элемента, необходимого для создания оптического компьютера [86, 87]. Но время вносит коррективы... Лазеру с насыщающимся нелинейным элементом близки по духу лазеры с другими типами нелинейности внутри резонатора [96 -98]. Сюда же можно отнести лазеры на основе активных сред, сечение индуцированного перехода в которых зависит от температуры, изменяющейся с изменением мощности генерации [100-102].

4. *Лазеры с запаздывающей обратной связью* [25,103-110]. В конце 60-х полупроводниковый лазер с запаздывающей обратной связью рассматривался как один из вариантов генератора коротких субнаносекундных световых импульсов [25]. Впоследствии он приобрел популярность в форме полупроводникового лазера с внешним резонатором, используемым для стабилизации частоты и уменьшения спектральной ширины линии генерации лазера [103], но тут же ввиду богатства динамических режимов он стал «добычей» нелинейных динамиков.

Многомодовые системы. Очевидно, что с возрастанием числа мод динамические возможности системы неограниченно возрастают. Возрастают и трудности анализа таких систем, так что многомодовые системы еще сравнительно малоизученная область.

1. *Противофазная динамика* [111-117]. Истоки этих работ в попытках понять сложную динамику генерации твердотельных лазеров на основе механизма нелинейного взаимодействия близких по частоте мод [111-114].

2. *Взаимодействие многих мод в лазерах* [25,41,118-125]. Сюда следует отнести динамику межмодового взаимодействия в связи с проблемой чувствительности метода внутррезонаторной лазерной спектроскопии [126].

3. *Поперечная динамика лазерного излучения, формирование структур* [127-130].

4. Динамика лазерных решеток [131-134].

5. *Генерация высших гармоник.* Развитие метода генерации гармоник путем помещения нелинейного элемента внутрь резонатора сделало генераторы гармоник динамически интересными системами. По существу, генераторы гармоник - это разновидность многомодового генератора. Даже если задающий генератор одномодовый, все устройство в целом представляет собой двухмодовую модель, описывающую поле основной частоты и поле гармоники [135 - 137].

Управление хаосом. В последние годы стала популярной тема управления хаосом. Еще в работе [6] было показано, что хаотические пульсации можно подавить внешним сигналом. Той же цели может служить отрицательная обратная связь [138]. Разрабатываемые в последние годы методы основаны на идее выбора желаемой фазовой траектории из множества траекторий странного аттрактора и ее поддержания с помощью малого управляющего сигнала [139-144].

Трехуровневые модели. В основе большинства работ по динамике лазеров лежит двухуровневая модель активной среды. Фактически же для стационарной накачки лазеров необходима, как минимум, трехуровневая система². Однако, если накачка производится некогерентным источником энергии, то динамическая модель такого лазера, как правило, может быть сведена к двухуровневой схеме. При накачке лазера когерентным излучением реальная динамическая система усложняется. В этом случае квантовые переходы между всеми парами трехуровневой схемы играют существенную роль в динамике лазера, и модель лазера не может быть сведена к двухуровневой схеме. Это обстоятельство привело к появлению серии публикаций по динамике «трехуровневых» лазеров [145 - 150].

Другие системы. Недавние теоретические исследования показали [151-153], что мазер на основе пучка моноскоростных атомов или молекул демонстрирует богатую динамику мультистабильных режимов. К сожалению, пока нет экспериментальных работ на эту тему, хотя оценки указывают на возможность постановки экспериментов [153].

Многие современные лазеры используют сверхзвуковые потоки активного вещества. Движение активной среды может обусловить взаимодействие мод в таких системах [154], что делает изучение динамики быстропроточных лазеров интересной проблемой.

Проблема динамической стохастичности в лазерах и других нелинейных оптических системах остается предметом пристального внимания исследователей вплоть до сегодняшних дней. Она стала темой специальных выпусков ряда известных журналов (см., например, [155] и серии специализированных конференций IDLNOS'85 [156], NDOS'90 [157], NDOS'92 [158], NDLOS'93 [159], NDOS'95 [160]).

Приведенный список литературы, несмотря на его внушительный объем, не претендует на полноту. Составление исчерпывающего списка - за пределами моих возможностей. Ряд авторов фигурируют в списке неявно: их работы можно найти в литературном перечне монографий, обзоров и в трудах конференций. Я приношу извинения тем авторам, публикации которых остались вне моего поля зрения.

Библиографический список

1. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. М.: Физматгиз, 1959.
2. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. М.: Наука, 1984.
3. Рюэль Д., Такенс Ф. О природе турбулентности // Странные аттракторы/ Пер. с англ. под ред. Я.Г.Синая, Л.П.Шильникова. М.: Мир, 1981. 117 с.

² Исключением являются инжекционный лазер и мазер на пучке атомов (молекул). В этих системах используется пространственное движение излучателей.

4. Лоренц Э. Детерминированное непериодическое течение // Странные аттракторы. М.: Мир, 1981. 88 с.
5. Грасюк А.З., Ораевский А.Н. Переходные процессы в молекулярном генераторе // РЭ. 1964. Т. 9, № 3. С.524.
6. Grasiuk A.Z., Oraevsky A.N. Transient processes in a beam maser // Proc. of the 4-th International Congress on Microwave Tubes. September, 1962. Sheveningen, Holland. P. 446.
- Grasiuk A.Z., Oraevsky A.N. The Dynamics of quantum oscillator. Estratto da Rendiconti della Scuola Internazionale di Fisica «E.Fermi», XXXI Corso. P.192 (August 1963, Varenna, Italy); in Quantum Electronics and Coherent Light / Ed. P.A. Miles. N.-Y.: Academic press, 1964.
7. Ораевский А.Н. Молекулярные генераторы. М.: Наука, 1984.
8. Haken H. Analogy between higher instabilities in fluids and lasers // Phys. Lett. A. 1975. Vol. 53, № 1. P. 77.
9. Файн В.М. Об уравнениях колебаний молекулярного генератора // ЖЭТФ. 1957. Т. 3. С. 945.
10. Ораевский А.Н. К теории молекулярного генератора // РЭ. 1959. Т. 4, № 4. С. 718.
11. Ораевский А.Н., Торонов В.Ю. Влияние флуктуаций на аттрактор в модели одномодового лазера // Квантовая электроника. 1989. Т. 16, № 10. С. 2063.
12. Ленфорд О. Изображение аттрактора Лоренца, полученное с помощью компьютера // Странные аттракторы. М.: Мир, 1981. 73 с.
13. Монин А.С. О природе турбулентности // УФН. 1978. Т. 125, № 1. С.97.
14. Рабинович М.И. Стохастические автоколебания и турбулентность // УФН. 1978. Т. 125, № 1. С. 123
15. Гапонов-Грехов А.В., Рабинович М.И. Л.И.Мандельштам и современная теория нелинейных колебаний и волн // УФН. 1979. Т. 128, № 4. С. 579.
16. Гапонов-Грехов А.В., Рабинович М.И. Нелинейная физика. Стохастичность и структуры. Препр. № 187. Горький: Ин-т прикл.физики АН СССР, 1983.
17. Ott E. Strange attractors and chaotic motions of dynamical systems // Rev.Mod.Phys. 1981.Vol.53. № 4, Pt. 1. P. 655.
18. Hofstadter D.R. Strange attractors: mathematical patterns delicately poised between order and chaos // Sci. Amer. 1980. P.16.
19. Ораевский А.Н. Мазеры, лазеры и странные аттракторы // Квантовая электроника. 1981. Т.8, № 1. С. 130.
20. Вильямс Р.Ф. Структура аттракторов Лоренца // Странные аттракторы. М.: Мир, 1981. 58 с.
21. Каплан Д., Иорке Дж. Предтурбулентность: режим, наблюдаемый в течении жидкости, описываемый моделью Лоренца // Странные аттракторы. М.: Мир, 1981. 213 с.
22. Афраймович В.С., Быков В.В., Шильников Л.П. О возникновении и структуре аттрактора Лоренца // ДАН СССР. 1977. Т. 234. 336 с.
23. Торонов В.Ю. Исследование динамических моделей одномодового лазера: Дисс.канд. физ.-мат. наук. Саратов: СГУ, 1992.
24. Ledrappier F. Some relations between dimension and Lyapunov exponents // Comm. Math. Phys. 1981. Vol.81, № 2. P. 229.
25. Беленов Э.М., Морозов В.Н., Ораевский А.Н. Вопросы динамики квантовых генераторов // Тр. ФИАН. 1970. Т. 52. С. 237.
26. Малкин И.Г. Некоторые задачи теории нелинейных колебаний М.: ГИТТЛ, 1956.
27. Arecchi F.T., Meucci R., Puccioni G.P., Tredicce J.R. Experimental Evidence of Subharmonic Bifurcations, Multistability, and Turbulence in a Q-Switched Gas Laser // Phys. Rev. Lett. 1982. Vol. 49, № 17. P. 1217.
28. Идиатулин В.С., Успенский А.В. Режимы в генераторе с неоднородно уширенной линией // Матер. II Всесоюз. семинара-совещания «Метрология в радиоэлектронике». М., 1971. С. 68.

29. Владимирский К.В. Об устойчивости генерации на неоднородно уширенной линии // Крат. сообщ. по физике. М.: ФИАН, 1971. № 10. С. 41.
30. Lugiato L.A., Narducci L.M., Bandy D.K., Abraham N.B. Instabilities in inhomogeneously broadened single-mode lasers // Opt. Comm. 1983. Vol. 46. P. 115.
31. Mandel P. Influence of Lorentz broadening on the stability of monomode ring lasers // Opt. Comm. 1983. Vol. 45. P. 269.
32. Mandel P. Properties of Lorentz-broadened single-mode unidirectional ring laser // JOSA-B. 1985. Vol. 2. P. 112.
33. Abraham N.B., Lugiato L.A., Mandel P., Narducci L.M., Bandy D.K. Steady-state and unstable behavior of a single-mode inhomogeneously broadened laser // JOSA-B. 1985. Vol. 2. P. 35.
34. Bandy D.K., Narducci L.M., Lugiato L.A., Abraham N.B. Time-dependent behavior of a unidirectional ring laser with inhomogeneous broadening // JOSA-B, 1985. Vol. 2. P. 56.
35. Casperson L.M. Spontaneous coherent pulsation in ring-laser oscillators: stability criteria // JOSA-B. 1985. Vol. 5. P. 933.
36. Tarroja M.F.H., Abraham N.B., Bandy D.K., Narducci L.M. Periodic and chaotic output pulsations in a single-mode inhomogeneously broadened laser // Phys. Rev. A. 1986. Vol. 34. P. 3148.
37. Casperson L.M. Stability criteria for lasers with mixed line broadening // Opt. & Quant. Electron. 1987. Vol. 17. P. 29.
38. Casperson L.M. Spontaneous coherent pulsation in standing-wave laser oscillator // JOSA-B. 1988. Vol. 5. P. 107.
39. Casperson L.M. Gas laser instabilities and their interpretation // Optical Instabilities-II / Eds. N.B. Abraham, F.T. Arecchi, L.A. Lugiato. N.- Y.: Plenum Press, 1988. P. 83.
40. Ораевский Ф.Н., Проценко И.Е., Сафонова М.А., Торонов В.Ю. Динамические режимы в лазере с двумя резонансными линиями активной среды // Изв. вузов. Радиофизика. 1988. Т. 31. С. 300.
41. Мельников А.Л. Пространственно-временная динамика световых полей в лазерах, резонансных средах и оптических волноводах: Дисс. док. физ.-мат. наук. Саратов: СГУ, 1992.
42. Глова А.Ф., Козлов С.Н., Луханский В.В., Ярцев В.П. Бифуркации и хаос в CO₂-лазере с периодической накачкой // Квантовая электроника. 1990. Т. 17, № 17. С. 894.
43. Хандохин П.А., Ханин Я.И. Автостохастический режим генерации твердотельного кольцевого лазера с низкочастотной периодической модуляцией потерь // Квантовая электроника. 1984. Т. 11, № 1. С. 1483.
44. Переведенцева Г.В., Хандохин П.А., Ханин Я.И. К теории одночастотного кольцевого твердотельного лазера // Квантовая электроника. 1980. Т. 7, № 1. С. 128.
45. Ivanov D.V., Khanin Ya.I., Matorin I.I., Pikovsky A.S. Chaos in a solid-state laser with periodically modulated losses // Phys. Lett. A. 1982. № 2. P. 229.
46. Gioggia R.S., Abraham N.B. Routs to chaotic output from a single-mode dc-excited laser // Phys. Rev. Lett. 1983. Vol. 51, № 8. P. 650.
47. Литвинов В.Ф., Молочев В.И., Морозов В.Н., Никитин В.В., Семенов А.С. Динамическая неустойчивость полупроводникового лазера при низких температурах // Письма в ЖЭТФ. 1974. Т. 19, № 12. С. 747.
48. Minden M.L., Casperson L.W. Dispersion-induced instability in CW laser oscillators // IEEE J. Quant. Electron. 1978. Vol. 18. P. 1952.
49. Bentley J., Abraham N.B. Mode-pulling, mode-splitting and pulsing in a high gain He-Xe-laser // Opt. Comm. 1982. Vol. 41, № 1. P. 52.
50. Biswas D.J., Harrison R.G. Observation of optical turbulence in a single mode homogeneously broadened optically pumped molecular laser // Opt. Comm. 1985. Vol. 54, № 2. P. 112.
51. Weiss C.O., Brock J. Evidence of Lorenz-type chaos in a laser // Phys. Rev. 1986. Vol. 57, № 22. P. 2804.

52. Weiss C.O., Abraham N.B., Hubner U. Homoclinic and heteroclinic chaos in single-mode laser // Phys. Rev. Lett. 1988. Vol. 61, № 14. P. 1587.
53. Abraham N.B., Dangoisse D., Glorieux P., Mandel P. Observation of undamped pulsation in a low-pressure far-infrared laser and comparison with a simple theoretical model // JOSA-B. 1985. Vol. 2. P. 23.
54. Ханин Я.И. Динамика квантовых генераторов. М.: Сов. радио, 1975.
55. Дементьев В.А., Зубарев Т.Н., Ораевский А.Н. Режимы пульсаций интенсивности излучения в квантовых генераторах // Тр. ФИАН. 1977. Т.91. С. 3.
56. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М.: Наука, 1981.
57. Ривлин Л.А., Семенов А.Т., Якубович С.Д. Динамика и спектры излучения полупроводниковых лазеров М.: Радио и связь, 1983.
58. Фейгенбаум М. Универсальность в поведении нелинейных систем // УФН. 1983. Т. 141, № 2. С. 343.
59. Войтович А.П. Магнитооптика газовых лазеров. Минск: Наука и техника, 1984.
60. Agrawal G.P., Dutta N.K. Long-wavelength semiconductor lasers. Vsn Nostrand Reinhold. N.-Y. 1986.
61. Неймарк Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания. М.: Наука, 1987.
62. Narducci L.M., Abraham N.B. Laser physics and laser instabilities. New Jersey: World Scientific, 1988.
63. Хакен Г. Лазерная светодинамика. М.: Мир, 1988.
64. Самсон А.М., Котомцева Л.А., Лойко Н.А. Автоколебания в лазерах. Минск: Наука і Тэхніка, 1990.
65. Анищенко В.С. Сложные колебания в простых системах. М.: Наука, 1990.
66. Gordon J.P. // Proc. IRE. 1962. Vol.50. P.1898.
67. Агабекян А.С., Грасюк А.З., Зубарев И.Г., Ораевский А.Н., Свергун В.И. // РЭ. 1964. Т. 9. С. 2156.
68. Lugiato L.A. // Lett. Nuovo Cimento. 1978. Vol. 23. P. 609.
69. Yamada T., Graham R. Chaos in a laser system under modulated external field // Phys. Rev. Lett.A. 1980. Vol. 45, № 16. P. 1322.
70. Scholz M.J., Yamada T., Brand H., Graham R. // Phys. Lett.A. 1981. Vol. 82. P. 321.
71. Lugiato L.A., Narducci L.M., Bandy D.K., Pennise C.A. // Opt. Comm. 1983. Vol. 46. P. 64.
72. Bandy D.K., Narducci L.M., Pennise C.A., Lugiato L.A. // Coherence and Quantum Optics / Eds. L.Mandel and E.Wolf. N.-Y.: Plenum Press, 1984. Vol.5. P. 585.
73. Arecchi F.T., Lippi G., Puccioni G., Tredicce J. // Coherence and Quantum Optics / Eds. L.Mandel and E.Wolf. N.-Y.: Plenum Press, 1984. Vol. 5. P.1227.
74. Otsuka K., Ivamura H. // Phys. Rev.A. 1983. Vol. 28. P. 3153.
75. Bandy D.K., Narducci L.M., Lugiato L.A. Coexisting attractors in a laser with injected signal // JOSA-B. 1985. Vol. 2. P. 148.
76. G.H.M. van Tartwijk, Lenstra D. Nonlocking behavior of an optically injected diode laser // Proc. of SPIE on Nonlinear dynamics in Lasers and Optical Systems. 1993. Vol. 2099. P. 89.
77. Ikeda K. // Opt. Comm. 1979. Vol.30. P. 257.
78. Lugiato L.A. Optical bistability // Progress in Optics / Ed. E.Wolf. North Holland, Amsterdam, 1984. Vol. XXI. P. 69.
79. Optical bistability / Eds. C.M. Bowden, U.Cifton and R.R. Robl. N.-Y.: Plenum Press, 1981.
80. Optical Bistability II / Eds. C.M. Bowden, H.M. Gibbs and S.L. McCall. N.-Y.: Plenum Press, 1984.
81. Gibbs H.M. Optical bistability: controlling light with light. N.-Y.: Academic Press, 1985.
82. Optical bistability / Eds. H.M Gibbs., P. Mandel, N. Peyghambarian and S.D. Smith. Springer, Berlin, 1986.

83. *Harrison R.J., Firth W.J., Emshary C.A., Al-Saidi I.A.* Observation of period doubling in all-optical resonator containing NH_3 gas // *Phys. Rev. Lett.* 1983. Vol. 51, № 7. P. 562.
84. *Ривлин Л.А.* Отрицательное резонансное поглощение света в устойчивой среде // *ЖЭТФ.* 1965. Т. 47, № 8. С. 624.
85. *Воропаев Н.Д., Ораевский А.Н.* Режимы в квантовом генераторе при наличии поглощающей примеси // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1965. Т. 8. С. 409.
86. *Lasher G., Stern F.* // *Phys. Rev.* 1964. Vol. 133, A533.
87. *Басов Н.Г., Никитин В.В., Семенов А.С.* // *УФН.* 1969. Т. 97, № 4. С. 561.
88. *Arimondo E., Glorieux P.* // *Appl. Phys. Lett.* 1978. Vol. 33, № 1. P. 49.
89. *Arimondo E., Casagrande F., Lugiato L.A., Glorieux P.* // *Appl. Phys. B.* 1983. Vol. 30, № 2. P. 57.
90. *Самсон А.М.* Равновесные состояния, автоколебания, полистабильность и гистерезисные явления в лазерах с просветляющимся фильтром: Препр. № 321. Минск: Ин-т. физики АН БССР, 1984.
91. *Arimondo E., Dagoisse D., Gabbanini C., Menchi E., Papoff F.* // *JOSA-B.* 1987. Vol. 4. P. 892.
92. *Самсон А.М., Котомцева Л.А., Лойко Н.А.* // *Изв. АН СССР. Сер. физическая.* 1989. Т. 53, № 6. С. 1076.
93. *Hennequin D., Dangoisse D., Glorieux P.* Farey hierarchy in a bimode CO_2 - laser with saturable absorber // *Phys. Rev. A.* 1990. Vol. 42, № 11. P. 6966.
94. *Анищенко В.С., Сафонова М.А., Татаркова С.А., Тучин В.В.* Модуляция параметров в лазере с насыщающимся поглотителем // *Квантовая электроника.* 1991. Т. 18, № 9. С. 1066.
95. *Lefranc M., Hennequin D., Dangoisse D.* Homoclinic chaos in a laser containing a saturable absorber // *JOSA-B.* 1991. Vol. 8, № 2. P. 239.
96. *Tatarkova S.A., Tuchin V.V.* Multistability and chaos in laser with saturable absorber // *Laser Physics.* 1992. Vol. 2, № 4. P. 482.
97. *Окулов А.Ю., Ораевский А.Н.* Регулярная и стохастическая автомодуляция излучения в кольцевом лазере с нелинейным элементом // *Квантовая электроника.* 1984. Т. 11, № 9. С. 1844.
98. *Ковалев В.И., Суворов М.Б., Тасмуратов О.С.* Временная динамика и пространственные характеристики генерации CO_2 -лазера с нелинейной средой в резонаторе // *Изв. АН СССР. Сер. физическая.* 1990. Т. 54, № 10. С. 2062.
99. *Гордиенко В.М., Ковалев В.И., Путивский Ю.Я.* Динамика ТЕА CO_2 -лазера с кубической нелинейной средой в резонаторе: от стабилизации частоты до хаоса // *Квантовая электроника.* 1994. Т. 21, № 12. С. 1160.
100. *Ораевский А.Н.* Многотемпературная модель и динамика лазера // *Квантовая электроника.* 1990. Т. 17, № 11. С. 1463.
101. *Oraevsky A.N., Clark M.M., Bandy D.K.* Many Temperature Model of a Laser with Dynamics // *Opt. Comm.* 1991. Vol. 85, № 4. P. 360.
102. *Willatzen M., Uskov A., Mork J., Olesen H., Tromborg B., Jauho A.-P.* Non-linear gain suppression in semiconductor lasers due to carrier heating // *IEEE Photon. Technol. Lett.* 1991. Vol. P. 606.
103. *Лойко Н.А.* Нелинейная динамика лазерных систем с запаздыванием: Дисс. док. физ.-мат. наук. Минск: Ин-т физики Белорусской АН, 1993.
104. *Mork J., Tromborg B., Mark J., and Velichansky V.* Instabilities in a laser diode with a strong optical feedback // *Proc. of SPIE.* 1992. Vol. 1837. P. 775.
105. *Mork J., Tromborg B., Christiansen P.L.* Bistability and low-frequency fluctuations in semiconductor lasers with optical feedback // *IEEE J. of Quantum Electronics.* 1988. Vol. 24, № 2. P. 124.
106. *Mork J.* Nonlinear dynamics and stochastic behaviour of semiconductor lasers with optical feedback // *The Technical University of Denmark, Report № S48, March, 1989.*
107. *Anishchenko V.S., Bogoroditsky A.G., Rabinovich E.M.* Bifurcation of the period adding and transition to chaos in a laser generator with delayed feedback // *OSA*

Proc. on Nonlinear Dynamics in Optical System / Eds. N.B. Abraham, Elsa Garmire, Paul Mandel. 1990. P. 415.

108. *Oraevsky A.N.* On the Theory of Thin-Layer Lasers // Sov. J. Quant. Electr. 1992. Vol. 19, № 10. P. 979.

109. *Oraevsky A.N., Denisov P.E., Jones D.J., Bandy D.K.* Nonlinear Dynamics of a Thin-Layer Laser // Proc. of SPIE on Nonlinear Dynamics in Lasers and Optical System. 1993. Vol. 2099. P. 183.

110. *Cerboneschi E., F. de Tomai, Arimondo E.* Low frequency fluctuation instabilities in diode lasers with optical feedback // Proc. of SPIE on Nonlinear Dynamics in Lasers and Optical System. 1993. Vol. 2099. P. 193.

111. *Басов Н.Г., Морозов В.Н., Ораевский А.Н.* Динамика оптического квантового генератора с двумя типами колебаний // ДАН СССР. 1965. Т. 162. С. 781.

112. *Басов Н.Г., Морозов В.Н., Ораевский А.Н.* Нелинейное взаимодействие типов колебаний в оптическом квантовом генераторе // ЖЭТФ. 1965. Т. 49. С. 895.

113. *Островский Л.А.* Автомодуляция излучения оптического квантового генератора с двухмодовым резонатором // ЖЭТФ. 1965. Т. 49. С. 1535.

114. *Fleck J. A., Kidder R.E.* Stability of coupled-mode laser equations // J. Appl. Phys. 1965. Vol. 36. P. 2327.

115. *Erich C., Mandel P., Abraham N.B., Zeglache H.* Dynamics of two mode semiconductor laser // IEEE J. of QE. 1992. Vol.18. P. 259.

116. *Mandel P.* Laser rate equations with phase sensitive interaction // IEEE J. of QE. 1993. Vol. 29, № 3. P. 836.

117. *Bielawsky S., Derozier D., Glorieux P.* Antiphase dynamics and polarization effects in the Nd-doped fiber laser // Phys. Rev. A. 1992. Vol. 46, № 5. P. 2811.

118. *Lamb Jr.W.E.* Theory of an Optical Maser // Phys. Rev.A. 1964. Vol. 134, № 6. P. 1429.

119. *Сучков А.Ф.* Влияние неоднородностей на режим работы квантовых генераторов на твердом теле // ЖЭТФ. 1965. Т. 49. С. 1495.

120. *Аллахвердян Р.Г., Ораевский А.Н., Сучков А.Ф.* Влияние волноводных свойств на генерацию GaAs-диодного лазера // ЖТФ. 1970. Т. 42, № 2. С. 341.

121. *Аллахвердян Р.Г., Ораевский А.Н., Сучков А.Ф.* Динамика полупроводникового лазера с показателем преломления, зависящего от интенсивности излучения // ЖТФ. 1970. Т. 42, № 2. С. 341.

122. *Bracikowski C., Rajarshi Roy.* Chaos in a multimode solid-state laser system // Chaos. 1991. Vol. 1, № 1. P. 49.

123. *Brunner W., Fischer R., Paul H.* Regular and chaotic behavior of multimode laser // JOSA-B. 1985. Vol. 2, № 1. P. 202.

124. *Melnikov L.A., Rabinovich E.M., Tuchin V.V.* Quasi-periodic oscillations and chaos in a gas discharge active mode-locked laser // JOSA-B. 1988. Vol. 5, № 5. P. 1134.

125. *Victorov E.A., Vitrishchak I.B., Novikov G.E., Orlov O.A., Mak A.A., Sokolov V.A., Ustyugov V.I., Khaleev M.M.* Instabilities and chaos in solid-state lasers as a result of mode coupling // OSA Proc. on Nonlinear Dynamics in Optical System / Eds. N.B.Abraham, Elsa Garmire, Paul Mandel. 1990. P. 410.

126. *Коваленко С.А.* Динамика генерации многомодовых широкополосных лазеров и чувствительность внутрирезонаторной спектроскопии: Дисс. канд. физ.-мат. наук. М.: ФИАН, 1991.

127. *Okulov A.Yu., Oraevsky A.N.* Space-Temporal Behavior of a Light Pulse in nonlinear nondispersive media // JOSA-B. 1986. Vol. 3(5). P. 741.

128. *Lugiato L.A.* Spatio-temporal structures. Prt I // Physics Reports. 1992. Vol. 219, № 3-6. P. 293.

129. *Weiss C.J.* Spatio-temporal structures. Prt II. Vortices and defects in lasers // Physics Reports. 1992. Vol. 219, № 3-6. P. 311.

130. *Arecchi F.T.* Optical Morphogenesis: pattern formation and competition in nonlinear optics // Nuovo Chimento. 1994. Vol. 107-A, № 7. P. 1111.

131. *Butler J.K., Ackley D.E., Botez D.* Coupled-mode analysis of phase-locked injection laser arrays // Appl. Phys. Lett. 1983. Vol. 44, № 3. P. 293.

132. *Kapon E., Katz J., Yariv A.* Supermode analysis of phase-locked arrays of semiconductor // *Opt. Lett.* 1984. Vol. 10. P. 125.
133. *Agraval G.P.* Lateral-mode analysis of gain-guided and index-guided semiconductor-laser arrays // *J. Appl. Phys.* 1985. Vol. 58, № 8. P. 2922.
134. *Wang S.S., Winful H.G.* Dynamics of phase-locked semiconductor laser arrays // *Appl. Phys. Lett.* 1988. Vol. 52, № 22. P. 1774.
135. *McNeil K.J., Drummond P.D., Walls D.F.* Self pulsing in second harmonic generation // *Opt. Comm.* 1978. Vol. 27, № 2. P. 292.
136. *Mandel P., Xiao-Guang Wu.* Second-harmonic generation in a laser cavity // *JOSA -B.* 1986. № 7. P. 940.
137. *Baer T.* Large-amplitude fluctuation due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd: YAG lasers // *JOSA-B.* 1986. № 9. P. 1175.
138. *Агабекян А.С., Грасюк А.З., Зубарев И.Г.* Стабилизация неустойчивого режима в двухуровневом квантовом генераторе // *РЭ.1964.* Т. 9, № 12. С. 2156.
139. *Auerbach D., Cvitanovic P., Eckmann J.-P., Gunaratne G., Procaccia I.* Exploring chaotic motion through periodic orbits // *Phys. Rev. Lett.* 1987. Vol. 58. P. 2387.
140. *Grebogi C., Ott E., Yorke J.A.* Unstable periodic orbits and the dimensions of multifractal chaotic attractors // *Phys. Rev. A.* 1988. Vol. 37. P. 1711.
141. *Lima R., Pettini M.* Suppression of Chaos by Resonant Parametric Perturbations // *Phys. Rev. A.* 1990. Vol. 41, № 2. P. 726.
142. *Arimondo E., Casagrande F., Lugiato L.A., Glorieux P.* Repetitive passive Q-switching and bistability in lasers with saturable absorbers // *Appl. Phys.B.* 1983. Vol. 30. P. 57.
143. *Meucci R., Gadomski W., Ciofini M., Arecchi F.T.* Experimental control of chaos by means of weak parametric perturbations // *Phys. Rev. E.* 1994. Vol. 49, № 4. P. 2528.
144. *Rajashi Roy.* Controlling Chaotic Lasers // *Nonlinear Dynamics in Optical Systems: Conference Digest, Rochester, June 5-7, 1995.* P. WA2.
145. *Dupertuis M.A., Salomaa R.R.E., Siegrist M.R.* The Conditions for Lorentz Chaos in the optically-pumped far-infrared laser // *Opt. Comm.* 1986. Vol. 57, № 6. P. 410.
146. *Lawandy N.M., Plant D.V.* On the experimental accessibility of the self-pulsing regime of the Lorentz model for single mode homogeneously broadened lasers // *Opt. Comm.* 1986. Vol. 59, № 1. P. 55.
147. *Moloney J.V., Uppal J.S. and Harrison R.G.* Origin of Chaotic Relaxation Oscillations in an Optically Pumped Molecular Laser // *Phys. Rev. Lett.* 1986. Vol. 59, № 25. P. 2868.
148. *Pujol J., Laguara F., Vilaseca R. and Corbalan R.* Influence of Pump Coherence on the Dynamic Behavior of a Laser // *J. Opt. Soc. Am. B.* 1988. Vol. 5, № 5. P. 1004.
149. *Khandokhin P.A., Khanin Ya.I. and Koryukin I.V.* Bifurcations and Chaos in the Three Level Model of Laser with Coherent Optical Pumping // *Opt. Comm.* 1988. Vol. 65, № 5. P. 367.
150. *Forysiak W., Moloney J.V. and Harrison R.G.* Bifurcations of an optically Pumped Three-level Laser Model // *Physica D.* 1991. Vol. 53. P. 162.
151. *Ораевский А.Н., Саркисян Т.В., Джонс Д.Дж., Бенди Д.К.* Динамика моноскоростного пучкового лазера // *Квантовая электроника.* 1992. Т. 19, № 3. С. 234.
152. *Casagrande F., Lugiato L.A., Lange W., Walther H.* Multistability in mesoscopic Rydberg-atom systems // *Phys. Rev.A.* 1993. Vol. 48, № 1. P. 790.
153. *Bandy D.K., Jons D.J., Grahem J., Oraevsky A.N., Sarkisian T.V.* Dynamics of a monovelosity-atomic-beam maser in a semiclassical model // *Phys. Rev.A.* 1994. Vol. 50, № 1. P. 685.
154. *Oraevsky A.N.* Nonlinear Dynamics of Gas-Flow Lasers // *9-th International Symposium on Gas-Flow and Chemical Lasers, 21-25 September 1992, Heraklion (Crete, Greece).*
155. *Nonlinear Dynamics of Lasers / Eds. D.K.Bandy, A.N.Oraevsky, J.Tradicce // JOSA-B.* 1988. Vol.5, № 5.

156. Instabilities and dynamics of lasers and nonlinear optical systems // Technical Digest of International meeting, Rochester, N.-Y., 1985.

157. Nonlinear Dynamics in Optical Systems-1992 // Technical Digest, June 22-26, 1992, Alpbach, Austria.

158. Nonlinear Dynamics in Optical Systems / Eds. N.B.Abraham, Elsa Garmire, Paul Mandel // OSA Proc. Oklahoma, June 4-8, 1990, Afton.

159. Nonlinear Dynamics in Lasers and Optical Systems // Proc. of SPIE. 1993. Vol. 2099. P. 162.

160. Nonlinear Dynamics in Optical Systems // Conference Digest. Rochester, 1995, June 5-7.

Физический институт РАН

*Поступила в редакцию 21.03.95
после переработки 30.08.95*

DYNAMICS OF SINGLE-MODE LASERS AND DYNAMICAL CHAOS

A.N. Oraevsky

A review on nonlinear of single-mode lasers are presented. A special attention is paid to properties of a strange attractor corresponding to a chaotic regime of a single mode laser. The main topics of laser nonlinear dynamics are listed and discussed. List of references: 160 positions.



Ораевский Анатолий Николаевич, родился 26 января 1934 года в г. Тейково Ивановской области. Окончил радиофизический факультет Московского физико-технического института в 1957 году. Работает в Физическом институте им. П.Н. Лебедева (ФИАН) с 1956 года. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в 1960 году и доктора физико-математических наук в 1965 году. Главный научный сотрудник и зав. сектором Теоретической радиофизики ФИАН, профессор Московского инженерно-физического института. Действительный член Академии Естественных Наук Российской Федерации, Лауреат Ленинской премии. Основные работы относятся к квантовым стандартам частоты, нелинейной динамике оптических систем, квантовой оптике, газодинамическим и химическим лазерам, лазерам на свободных электронах, лазерной химии и биологии, сверхпроводимости.

Среди результатов, полученных А.Н. Ораевским лично или в соавторстве: пионерские работы по динамике мазеров и лазеров; обнаружение неперидических (стохастических) режимов в одномодовом мазере (лазере) (1962), предложение (1963) и реализация (1969) химических лазеров на цепных реакциях (независимо от В.Л. Тальрозе); экспериментальное обнаружение фотохимического действия инфракрасного лазерного излучения; вывод нестационарной системы уравнений для сверхпроводника, объединяющей параметр порядка, фотоны и фононы в единую динамическую систему и др. Автор (соавтор) более 400 публикаций в рецензируемых научных журналах, четырех монографиях, 20 изобретений.



ПРОСТАЯ МОДЕЛЬ НЕЙРОНА, ОБЛАДАЮЩЕГО СЛОЖНОЙ ОСЦИЛЛЯТОРНОЙ АКТИВНОСТЬЮ

М.В. Баженов, М.И. Рабинович, Л.Л. Рубчинский

Предлагается и исследуется простая модель нейрона, демонстрирующего колебательную активность. Эта модель в виде трех обыкновенных дифференциальных уравнений описывает регулярное поведение и хаотическую динамику различных паттернов во временной реализации электрического потенциала клеточной мембраны. Обсуждаются свойства нейронных сетей, составленных из таких элементов.

Введение

Модели нейронов, используемые в настоящее время в исследованиях нейронных сетей, могут быть разделены на три группы. Первая группа состоит из моделей, использующих детальную информацию о токах, текущих через клеточную мембрану. Эта группа, в частности, включает в себя ставшую классической модель Ходжкина - Хаксли [1,2] и ее многочисленные обобщения, учитывающие большое число различных ионных каналов, воздействие нейромедиаторов и так далее (см., например, [3]). Ко второй группе относятся очень простые модели, основанные на уравнениях типа Ван-дер-Поля или Фитц Хью - Нагумо [4,5]. Простейший вариант таких моделей - модель Хопфилда [6]. В этой модели нейрон может находиться только в двух различных состояниях. Такие модели естественно использовать для исследования явлений в нейронных сетях, состоящих из очень большого числа нейронов, при этом большое значение имеет топология и тип связей между нейронами, а индивидуальная динамика нейрона отступает на второй план. Третья группа (занимающая промежуточное положение между двумя предыдущими) включает в себя феноменологические модели, основанные на относительно простых уравнениях, но в то же время, дающие качественно правильную картину поведения нейронов и некоторых его бифуркаций. К этой группе можно отнести модели типа Розе - Хиндмарша [7] и Чэя [8]. Они получены из уравнений Ходжкина - Хаксли путем большого числа упрощений и замечательны тем, что описывают генерацию релаксационных колебаний, медленные колебания и хаотическую активность нейрона.

Модель, предлагаемая в этой работе, относится к третьей группе. Она дает качественно правильное описание двух различных типов колебаний электрического мембранного потенциала нейрона, наблюдаемых в ряде экспериментов с определенными типами нервных клеток. Мы полагаем, что подобного рода модели выглядят весьма обещающими для моделирования

принципов работы небольших нейронных сетей, например, ответственных за моторную активность живых организмов. Может быть, использование таких моделей поможет найти ответы на очень важные и тяжелые вопросы: почему коллективная динамика небольших нейронных сетей зачастую проще индивидуальной динамики отдельного нейрона? Каким образом феномен мультистабильности появляется в небольших нейронных сетях, состоящих из хаотических элементов? И др.

1. Построение модели

Существует большое число экспериментальных данных, свидетельствующих о том, что колебательная активность нейронов (или же колебательное поведение пассивных нейронов) является их неотъемлемым свойством. Очень часто временная зависимость электрического потенциала клеточной мембраны представляет собой колебания (в том числе и хаотические), в которых легко выделить участки различные по форме, частоте и проч., - паттерны, как нередко говорят биологи (см., например, [9], где рассматриваются различные эксперименты). Экспериментальные данные убеждают, что эти два свойства - существование колебаний с различными временными масштабами и наличие области хаотического режима в пространстве параметров - характерны практически для всех нейронов и поэтому их естественно учитывать при построении моделей нейронов и нейронных сетей. При построении нейронных сетей, например, конкретные особенности нейрона не очень существенны, гораздо важнее тип связи между нейронами.

Из общих соображений следует, что простейшая модель нейрона из обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), удовлетворяющая указанным выше свойствам, должна быть трехмерной. Форма колебаний позволяет сделать некоторые утверждения о структуре фазового пространства системы, в частности, можно предположить, что разным паттернам могут соответствовать особые точки типа седлофокус.

Мы предлагаем следующую систему из трех ОДУ:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= z - 2y^2 + (\delta - \alpha z)y + \gamma x, \\ \dot{y} &= 2xy - (\delta - \alpha z)x, \\ \dot{z} &= -2z(x + 1). \end{aligned} \tag{1}$$

Эта система является модификацией системы уравнений, предложенной для описания возникновения стохастичности в распадных процессах [10]. Похожие системы известны в биологии. Это, например, математические модели мембранной регуляции клеточного цикла [11] и так далее. При построении этой модели мы ориентировались на эксперименты, проведенные с нейроном из центра нервной системы краба, управляющего пищеварением [12-14]. Но наша цель - не построение модели, точно описывающей динамику конкретного нейрона, а создание модельной системы, обладающей некоторыми характерными свойствами нервных клеток, для исследования процессов в нейронных сетях (см. Заключение). Решение $x(t)$ системы (1), при достаточно больших t соответствующее устойчивому предельному циклу (см. ниже), для значений параметров $\alpha = \alpha_0 = 2.5$, $\beta = \beta_0 = 2.5$ и $\gamma = \gamma_0 = 0.25$ (рис.1) качественно совпадает с экспериментальными данными [12-14].

2. Исследование модели

Численный эксперимент показал, что в фазовом пространстве системы (1) существует устойчивый предельный цикл сложной формы (рис. 2). Траектория,

соответствующая циклу, проходит относительно недалеко от особых точек (1) и, следовательно, ее форма существенно зависит от структуры векторного поля в их окрестности, которое может быть рассмотрено в линейном приближении.

Система (1) обладает тремя состояниями равновесия.

1. $S_1 (x=0, y=0, z=0)$ - раскручивающийся седлофокус с собственными значениями $\lambda_1=2$ и $\lambda_{2,3} = \gamma \pm (\gamma^2 - 4\delta^2)^{1/2}/2$;

2. $S_2 (x=0, y=\delta/2, z=0)$ - седло с собственными значениями $\lambda_1 = \gamma, \lambda_2 = 0$ и $\lambda_3 = -2$;

3. $S_3 (x=1, y=(\delta - \gamma\alpha)/2, z=\gamma)$ - закручивающийся седлофокус.

Два седлофокуса, обладающие различными мнимыми частями собственных значений (то есть различными частотами колебаний вблизи особых точек), соответствуют различным паттернам (типам колебаний) в зависимости x от t .

В фазовом пространстве системы (1) существует инвариантное множество - поверхность $z=0$. Это значит, что решение уравнений (1), принадлежащее этой поверхности при $t=0$ будет принадлежать ей и далее для любого $t > 0$. Более того, легко показать, что $z(t) > 0$ для любого $t \in (0, \infty)$, если $z(0) > 0$, и условие $z=0$ может быть выполнено только при $t \rightarrow \infty$. На многообразии $z=0$ система (1) сводится к системе двух ОДУ

$$\dot{x} = -2y^2 + \delta y + \gamma x, \tag{2}$$

$$\dot{y} = 2xy - \delta x.$$

Нетрудно заметить, что функция $V = x^2 + y^2$ также, как и производная в силу системы (1) $\dot{V} = \gamma x^2$ положительно определены, если $\gamma > 0$ (множество $x=0$ не является траекторией системы (2)) и, следовательно, любое решение (2) стремится к бесконечности при $t \rightarrow \infty$. Можно заметить, что прямая $y = \delta/2$ - инвариантное множество (2) и простой анализ фазовой плоскости (2) показывает, что $y \rightarrow \delta/2, x \rightarrow -\infty$ при $t \rightarrow \infty$.

Представленные выше соображения позволяют качественно описать поведение фазовых траекторий системы (1) следующим образом. Любая траектория, для которой выполняется условие $1+x > 0$ (мы рассматриваем

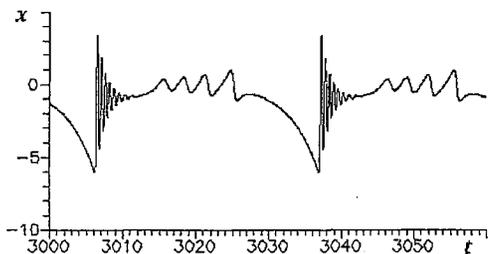


Рис. 1. Решение $x(t)$ системы (1) при $\alpha=2.5, \delta=2.5, \gamma=0.25$, соответствующее предельному циклу. Хорошо видны периодические колебания сложной формы с двумя типами временных паттернов

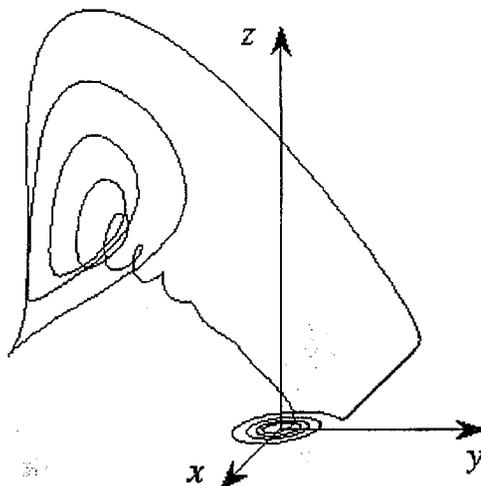


Рис. 2. Предельный цикл системы (1) при $\alpha=2.5, \delta=2.5$ и $\gamma=0.25$

инвариантное подпространство $z \geq 0$), асимптотически стремится к поверхности $z=0$. Это происходит достаточно быстро из-за сильного сжатия фазового потока вдоль направления Oz в окрестности точки S_1 (так как $\lambda_1 = -2$). Затем траектория медленно раскручивается на плоскости $z=0$ в ε -окрестности S_1 (значение ε тем меньше, чем траектория ближе к одномерному многообразию, соединяющему S_1 и S_3). Этот участок траектории может быть приближенно описан двумерной системой (2). Однако, как только условие $1+x > 0$ нарушается, траектория покидает окрестность многообразия $z=0$ и ее дальнейшее поведение описывается только системой (1). Численное моделирование показывает, что далее траектория попадает в окрестность S_3 и, следовательно, условие $1+x > 0$ выполняется опять. Так траектория остается ограниченной, хотя это утверждение трудно доказать аналитически. В частности, можно заметить, что для любого $R > 0$ существуют начальные условия внутри сферы радиуса R ($x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 < R^2$), для которых $x^2(t) + y^2(t) + z^2(t) > R^2$ при $t > t_1 > 0$, где t_1 зависит от R и начальных условий.

В системе (1) может существовать хаос. При возрастании γ до $\gamma=0.77$ происходит бифуркация удвоения периода и далее через каскад удвоений периода образуется странный аттрактор при $\gamma \approx 0.88$. Аксонометрическая проекция странного аттрактора при $\gamma = 1$ и соответствующая зависимость $x(t)$ представлены на рис. 3, 4.

Существование простого и сложного периодических и хаотического режимов в одной системе (а для этого ее фазовое пространство должно быть, как минимум, трехмерно) является естественным для многомерных динамических систем, но представляется весьма важным в свете биологических приложений.

Введением в систему (1) дополнительных параметров можно управлять положением особых точек, то есть средними значениями колебаний в соответствующих временных паттернах в $x(t)$. Запишем третье уравнение (1) в виде

$$\dot{z} = -2z(x + \beta). \quad (3)$$

Выбирая β меньшим единицы, например, $\beta = 0.6$, мы получим, что координата точки S_3 и, следовательно, среднее значение колебаний x около этой точки будет равно -0.6 . Однако, изменение β влечет за собой изменение и числа осцилляций около соответствующего среднего значения, и их формы; при большом уменьшении β структура фазового пространства существенно изменится. Так, у собственных значений особых точек S_1 и S_2 не будет отрицательных действительных частей при $\beta < 0$.

Следует отметить, что система (1) не является структурно устойчивой в классе систем общего положения. Это обстоятельство обусловлено наличием в

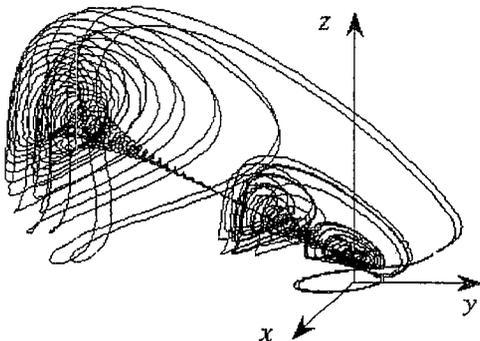


Рис. 3. Странный аттрактор системы (1) при $\alpha=2.5$, $\delta=2.5$ и $\gamma=1$

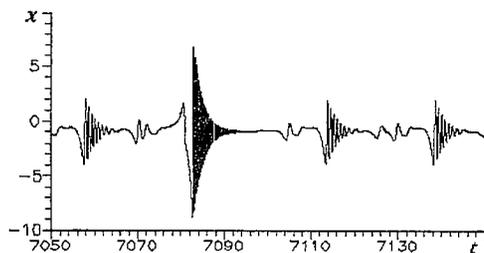


Рис. 4. $x(t)$ в хаотическом режиме при $\alpha=2.5$, $\delta=2.5$ и $\gamma=1$

системе (1) вырождения - плоскость $z=0$ является инвариантным множеством. Последнее приводит к тому, что в системе (1) не могут существовать грубые гетероклинические траектории, а единственной негрубой является траектория, идущая из S_3 и S_1 . Снять указанное вырождение можно, записав последнее уравнение системы (1) в виде

$$\dot{z} = -2(z - ax)(x + \beta), \quad (4)$$

где $0 < a \ll 1$. При малых a качественно поведение фазовых траекторий системы не изменяется, однако, вырождение исчезает. В модифицированной системе устойчивое и неустойчивое двумерные многообразия особых точек S_1 и S_3 будут пересекаться грубым образом. Если предположить, что при некоторых значениях параметров в системе с $a \neq 0$ существует негрубая гетероклиническая траектория, идущая из S_3 и S_1 , то возникает гетероклинический контур, при разрушении которого и происходит рождение устойчивого периодического решения, описанного выше.

Заклучение

Как уже упоминалось в первой части, эксперименты показали, что в одной клетке могут существовать и периодические колебания сложной формы с несколькими характерными временными масштабами, и хаос [9,12-15]. Может быть, в свете этого появление упорядоченных структур в нейронных сетях выглядит совсем нетривиальным. Представляется весьма перспективным использовать модели в виде элементов нейронных сетей, одна из которых описана выше. Существует большое число различной литературы, посвященной исследованию хаоса, синхронизации, формированию структур и проч. в цепочках, сетях и других системах связанных осцилляторов и их непрерывных аналогов. Но большинство работ, посвященных изучению осцилляторных нейронных сетей, рассматривают в виде структурного элемента нейронных сетей двумерные динамические системы (см., например, обзор [16]) или же, редко, сложные многомерные системы. Мы считаем, что исследования динамики осцилляторных сетей, состоящих из структурных элементов, обладающих аттракторами сложной формы (при некоторых значениях параметров - сложный предельный цикл, при других - странный аттрактор) и с разными типами связей между ними (электрическими и химическими - возбуждающими и тормозящими), позволят промоделировать новые феномены в нейронных сетях [17].

Наши численные эксперименты с цепочками диссипативно связанных систем (1) показали наличие таких явлений, как синхронизация и хаос при параметрах, когда несвязанные системы ведут себя нехаотически. Естественно предположить и наличие хаотической синхронизации в таких системах. Мы надеемся, что удастся выяснить, существенно ли использование в виде элементов нейронной сети простых, но не двумерных осцилляторных систем со сложным периодическим и хаотическим поведением для построения математических моделей явлений в ансамблях нервных клеток, в частности, центральной нервной системе и мозге.

Авторы хотят выразить свою признательность коллегам Peter Rowat и Alan Selverston из Калифорнийского университета в Сан-Диего за обсуждение экспериментов по осцилляторной электрической активности нейронов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 94-02-03263а) и Международного научного фонда (грант NOU 000).

Библиографический список

1. *Hodzhkin A.L. and 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.
2. *Ходоров Б.И.* Общая физиология возбудимых мембран. М.: Наука, 1975.
3. *Bochholtz P., Golowasch J., Epstein I.R., and Morder E.* Mathematical model of an identified stomatogastric ganglion neuron // *J.Neurophysiol.* 1992. Vol.67. P.332.
4. *Fitz Hugh R.* Impulses and physiological states in models of nerve membrane // *Biophys.J.* 1961. Vol.1. P.445.
5. *Nagumo J., Arimoto S., and Yoshizawa S.* An active pulse transmission line simulating nerve axon // *Proc.IRE.* 1962. Vol.50. P.2061.
6. *Hopfield J.J.* Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities//*Proc.Natl.Acad.Sci. USA.* 1982. Vol.79. P.2554.
7. *Hindmarsh J.L. and Rose R.M.* A model of neuronal bursting using three coupled first order differential equations // *Proc.R.Soc.London B.* 1984. Vol.221. P.87.
8. *Chay T.R.* Chaos in a three-variable model of excitable cell // *Phys.D.* 1985. Vol.16. P.233.
9. *Llinas R.R.* The intrinsic electrophysiological properties of mammalian neuron: insight into central nervous system function // *Science.* 1988. Vol.242. P.1654.
10. *Рабинович М.И.* Стохастические автоколебания и турбулентность // *УФН.* 1978. Т.125, № 1. С.123.
11. *Романовский Ю.М., Степанова Н.В., Чернавский Д.С.* Математическая биофизика. М.: Наука, 1984.
12. *Abarbanel H.D.I., Huerta R., Rabinovich M.I., Rulkov N.F., Rowat P.F., and Selverston A.I.* Synchronized action of synaptically coupled chaotic neurons//Preprint University of California, San-Diego, 1995, to appear in *Biol. Cybernetics*.
13. *Rowat P.F. and Selverston A.I.* Modelling the gastric mill central pattern generator of the lobster with a relaxation-oscillator network // *S.Neurophysiol.* 1993. Vol.70. P.1030.
14. *Rowat P.F. and Selverston A.I.* Experiments with neurons from lobsterstomatogastric ganglion. Unpublished data. 1994.
15. *Hayashi H. and Ishizuka S.* Chaotic nature of bursting discharges in *Onchidium* pacemaker neuron // *J.Theor.Biol.* 1992. Vol.156. P.269.
16. *Борисюк Г.Н., Борисюк Р.М., Казакович Я.Б., Лузянина Т.Б., Турова Т.С., Цымбалюк Г.С.* Осцилляторные нейронные сети. Математические результаты и приложения // *Математическое моделирование.* 1992. Т.4, № 1. С.3.
17. *Абарбанель Г.Д.И., Баженов М.В., Рабинович М.И., Рубчинский Л.Л., Суцук М.М., Хуэрта Р.* Синхронизация в нейронных ансамблях (готовится к печати в *УФН*).

Институт прикладной физики РАН

Поступила в редакцию 14.04.95
после переработки 27.07.95

A SIMPLE MODEL FOR A NEURON WITH COMPLEX OSCILLATORY ACTIVITY

M.V. Bazhenov, M.I. Rabinovich, L.L. Rubchinsky

A simple mathematical model of a neuron describing its oscillatory activity is constructed and investigated. This model in the form of a system of three ordinary differential equations describes both regular behaviour of different patterns in the time dependence of electric membrane potential and their chaotic dynamics. The features of the neural networks consisting of such elements are discussed.



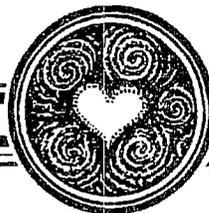
Баженов Максим Владимирович родился в 1967 году в Горьком, научный сотрудник отдела нелинейной динамики Института прикладной физики РАН. Окончил радиофизический факультет Нижегородского университета (1989). Кандидат физ.-мат. наук (1994). Область научных интересов: качественная теория дифференциальных уравнений, теория пространственно-временного хаоса и структурообразования в распределенных неравновесных системах. Автор ряда работ в отечественной и зарубежной печати.



Рабинович Михаил Израилевич родился в 1941 году, доктор физ.-мат. наук, член-корр. РАН, зав. отделом нелинейной динамики Института прикладной физики РАН. Область научных интересов: динамическая теория жидкости, проблемы хаоса и структурообразования, нелинейные волны в неравновесных средах. Общее число публикаций - более 200, из них 5 книг, около 10 обзоров, учебные пособия и курсы лекций, статьи в отечественных и зарубежных журналах.



Рубчинский Леонид Львович родился в 1974 году в Горьком. Окончил Высшую школу общей и прикладной физики Нижегородского университета (1995). С 1993 года работает в отделе нелинейной динамики Института прикладной физики РАН. Соросовский студент-стипендиат (1994), Стипендиат президента России (1995). В настоящее время - аспирант Калифорнийского университета, Сан-Диего. Область научных интересов: пространственно-временной хаос и образование структур, осцилляторные нейронные сети, приложения нелинейной динамики в биологии. Имеет публикации.



ОБ ОДНОЙ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭПИДЕМИИ

А.А. Короновский

В работе рассмотрена модель распространения заболевания, имеющего длительный инкубационный период, передающегося при контакте больного человека со здоровым, при условии, что люди иммунитетом к заболеванию не обладают. Получено уравнение, описывающее процесс распространения эпидемии во времени и пространстве, и показано, что, при определенных условиях, оно может быть сведено к дифференциальному уравнению Абеля второго рода. В работе приведены рисунки, иллюстрирующие расположение семейства изоклин для этого уравнения, а также рисунки, показывающие поведение интегральных кривых при различных значениях параметров. Установлена возможность распространения бегущих эпидемиологических волн, в том числе и ударных.

В настоящее время известны различные модели распространения эпидемий. В качестве примера можно привести классическую модель Кермака - Макендрика, предложенную в 1927 году, в которой процесс локального нарастания эпидемии во времени описывается системой трех нелинейных дифференциальных уравнений с отклоняющимся аргументом [1].

Наиболее широкую известность получила пространственная модель эпидемии вида

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + F(p), \quad (1)$$

где p - относительная численность больных особей, а функция $F(p)$ описывает локальное увеличение количества больных особей в зависимости от их плотности. Предполагается, что перемещение особей носит случайный характер, подвижность здоровых и больных особей одинакова, эпидемия безымунная, заражение происходит в результате контакта больных и здоровых особей [2]. Впервые подобная проблема (биологическая задача распространения гена) была рассмотрена в 1937 году А.Н. Колмогоровым, И.Г. Петровским и Н.С. Пискуновым [3]. Было доказано, что в уравнении (1) возможно существование решения типа бегущей волны $p = p(x + vt)$, распространяющейся влево со скоростью v , причем, при достаточно больших t , $v \rightarrow v_0 = 2(DF'(0))^{1/2}$, где $F'(0)$ - есть производная от функции $F(p)$, вычисленная в точке $p=0$; предельная форма кривой плотности дается решением уравнения

$$v_0 \frac{dp}{dx} = D \frac{d^2 p}{dx^2} + F(p),$$

обращающимся в ноль при $x = -\infty$ и в единицу при $x = +\infty$. Такое решение всегда

обращающимся в ноль при $x \rightarrow -\infty$ и в единицу при $x \rightarrow +\infty$. Такое решение всегда существует, и оно единственно.

Значительный интерес представляет собой задача о пространственно-временном распространении эпидемии в человеческом обществе. Понятно, что попытка простого грубого переноса биологических моделей на социальные процессы недопустима. В рамках настоящей работы сделана попытка построения подобной эпидемиологической модели для человеческого общества и ее исследования, правда, при очень существенных упрощающих предположениях. (Заметим также, что эта модель может быть практически без изменений применена к не менее интересным процессам распространения слухов).

Пусть место постоянного проживания индивидуумов характеризуется вектором x , а плотность расселения людей есть $n(x)$. Если $f(x, z, t)$ есть вероятность нахождения индивидуума, проживающего в точке с координатами x , в бесконечно малой окрестности точки с координатами z в момент времени t , то тогда общее число людей, «собравшихся» в точке z в момент времени t , определяется как

$$N(z, t) = \int_S n(x) f(x, z, t) dS_x, \quad (2)$$

где символ dS_x в формуле (2) означает, что при вычислении поверхностного интеграла интегрирование ведется по координатам постоянного места жительства x . Рассмотрим теперь, как будет изменяться число инфицированных людей, если предположить, что заболевание имеет длительный инкубационный период, (а, следовательно, «подвижность» здоровых и больных людей практически одинакова), инфекция передается при контакте больного человека со здоровым, иммунитетом к инфекции люди не обладают.

Если $u(x, t)$ есть доля инфицированных людей, проживающих в точке x , ($0 \leq u \leq 1$), то в момент времени t в точке z из $N(z, t)$ людей $A(z, t)$ будут инфицированными, а $(N(z, t) - A(z, t))$ - здоровыми, где $A(z, t)$ есть

$$A(z, t) = \int_S n(x) u(x, t) f(x, z, t) dS_x. \quad (3)$$

Так как инфицирование происходит при контакте больного человека со здоровым, то увеличение числа инфицированных людей в точке z за интервал времени Δt разумно определить как

$$\Delta A(z, t) = k A(z, t) [N(z, t) - A(z, t)] \Delta t, \quad (4)$$

где k - коэффициент пропорциональности. Нетрудно видеть, что увеличение доли инфицированных людей, проживающих в точке x , обусловленное заражением в точке z в момент времени t есть

$$\Delta u^*(x, z, t) = \frac{\Delta A(z, t)}{N(z, t)} f(x, z, t). \quad (5)$$

Понятно, что увеличение доли инфицированных людей, проживающих в точке x , обусловленное всевозможными контактами на всей области проживания населения есть

$$\Delta u(x, t) = \int_S \Delta u^*(x, z, t) dS_z, \quad (6)$$

Тогда, устремляя Δt к нулю, с учетом равенств (2)-(6), получим, что

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial t} = k \frac{\int_S n(y) u(y, t) f(y, z, t) dS_y \int_S n(y) (1 - u(y, t)) f(y, z, t) dS_y}{\int_S n(y) f(y, z, t) dS_y} f(x, z, t) dS_z. \quad (7)$$

Полученное уравнение (7) описывает процесс распространения эпидемии во времени и в пространстве, с учетом сделанных выше предположений. (Заметим, что (7) можно применять и в качестве модели, описывающей распространение волны слухов: в этом случае $u(x,t)$ есть доля людей, проживающих в точке x , которые уже знают содержимое «слуха», а $(1 - u(x,t))$ - доля людей, до которых эта информация еще не дошла.)

Понятно, что уравнение (7) очень сложно и громоздко, для того, чтобы его исследовать. Сделаем теперь предположения, которые существенно упростят (и, конечно, идеализируют) рассматриваемую модель.

Будем рассматривать одномерную задачу, полагая область расселения людей бесконечно протяженной. В этом случае уравнение (7) может быть переписано в виде

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = k \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} n(y)u(y,t)f(y,z,t)dy \int_{-\infty}^{+\infty} n(y)(1 - u(y,t))f(y,z,t)dS_y}{\int_{-\infty}^{+\infty} n(y)f(y,z,t)dy} f(x,z,t)dz_z. \quad (8)$$

Будем полагать теперь, что плотность населения везде одинакова и не зависит от координаты x (то есть, $n(x) = n_0 = \text{const}$), функция $f(x,z,t)$ не зависит от времени, и $f(x,z,t) = f(|x - z|)$. Полагаем также, что u дифференцируема по x . Тогда, с учетом всех сделанных предположений и соотношений (2)-(6), получим

$$N(z,t) = \int_{-\infty}^{+\infty} n_0 f(x,z,t)dx = n_0 \int_{-\infty}^{+\infty} f(x,z,t)dx = n_0 \int_{-\infty}^{+\infty} f(|x - z|)dx.$$

С учетом условия нормировки $\int_{-\infty}^{+\infty} f(|z - x|)dx = 1$ окончательно получим

$$N(x,t) = n_0. \quad (9)$$

Раскладывая $u(x,t)$ в ряд Тейлора в окрестности точки z , пренебрегая высшими членами разложения (то есть, считая, что вероятность передвижения людей на расстояния, на которых происходят значительные изменения u , пренебрежимо мала), обозначив $y = x - z$, получим

$$\begin{aligned} A(z,t) &= n_0 \int_{-\infty}^{+\infty} [u(z,t) + \frac{\partial u}{\partial y} y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} y^2] f(|y|)dy = \\ &= n_0 [u(z,t) + \frac{\partial u}{\partial y} \int_{-\infty}^{+\infty} y f(|y|)dy + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \int_{-\infty}^{+\infty} y^2 f(|y|)dy]. \end{aligned}$$

Обозначая

$$\gamma = \int_{-\infty}^{+\infty} y^2 f(|y|)dy, \quad (10)$$

получим, что

$$A(z,t) = n_0 [u(z,t) + \frac{\gamma}{2} \frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial z^2}]. \quad (11)$$

Тогда формула (4) примет вид

$$\begin{aligned} \Delta A(z,t) &= kn_0 [u(z,t) + \frac{\gamma}{2} \frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial z^2}] [n_0 - n_0 [u(z,t) + \frac{\gamma}{2} \frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial z^2}]] \Delta t = \\ &= kn_0^2 [u(z,t) - u^2(z,t) - \gamma u(z,t) \frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial z^2} + \frac{\gamma}{2} \frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial z^2} - (\frac{\gamma}{2} \frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial z^2})^2] \Delta t. \end{aligned}$$

Учитывая, что γ является малым параметром ($\gamma^2 \ll \gamma$), окончательно получим

$$\Delta A(z,t) = kn_0^2 [u(z,t) - u^2(z,t) - \gamma u(z,t) \frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial z^2} + \frac{\gamma}{2} \frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial z^2}] \Delta t. \quad (12)$$

Обозначив

$$w(z,t) = kn_0 [u(z,t) - u^2(z,t) - \gamma u(z,t) \frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial z^2} + \frac{\gamma}{2} \frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial z^2}], \quad (13)$$

получим, что

$$\Delta u^*(x,z,t) = w(z,t) f(|x-z|) \Delta t. \quad (14)$$

С учетом всех сделанных предположений, а также формул (9)-(14), формула (8) примет вид

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = \int_{-\infty}^{+\infty} w(z,t) f(|x-z|) dz. \quad (15)$$

Раскладывая теперь $w(z,t)$ в ряд Тейлора в окрестности точки x , обозначив $y=z-x$, пренебрегая членами высших порядков, получим

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = \int_{-\infty}^{+\infty} [w(x,t) + \frac{\partial w}{\partial y} y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} y^2] f(|y|) dy,$$

или, с учетом (10)

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = w(x,t) + \frac{\gamma}{2} \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2}. \quad (16)$$

Пренебрегая членами порядка γ^2 , имеем

$$\frac{\gamma}{2} \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\gamma}{2} kn_0 \left(\frac{\partial u}{\partial x} - 2u \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] = kn_0 \gamma \left[\frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right]. \quad (17)$$

Тогда, с учетом (13), (16), (17)

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= kn_0 \left[u - u^2 - \gamma u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\gamma}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\gamma}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \gamma u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \gamma \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right] = \\ &= kn_0 \left[(u - u^2) + \gamma \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} (1 - 2u) - \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right) \right]. \end{aligned}$$

Вводя новый масштаб времени $\tau = kn_0 t$, окончательно получим

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + \gamma \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + (2u - 1) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right] = u(1 - u). \quad (18)$$

Полученное уравнение (18) является дифференциальным уравнением в частных производных для функции u . Нетрудно заметить, что (18) похоже на классическое уравнение (1) и отличается от него наличием нелинейных членов $(\partial u / \partial x)^2$ и $2u(\partial^2 u / \partial x^2)$. Возникает вопрос, существует ли решение уравнения (18) в виде бегущей волны

$$u(x,\tau) = u(x + v\tau) = u(\xi), \quad (19)$$

распространяющейся справа налево со скоростью v , со следующими граничными

условиями на функцию $u(\xi)$:

$$u(-\infty) = 0, \quad u(+\infty) = 1, \quad (20)$$

как это происходит с уравнением (1)? (Граничные условия (20) вытекают из предположения, что в любой фиксированной точке x_0 , в момент времени $\tau = -\infty$ (то есть, до начала рассмотрения) инфицированных людей вообще не было, а в момент времени $\tau = +\infty$ (после завершения распространения эпидемии) все люди, проживающие в точке x_0 , оказались зараженными.) Заметим, что все последующие рассуждения могут быть применены и для бегущей волны, распространяющейся слева направо, для чего необходимо заменить v на $-v$ и граничные условия с $u(-\infty) = 0, u(+\infty) = 1$, на $u(-\infty) = 1, u(+\infty) = 0$. Как станет ясно из дальнейшего рассмотрения, все выводы, полученные для волны, распространяющейся со скоростью $+v$, остаются справедливыми и для волны, распространяющейся со скоростью $-v$, чего, в общем-то, и следовало ожидать.

Понятно, что $(\partial u / \partial x) = (du / d\xi)$, $(\partial^2 u / \partial x^2) = (d^2 u / d\xi^2)$ и $(\partial u / \partial \tau) = v(du / d\xi)$; тогда уравнение (18) примет вид

$$v \frac{du}{d\xi} + \gamma \left[\left(\frac{du}{d\xi} \right)^2 + (2u - 1) \frac{d^2 u}{d\xi^2} \right] = u(1 - u). \quad (21)$$

Обозначив $p = du / d\xi$, приведем (21) к системе двух дифференциальных уравнений первого порядка.

$$\begin{aligned} du/d\xi &= p, \\ \frac{dp}{d\xi} &= \frac{u(1 - u) - vp - \gamma p^2}{\gamma(2u - 1)}. \end{aligned} \quad (22)$$

Система (22) имеет две неподвижные точки $(0;0)$ и $(1;0)$. Понятно, что при $v < 2\gamma^{1/2}$ неподвижная точка $(0;0)$ является неустойчивым фокусом и при $v \geq 2\gamma^{1/2}$ - неустойчивым узлом, а точка $(1;0)$ - устойчивым фокусом при $v < 2\gamma^{1/2}$ и устойчивым узлом при $v \geq 2\gamma^{1/2}$.

Исключим из рассмотрения в системе (22) переменную ξ , для чего будем считать, что $p = p(u(\xi))$. Тогда уравнение (22) может быть сведено к уравнению Абеля второго рода [4]

$$p \frac{dp}{du} = \frac{1}{1 - 2u} p^2 + \frac{v}{\gamma(1 - 2u)} p + \frac{u(u - 1)}{\gamma(1 - 2u)}, \quad (23)$$

или, разрешая (23) относительно производной dp/du , получим

$$\frac{dp}{du} = \frac{u(1 - u) - vp - \gamma p^2}{\gamma(2u - 1)p}. \quad (24)$$

Если теперь удастся показать, что для (23) на плоскости (u, p) существует кривая, выходящая из точки $(0;0)$ и приходящая в точку $(1;0)$ (что, в принципе, возможно, так как, $(0;0)$ является неустойчивой, а $(1;0)$ - устойчивой точкой), такая, что $0 \leq u \leq 1$, то тем самым будет доказана возможность существования для уравнения (18) решения в виде бегущей волны (19) с граничными условиями (20).

Проведем качественный анализ поведения интегральных кривых уравнения (23) на плоскости (u, p) . Для этого рассмотрим семейство изоклин уравнения (24):

$$\frac{u(1 - u) - vp - \gamma p^2}{\gamma(2u - 1)p} = c, \quad (25)$$

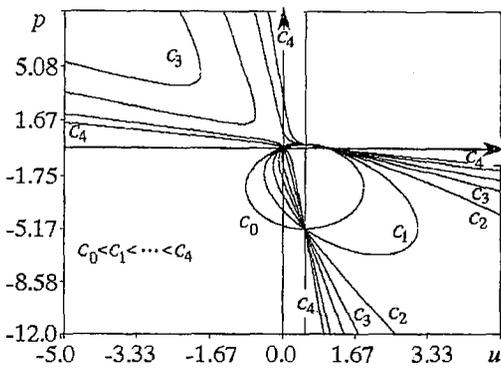


Рис. 1. Семейство изоклин, построенное при выбранных значениях параметров $\gamma=0.25$ $v=1.25$. Параметр c является фиксированным угловым коэффициентом интегральных кривых: $c_0=0$, $c_1=1$, $c_2=2$, $c_3=3$, $c_4=8$. На рисунке приведены лишь изоклины с неотрицательным параметром c . Изоклины с параметром $-c$ ($c>0$) расположены симметрично изоклинам с параметром c относительно прямой $u=1/2$

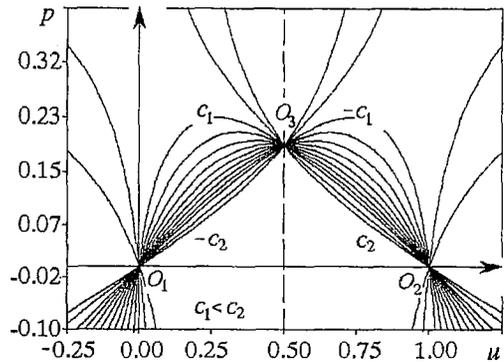


Рис. 2. Поведение семейства изоклин в области $0 \leq u \leq 1$. Показаны изоклины как с положительным, так и с отрицательным параметром c ($c_1=4$, $c_2=8$)

где c есть значение dp/du в точке (u, p) . Нетрудно видеть, что существует четыре особых точки, в которых не выполняются требования теоремы о существовании и единственности решения уравнения [5]: в этих точках $(0;0)$, $(1;0)$, $(1/2; [(v^2+\gamma)^{1/2} - v]/2\gamma)$, $(1/2; -[(v^2+\gamma)^{1/2} + v]/2\gamma)$ пересекаются все изоклины. На рис. 1 приведено схематичное расположение семейства изоклин на плоскости (u, p) для случая $v > 2\gamma^{1/2}$. Как явствует из исследования уравнения (25), при $c^2 < 1/\gamma$ изоклины являются эллипсами, а при $c^2 > 1/\gamma$ - гиперболами. В случае $c^2 = 1/\gamma$ изоклины являются параболлами, а при $c^2 = (v^2 + \gamma)/\gamma^2$ и $c = \pm\infty$ - скрещенными прямыми. Рис. 2 иллюстрирует расположение тех же изоклин в области $0 \leq u \leq 1$, а на рис. 3, 4 показано качественное поведение интегральных кривых уравнения (23) в случаях $v < 2\gamma^{1/2}$ и $v > 2\gamma^{1/2}$ соответственно. Очевидно, что при $v < 2\gamma^{1/2}$ (см.рис.3) любая интегральная кривая, выходящая из $(0;0)$, обязательно пройдет через область отрицательных u [6] (точка $(0;0)$ является неустойчивым фокусом), что, при

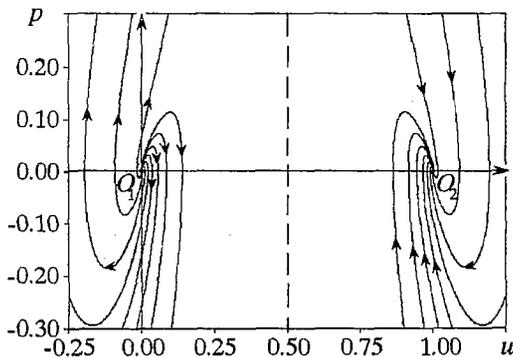


Рис. 3. Поведение интегральных кривых уравнения Абеля второго рода на плоскости (u, p) для случая $v < 2\gamma^{1/2}$ ($v_0 = 0.75$, $\gamma=0.25$). Интегральные кривые получены численным моделированием системы дифференциальных уравнений (22) методом Рунге - Кутты четвертого порядка с шагом интегрирования $h = 0.001$

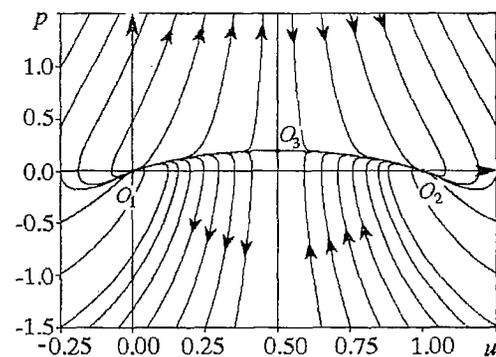


Рис. 4. Поведение интегральных кривых рассматриваемого уравнения для случая $v > 2\gamma^{1/2}$ ($v_0 = 1.25$, $\gamma=0.25$)

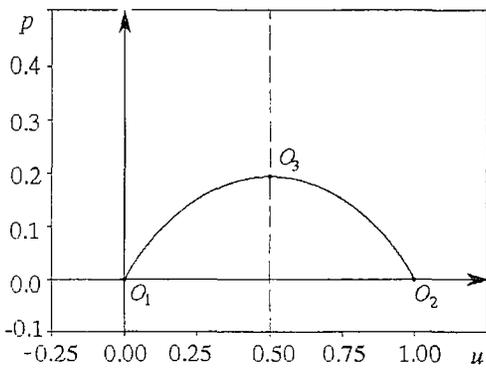


Рис. 5. Финитная интегральная кривая, проходящая через точку O_3

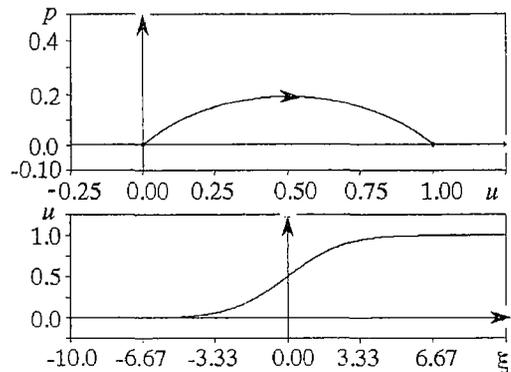


Рис. 6. «Особая» интегральная кривая и профиль фронта соответствующей ей бегущей волны

нашей интерпретации величины u , не имеет смысла. Следовательно, при $v < 2\gamma^{1/2}$ бегущей волны (19) существовать не может.

Совершенно иная ситуация возникает в случае $v \geq 2\gamma^{1/2}$. Как видно из рис. 4, на плоскости (u, p) существует единственная интегральная кривая, выходящая из точки $O_1(0;0)$ и приходящая в точку $O_2(1;0)$. Поведение этой кривой отдельно показано на рис.5: кривая, выходящая из неустойчивого узла $O_1(0;0)$, попадает в особую точку $O_3(1/2; [(v^2 + \gamma)^{1/2} - v]/2\gamma)$, которая является седлом [5]. Следовательно, через точку O_3 проходит *только одна финитная* интегральная кривая, параллельная в этой точке оси $0u$ ($dp/du=0$). Пройдя через точку O_3 , интегральная кривая, вышедшая из точки O_1 , приходит в устойчивый узел O_2 . Эта «особая» интегральная кривая целиком лежит в области $0 \leq u \leq 1$, а, следовательно, в рассматриваемой модели может существовать бегущая волна, распространяющаяся справа налево со скоростью $v \geq v_0 = 2\gamma^{1/2}$. Профиль фронта этой волны схематично изображен на рис. 6.

Кроме того, при $v \geq v_0 = 2\gamma^{1/2}$ существует целый класс интегральных кривых, выходящих из точки O_1 и уходящих на бесконечность, но, тем не менее, полностью лежащих в области $0 \leq u \leq 1/2$, а также класс интегральных кривых, приходящих из бесконечно удаленной точки в устойчивый узел O_2 , полностью принадлежащих области $1/2 \leq u \leq 1$ (рис. 7). Тот факт, что вдоль интегральных кривых неограниченно возрастает p , объясняется тем, что производная dp/du обращается в бесконечность при $u=1/2$. Каждая такая интегральная кривая соответствует бегущей волне, распространяющейся справа налево со скоростью v , причем эта бегущая волна является ударной волной, то есть, она имеет на своем профиле фронта участок бесконечно быстрого роста, так как при $u=1/2$ (кроме особой точки O_3) выполняется $p=du/d\xi=\infty$ (рис. 8)*.

* Следует отметить, что все вышеизложенное относится к уравнению (18), которое, фактически, является «первым приближением» модели (8), а, следовательно, поведение (8) может отличаться от поведения (18). Действительно, для участка бесконечно быстрого роста величины u на профиле бегущей ударной волны, при рассмотрении поведения (8), в уравнении (18) следует учитывать члены, содержащие старшие производные. Так, сохраняя члены порядка γ^2 , получим вместо (18) уравнение

$$u_\tau + \gamma[u_x^2 + (2u - 1)u_{xx}] + (\gamma/2)^2[3u_{xx}^2 + 4u_x u_{xxx} + (2u - 1)u_{xxxx}] = u(1 - u).$$

Однако, учитывая, что параметр γ является малым, становится понятно, что поведение решения (18) отличается от поведения решения (8) (в рамках сделанных предположений) только лишь для самого фронта ударной волны (то есть для очень «тонкого» участка с бесконечно быстрым ростом величины u на профиле волны) и остается адекватным поведению (8) на всем остальном профиле бегущей волны.

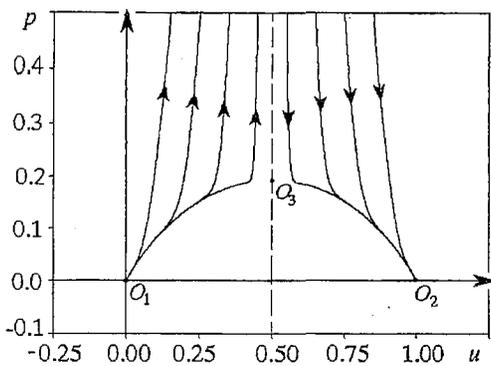


Рис. 7. Множество инфинитных интегральных кривых, удовлетворяющих условию $0 < u < 1$

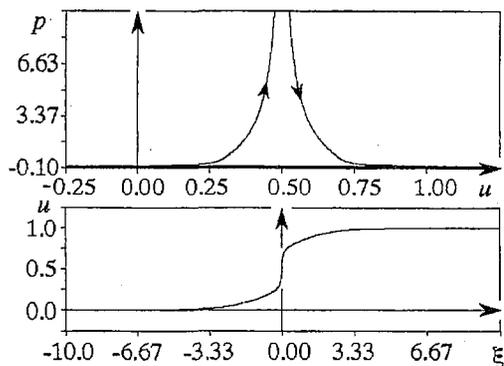


Рис. 8. Одна из инфинитных интегральных кривых и профиль фронта соответствующей ей бегущей ударной волны. На профиле фронта отчетливо виден участок бесконечно быстрого роста величины u

Заметим, что «особая» интегральная кривая (см. рис. 5) является неустойчивой в области $0 \leq u \leq 1/2$, и, наоборот, притягивающей в области $1/2 \leq u \leq 1$ (см.рис. 4).

Таким образом, для любого значения $v \geq v_0 = 2\gamma^{1/2}$ существуют интегральные кривые, выходящие из точки $O_1(0;0)$ и входящие в $O_2(1;0)$, целиком лежащие в области $0 \leq u \leq 1$, причем, существуют одна финитная интегральная кривая (эта «особая» интегральная кривая и профиль фронта соответствующей ей бегущей волны показаны на рис. б) и множество инфинитных кривых, одна из которых, вместе с профилем фронта соответствующей ей ударной бегущей волны, показана на рис.8.

Иными словами, мы получили спектр возможных скоростей, с которыми могут распространяться бегущие волны (в том числе и ударные), ограниченный снизу величиной $v_0 = 2\gamma^{1/2}$. Вопрос же о том, какая из этих скоростей реализуется в действительности, требует более серьезного исследования и в данной работе не рассматривается. Рискнем, однако, предположить, что выводы, полученные для классического уравнения (1), могут быть применены и к рассматриваемой задаче. В пользу подобного предположения может свидетельствовать тот факт, что качественная оценка скорости, с которой будет распространяться бегущая волна при $t \rightarrow +\infty$ для уравнения (1) в работе [6], вполне применима и для (18) и дает тот же самый результат $v \rightarrow v_0 = 2\gamma^{1/2}$.

В заключение выражаю искреннюю признательность профессору Д.И. Трубецкову за постоянную поддержку и внимание, а также доценту В.П. Складкову за ряд ценных советов, которые были использованы при написании данной работы.

Библиографический список

1. Хайпер Э., Нерсетт С., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Нежесткие задачи. М.: Мир, 1990. С.313.
2. Байжанова К.С. Вопросы исследования скорости эпидемических волн // Моделирование процессов экологического развития: Сб. тр. Вып. 8. М.:ВНИИСИ, 1984. С. 48.
3. Колмогоров А.Н., Петровский И.Г., Пискунов Н.С. Исследование уравнения диффузии, соединенной с возрастанием количества вещества, и применение его к одной биологической проблеме//Бюл. МГУ. 1937. Сер. А, вып. 6.
4. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Наука, 1976. С. 47.

5. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1957. С. 28.

6. Свирижев Ю.М. Нелинейные волны, диссипативные структуры и катастрофы в экологии. М.: Наука, 1987.

Саратовский государственный
университет

Поступила в редакцию 22.03.95
после переработки 25.05.95

ABOUT ONE MODEL OF EPIDEMIC SPREAD

A.A. Koronovski

The work deals with the model of the disease spread, having long incubation period, transmitting during the contact between the sick and the healthy people on condition that people are not immune against the disease. The equation, describing the process of epidemic spread in time and in space, has been obtained and it has been shown that in certain conditions it can be reduced to Abel differential equation of the second kind. The figures, illustrating the distribution of the family of isoclines for the equation mentioned and the figures, demonstrating the behaviour of the integral curves at different parameter values, are shown. The possibility of travelling epidemic waves transmission, including the shock waves, has been established.



Короновский Алексей Александрович - родился в 1972 году в Саратове. Окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1995). Аспирант кафедры электроники и волновых процессов СГУ. Область научных интересов - нелинейная динамика и ее проявления в различных сферах человеческой жизнедеятельности, в том числе нелинейная динамика социально-экономических процессов. В издательстве ГосУНЦ «Колледж» вышла монография в соавторстве с профессором Д.И. Трубецковым «Нелинейная динамика в действии» (1996). Автор 2 статей в центральной печати.



ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ФРАКТАЛЬНЫХ СТРУКТУР БИОТКАНЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СПЕКЛ-КОРРЕЛОМЕТРИИ

Д. А. Зимняков, В. В. Тучин, А. А. Мишин

Рассмотрены вопросы формирования спекл-полей в дальней зоне дифракции при рассеянии когерентных пучков на фрактальных структурах в рамках модели случайного фазового экрана. Исследована взаимосвязь между параметрами структурных функций флуктуаций фазы граничного поля и интенсивности спеклов в дальней зоне. Разработана методика визуализации структур биотканей путем локальных оценок значений экспоненциального фактора структурной функции флуктуаций интенсивности. Эксперименты с образцами эпидермиса кожи человека на разных стадиях поражения псориазом показали, что подобные двумерные изображения структуры, полученные с помощью сканирующего спекл-коррелометра, адекватно отражают эволюцию структуры эпидермиса по мере развития очага поражения.

Введение

В настоящее время одним из важных направлений морфологического анализа клеточных препаратов и структур является разработка методов и средств исследования общих свойств структур анализируемых объектов, связанных с понятием «фрактальность». Подобные свойства проявляются, в частности, в некоторых особенностях пространственных распределений рассеянных полей, формируемых в результате некогерентного или когерентного освещения биотканей.

Когерентно-оптические методы морфологического анализа биологических объектов являются в настоящее время одним из основных приложений статистической и корреляционной оптики в исследованиях структуры оптически неоднородных объектов и сред [1]. Как правило, область их применения в основном ограничена случаями оптически тонких рассеивателей, создающих фазовую модуляцию зондирующих когерентных пучков и допускающих интерпретацию в рамках скалярной теории дифракции с использованием модели фазового экрана [2]. В качестве анализируемых характеристик спекл-полей, формируемых в дальней зоне дифракции при когерентном освещении исследуемых структур, обычно используются нормированные значения статистических моментов флуктуационной компоненты интенсивности [3-5] (например, контраст спекл-поля выражается через нормированный момент второго порядка и т.д.) или ее корреляционные характеристики (длина корреляции, которая связана со

средним размером спеклов в регистрируемом спекл-поле). В рамках модели случайного фазового экрана (СФЭ), описываемого параметрами пространственного распределения фазы формируемого граничного поля при освещении СФЭ широким коллимированным пучком, взаимосвязь между структурными характеристиками объекта и статистическими свойствами соответствующего спекл-поля может быть получена аналитически [6]. Полученные таким образом значения (например, характерный размер элементарных рассеивателей, образующих структуру объекта, и среднее значение величины флуктуаций показателя преломления) относятся к интегральным морфологическим характеристикам исследуемого образца. Вместе с тем значительный интерес могут представлять методы визуализации структуры, основанные на локальных оценках корреляционных свойств флуктуаций рассеянного поля. В данном случае более предпочтительной для описания статистики второго порядка флуктуаций интенсивности в дальней зоне является структурная функция [2] как объект, более чувствительный, чем автокорреляционная функция, к поведению флуктуационной компоненты в области малых пространственных масштабов. В работе рассматривается методика построения двумерных изображений структуры биотканей с использованием локальных оценок такого параметра структурной функции флуктуаций интенсивности спеклов, как экспоненциальный фактор, при сканировании исследуемого образца когерентным зондирующим пучком. Подобный подход может быть условно назван «пространственной спекл-коррелометрией».

Значение экспоненциального фактора двумерного случайного изотропного распределения однозначно связано с такой его характеристикой, как фрактальная (хаусдорфова) размерность. В связи с этим метод пространственной спекл-коррелометрии представляет интерес с точки зрения морфологического анализа структур биотканей с фрактальными свойствами.

1. Взаимосвязь между корреляционными и фрактальными параметрами фазы граничного поля и интенсивности спеклов в дальней зоне

Для дальнейшего анализа рассмотрим взаимосвязь между характеристиками структурных функций флуктуаций фазы граничного поля и интенсивности рассеянного поля в дальней зоне дифракции. Структурная функция флуктуаций фазы граничного поля для изотропного и статистически однородного СФЭ может быть представлена следующим соотношением [7]:

$$D_\phi(\Delta\mathbf{r}) = \langle (\phi(\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}) - \phi(\mathbf{r}))^2 \rangle \cong C_\phi L_\phi^{2-\nu_\phi} |\Delta\mathbf{r}|^{\nu_\phi}, \quad (1)$$

в котором подразумевается усреднение по ансамблю реализаций фазовой функции пропускания объекта. Экспоненциальный фактор ν_ϕ описывает асимптотические свойства структурной и корреляционной функций при $|\Delta\mathbf{r}| \rightarrow 0$. Параметр L_ϕ , имеющий размерность длины и называемый топотезой, в соответствии с [8] равен расстоянию между двумя точками на поверхности, описываемой функцией $\phi(x,y)/C_\phi^{0.5}$, для которого среднее значение тангенса угла наклона отрезка, соединяющего эти точки, равно 1. Нормировочный коэффициент C_ϕ имеет размерность, обратно пропорциональную квадрату длины.

Со значением экспоненциального фактора ν_ϕ тесно связана такая характеристика распределений фазы граничного поля, как их фрактальная (хаусдорфова) размерность $D_{\text{НВ}}$ [7,8]. В частности, для произвольным образом выбранной одномерной реализации распределения $\phi(x,y)$ (его одномерного «среза») выполняется соотношение

$$\nu_\phi = 2(2 - D_{\text{НВ}}). \quad (2)$$

При этом хаусдорфова размерность изотропного двумерного распределения

больше соответствующей размерности одномерной реализации на 1 [9].

Для непрерывных многократно дифференцируемых распределений фазы $\nu_\phi = 2$ и $D_{\text{НВ}}=1$. Для непрерывных, но не дифференцируемых распределений, порождаемых, например, рассеивателями с фрактальной структурой, $0 < \nu_\phi < 2$ и $1 < D_{\text{НВ}} < 2$. В [8] выделены следующие характерные примеры двумерных непрерывных распределений, удовлетворяющих условию $D_{\text{НВ}} \geq D_E$, где D_E - соответствующая топологическая размерность (для одномерных реализаций фазы $D_E=1$):

а) $\nu_\phi=0$; $D_{\text{НВ}}=2$ - «пределный» фрактал (extreme fractal);

б) $\nu_\phi=1$; $D_{\text{НВ}}=1.5$ - броуновский фрактал (Brownian fractal);

в) $\nu_\phi=2$; $D_{\text{НВ}}=1$ - «маргинальный» фрактал (marginal fractal), или «обычное»,

непрерывное и дифференцируемое распределение фазы.

Случай «б» может соответствовать изотропным распределениям фазы, порождаемым так называемым процессом Орнштейна-Уленбека [10] с нормированной автокорреляционной функцией вида $\exp(-|\Delta r|)$. Для фазовых экранов рассматриваемого типа характерны степенные зависимости спектральной плотности флуктуаций фазы граничного поля в области высоких пространственных частот с показателями степени, определяемыми значениями экспоненциальных факторов ν_ϕ (и, соответственно, $D_{\text{НВ}}$) [8]. Необходимо отметить, что реально существующие распределения фазы могут демонстрировать фрактальные свойства только в конечном диапазоне пространственных масштабов, верхняя граница которого определяется размерами рассеивателя, а нижняя - соответственно длиной волны освещающего пучка. Как правило, для наблюдаемых на практике рассеивающих объектов, удовлетворяющих моделям фрактальных фазовых экранов, данные особенности (степенной характер спектральной плотности, значения ν_ϕ , меньше 2) могут быть зафиксированы в существенно более узком интервале пространственных масштабов; подобные объекты могут быть отнесены к классу так называемых «физических» фракталов или фракталов с ограниченной полосой частот [11]. Рассмотрим взаимосвязь между значениями экспоненциальных факторов флуктуаций фазы ν_ϕ и интенсивности рассеянного поля ν_I при движении рассеивателя в направлении, перпендикулярном оси освещающего пучка. Для рассеивателей с гауссовой статистикой фазы граничного поля при использовании в качестве освещающего широкого коллимированного пучка с однородным распределением амплитуды по сечению подобная взаимосвязь может быть получена исходя из выражения для поперечной функции когерентности поля [2]

$$\Gamma_U(\Delta \mathbf{p}) = \langle U(\mathbf{p})U^*(\mathbf{p} + \Delta \mathbf{p}) \rangle = \exp(-0.5 D_\phi(\Delta \mathbf{p})). \quad (3)$$

Здесь, как и ранее, предполагается усреднение по ансамблю реализаций фазовой функции пропускания рассеивателя, $U(\mathbf{p})$ и $U^*(\mathbf{p})$ - комплексная амплитуда граничного поля и сопряженная величина в точке с радиус-вектором \mathbf{p} . С другой стороны, автокорреляционная функция флуктуаций интенсивности рассеянного поля в дальней зоне выражается следующим образом:

$$R_I(\Delta \mathbf{p}) = |\Gamma_U(\Delta \mathbf{p})|^2 - |\nu_0|^4, \quad (4)$$

где $|\nu_0|$ - модуль средней амплитуды граничного поля. Подставляя выражение (3) в (4) и используя взаимосвязь между структурной и корреляционной функциями, можно получить, что

$$D_I(\Delta \mathbf{r}) \cong 2D_\phi(\Delta \mathbf{r}) \quad (5)$$

при $|\Delta \mathbf{p}| \rightarrow 0$ и равенстве 1 модуля комплексной амплитуды исходного освещающего

пучка. Таким образом, для развитых спекл-полей [12], порождаемых рассеивающими объектами с гауссовой статистикой фазы граничного поля, в области малых пространственных масштабов имеет место равенство экспоненциальных факторов ν_1 и ν_ϕ , следующее из уравнения (5).

При использовании в качестве освещающих когерентных сфокусированных пучков характер взаимосвязи между величинами ν_1 и ν_ϕ становится более сложным. В частном случае остросфокусированных пучков с квазиоднородным пространственным спектром можно показать, используя взаимосвязь между автокорреляционной функцией и спектральной плотностью флуктуационной компоненты изотропного двумерного случайного процесса [7], что

$$\nu_1 = 2\nu_\phi - 2. \quad (6)$$

Выражение (6) позволяет сделать несколько любопытных заключений относительно свойств флуктуационной компоненты интенсивности рассеянного поля, формируемого при сканировании фрактальных рассеивателей остросфокусированными когерентными пучками. Очевидно, что функция $I(x,y)$ описывающая мгновенное значение интенсивности в параксиальной области дальней зоны при сканировании фрактального СФЭ в направлениях (x,y) , перпендикулярных оси освещающего пучка, также будет являться фрактальным двумерным распределением с хаусдорфовой размерностью, превышающей соответствующую размерность распределения фазы граничного поля. Предельным случаем является сканирование «броуновского» СФЭ с $\nu_\phi=1$, порождающее распределение флуктуаций интенсивности, которое относится к «предельным» (extreme) фрактальным распределениям с $\nu_\phi=0$ и $D_{\text{нв}}=2$. Вместе с тем для «маргинальных» фрактальных рассеивателей характерно равенство экспоненциальных факторов и хаусдорфовых размерностей флуктуаций фазы и интенсивности как в случае сканирования широким коллимированным пучком с однородным распределением амплитуды, так и в случае сканирования остросфокусированным пучком. Таким образом, схема формирования динамического частично развитого спекл-поля при сканировании фрактальных СФЭ остросфокусированным когерентным пучком может быть интерпретирована как «усилитель хаоса», приводящий к возрастанию хаусдорфовой размерности флуктуационной компоненты интенсивности по сравнению с исходной размерностью фазы граничного поля [13]. Оценки значения ν_1 в результате анализа асимптотического поведения корреляционной или структурной функции флуктуаций интенсивности спеклов в параксиальной области дальней зоны могут быть использованы для описания высокочастотной составляющей структуры рассеивающих объектов; при этом переход к значениям ν_ϕ , характеризующим двумерное распределение фазы, в зависимости от условий освещения объекта производится либо исходя из равенства ν_ϕ и ν_1 , либо в соответствии с выражением (6).

Применение метода вычисления ν_1 по конечному числу отсчетов интенсивности, меньшему, чем общий объем выборки при сканировании по трассе заданной длины («скользящее окно» для выборки данных) позволяет осуществлять двумерную визуализацию данных с использованием экспоненциального фактора флуктуаций интенсивности как параметра визуализации. В данном случае двумерное сканирование осуществляется по схеме растровой развертки, а локальные оценки ν_1 могут быть сделаны в соответствии со следующим выражением:

$$\nu_1(i,j) \cong 1.44(\ln\{\sum_{k=i-M}^{k=i+M}[I(k+2p,j) - I(k,j)]^2\} - \ln\{\sum_{k=i-M}^{k=i+M}[I(k+p,j) - I(k,j)]^2\}). \quad (7)$$

Здесь i - текущий номер отсчета вдоль строки раstra сканирования, определяющий положение центра «скользящего окна»; M - число шагов дискретизации, определяющее полуширину окна; j - номер обрабатываемой

строки растра; p - число шагов дискретизации, определяющее интервал, используемый для оценки экспоненциального фактора v_i ; $I(i,j)$ - дискретный отсчет интенсивности спекл-поля в точке растра сканирования с координатами (i,j) . Использование подобной процедуры будет приводить к анизотропии формируемого двумерного изображения, обусловленной существенно одномерным характером обработки регистрируемого двумерного массива (ориентацией «скользящего окна» вдоль строк растра). Данная анизотропия связана прежде всего с различной разрешающей способностью используемого алгоритма вдоль строк растра и в перпендикулярном направлении и может быть устранена в результате применения специальных корректирующих цифровых фильтров или двумерного «скользящего окна». Недостатком последнего способа является существенное увеличение вычислительных затрат по сравнению с «одномерным» алгоритмом, описываемым выражением (7).

2. Эксперименты с пространственным спекл-коррелометром

Были проведены экспериментальные исследования по предложенной методике; в качестве исследуемых объектов были использованы отрывы эпидермиса нормальной и пораженной псориазом кожи человека на разных стадиях заболевания. Исследуемые образцы представляли собой тонкие (30-50 мкм) поверхностные слои эпидермиса площадью от 1 до 3 см², фиксируемые на стеклянных подложках с помощью медицинского клея. Проведенные ранее исследования формирования спеклов при рассеянии лазерных сфокусированных пучков в слоях эпидермиса [14] показали существенное влияние процесса возникновения и развития фокусов паракератоза на пораженных псориазом участках на корреляционные свойства флуктуаций интенсивности спеклов. Развитие паракератоза носит преимущественно очаговый характер; средние размеры элементов структуры - порядка 0.3-0.7 мм. Плотность очагов на свежепораженных участках может достигать 50 и более. Эти особенности структуры проявляются в специфическом поведении автокорреляционной функции интенсивности (возрастание полуширины главного автокорреляционного пика и появление сравнительно высокоамплитудных низкочастотных флуктуаций на ее «хвосте» для образцов эпидермиса, пораженного псориазом) [14]. Кроме того, асимптотические характеристики структурной и автокорреляционной функций флуктуаций интенсивности (в частности, значение v_0) также должны быть весьма чувствительны к структурным изменениям эпидермиса, обусловленным развитием псориаза. Исследования проводились с помощью сканирующего спекл-коррелометра, оптическая схема которого представлена на рис. 1. В качестве источника излучения использован одномодовый He-Ne лазер 1. Для формирования зондирующего пучка применяется телескопическая система-расширитель 2. Фокусировка изображения на исследуемый образец 4 осуществляется фокусирующим объективом 3. С помощью двухкоординатного сканирующего устройства 5 производится перемещение исследуемого объекта в плоскости (x,y) , перпендикулярной оптической оси системы. Фотодетектор 7 (ФЭУ с точечной диафрагмой) расположен на расстоянии z от объекта, удовлетворяющем критерию дальней зоны дифракции для используемых размеров освещаемого участка объекта. В схеме также используется фурье-преобразующий объектив 6, при этом $z=2f$, где f - фокусное расстояние фурье-объектива. Аналого-цифровое преобразование мгновенных значений интенсивности и управление шаговыми приводами сканирующего устройства осуществляется с помощью интерфейсного блока 8, подключенного к системной шине персонального компьютера, используемого для управления спекл-коррелометром и обработки результатов анализа. Минимальная величина шага сканирования, обеспечиваемая шаговыми приводами сканирующего устройства при сканировании по координатам (x, y) , равна 5 мкм. Для увеличения разрешающей способности при регистрации фотоэлектрического сигнала

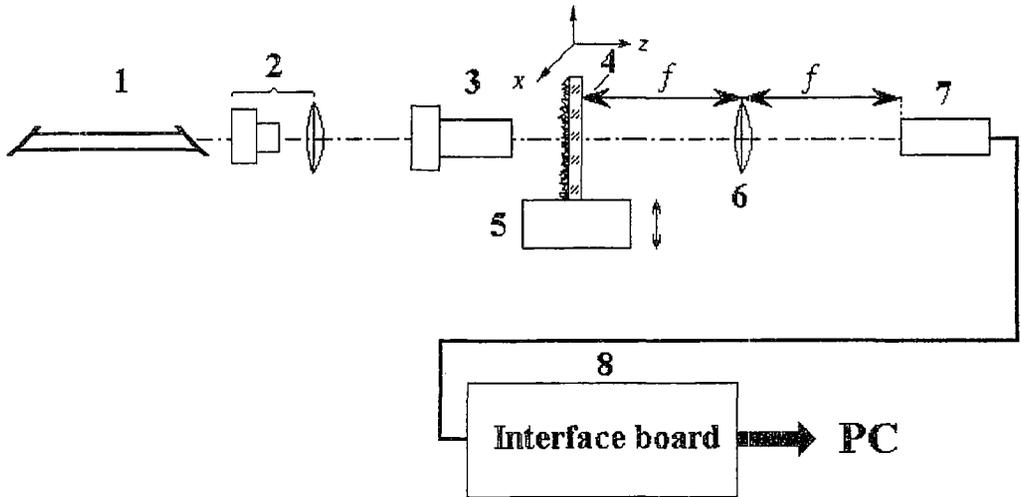


Рис. 1. Оптическая схема сканирующего спекл-коррелометра. 1 - He-Ne лазер, 2 - телескопическая система, 3 - фокусирующий объектив, 4 - исследуемый образец, 5 - сканирующее устройство, 6 - фурье-преобразующий объектив, 7 - фотодетектор, 8 - интерфейсный блок

использован следующий прием: частота синхронизации аналого-цифрового преобразования существенно выше, чем тактовая частота управления шаговым приводом при сканировании по строке раstra. При отношении этих двух частот, равном 20, и тактовой частоте, равной 1 кГц (в данном случае обеспечивается квазиравномерное движение объекта со скоростью 5 мм/с), величина шага дискретизации флуктуаций интенсивности равна 0.25 мкм. Фрагменты полученных двумерных изображений структуры эпидермиса кожи представлены на рис. 2. Рис: 2, а соответствует структуре здорового эпидермиса, а рис. 2, б-г - различным

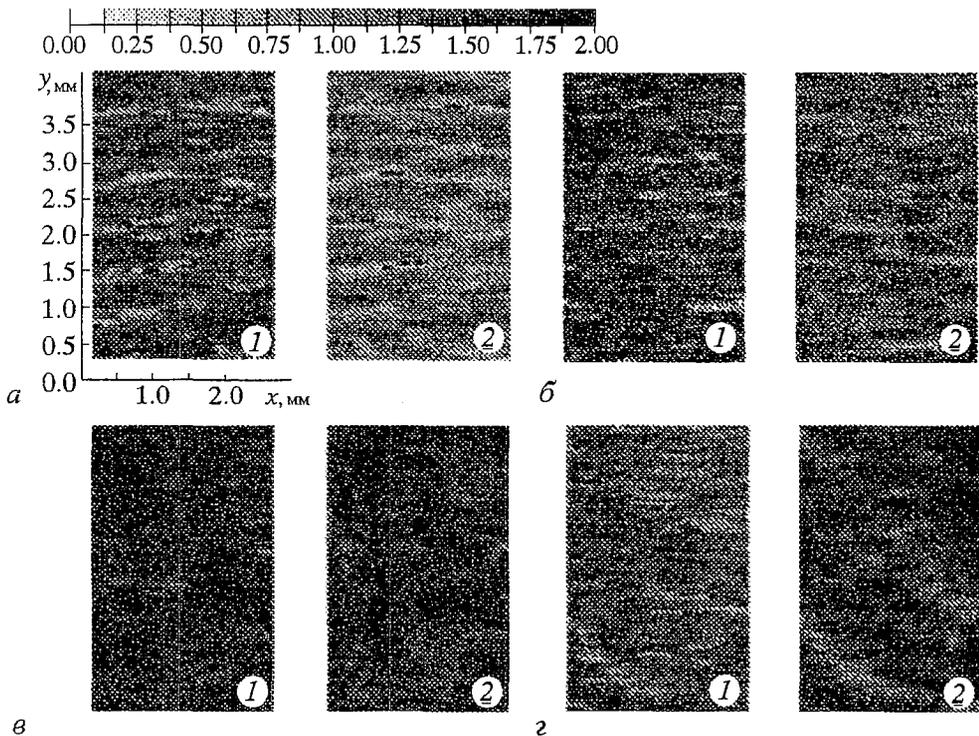


Рис. 2. Двумерные изображения структуры эпидермиса человеческой кожи для различных стадий псориаза при освещении образца эпидермиса широким пучком (1) и острогофокусированным пучком (2): а - нормальная кожа; б - начальная стадия развития псориаза; в - промежуточная стадия; г - поздняя стадия

стадиям поражения псориазом. При построении двумерных распределений экспоненциального фактора v_1 использовано «скользящее окно» шириной 1000 шагов дискретизации (250 мкм), что существенно превышает ширину главного автокорреляционного пика флуктуационной компоненты интенсивности спеклов. Цифрой 1 помечены изображения, соответствующие случаю сканирования исследуемых объектов широким зондирующим пучком (образцы располагались на расстоянии порядка 2.0 - 2.5 мм (приблизительно $(60 - 80)R$) от плоскости перетяжки пучка; здесь R - конфокальный параметр освещающего пучка [15]), а цифрой 2 - сфокусированным пучком (образцы располагались в плоскости перетяжки). Для первого случая характерна конечная кривизна радиуса волнового фронта освещающего пучка, в то время как проведенный ранее анализ соответствует коллимированным пучкам с плоским волновым фронтом и однородным распределением амплитуды. Тем не менее, проведенные оценки позволяют утверждать, что при используемой геометрии эксперимента влияние фазовой компоненты апертурной функции зондирующего пучка вследствие конечной кривизны его волнового фронта на характеристики высокочастотной составляющей интенсивности в рассматриваемом диапазоне пространственных масштабов (0.25 - 5.0 мкм) можно пренебречь.

3. Обсуждение результатов

Полученные изображения качественно отображают эволюцию структурных изменений эпидермиса, обусловленную прогрессированием заболевания. Для здоровой кожи характерно структурированное изображение с относительно малыми значениями v_1 , что обусловлено сильным рассеянием зондирующего пучка клеточной структурой здоровой кожи, характеризуемым относительно медленным спадом спектральной плотности флуктуаций интенсивности в области высоких пространственных частот (см. рис. 2, а). По мере развития псориазического поражения, наряду с возникновением очагов паракаротоза происходит насыщение окружающих их тканей тканевыми жидкостями [16], снижающими величину флуктуаций показателя преломления в исследуемом объеме (иммерсионный эффект), в результате чего скорость спада спектральной плотности флуктуаций интенсивности в высокочастотной области может существенно возрасти, приводя к увеличению v_1 (см. рис. 2, б, в - начальная и промежуточная стадии развития псориазической бляшки). На поздних стадиях наблюдается уменьшение среднего значения v_1 и возрастание его дисперсии, обусловленное разрыхлением структуры эпидермиса вследствие образования микрополостей с воздушным заполнением и частичным отделением фрагментов верхних слоев («scaling», «desquamation stage» [17]).

Различие между изображениями структуры в случаях 1 и 2 обусловлено «хаотизацией» флуктуационной компоненты спекл-поля при использовании остросфокусированных освещающих пучков, в соответствии с выражением (6). Поскольку статистика распределений фазы, порождаемых исследуемыми объектами, может существенно отличаться от гауссовой, точная аналитическая связь между значениями v_1 для различных условий освещения объекта может быть иной, чем предписываемая выражением (6). Тем не менее, эффект «хаотизации» наблюдается и может быть использован для контрастирования изображений структур биотканей, получаемых в соответствии с предложенной методикой.

Возникает вопрос о применимости понятий теории фрактальных структур [9] (хаусдорфова размерность, фрактальные распределения) для данного случая. Определяемые в эксперименте значения экспоненциального фактора являются обобщенными параметрами, описывающими исследуемые объекты в области высоких пространственных частот (в частности, величину наклона их пространственных спектров в логарифмических координатах) и непосредственно связанными с такими их свойствами, как самоподобие [8,9]. Поскольку оценки значений v_1 производятся на конечном интервале пространственных масштабов,

характеризуемом параметром $\mu = \ln(\Delta_{\max}/\Delta_{\min})$ (в рассматриваемом случае $\mu = \ln(5.0/0.25) \approx 3.0$), имеет смысл говорить о полосно-ограниченных фрактальных структурах. В литературе подобные объекты часто называются «предфрактальными структурами», или «предфракталами» (pre-fractals) [18,19].

Заключение

На наш взгляд, разработанная методика визуализации структуры биологических и медицинских объектов с использованием сканирующего спекл-коррелометра, основанная на локальных оценках значений экспоненциального фактора структурной функции флуктуаций интенсивности спеклов, представляет интерес с точки зрения задач мониторинга структур биотканей оптоэлектронными и лазерными методами. Учет взаимосвязи асимптотических характеристик структурной функции с фрактальной (хаусдорфовой) размерностью при построении двумерных изображений рассмотренного типа позволит осуществлять селекцию участков со специфическими параметрами структурных характеристик, обусловленными особенностями развития тканей. Представляется весьма актуальной разработка комплексного подхода к анализу подобных особенностей, основанного на использовании сканирующего спекл-коррелометра в комбинации с традиционными методами исследования биотканей (традиционная и люминесцентная микроскопия, спектрофотометрические исследования).

Библиографический список

1. *Tuchin V.V. Tissue Optics: Applications in Medical Diagnostics and Therapy // SPIE Milestone Ser. Vol. MS 102. Bellingham (USA), 1994.*
2. *Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Ч.2. Случайные поля. М.: Наука, 1978.*
3. *Jakeman E. Speckle statistics with a small number of scatterers // Optical Engineering. 1984. Vol. 23, № 4. P. 453.*
4. *Briers J.D. Speckle fluctuations and biomedical optics: implications and applications // Optical Engineering. 1993. Vol. 32. P. 277.*
5. *Zimnyakov D.A., Tuchin V.V., Utz S.R. Human skin epidermis structure investigations using coherent light scattering // Proc. SPIE. 1994. Vol. 2100. P. 218.*
6. *Kadono H., Asakura T., Takai N. Roughness and correlation length measurements of rough surface objects using the speckle contrast in the diffraction field // Optik. 1988. Vol. 80, № 3. P.115.*
7. *Джейкмен Э. Рассеяние на фракталах // Фракталы в физике: Тр. VI междунар. симпоз. по фракталам в физике. М.: Мир, 1988. С. 82.*
8. *Church E.L. Fractal surface finish // Appl. Opt. 1988. Vol. 27, № 8. P. 1518.*
9. *Мандельброт Б. Самоафинные фрактальные множества // Фракталы в физике: Тр. VI междунар. симпоз. по фракталам в физике. М.: Мир, 1988. С. 9.*
10. *Лидбеттер М., Ротсен Х., Линдгрэн Т. Экстремумы случайных последовательностей и процессов. М.: Мир, 1989.*
11. *Jaggard D.L., Kim Y. Diffraction by band-limited fractals // JOSA A. 1987. Vol. 4, № 6. P. 1056.*
12. *Dainty J.C. Laser speckle and related phenomena // Topics in applied physics. Berlin, Springer, 1975. Vol. 9.*
13. *Ангельский О.В., Максимьяк П.П., Перун Т.О. Корреляционно-оптический метод оценки размерности пространственного хаоса в оптических полях // Оптика и спектроскопия. 1992. Т. 73, № 5. С. 926.*
14. *Зимняков Д.А., Тучин В.В., Утц С.Р. Исследование статистических свойств частично развитых спекл-полей применительно к диагностике структурных изменений кожи человека // Оптика и спектроскопия. 1994. Т. 76, № 5. С. 838.*
15. *Ринкевичюс Б.С. Лазерная диагностика потоков. М.: Изд-во МЭИ, 1990.*

16. *Zimnyakov D.A., Tuchin V.V., Utz S.R., Mishin A.A.* Speckle-imaging methods using focused laser beams in application to tissues mapping // Proc. SPIE. 1995. Vol. 2433, № 47.
17. *Tuchin V.V., Utz S.R., Yaroslavsky I.V.* Tissue optics, light distribution and spectroscopy. Optical Engineering. 1994. Vol. 10. P. 3178.
18. *Шкуратов Ю.Г.* Фотометрические свойства физических фракталов // Оптика и спектроскопия. 1995. Т. 79, № 1. С. 110.
19. *Sakyrada Y., Uozumi J., Asakura T.* Diffraction fields of fractally bounded apertures // Optical Review, Sample Issue. 1994. P. 12.

*Саратовский государственный
университет
СФ Институт машиноведения РАН*

Поступила в редакцию 27.10.95

IMAGING OF THE BIOTISSUES FRACTAL STRUCTURES USING SPATIAL SPECKLE-CORRELOMETRY TECHNIQUE

D.A. Zimnyakov, V.V. Tuchin, A.A. Mishin

Far-zone speckles formation due to coherent beam diffraction on fractal structures is discussed using the random phase screen approach. Relationship between parameters of the structure functions of boundary field phase and speckle intensity fluctuations has been analyzed. Biotissues structure imaging technique using local estimations of the intensity exponential factor has been developed. Experiments with psoriasis human epidermis using scanning speckle-correloimeter have shown the adequacy of the obtained 2D-images to structure evolution character caused by disease progress.



Зимняков Дмитрий Александрович - родился в 1956 г. в Саратове, окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1978). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук в Московском институте приборостроения (1989) в области разработки методов и средств контроля материалов, веществ и изделий. В настоящее время является докторантом кафедры оптики СГУ. Им опубликовано более 30 научных статей. Область научных интересов - статистическая и корреляционная оптика и ее метрологические приложения.



Тучин Валерий Викторович - кандидат физико-математических наук с 1973 г., доктор физико-математических наук с 1982 г., профессор, заведующий кафедрой оптики СГУ, заведующий лабораторией Саратовского филиала ИМАШ РАН. Круг его научных и педагогических интересов включает физику лазеров, нелинейную динамику лазерных и оптических систем, биомедицинскую оптику и физику оптических измерений. Он автор или редактор 16 книг и глав в книгах, автор или соавтор 23 изобретений, более 150 статей. Действительный член Международной Академии Информатизации, член Международных Обществ по оптической технике SPIE, по биомедицинской оптике BIOS и по лазерам и электрооптике LEOS, член Совета Российского отделения SPIE/RUS.



Мишин Алексей Александрович - родился в 1970 г. в Саратове, окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1992). В настоящее время является младшим научным сотрудником Саратовского филиала Института машиноведения РАН. Им в соавторстве опубликовано 4 статьи по вопросам статистического анализа спекл-полей и биомедицинской оптики.



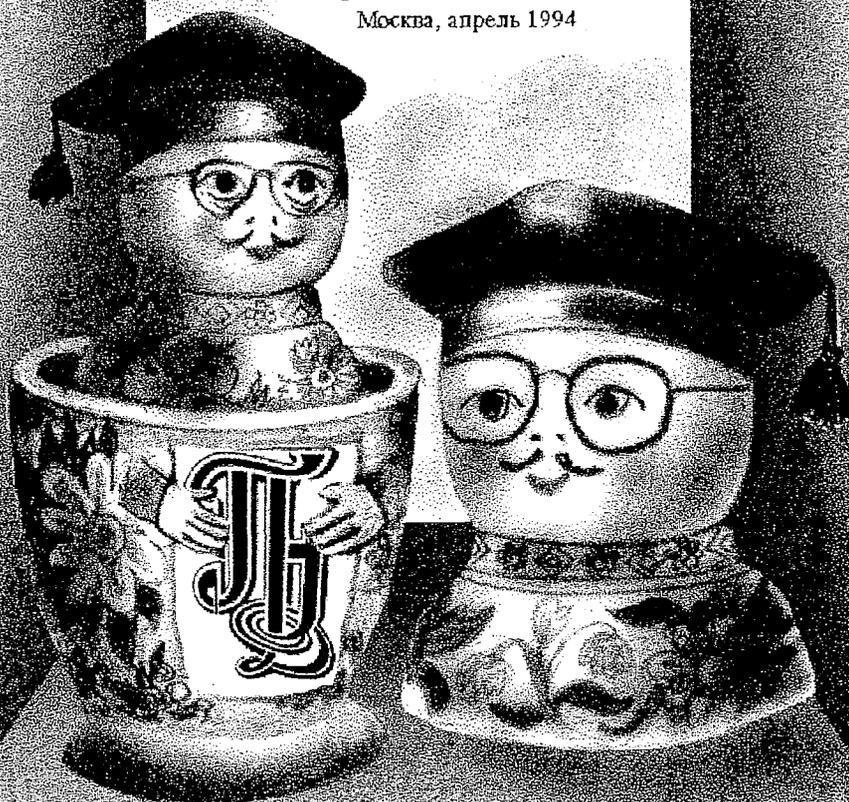
В издательстве ГосУНЦ «Колледж»
вышел в свет в 1996 году сборник:

Лекции по СВЧ электронике и радиофизике
10-ая зимняя юбилейная школа-семинар
10-20 января 1996 г. в 3-х книгах.

Стоимость наложенного платежа
за комплект 30 тыс. руб. с почтовыми расходами.
Заказы направлять по адресу редакции
тел. (845-2)51-42-98
e-mail: and@college.saratov.su

ЖУРНАЛ ЖУРНАЛ

По материалам конференции
Эколого-физиологические
проблемы адаптации
Москва, апрель 1994





Изв.вузов «ПНД», т.4, №1, 1996

НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ И МЕДИЦИНЫ: обзор тематической рубрики

Материалы рубрики «Журнал в журнале» представляют читателям Головной Совет *Здравоохранение и экология человека* Государственного комитета Российской Федерации по высшему образованию и статьи, написанные по некоторым докладам конференции «Эколого - физиологические проблемы адаптации», подготовленной и проведенной при активном участии Головного Совета в апреле 1994 года в Москве.

Головные Советы созданы в январе 1993 года как экспертно-консультационные органы Госкомитета РФ по высшему образованию по всем отраслям науки и техники, представленным в вузах России. Головные Советы призваны определять стратегию развития научных исследований в высшей школе и подготовки специалистов по соответствующему профилю. Они осуществляют экспертную оценку финансируемых Госкомитетом научно-технических программ. Создавая и работая с базами данных по тематике научных исследований и технологических разработок, по авторским коллективам, производителям и потребителям наукоемкой продукции, они представляют интересы вузов, научных коллективов, отдельных ученых в системе University - Industry Relations.

Головной Совет *Здравоохранение и экология человека*, председатель - академик РАМН Н.А. Агаджанян, заместители председателя - академик РАМН Т.Т. Березов, проф. Д.И. Медведев, с.н.с. В.В. Розанов, ученый секретарь - к.м.н. И.В. Радыш, головной вуз - РУДН, объединяет секции:

Экология человека, РУДН, председатель - академик РАМН Н.А. Агаджанян;

Молекулярные и морфологические основы патологии, РУДН, председатель - академик РАМН Т.Т. Березов;

Здоровье населения и среда обитания, РГМУ, сопредседатели - академик РАМН Ю.П. Лисицин, проф. Н.А.Тюрин;

Медико-биологические и экологические проблемы освоения космоса, ИМБП, председатель - академик РАМН А.И. Григорьев;

Экологический мониторинг и прогнозирование чрезвычайных ситуаций, СПбГЭТУ, председатель - проф. А.Д. Викторов;

Наукоемкие технологии и фундаментальные исследования для медицины, МГУ, сопредседатели - чл.-корр.РАМН Ю.П.Пивоваров, с.н.с. В.В. Розанов;

Экологическая безопасность, РУДН, председатель - академик РАЕН Ю.П. Козлов;

Автоматизированные системы медико-биологического назначения, НИИ нейрокибернетики РГУ, председатель - проф. Г.А.Кураев.

В составе Президиума и 8 секций Головного Совета 19 академиков и членов-корреспондентов РАН, РАМН, РАЕН, 78 докторов и 32 кандидата наук, которые являются ведущими специалистами во всех отраслях фундаментальной и практической медицины, во многих областях науки и техники.

Высокопрофессиональный состав Головного Совета позволяет эффективно осуществлять одну из основных возложенных на него Госкомитетом функций - определение уровня выполняемых исследований, оценку их научной и практической значимости, проведение экспертизы научных направлений, программ, отдельных работ, то есть осуществление широкомасштабной научно-технической и прогностической экспертизы с элементами маркетинга на всех этапах научной работы - от идеи до практической реализации.

Сегодня по профилю Головного Совета Госкомитетом финансируются фундаментальные и прикладные научные исследования, объединенные в научно-технические программы:

«Новые лекарственные препараты», РГУ, научн.рук. - проф. В.И. Минкин;

«Человек в экстремальных ситуациях», РосНИИ ТМЭ (СЭФ), научн. рук. - проф. В.В.Лучинин;

«Приборы и системы индивидуального медицинского контроля человека», Региональный НТЦ, Воронеж, научн. рук. - проф. А.Д. Поваляев;

«Автоматизированные системы медико-биологического назначения», НИИ нейрокибернетики РГУ, научн.рук. - проф. Г.А. Кураев;

«Очистка воды и стоков», ТПУ, научн.рук. - проф. В.Я. Ушаков;

«Новые медицинские приборы и техника», МГТУ, научн. рук. - проф. В.П. Жаров;

«Рациональные комплексы и технологии для научного приборостроения, медицины, обработки сельхозпродукции», МИФИ, научн. рук. - проф. В.Н. Неволин.

Большие разделы посвящены медицине в программах:

«Университеты России», Генеральный директор программы - д.г.-м.н. В.И. Сергеев, председатель Экспертного Совета *Медицина* - проф. Д.И. Медведев;

«Конверсия научно-технического потенциала вузов», куратор программы - к.т.н.В.В. Иванов.

Головной Совет *Здравоохранение и экология человека* представлял разработки российских вузов на крупнейшей международной выставке «Здравоохранение-93» со стендом «Российские университеты». Большую помощь в организации этой экспозиции оказал Госкомитет РФ по высшему образованию, постоянно поддерживающий Головной Совет в его начинаниях. Неотъемлемая поддержка в подготовке стенда и его успешной работе АО «Аэрофлот - международные авиационные линии». На стенде были представлены наукоемкие технологии и фундаментальные исследования для медицины российских вузов и сотрудничающих с ними организаций, предприятий и фирм. Основу экспозиции составили разработки ученых Российского государственного медицинского университета (РГМУ), Московского, Саратовского, Санкт-Петербургского, Пермского, Ростовского, Казанского, Чувашского государственных университетов, Российского университета дружбы народов, Московского, Саратовского и Казанского государственных технических университетов, Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета, Института авиационной и космической медицины, Государственного научного Центра лазерной медицины, выполненные в соавторстве или при активном участии и поддержке таких институтов и предприятий, как, например, «ГИНАЛМАЗЗОЛОТО», Смоленский авиационный завод, НПО «Алтай», Институт сердечно-сосудистой хирургии им. Бакулева, ЦНИИ стоматологии, НИИ урологии, ЦИТО и др.

Деятельность Головного Совета не замыкается в стенах базовых факультетов и университетов. Стали практикой выездные заседания Президиума

Головного Совета в институтах и университетах, базовых для секций совета. Такие заседания были в Москве - в РУДН, МГУ, РГМУ, ИМБП, в Санкт-Петербурге - в СПбГЭТУ, в Нальчике - в Кабардино-Балкарском госуниверситете.

Головной Совет постоянно держит в поле зрения и такой важнейший вопрос, как постановка экологического образования. Этому, в частности, было посвящено одно из выездных заседаний Президиума Совета на базе экологического факультета РУДН (декан факультета - академик РАЕН Ю.П. Козлов). Группой творческих коллективов медицинских вузов России под руководством чл.-корр. РАМН Ю.П. Пивоварова создана единая межкафедральная программа экологического образования в медицинских вузах. Программа утверждена Минздравом Российской Федерации. Кафедра нормальной физиологии медицинского факультета РУДН подготовила избранные лекции «Экология человека» под редакцией академика РАМН Н.А. Агаджаняна. Учебное пособие предназначено для преподавателей и студентов медицинских и биологических вузов, учащихся лицеев и колледжей, а также школьников, интересующихся вопросами экологии.

Головной Совет принимает активное участие в подготовке и проведении научных конференций. Одна из таких конференций - «Эколого-физиологические проблемы адаптации» - проводилась в апреле 1994 года в Москве. Статьи рубрики «Журнал в журнале» дают представление о части докладов секции «Научоемкие технологии для экологии и медицины» конференции. Это направление охватывает широчайший круг актуальнейших вопросов и проблем фундаментальных наук, технологических разработок, инновационных и поисковых проектов и исследований.

Решение этих важнейших и сложнейших проблем не по силам узким специалистам сколь угодно высокой квалификации. Только объединение усилий физиков, химиков, медиков, биологов, математиков, географов, геологов, инженеров, представителей других наук и профессий может дать качественно новый подход к экологическим проблемам, их осмысление и исследование на новом понятийном уровне, привести к созданию новых научных подходов и методик, развитию новых экологически чистых технологических процессов, подготовке научных, инженерных, педагогических и управленческих кадров с новым экологическим видением окружающего мира, владеющих арсеналом новых научно-технических средств знаний, методик, подходов к решению острейших экологических проблем современности.

Отсюда и такой широкий тематический спектр представленных работ от биотехнологий до физики взрыва, от физических методов в дифференциальной диагностике болезней людей до математических методов анализа физических процессов, происходящих в биологических мембранах, от воздействия физических полей на объекты живой природы до новых информационных технологий, от динамического гомеостаза до нелинейных задач взрывных технологий. Но это не случайный эклектичный набор разрозненных исследований, а отражение (далеко неполное) разнообразия направлений, требующих скоординированных усилий ученых и специалистов самых различных направлений и школ.

Экология человека - вот главное содержание всех научно-исследовательских работ, проводящихся на кафедре нормальной физиологии РУДН под руководством ее заведующего, академика РАМН, Н.А. Агаджаняна. Многолетние исследования в лабораторных и экспедиционных условиях были посвящены изучению эколого-физиологических проблем адаптации. Отсюда и название конференции, организатором и научным руководителем которой уже много лет является академик Н.А. Агаджанян. Естественно, что эти работы были очень широко представлены во всех ее секциях и на пленарных заседаниях. На пленарных заседаниях с докладами выступили ведущие ученые страны - вице-президент РАМН Ф.И. Комаров, академики РАМН Ю.И. Бородин, К.В. Судаков, Ю.А. Романов и др.

Доклады по этой тематике будут опубликованы в специальных номерах журналов «Авиакосмическая и экологическая медицина» и «Физиология

человека». Здесь же публикуется только одна статья Т.Н. Воробьевой «Динамический гомеостаз: равновесие, стационарное состояние, хаос?», посвященная анализу ряда существующих математических моделей, рассматривающих отдельные компоненты механизма общей адаптации, как варианты реализации в организме устойчивых и неустойчивых стационарных состояний и переходов.

Другой подход к этой проблематике содержится в работах ученых Саратовского госуниверситета, выполняемых под руководством чл.-корр. РАН Д.И. Трубецкого. Эти работы были представлены на конференции как на секционном, так и на пленарном заседаниях и были встречены с большим интересом.

Обзорный доклад Д.И. Трубецкого носил характер введения в нелинейную динамику для тех, кто занимается экологией и медициной, но не связан с решением математических проблем в этих науках. Были изложены основные представления о динамическом хаосе и фрактальных свойствах различных объектов. В частности, приводились данные, свидетельствующие в пользу того, что у здорового человека сердечный ритм характеризуется хаосом (широкий частотный спектр; поведению в фазовом пространстве соответствует странный аттрактор). В то же время явление в сердечном ритме четко выраженной периодичности (в спектре имеется резкий пик; в фазовом пространстве - предельный цикл) свидетельствует о заболевании. В докладе были также даны примеры фракталоподобных образований в человеческом организме, имеющих место в структуре кровеносных сосудов и различных протоков, в нервной системе, в дыхательных путях. В качестве примеров экологического хаоса были приведены результаты анализа решений разностного уравнения, соответствующего модели популяций с перекрывающимися поколениями, а также результаты изучения модели «хищник - жертва - пища жертвы». Высказано предположение, что хаотические системы легко адаптируются к различным изменениям потому, что способны работать в широком диапазоне условий часто непредсказуемо меняющейся внешней среды.

В докладе А.А. Кипчатова обсуждались варианты установок, созданных для анализа временных реализаций разной природы (например, кардиограмм и энцефалограмм) методами нелинейной динамики. Было проведено сравнение различных количественных характеристик сложной системы.

Медико-биологическое направление в исследованиях физиков Московского университета (декан физического факультета - проф. В.И. Трухин) развивается давно и успешно. Достаточно перечислить только некоторые из работ последних лет.

Так, учеными кафедры биофизики (зав.кафедрой - проф. В.А.Твердислов) установлено, что внешний постоянный электрический ток, модулированный синусоидальной составляющей, снимает болевые синдромы и прекращает процессы резорбции костей при пародонтозе. На этой основе группой исследователей под руководством д.б.н. Г.Н. Зацепиной и к.ф.-м.н. С.В. Тульского создан прошедший клинические испытания портативный прибор - стационарный электрический стимулятор поля активного остеогенеза. Одному из аспектов работ по этой тематике посвящена статья Г.Н. Зацепиной с соавторами «Развитие методов дифференциальной диагностики болезней людей посредством исследований изменений тонкой структуры постоянного электрического поля по коже человека».

Коллективом исследователей под руководством к.ф.-м.н. Г.Е. Горюнова создана интерактивная система сбора и обработки данных с одновременным опросом до 31 прибора или датчика. Обрабатываемая информация непрерывно отображается в табличном и графическом виде в многооконном режиме с сохранением на диске для дальнейшего использования.

Интересные результаты по математическому моделированию коллективных состояний системы ионных каналов, полученные сотрудниками этой же кафедры, представлены в статье П.С. Иванова и А.А. Бутылина.

На кафедре квантовой радиофизики (зав.кафедрой - академик РАН Л.В.

Келдьш) под руководством д.ф.-м.н. В.И. Панова проводятся работы по созданию и развитию методик использования сканирующего туннельного атомно-силового микроскопа для изучения биологических объектов, макромолекул и манипуляций с молекулами на поверхности. Прибор может быть с успехом использован для исследования топографии и проводящих свойств различных веществ и биологических объектов, таких как мембраны, ДНК, с атомным (нанометровым) пространственным разрешением.

Многоплановые исследования экологической и медико-биологической направленности проводятся в научном центре гидрофизических исследований (директор - Н.Н. Сысоев).

Одно из направлений - исследование физических основ экологически безопасных технологий утилизации боеприпасов и элементов военной и гражданской техники, выполняемое совместно с коллективом ученых из МГТУ им. Н.Э. Баумана под руководством проф. В.С. Соловьева и проф. В.В. Селиванова. Этой теме посвящена представленная ниже статья Ю.И. Кудряшова, В.В. Розанова, Н.Н. Сысоева и Л.Ф. Ускова «Численное исследование нелинейных задач взрывных технологий».

Другое направление - разработка и создание совместно с группой ученых и инженеров из НПО «Алтай» (под руководством зав.лабораторий В.А. Шандакова) твердопливных источников селективных газов (азота, кислорода и водорода). Технологии поверхностного упрочнения сталей, экологически безопасное газовое пожаротушение, различные пневмоприводы, надув спасательных средств, получение дыхательных смесей в полевых и аварийных условиях и т.п. - вот лишь основные пункты из длинного списка возможностей их применения.

И третье направление - исследования по физическим основам технологий гидрорезания. Эти работы ведутся в Центре гидрофизических исследований под руководством директора ЦГИ Н.Н. Сысоева и с.н.с. В.В. Розанова в тесном сотрудничестве с коллегами из Владимира (коллектив под руководством А.Н. Архипова), НПО «Алтай» (зав.лабораторией - В.П. Борочкин), РГМУ (зав.отделом экспериментальной хирургии - проф. И.В. Ступин). Интерес к этому направлению определяется, как и в предыдущем направлении, широкими возможностями применения - от станков с ЧПУ, способных резать струей воды материалы практически любой твердости, до гидроскальпеля. Особое место в этих работах занимает создание автономной портативной гидрорежущей установки.

В целом ряде научных коллективов на различных кафедрах ведутся работы по изучению воздействия физических полей различной природы на биологические объекты и структуры. В настоящем журнале эти исследования представлены статьей А.И. Акимова, А.Н. Баранова и А.М. Салецкого «Влияние слабых магнитных полей на рост и фотосинтетическую активность листьев бобов». Этот научный коллектив уже давно работает над проблемами, связанными с водой, а также воздействием на нее физических полей. На конференции «Эколого-физиологические проблемы адаптации» этой тематике было посвящено несколько докладов. Но, по-видимому, тема исследования воды как физической субстанции, как объекта внешних воздействий, как важнейшей составляющей биологических тканей, ее строения, свойств, взаимодействий достойна стать предметом особого разговора в специально посвященном этой теме номере журнала.

Широко представлены эти работы и на кафедре гигиены и экологии РГМУ (зав.кафедрой - чл.-корр. РАМН Ю.П. Пивоваров). В настоящем выпуске отражено другое не менее важное направление исследований этого коллектива - биотехнология. Статья Ю.П. Пивоварова и В.В. Королика «Современное состояние вопроса о гигиеническом регламентировании биотехнологических штаммов в объектах окружающей среды» посвящена научно обоснованному гигиеническому регламентированию содержания биотехнологических штаммов в окружающей среде. В условиях все возрастающей антропогенной нагрузки на окружающую среду актуальность таких исследований невозможно переоценить.

Интереснейшие работы проводятся сотрудниками Московского специализированного (по медицинским специальностям) Центра новых информационных технологий, работающего под руководством к.ф.-м.н. М.Г. Крейнса на базе Московской медицинской академии им. И.М. Сеченова. Одна из последних

разработок центра - уже используемый в учебном процессе в Московской медицинской академии медицинский диагностический тренажер, созданный на базе оригинальной математической модели медицинского знания, диагностических методов и эффективной стратегии диагностики. Идеология, положенная в основу такого подхода, изложена ниже в статье М.Г. Крейнса «Моделирующие системы представления знаний для задач классификации - новая информационная технология для работы с плохо формализованными знаниями».

Среди ближайших планов Головного Совета - участие в организации научной конференции «Образ жизни и здоровье студентов», которая будет проведена 24-25 октября сего года в Москве на базе РУДН. Научная программа конференции включает в себя работу по трем секциям: «Медико-социальные проблемы студенческой семьи», «Экология, адаптация и здоровье студентов», «Образ жизни студентов». На очереди - новые выездные заседания, экспертизы, конференции, выставки.

Головной Совет *Здравоохранение и экология человека* Государственного комитета Российской Федерации по высшему образованию приглашает государственные и общественные организации, научно-исследовательские учреждения и специализированные фирмы, разработчиков и потребителей, спонсоров и коммерсантов к всестороннему сотрудничеству в самой необходимой, самой гуманной сфере человеческой деятельности - **здравоохранение и экология человека**.

Москва
март 1995

Редактор рубрики председатель
Головного Совета, академик РАМН

Н.А. Агаджанян

Заместитель председателя Головного Совета, с.н.с.

В.В. Розанов



Агаджанян Николай Александрович - родился в 1928 году. После окончания медицинского института (1951) и учебы в аспирантуре в Институте физиологии АМН СССР работал в Институте авиационной и космической медицины, в Институте медико-биологических проблем. С 1981 года заведует кафедрой нормальной физиологии Российского университета дружбы народов. Доктор медицинских наук, профессор РУДН, академик РАМН, действительный член Международной академии астронавтики, Международной академии наук, экологической академии России и ряда других академий. Много лет занимается проблемами экстремальной физиологии, адаптации организма, в том числе, к экстремальным условиям и в аварийных ситуациях, медицинского обеспечения космических полетов. Опубликовал более 400 печатных работ, в том числе монографии «Организм и газовая среда обитания», «Горы и резистентность организма», «Медицина и космос»,

«Биологические ритмы», а также книги «Резервы нашего организма», «Сквозь тернии к звездам», «Человеку жить всюду», «Зерно жизни». Возглавляет Головной Совет *Здравоохранение и экология человека* Госкомитета РФ по высшему образованию, Проблемную комиссию «Эколого-физиологические проблемы адаптации» научного совета РАМН, секцию «Экология человека» научного совета РАН по проблемам биосферы. Является членом редакционных советов журналов «Экология человека», «Авиакосмическая и экологическая медицина» и др.



Розанов Владимир Викторович - родился в 1950 году, окончил физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (1973), где и работает по настоящее время. Защитил диссертацию на соискание кандидата физико-математических наук в МГУ (1985) в области геофизической гидродинамики и волновых процессов, старший научный сотрудник МГУ, зам. директора Центра гидрофизических исследований. Область научных интересов - геофизика, гидродинамика, биофизика, экология. Опубликовал в соавторстве более 30 научных статей по этим направлениям.



РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ БОЛЕЗНЕЙ ЛЮДЕЙ ПОСРЕДСТВОМ ИССЛЕДОВАНИЙ ИЗМЕНЕНИЙ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПО КОЖЕ ЧЕЛОВЕКА

Г.Н. Зацепина, Н.Н. Горюнов, С.В. Тульский, Д.К. Мальшев, Т.О. Елисеева

В данной работе предлагается новый неинвазивный метод диагностики болезней человека на основании данных о различном изменении тонкой структуры постоянного электрического поля человека при разных заболеваниях. Под тонкой структурой постоянного электрического поля человека подразумевается распределение по коже человека разностей электрических потенциалов, измеренных неполяризуемыми $Ag/AgCl$ электродами относительно одной референтной точки, расположенной на шее в районе пересечения трапецевидной и ключично-сосковой мышц. В качестве измерительных точек, при разработке метода диагностики ряда болезней глаз используются две точки под глазами, две точки сбоку глаз, на козелках ушей и две точки в уголках ногтевого ложа на четвертом пальце обеих рук. Возможности метода демонстрируются на примере изменения тонкой структуры постоянного электрического поля при ряде заболеваний глаз. Предлагается метод лечения болезней с помощью компенсации изменений тонкой структуры постоянного электрического поля внешним источником тока с нужными параметрами. Теоретические и экспериментальные основы развиваемого метода изложены в монографии: «Электрическая система регуляции процессов жизнедеятельности». Москва: МГУ, 1992.

Еще в работах Клода Бернара было сформулировано условие необходимое для перехода организма от простой адаптации к активной регуляции процессов жизнедеятельности. Это условие базируется на тесном взаимодействии организма и внешней среды и обусловленной ею стабилизации ряда физико-химических параметров гомеостаза внутренней среды живого организма.

Однако, до сих пор еще распространено представление о том, что основными регуляторами процессов жизнедеятельности организма млекопитающего служат эндокринная система и вегетативно-нервный аппарат. Обе перечисленные выше системы как в онтогенезе, так и в филогенезе возникают лишь на определенном этапе развития организма под управлением более древней системы регуляции процессов жизнедеятельности - электрической системы регуляции.

Под электрической системой регуляции процессов жизнедеятельности, мы понимаем (Г.Н. Зацепина и др.) систему распределения разностей электрических потенциалов по коже - по базальной системе млекопитающих - измеряемую относительно одной референтной точки неполяризуемыми электродами с помощью высокоомной измерительной системы ($R_{вх} = 100 \text{ Мом}$).

Активным параметром электрической системы регуляции процессов жизнедеятельности служит средний мембранный потенциал (МП) каждой клетки многоклеточного организма млекопитающего. Функциональные различия клеток организма млекопитающего обуславливают различные значения МП и распределение разностей электрических потенциалов (РЭП) по базальной системе. При разных заболеваниях организма млекопитающего различно изменяется и электрическая система регуляции процессов его жизнедеятельности, изменяется распределение РЭП по коже человека.

Сопоставления изменений распределения РЭП по коже здорового человека и изменение распределения РЭП при разных его заболеваниях позволяет разработать неинвазивный метод дифференциальной диагностики самых разных болезней и метод последующего их лечения посредством компенсации, с помощью внешнего генератора тока, нарушений распределений РЭП, обусловленных болезнью.

Проанализируем возможности предлагаемого метода диагностики на примере изменения РЭП в случае развития трех разных глазных болезней: неврита зрительного нерва, глаукомы и зрелой старческой катаракты с показанием к удалению хрусталика.

Эксперименты были выполнены в 13 глазном отделении 15-ой Городской клинической больницы при участии доктора Т.О. Елисейевой. Деление больных на группы осуществляли на основании обычного клинического диагноза. Возраст больных варьировал от 20 до 80 лет.

РЭП каждого больного измеряли в течение 20-ти дней в определенное для каждого больного время суток (от 9 до 16 часов). Помимо трех групп больных людей, измеряли РЭП здоровых людей в течение тех же 20 дней: двух мужчин и двух женщин.

С целью разработки метода дифференциальной диагностики перечисленных заболеваний записывали распределение РЭП от четырех измерительных точек относительно референтной, расположенной на шее, в месте пресечения трапецевидной и ключично-сосковой мышц. Две измерительные точки были выбраны на лице, около глаз, третья - на четвертом пальце обеих рук в уголках ногтевого ложа, а четвертая - на козелках ушей. Расположение точек схематично показано на рисунке.

Разность электрических потенциалов между измерительными точками и референтной отводили с поверхности кожи, посредством неполяризующихся $Ag/AgCl$ электродов, через каплю электропроводного геля. Для каждой точки находили общее среднее значение по всем измерениям и среднеквадратичное отклонение от среднего. Полученные результаты для средних значений РЭП между исследуемыми точками для здоровых мужчин и больных, перечисленными выше болезнями, представлены в таблице. Как видно из данных, представленных в таблице, имеют место существенные нарушения тонкой структуры распределения РЭП по коже людей в случаях перечисленных выше заболеваний зрительной системы.

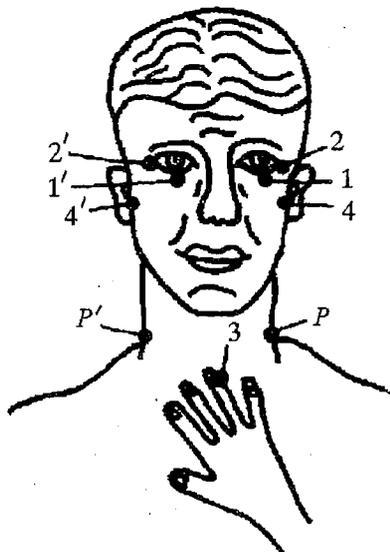


Рис. Места расположения измерительных электродов на лице и руке и позиция референтного электрода на шее человека

Таблица

Состояние организма и положение электродов	Значения РЭП, мВ			
	Места расположения измерительных точек			
	под глазом	сбоку глаза	козелок уха	ногтевое ложе
Здоровые женщины левое положение	+ 9.0	+ 5.5	+ 3.1	-12.5
Здоровые женщины правое положение	+ 6.6	+ 1.8	- 0.8	-14.9
Здоровые мужчины левое положение	+ 8.8	+ 3.7	- 1.4	-18.6
Здоровые мужчины правое положение	+ 5.6	- 1.4	- 7.7	-22.3
Глаукома у женщины больной глаз	+ 7.5	+ 14.4	+ 4.2	-26.0
Глаукома у женщины здоровый глаз	+ 7.0	+ 7.2	+ 2.3	-22.0
Глаукома у мужчины больной глаз	+ 10.1	+ 12.7	+ 3.0	-27.0
Глаукома у мужчины здоровый глаз	+ 8.4	+ 13.3	+ 3.1	- 29.0
Неврит зрительного нерва	- 6.1	- 19.0	- 27.4	- 36.7
Старческая катаракта	+ 15.0	+ 7.5	+ 5.0	- 5.0

Старческая катаракта. Как видно из представленных данных, в случае заболевания старческой катарактой все значения РЭП между рукой и шеей смещены в область более положительных значений по сравнению с теми же характеристиками здоровых людей.

Согласно нашим результатам, полученным ранее, смещение значений РЭП в область более положительных значений свидетельствует о снижении уровня метаболических процессов в организме, что по-видимому имеет место и при старческой катаракте. В связи с этим, основной метод предупреждения болезни и борьбы с ней состоит в активировании процессов общего метаболизма до среднего уровня здорового человека.

Глаукома. Глаукома представляет собой заболевание, которое характеризуется постоянным или периодическим повышением внутриглазного давления с последующей атрофией зрительного нерва. Как видно из таблицы, в этом случае значения РЭП для точек лица сдвигаются глубже в положительную область, по сравнению со значениями РЭП тех же точек здоровых людей, а значения РЭП на пальцах сдвигаются глубже в область отрицательных значений по сравнению с РЭП здоровых людей. Согласно нашим общим представлениям об изменении тонкой структуры РЭП в разных патологических случаях, такое изменение РЭП свидетельствует об увеличении активности процессов резорбции в поврежденном органе, при увеличении общего метаболизма, направленного на борьбу организма с болезнью.

Токсический неврит зрительного нерва. В таблице представлены результаты изменения РЭП при токсическом неврите зрительного нерва, вызванного отравлением людей метиловым спиртом. Стандартное лечение таких больных не привело к положительным результатам. Как видно из таблицы, все измеренные значения РЭП смещены в этом случае в область более отрицательных значений относительно РЭП здоровых людей. По нашим данным такое изменение тонкой структуры РЭП может быть обусловлено активно идущими воспалительными процессами в окрестности больного органа и усилением метаболических процессов организма в целом. В случае токсических невритов нами были обнаружены периодические изменения РЭП с частотами близкими к 0.2 и 1 Гц, которые часто наблюдаются в случаях острых воспалений.

Выводы. На основании представленных в таблице экспериментальных результатов для средних значений РЭП ряда измерительных точек по коже здоровых людей и людей с рядом заболеваний зрительной системы можно сделать следующие выводы.

1. Исследование изменений тонкой структуры РЭП ряда точек по коже лица человека позволяет осуществить дифференциальную диагностику трех разных глазных болезней.

2. Согласно выполненным исследованиям по выяснению управляющей роли электрической системы регуляции процессов жизнедеятельности возможен оптимальный физиологический способ лечения перечисленных выше болезней посредством компенсации изменений собственного постоянного электрического поля организма, обусловленных болезнью, с помощью внешнего генератора ЭДС с нужными характеристиками.

3. Представляет интерес полученный результат увеличения общего метаболизма организма при всех заболеваниях кроме старческой катаракты.

Заключение. В данном сообщении продемонстрирована работа метода дифференциальной диагностики на примере ряда болезней глаз. К настоящему моменту авторами накоплен экспериментальный материал и по диагностике разных стадий пародонтоза без сопутствующих и при ряде сопутствующих заболеваний. Во всех исследованных авторами случаях метод дифференциальной диагностики заболеваний глаз и пародонтоза по изменению тонкой структуры постоянного электрического поля работает. Помимо возможностей диагностики, полученные результаты позволяют сделать заключения об активности метаболических процессов в больном организме, или, другими словами, дают возможность сделать оценку активности организма - его жизнеспособности.

*Московский государственный
университет*

*Поступила в редакцию 1.12.94
после переработки 13.12.95*

MEASURING OF THE CONSTANT ELECTRIC FIELD FINE STRUCTURE CHANGES AS A METHOD FOR THE DIFFERENTIAL DIAGNOSTIC OF DIFFERENT DISEASES

G.N. Zatsepina, S.V. Tylskii, N.N. Gorynov, D.K. Malyshev, T.O. Yeliseeva

We investigated the natural constant electric field of a healthy person and its change in the different eye pathology. The electric potential difference (EPD) was measured between the few points on the face and one point on the hand relative one point situated on the neck. It was shown that EPD of the healthy humans and its deviations in different pathology states give the basis for development of the new method - differential diagnostic of different diseases.



Зацепина Галина Николаевна - окончила физический факультет МГУ (1950). Работала в ФИАН СССР в качестве младшего научного сотрудника (1950-60). В 1960 году перешла на вновь образованную кафедру биофизики на физическом факультете МГУ в качестве ассистента. Защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности биофизика (1971). Защитила диссертацию на степень доктора биологических наук по специальности биофизика (1993). Научные интересы: электрическая система регуляции процессов жизнедеятельности и роли воды в биологических процессах. Имеет две монографии по физическим свойствам и структуре воды; одну монографию с группой соавторов по исследованию электрической системы регуляции процессов жизнедеятельности; более 70 публикаций в периодической печати. В данный момент занимается развитием метода дифференциальной диагностики болезней человека на основе полученных ею результатов о различном

изменении тонкой структуры постоянного электрического поля человека при разных заболеваниях и ролью воды в этих процессах.



Тульский Сергей Васильевич - родился в Москве (1936), окончил физический факультет МГУ (1960). После окончания поступил в аспирантуру на кафедру биофизики, защитил диссертацию на тему «Спектры пьезоэлектрического резонанса некоторых биологически важных веществ» (1966). Ассистент кафедры биофизики физического факультета МГУ (1963), старший научный сотрудник кафедры биофизики (1968), доцент кафедры биофизики (1985). Область научных интересов - применение электроники в биофизике и изучение принципа функционирования электрической системы регуляции процессов жизнедеятельности. Опубликовал много научных статей по указанным выше проблемам и две монографии.



Горюнов Николай Николаевич - родился в Москве (1931), окончил физический факультет МГУ (1954). После окончания работал в НИАФ МГУ и защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в области электроники (1960). Работал в НИИ по исследованию и разработке полупроводниковых приборов и интегральных схем (1960-1978). С 1978 года - профессор кафедры полупроводниковой электроники и физики полупроводников МИСИС. Опубликовал много научных статей и три монографии по исследованию свойств полупроводниковых приборов.



НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОЛЛЕКТИВНЫХ СОСТОЯНИЙ СИСТЕМЫ ИОННЫХ КАНАЛОВ

П.С. Иванов, А.А. Бутылин

Рассмотрена проблема выявления устойчивых состояний проводимости ансамбля грамицидиновых ионных каналов, встроенных в бислойную липидную мембрану, и показана необходимость использования несостоятельных оценок плотности распределения при наличии в системе двухуровневой иерархии случайных процессов с близкими характерными временами. Предложен и обоснован непараметрический подход к анализу гистограмм флуктуаций проводимости мембраны. Разложение гистограмм по ортогональному базису функций и применение метода главных компонент позволило исследовать блуждания образа системы в признаковом пространстве и оценить времена устойчивости ее состояний, равные 1-2, 5 и 9 с. Высказана гипотеза о возможном механизме взаимодействия грамицидиновых димеров в мембране, связанном с локальной деформацией бислоя вблизи открытого канала. Обсуждаются перспективы применения использованных статистических процедур при исследовании кооперативных процессов в других биологических системах.

При анализе коллективных эффектов в биологии наибольший интерес представляют системы, в которых функционирование элементарных структурных единиц носит случайный характер, а кооперативность является следствием их взаимодействия. Если, в свою очередь, образование «кластеров» из отдельных единиц тоже подчиняется вероятностным законам, то кооперативность в их поведении приводит к появлению в изучаемой системе иерархии (по крайней мере, двухуровневой) случайных процессов.

При отсутствии периодических процессов в системе применение спектральных методов анализа к временным рядам флуктуаций ее измеряемой характеристики становится неэффективным, а для выявления устойчивых состояний вместо самих временных рядов можно использовать гистограммы, построенные по их фрагментам. На практике встречаются ситуации, когда характерные времена существования коллективных состояний несильно (например, не больше чем на порядок) превосходят времена, описывающие функционирование отдельных единиц. В этом случае для одновременного изучения процессов, относящихся к близким временным диапазонам, длительность накопления одной гистограммы необходимо выбрать не превосходящей наименьшего из характерных времен системы. Описанная ситуация является типичной для функционирования ион-транспортующих систем [1]. В качестве экспериментальной модели катион-селективных клеточных ионных пор в данной работе выбраны грамицидиновые каналы, встроенные в бислойную липидную мембрану (БЛМ).

В группе каналоформеров полипептидной и небелковой природы грамицидиновый канал является наиболее детально изученной системой с известной молекулярной структурой и основными физико-химическими характеристиками [2,3]. Большая часть данных о строении и функционировании этих каналов была получена в экспериментах на одиночных порах. В то же время работы, относящиеся к особенностям функционирования ансамбля каналоформеров, сравнительно редки, поскольку долгое время (под влиянием классического исследования Хладки и Хэйдона [4]) считалось, что работа отдельных грамицидиновых каналов в БЛМ подчиняется принципу вероятностной независимости.

Вопрос о существовании коллективных эффектов в ансамбле каналов стал серьезно обсуждаться в 80-е годы, когда при исследовании липидных дисперсных смесей, содержащих молекулы грамицидина, было обнаружено существование агрегатов из молекул антибиотика [5]. Правильные двумерные периодические структуры из грамицидиновых гексамеров наблюдались и в экспериментах с замораживанием/скальванием везикул со встроенными каналами [6]. Возможность кластеризации молекул грамицидина в плоской БЛМ рассмотрена в работе [7], авторы которой на основании результатов релаксационных экспериментов высказали гипотезу о существовании грамицидиновых тетрамеров и олигомеров более высокого порядка. Очевидно, что непосредственные свидетельства в пользу кооперативного функционирования грамицидиновых пор могут быть получены при анализе флуктуаций проводимости ансамбля каналов в БЛМ.

Очевидно, что едва ли не единственным свидетельством в пользу коллективного поведения ансамбля каналов является наличие множества выделенных уровней проводимости системы, которое сохраняется неизменным на определенных временах (среднее значение проводимости при фиксированном числе ионных пор остается постоянным практически на всем протяжении эксперимента). Для обнаружения подобного «спектра» уровней при построении экспериментальных оценок плотности распределения проводимости (гистограмм) приходится производить довольно мелкое разбиение диапазона возможных её значений на отдельные интервалы, а существование по крайней мере двух слабо различающихся характерных времен функционирования системы (априорное предположение, основанное на известной молекулярной картине работы грамицидинового канала) заставляет ограничиться малыми периодами накопления. В результате получаемые гистограммы будут являться несостоятельными оценками плотности распределения [8]. Вследствие этого при их анализе параметрические методы, предполагающие заданность семейства распределений исследуемой случайной величины или построенной для нее статистики, приходится оставить в стороне и обратиться к непараметрическим статистическим процедурам.

Воспроизводимость форм гистограмм величин проводимости БЛМ на ограниченных временных интервалах можно трактовать как нахождение этой системы в определенном состоянии. Несмотря на феноменологический характер такого определения, анализ устойчивости и эволюции форм несостоятельных оценок плотности распределения позволяет оценить характерные времена нахождения системы в различных состояниях, а на их основе - высказать определенные гипотезы о механизмах, обеспечивающих кооперативное поведение её функциональных элементов.

Материалы и методы

Бислойные мембраны формировали по методу Мюллера и др. [9] из растворенного в *n*-гептане и *n*-декане азолектина (SIGMA) на отверстии диаметром 0.5 мм в тефлоновой кювете. В качестве электролита использовался 0.1 М KCl (х.ч.). Каналы в БЛМ формировали путем естественного встраивания молекул грамицидина А, В и С (Boehringer Mannheim). Опыты проводили при

комнатной температуре. В связи с необходимостью установления равновесия между процессами встраивания и десорбции грамицидиновых молекул регистрацию флуктуаций ионного тока через мембрану при поданном постоянном напряжении начинали не раньше, чем через 35-40 минут после добавления грамицидина.

Флуктуации мембранной проводимости исследовали при наложении на мембрану постоянного напряжения в диапазоне 10-100 мВ от гальванического элемента. В качестве предусилителя использовали операционный усилитель постоянного тока Keithley-427 (максимальный коэффициент усиления 10^{11} В/А). Верхняя частота среза фильтра в разных опытах составляла 30 или 100 Гц. Для подавления 50 - герцевых наводок применяли заградительный активный фильтр на 40 дБ.

Для регистрации флуктуаций проводимости БЛМ со встроенными грамицидиновыми каналами установка была сопряжена с персональным компьютером IBM PC286 через АЦП Ф7077/2 (собственное время преобразования 3 мкс). Для повышения разрешающей способности регистрирующей аппаратуры осуществляли сдвиг стационарного среднего значения напряжения, снимаемого с усилителя, до нулевой величины и последующее усиление сигнала до максимального использования входного диапазона АЦП. Перед началом количественного анализа временных рядов в случае необходимости проводили дополнительную фильтрацию при помощи цифрового синусного фильтра низких частот Баттеруорта.

Построение гистограмм по временным рядам флуктуаций проводимости и их непараметрический анализ проводился на компьютере IBM PC386 с использованием программного обеспечения, разработанного одним из авторов совместно с Н.Г. Ирошниковым.

Статистический анализ состояний ансамбля грамицидиновых каналов

Основным математическим объектом для количественного анализа являлись несостоятельные гистограммы амплитуд флуктуаций проводимости БЛМ со встроенными грамицидиновыми каналами. Каждая гистограмма формировалась по 100 или 200 последовательным точкам временного ряда, что соответствовало суммарному времени ее накопления 0.5-1.0 с в зависимости от частоты оцифровки. Для выявления характерных времен системы использовались гистограммы, построенные как по соседним, так и по перекрывающимся частям временного ряда, а также по частям, разделенным некоторым промежутком времени.

Формально компоненты гистограммной оценки плотности вероятности $\hat{p}(x)$ могут быть записаны в виде

$$p_l^{\wedge}(x) = \frac{1}{nV_l} \sum_{i=1}^n v_l(x_i), \quad l = 1, \dots, m, \quad (1)$$

где $x = (x_1, \dots, x_n)$ - выборка объема n , $v_l(x_i) = 1$ при $x_i \in I_l$ и $v_l(x_i) = 0$ в противном случае; m - число интервалов группирования данных; I_l - l -й интервал группирования; V_l - длина этого интервала.

Оценка $\hat{p}(x)$ теряет свойство состоятельности, как только количество интервалов m группирования выбирается того же порядка, что и объем выборки, в противоположность традиционным рекомендациям типа [10]

$$0.7n^{0.4} \leq m \leq 1.25n^{0.4}. \quad (2)$$

В этом случае форма выборочного распределения имеет мало общего с предполагаемой гладкой кривой функции плотности (как правило,

одномодалной), а характеризуется появлением некоторого числа хорошо разрешенных максимумов и минимумов. При построении гистограмм по экспериментальным данным число интервалов группирования находилось в диапазоне 25-50. Конкретное значение выбиралось ближайшим к программно заданной величине, так чтобы ширина разряда оставалась кратной разрешающей способности АЦП по амплитуде.

Для исследования вопроса о наличии устойчивых состояний ансамбля каналов и оценки средних времен нахождения системы в этих состояниях каждой гистограмме был поставлен в соответствие вектор (точка) в пространстве признаков небольшой размерности. В результате эволюцию во времени формы распределения анализировали по движению изображающей точки в признаковом пространстве. Главным критерием при построении пространства признаков является сохранение максимума информации об особенностях формы гистограмм.

Достаточно информативным методом параметризации оценки плотности является ее разложение по некоторому базису функций, в качестве которого может выступать система ортогональных полиномов. В данном случае для анализа состояний ансамбля каналов использовалось разложение по системе тригонометрических функций, что на вероятностном языке соответствует выборочному оцениванию характеристической функции случайной величины

$$Y_k = \Delta x \sum_{l=0}^{m-1} y_l \exp(-j \frac{2\pi}{m} lk), \quad (3)$$

где y_l - ординаты гистограммы, m - их число, Δx - шаг по оси абсцисс, k изменяется от 0 до $[m/2]$, $j^2 = -1$. Вектор признаков формировался из нескольких первых коэффициентов Фурье Y_k , получаемое признаковое пространство имело размерность от 6 до 9 в разных случаях.

Случайные блуждания образа гистограммы в признаковом пространстве исследовали при помощи координаты вдоль траектории $s(t)$ в евклидовой метрике. Число измерений и процедуры построения и параметризации были одинаковыми для всей совокупности анализировавшихся гистограмм. Производная натуральной координаты по времени

$$s(t) = [s(t+\tau) - s(t)]/\tau = \left[\sum_{k=1}^q (Y_k(t+\tau) - Y_k(t))^2 \right]^{1/2}/\tau \quad (4)$$

(где q - размерность признакового пространства, τ - сдвиг между двумя соседними частями ряда, по которым строятся гистограммы, t - время начала записи таких частей, то есть текущее время в эксперименте) позволяет судить о скорости случайных блужданий изображающей точки.

Типичная зависимость $s(t)$ представлена на рис. 1, а. Хаотический вид функции $s(t)$ для гистограмм, построенных по соседним участкам временного ряда, заставил обратиться к «зависимым» гистограммам, порождаемым частично перекрывающимися выборками. Степень зависимости определялась отношением τ/T , где T - время дискретизации случайного сигнала. Как видно из рис. 1, переход к «зависимым» гистограммам позволяет исследовать случайные блуждания в признаковом пространстве с большим временным разрешением и обнаружить периоды устойчивости формы распределений на временах, больших времени накопления одной гистограммы.

Количественное оценивание времен устойчивости проводилось по автокорреляционной функции $C_{ss}(\tau)$ для производной $s(t)$. Типичные зависимости для $C_{ss}(\tau)$ вместе с 5%-ной доверительной полосой показаны на рис. 2, иллюстрирующем достоверное отличие значений автокорреляционной функции от нуля. В результате оценивания $C_{ss}(t)$ для нескольких временных рядов при разных частотах оцифровки входного сигнала (2 - 200 Гц) были получены три времени, характеризующих протекание процессов в исследуемой системе: 1-2, 5 и 9 с.

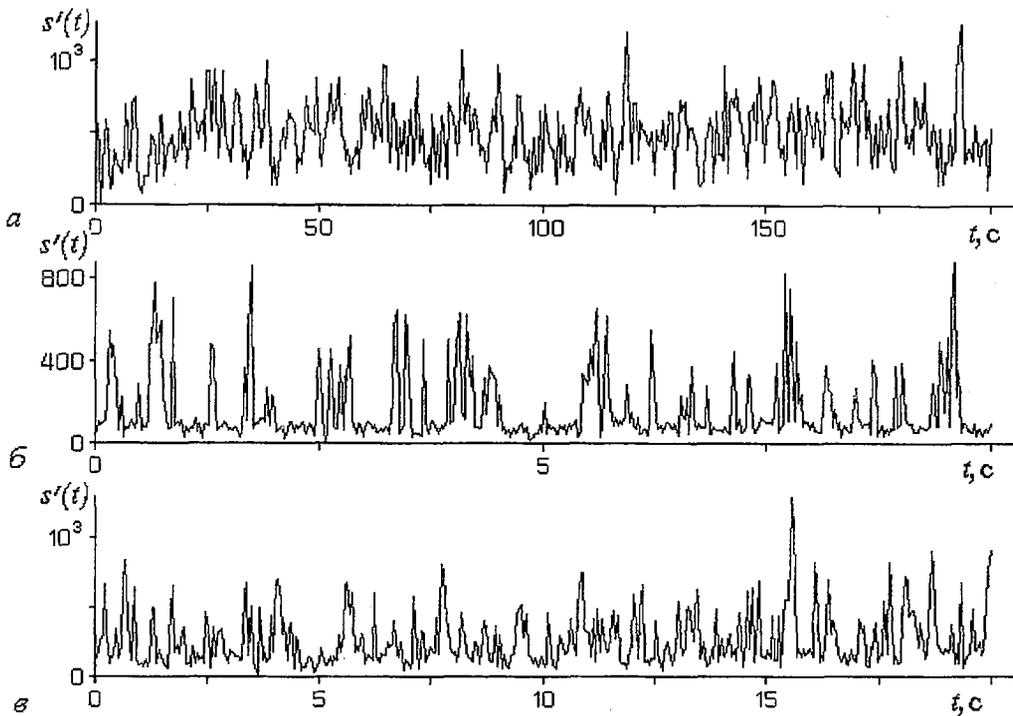


Рис. 1. Изменения производной от натуральной координаты во времени при $\tau = NT$ (а), $\tau = 5T$ (б) и $\tau = 10T$ (в). В каждой гистограмме $N = 100$ измерений. Размерность признакового пространства равна 8. Частота оцифровки $1/T = 200$ Гц

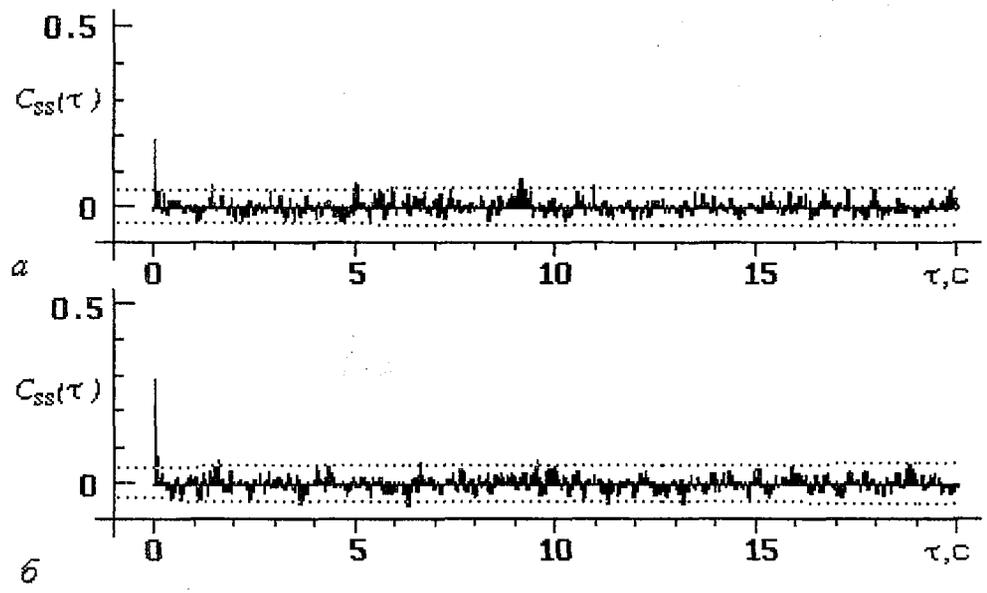


Рис. 2. Примеры автокорреляционных функций для производной от натуральной координаты и зависимых гистограмм: а - частота оцифровки 20 Гц; б - частота оцифровки 200 Гц, частота среза фильтра 30 Гц. Потенциал на мембране - 50 мВ, среднее число одновременно открытых каналов - 65. В гистограммах по 100 измерений, для формирования признакового пространства использованы коэффициенты разложения Фурье от 1-го до 8-го. Приведенные фрагменты получены на разных временных рядах. Показана 5%-ая доверительная полоса для ненулевых значений автокорреляционной функции

Использование величины $s(t)$ не позволяет определить истинный характер блужданий образа гистограммы в признаковом пространстве. Временные интервалы, соответствующие малым значениям производной $s(t)$ и достоверно выявленные при $\tau < NT$, могут отвечать либо «дрожаниям» около некоторого центра (тогда всплески на графиках $s(t)$ должны означать смену локальной области устойчивости), либо медленному движению (эволюции) вдоль некоторого направления (локальные области устойчивости при этом могут вообще отсутствовать).

Для внесения большей определенности в картину блужданий была проведена визуализация траекторий системы в признаковом пространстве методом главных компонент [11]. Алгоритм главных компонент сводится к такому линейному ортогональному преобразованию координат признакового пространства, что в новых координатах рассеяние данных вдоль k -ой оси оказывается больше рассеяния вдоль $(k+1)$ -ой. В случае, когда первые три главные компоненты объясняют значительную долю дисперсии исходных данных, ограничение анализа соответствующим трехмерным подпространством не приведет к заметной потере информации. Для анализа устойчивости и эволюционирования типов несостоятельных распределений использование трех главных компонент было вполне достаточным: доля объясненной дисперсии обычно превосходила 70%.

На рис. 3 представлена типичная траектория изображающей точки в подпространстве трех главных компонент (z_1, z_2, z_3) для массива из 140 «зависимых» гистограмм. Отчетливо проявляются пространственные структуры, соответствующие разным типам формы распределения (обведены сплошными линиями). Анализ траектории показывает, что указанные области отвечают устойчивым состояниям системы: вместо беспорядочных скачков между областями наблюдается продолжительная локализация в каждой из них. При этом на основе проведенного анализа можно утверждать, что с большой вероятностью и во все промежуточные моменты времени траектория находится в пределах данной локальной области. Медленные блуждания системы в признаковом пространстве наблюдаются и в области центрального скопления, а единичные скачкообразные перемещения соответствуют переходам между устойчивыми состояниями. Кроме того, в подпространстве главных компонент отчетливо видны возвращения системы в данное состояние. На рис. 4 показаны типичные представители гистограмм, попавших в разные области признакового

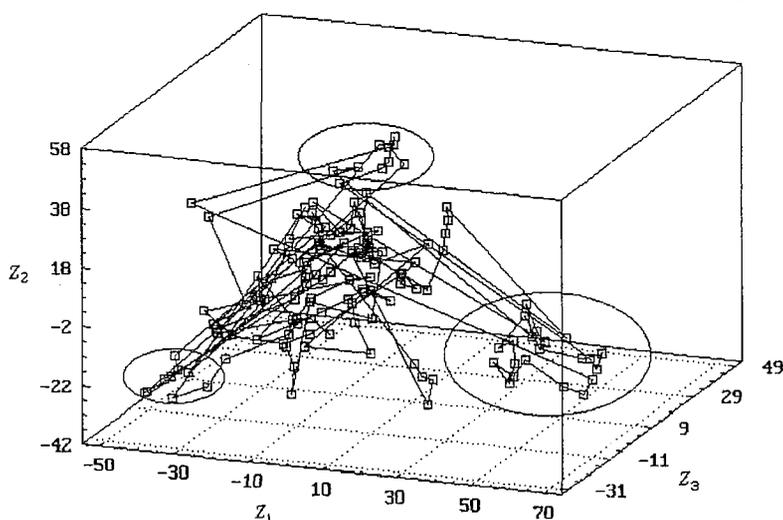


Рис. 3. Траектория для 140 зависимых гистограмм в подпространстве первых трех главных компонент. Параметры гистограмм - как на рис. 2, б. Сплошными линиями обведены локальные области, отвечающие устойчивым состояниям ансамбля каналов

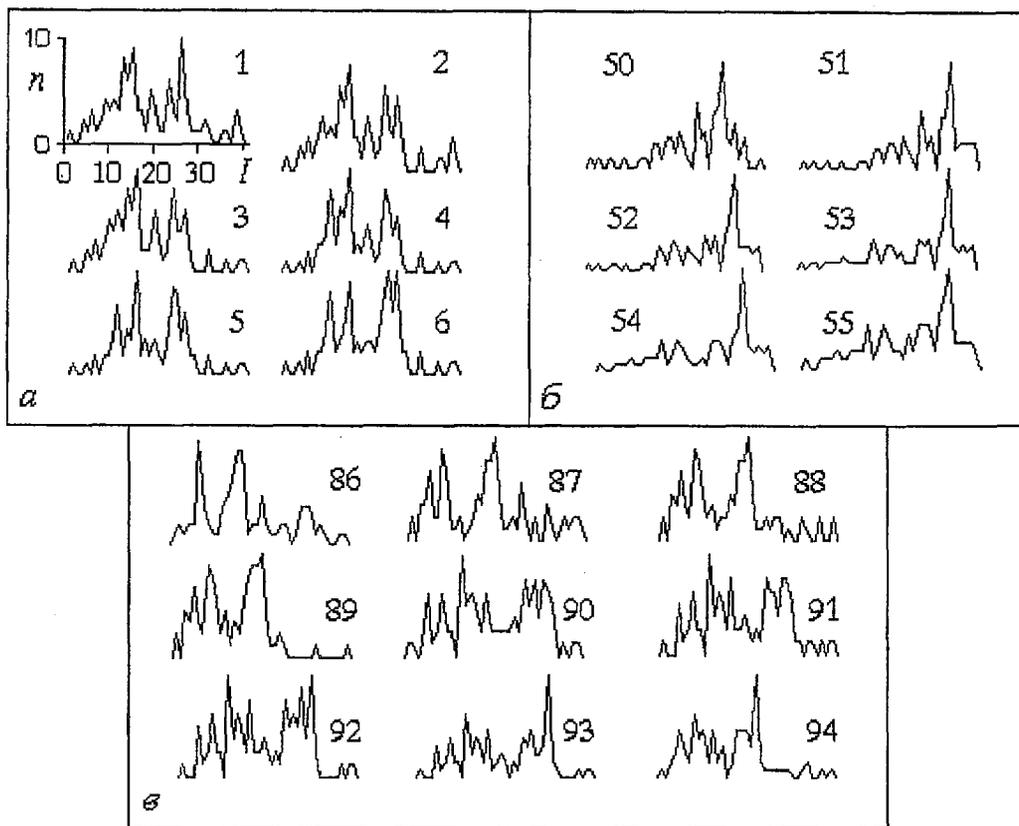


Рис. 4. Типичные представители разных типов формы для совокупности зависимых гистограмм, соответствующих блужданиям системы в подпространстве главных компонент (рис. 3). Фрагменты а-в отвечают трем пространственным областям устойчивости. Номера гистограмм соответствуют разным положениям изображающей точки на траектории. Один разряд гистограммы равен 0.78 пА. Экспериментальные параметры - как на рис. 2,б

пространства. Визуализация данных в подпространстве главных компонент позволила непосредственно оценить времена жизни устойчивых состояний по продолжительности пребывания образа гистограммы в локальных областях признакового пространства. Полученные таким методом значения оказались близки к величинам, найденным по автокорреляционной функции $C_{ss}(t)$, причем меньшие времена (1-2 и 4-5 с) наблюдались чаще.

Обсуждение

Обнаружение времен устойчивости состояний ансамбля грамицидиновых каналов, достоверно превосходящих среднее время жизни одиночной поры в проводящем состоянии, можно рассматривать как указание на наличие кооперативности в их функционировании. Конкретный механизм синхронизации процессов открывания/закрывания грамицидиновых каналов в бислое на сегодняшний день неизвестен. Авторами [6] предложена модель взаимодействия аминокислотных остатков, расположенных на углах треугольной (в поперечном сечении) молекулы грамицидина. В таком случае грамицидиновый кластер оптимального размера может состоять из шести отдельных проводящих единиц.

Наличие нескольких времен жизни устойчивых состояний ансамбля каналов позволяет предположить существование кластеров с разным числом грамицидиновых димеров. При этом модель, исходящая из наличия ван-дер-ваальсового взаимодействия между отдельными молекулами каналоформера, не является единственно возможной.

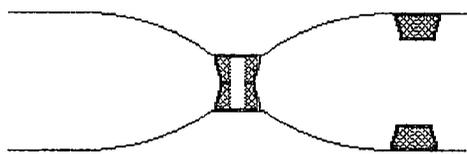


Рис. 5. Деформация бислоя вблизи грамицидинового канала в проводящем состоянии

локальному уменьшению толщины мембраны вблизи соседней поры. В результате переход в проводящее состояние одного из каналов может повлиять на открывание соседних (одной или нескольких) близко расположенных пор, причем степень такого влияния должна зависеть от расстояния между ними. Взаимная стабилизация двух или большего числа грамицидиновых димеров в открытом состоянии приведет к увеличению соответствующего среднего времени жизни. Логично предположить также, что закрывание одного из открытых каналов будет стимулировать закрывание соседних. Обнаруженные времена устойчивости состояний ансамбля каналов 5 и 9 с, их слабое изменение при варьировании некоторых экспериментальных условий и применяемых статистических методов в рамках описанной модели можно рассматривать как указание на существование в БЛМ «кластеров» грамицидиновых каналов с разным числом образующих их элементарных проводящих единиц.

Многомерные методы, примененные к анализу флуктуаций проводимости ансамбля грамицидиновых каналов, могут быть использованы при исследованиях коллективных процессов в других биологических системах. Одно из очевидных приложений - анализ подсостояний проводимости клеточных ионных каналов. Возникающие здесь проблемы связаны с надежной идентификацией разных подуровней при большом их числе и недостаточно высоком отношении сигнал/шум, а также с количественным описанием изменений числа и характеристик отдельных подуровней, происходящих при инактивации или деградации канала, действии блокаторов и т.д. [12].

Непараметрические методы анализа можно рассматривать в качестве альтернативы уже применяемым процедурам идентификации подуровней проводимости, в которых используются описание подуровней в виде откликов системы на внешний импульс [13], назначение порогов для дисперсии тока в каждом подсостоянии [14] или зависимость дисперсии от среднего значения для фрагментов ряда, вырезаемых скользящим окном [15]. Существующие алгоритмы обладают непостоянной точностью или применимы только к слабо зашумленным данным. Между тем даже при высоком (но неизменном) уровне шума максимумы на гистограмме величин проводимости, отвечающие разным подуровням, будут воспроизводиться на одних и тех же местах, а «пики», обусловленные шумом, - появляться и пропадать. Проецирование гистограмм в подпространство главных компонент позволяет выделить достаточно многочисленный класс распределений, по форме которых можно статистически надежно оценить значения проводимости в промежуточных подсостояниях. Подобная процедура требует сложных вычислений, но зато лишена многих ограничений, свойственных другим методам. Непараметрический подход позволяет также исследовать эволюцию подсостояний при изменяющихся внешних условиях.

Авторы выражают искреннюю признательность В.А. Твердислову и Л.В. Яковенко за плодотворные обсуждения настоящей работы.

Библиографический список

1. Иванов П.С., Бутылин А.А. Ионные каналы как модель кооперативной биологической системы // Доклады Межд. научно-технической конф. «Актуальные проблемы фундаментальных наук». 7-10 июня 1991 г. М.: Изд. МГТУ, 1991. Т. 3. С. 23.

2. Ермишкин Л.Н., Зильберштейн А.Я. Ионные каналы, образуемые антибиотиками. Структура и свойства // Биофизика мембран. М.: ВИНТИ, 1982. Т. 2. С. 82.

3. Andersen O.S. Gramicidin channels // Ann. Rev. Physiol. 1984. Vol. 46. P. 531.

4. Hladky S.B., Haydon D.A. Ion transfer across lipid membranes in the presence of gramicidin A. 1. Studies of the unit conductance channel // Biochim. Biophys. Acta. 1972. Vol. 274. P. 294.

5. Cavatorta P., Spisni A., Casali E., Lindner L., Masotti L., Urry D.W. Inter-molecular interactions of gramicidin A' transmembrane channels incorporated into lysophosphatidylcholine lipid systems// Biochem. Biophys. Acta. 1982. Vol. 689. P. 113.

6. Spisni A., Pasquali-Ronchetti I., Casali E., Lindner L., Cavatorta P., Masotti L., Urry D.W. Supramolecular organization of lysophosphatidylcholine-packaged gramicidin A // Biochim. Biophys. Acta. 1983. Vol. 732. P. 58.

7. Stark G., Strassle M., Takacz Z. Temperature-jump and voltage-jump experiments at planar lipid membranes support an aggregational (micellar) model of the gramicidin A ion channel // J. Membr. Biol. 1986. Vol. 89. P. 23.

8. Бодрова Н.Б., Удальцова Н.В., Иванов П.С., Шноль С.Э. О неслучайности формы «несостоятельных» гистограмм: Препринт/ Научный центр биологических исследований АН СССР. Пущино, 1989. 32 с.

9. Mueller P., Rudin D.O., Tien H.T., Wescott W.C. Reconstitution of cell membranes structure *in vitro* and its transformation into an excitable system // Nature. 1962. Vol. 194. P. 979.

10. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1985.

11. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989.

12. Гелетюк В.И., Казаченко В.Н. Кластерная организация ионных каналов. М.: Наука, 1990.

13. Регистрация одиночных каналов. М.: Мир, 1987.

14. Nagy K., Bagany M. Multiple discrete single sodium channel current levels in neuroblastoma cells // Proc. Int. Union Physiol. Sci. 1985. Vol. 16. P. 441.

15. Patlak J.B. Sodium channel subconductance levels measured with a new variance-mean analysis // J. Gen. Physiol. 1988. Vol. 92. P. 413.

Московский государственный
университет

Поступила в редакцию 1.12.94
после переработки 13.12.95

NON-PARAMETRIC ANALYSIS OF COLLECTIVE EFFECTS IN THE ENSEMBLE OF IONIC CHANNELS

P.S. Ivanov, A.A. Butylin

The existence of stable conductance states in the ensemble of gramicidin channels incorporated into bilayer lipid membrane have been studied. Inconsistent estimators of density function are employed as a quantitative tool for description of systems with two-level hierarchy of random processes having similar characteristic times. Non-parametric approach to investigation of histograms of membrane current fluctuations is developed. The expansion of histograms in terms of basic set of orthogonal functions and the use of the main components method allowed to visualize wanderings of image point throughout phase space and to evaluate the characteristic times of stable states which proved to be equal to 1-2, 5, and 9 seconds. Local membrane deformations caused by openings of separate channels are discussed as being responsible for interactions between gramicidin dimers. The advantages of application of non-parametric methods to investigation of cooperative effects in other biological systems are also considered.



Иванов Павел Сергеевич - родился в Москве (1965), окончил Московский государственный университет им М.В. Ломоносова (1988). После окончания работает на кафедре биофизики физического факультета МГУ. Защитил кандидатскую диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в МГУ (1992) в области биофизики ионных каналов. Область научных интересов - биофизика ионного транспорта, теория динамических систем, математическая статистика.



Бутылин Андрей Александрович - родился в Москве (1963), окончил Московский государственный университет им М.В. Ломоносова (1986). После окончания работает на кафедре биофизики физического факультета МГУ. Защитил кандидатскую диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в МГУ (1991) в области биофизики ионных каналов. Область научных интересов - биофизика ионного транспорта, теория динамических систем, медицинская биофизика.



ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ ВЗРЫВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Ю.И. Кудряшов, В.В. Розанов, Н.Н. Сысов, Л.Ф. Усков

Создан пакет прикладных программ для решения задач высокоскоростного взаимодействия сред и тел сложной геометрической формы и с различными физико-механическими свойствами. Расчетная схема построена на основе численной аппроксимации на конечных элементах среды интегральных законов сохранения массы, импульса и энергии и обладает свойством полной консервативности. Проведено численное исследование задач, связанных с применением взрывных технологий:

- метание плоскими цилиндрическими и сферическими детонационными волнами многослойных наборов корпусов и оболочек;
- ударное взаимодействие упругих и упругопластических тел;
- действие подводного взрыва на сложные конструкции;
- задача оптимизации проведения работ по разделке взрывом корпусов военной и гражданской техники.

Технологии, в которых применяются взрывные процессы, связаны, как правило, с повышенной опасностью проведения работ и высоким уровнем загрязнения окружающей среды. С другой стороны, взрывные и импульсные технологии в настоящее время широко используются для создания материалов с новыми свойствами, штамповки многослойных изделий, утилизации корпусов военной и гражданской техники.

Необходимо обеспечить максимальную безопасность и экологичность проведения таких работ. Эти задачи решаются выбором оптимальных технологических параметров (размеров и геометрии корпусов, мощности и места расположения зарядов). Вместе с тем проведение экспериментальных исследований по выбору оптимальных параметров требует больших материально-технических затрат.

Интенсивное развитие вычислительной техники нового поколения позволило моделировать сложные задачи, связанные с ударно-волновыми процессами, что открывает новые возможности для проведения анализа значительного числа параметров с целью оптимизации технологических режимов взрывных работ с точки зрения их безопасности, минимального загрязнения окружающей среды и максимальной экономичности.

Для указанных задач характерным является наличие значительных деформаций, больших скоростей деформаций, протекающие процессы носят ярко выраженный ударно-волновой характер.

С точки зрения математической постановки проблемы необходимо найти решение начально-краевой задачи, когда известны начальные условия в какой-то момент времени и внешние граничные условия как функции от времени.

Параметры сред на границах раздела между ними определяются в ходе счета. Предполагается, что задача хорошо обусловлена, то есть малые изменения в начальных данных приводят к достаточно малым изменениям в решении.

Вследствие больших деформаций и скоростей деформаций, геометрически сложного ударно-волнового характера решений были выбраны численные методы, удовлетворяющие следующим требованиям:

- в расчетах методом «сквозного счета» скачки уплотнения не выделяются;
- в основу математического описания берутся интегральные законы сохранения для разработки консервативных схем;
- схемы строятся на подвижных лагранжевых сетках - конечных элементах (КЭ) среды постоянной массы (в эйлеровых координатах реализовать численную аппроксимацию условий на подвижных границах сред значительно сложнее).

Законы сохранения. При разработке численных схем будем использовать запись законов сохранения массы и импульса в вариационной форме [1-2] для лагранжевого КЭ среды объема V_e с площадью поверхности S_e , плотностью ρ , тензором напряжений σ , скоростью относительно неподвижной декартовой системы координат $\mathbf{u} = d\mathbf{x}/dt$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{V_e(t)} \rho \delta \rho dv &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} \int_{V_e(t)} \rho \mathbf{u} \delta \mathbf{u} dv + \int_{V_e(t)} \sigma : (\nabla \cdot \delta \mathbf{u}) dv &= \int_{S_e(t)} \mathbf{Y} \delta \mathbf{u} ds, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\delta \rho$, $\delta \mathbf{u}$ - кинематически допустимые вариации плотности и скорости,

$$\mathbf{Y} = \sigma \mathbf{n} \quad (2)$$

- поверхностные силы на границе КЭ S_e с вектором нормали \mathbf{n} , точкой обозначено скалярное умножение векторов, двоеточие - свертка тензоров, $\nabla_i = \partial/\partial x_i$ - оператор пространственного дифференцирования.

Определяющие соотношения для различных сред. При построении схем будем исходить из реологических моделей изотропной температуропроводной упругопластической разрушаемой среды [3-5], используя следующие уравнения.

1. Уравнения течения Прандтля - Рейса при условии текучести Мизеса в виде

$$\begin{aligned} \sigma &= -PI + S, \quad P = P(\rho) + \rho \Gamma U, \\ \frac{\partial S}{\partial t} - \Lambda S &= 2\mu e, \\ \Lambda &= \frac{2\mu}{k^2} S : e H(S : S - k^2). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь P - давление в среде, представленное «холодной» и «горячей» составляющими, Γ - коэффициент Грюнайтцена, U - внутренняя энергия среды, k - динамический предел текучести, H - функция Хэвисайда, S - девиатор тензора напряжений, e - тензор скоростей деформации.

2. Уравнение изменения внутренней энергии

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial U}{\partial t} &= \sigma e + (\nabla \cdot \mathbf{q}), \\ \mathbf{q} &= \kappa \nabla T, \end{aligned} \quad (4)$$

где κ - коэффициент теплопроводности, T - температура среды. Однако, в рассматриваемых задачах взрывного взаимодействия физические процессы протекают очень быстро, время исследования мало, изменением внутренней энергии за счет теплообмена можно в большинстве задач пренебречь и рассматривать их в адиабатическом приближении.

3. Модель разрушения среды: с некоторого момента расчетного времени согласно выбранному критерию начала разрушения на КЭ формируется трещина, которая в процессе счета уже не «залечивается» (то есть раз образовавшись, во время расчета она уже не исчезает). По нормали к трещине растягивающее напряжение полагается равным нулю. Если в КЭ имеют место напряжения, сжимающие трещину, то разрушенный КЭ не отличается с точки зрения алгоритма счета от неразрушенного. Характеристикой разрушения КЭ является вектор нормали к трещине N_{np} ; $N_{np}=0$, пока на КЭ не будет превышен предел прочности на разрыв - максимально допустимое растягивающее напряжение $\sigma_{кр}$.

Моделирование распространения детонационной волны (ДВ) по взрывчатому веществу (ВВ).

В численных расчетах при моделировании движения ДВ по ВВ будем исходить из следующих основных положений [6]:

- ДВ сферическая (или плоская) распространяется из центра (или плоскости) инициирования с постоянной скоростью D , заданной для данного ВВ;
- ДВ имеет толщину большую, чем размеры лагранжевой сетки Δh_{min} на которую разбито поле ВВ;
- по мере прохождения ДВ узлы сетки ВВ начинают двигаться со скоростью газа $u=D/(\gamma+1)$ за ДВ в точке Чепмена - Жуге; за ДВ ВВ превращается в газ с уравнением состояния

$$\left(\frac{P}{P_{чж}}\right) = \left(\frac{\rho}{\rho_{чж}}\right)^\gamma,$$

$P_{чж} = \rho_0 D^2 / (\gamma + 1)$ и $\rho_{чж} = \rho_0 (\gamma + 1) / \gamma$ - давление и плотность газа за ДВ в точке Чепмена - Жуге, ρ_0 - плотность ВВ, γ - показатель политропы. Аналитические выкладки [6] показали, что при таком моделировании давление сразу за ДВ аппроксимируется с точностью

$$\left(\frac{\Delta P}{P_{чж}}\right) \leq \left(\frac{Cur}{\gamma + 1} \frac{\Delta h_{min}}{\Delta}\right)^\gamma \sim 1\% \quad \text{при } \gamma = 3, \quad Cur < 1, \quad \frac{\Delta h_{min}}{\Delta} \sim 3.$$

Граничные условия. В рассматриваемых задачах могут быть учтены либо при вычислении интегралов по поверхности среды в уравнениях (1), либо заданием параметров в граничных узлах равными определенным для текущего момента времени значениям следующие условия на границе области решения:

- заданы скорости движения границ, на которых отсутствует трение

$$u_n = (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}_{гр}) = U_{гр}(t) \quad (\mathbf{n}_{гр} - \text{нормаль к поверхности границы}); \quad (5)$$

- заданы внешние силы $Y_{гр} = \sigma_{гр} \mathbf{n}_{гр}$;
- на поверхности раздела двух сред скачок нормальной к поверхности составляющей скорости и силы равен нулю

$$\begin{aligned} [\mathbf{u}_{гр} \cdot \mathbf{n}_{гр}] &= 0; \quad [Y_{гр} \cdot \mathbf{n}_{гр}] = 0 \text{ в случае проскальзывания без трения,} \\ [\mathbf{u}_{гр}] &= 0; \quad [Y_{гр}] = 0 \text{ в случае полного «слипания» тел.} \end{aligned}$$

Численные схемы. Наряду с неподвижной декартовой системой координат x введем систему координат, связанную с текущей в момент времени t конфигурацией тела или среды $\mathbf{X} = \mathbf{X}(x, t)$, $\mathbf{X} \in V(t)$, $V(t)$ - область пространства,

занимаемая телом. Будем предполагать, что отображение $X(x,0) \rightarrow X(x,t)$ взаимнооднозначное и достаточно гладкое в исследуемом интервале времени. Градиент отображения L , определяемый как $dx=LdX$, удовлетворяет условию $\det L \neq 0$.

При $t=0$ в связанной системе координат X введем расчетную сетку Ω из элементов среды КЭ. Плотность сетки больше в тех местах области V , где ожидаются высокие градиенты скорости. Сетка Ω задается множеством ω - набором узловых точек X_i ($i=0, \dots, N1$; $N1$ - число узлов) и информационным массивом целых чисел G_{ie} ($i=1, \dots, m$; $e=1, \dots, N2$; $N2$ - число КЭ, m - максимальное число узлов в КЭ), определяющим номера узлов на КЭ. В двумерных задачах выбираются треугольные ($m=3$) или четырехугольные ($m=4$) КЭ, в пространственных задачах - тетраэдры ($m=4$) или параллелепипеды ($m=8$). Часть узлов на границе тел, где заданы кинематические условия (5), обозначим $\omega_{гр} \in \omega$. В ходе расчета задается также множество Ω_t дискретных моментов времени t^n ($n=0, \dots, \infty$), для которых последовательно, начиная с $t^0=0$, определяется решение задачи на Ω и ω . Значения t^n определяются в ходе счетного эксперимента, исходя из анализа полученного решения для t^i ($i < n$).

Обозначим через u_i^n , δu_i^n и X_i^n ($i \in \omega$), соответственно, скорости, вариации скорости и координаты в декартовой системе координат x для i -го узла в момент времени t^n ; $\delta \rho_e^n$, ρ_e^n , σ_e^n , e_e^n , S_e^n , P_e^n , U_e^n ($e \in \Omega$) - значения вариации плотности, плотности, тензора напряжений, тензора скоростей деформаций, девiatorа напряжений, давления и внутренней энергии в центрах КЭ. Будем использовать симплекс-аппроксимацию координат и скоростей на расчетной сетке [7]. Интегралы в системе вариационных уравнений рассчитываются с помощью квадратурных формул прямоугольников: точки для численного расчета интегралов по КЭ от виртуальных работ сил инерции будем брать в узлах сетки ω , для интегралов от виртуальных работ напряжений и интеграла, выражающего закон сохранения массы - в центрах КЭ на сетке Ω , для интегралов по поверхности - в серединах граничных граней КЭ. Производная по времени аппроксимируется явной одношаговой конечно-разностной схемой. Сокращая после интегрирования на произвольные вариации $\delta \rho_i^n$ и δu_i^n , получим явную консервативную схему [6,8-10]

$$u_i^{n+1} = u_i^n + \frac{1}{M_i} F_i^n \Delta t^n, \quad \Delta t^n = t^{n+1} - t^n, \quad n \in \Omega, \quad i \in \omega \setminus \omega_{гр},$$

$$M_i = \sum_{e=1}^{N2} \frac{1}{m} M_e \sum_{k=1}^m \hat{H}(i - G_{ke}), \quad F_i = \sum_{e=1}^{N2} \frac{1}{m} F_e \sum_{k=1}^m \hat{H}(i - G_{ke}), \quad u_i^{n+1} = u_{i_{гр}}(t^{n+1}),$$

$$e \in \Omega, \quad l \in \omega_{гр},$$

$$S_e^{n+1} = S_e^n (1 + \Lambda_e^n \Delta t) + 2\mu e_e^n \Delta t, \quad \Lambda_e^n = H(S_e^n; S_e^n - (k^2)_e^n) H(S_e^n; e_e^n) S_e^n; e_e^n$$

$$\sigma_e^{n+1} = -P_e^{n+1} I + S_e^{n+1}, \quad P_e^{n+1} = P(\rho_e^{n+1}) + \Gamma \rho_e^{n+1} U_e^{n+1}, \quad \rho_e^{n+1} = \frac{1}{V_e^{n+1}} \rho_e^0 V_e^0 = \frac{M_e}{V_e^{n+1}},$$

$$U_e^{n+1} = U_e^n + \frac{1}{\rho_e^{n+1}} \sigma_e^{n+1} e_e^{n+1} \Delta t, \quad W_{pe}^{n+1} = W_{pe}^n + \Lambda_e^n S_e^{n+1}; e_e^{n+1} \Delta t,$$

$$\sigma_e^{n+1} \Rightarrow \sigma_e^{n+1}_{1,2,3}, \quad \sigma_e^{n+1}_1 = \sigma_e^{n+1} H(W_{pe}^{n+1} - W_{ekp}(t^{n+1})), \quad \sigma_e^{n+1} \Leftarrow \sigma_e^{n+1}_{1,2,3},$$

$$X_i^{n+1} = X_i^n + u_i^{n+1} \Delta t.$$

Здесь функция $\hat{H}(0)=1$ и $\hat{H}(a)=0$, $a \neq 0$, $\hat{H}(a)=1$ при $a > 0$, $\hat{H}(a)=0$ при $a \leq 0$; M_e -

неизменная по времени масса КЭ; \Rightarrow и \Leftarrow операторы перехода для тензора к главным осям и обратно. Тензор скорости деформации определяется через тензор скорости градиента отображения $\dot{L} = \nabla \otimes u$ (\otimes - знак тензорного умножения); $e_e^{n+1} = 0.5[I - (\dot{L}_e^{n+1})^T (\dot{L}_e^{n+1}) - 1]$; F_e^n - вычисленные интегралы (1) по объему и по граничной поверхности КЭ. Для расчета F_e^n и L_e^{n+1} определим дискретный оператор пространственного дифференцирования ∇_e^{n+1} , исходя из формул для естественной аппроксимации производных [8]

$$\nabla_e^{n+1} F V_e^{n+1} = \oint_{S_e} (F \cdot n) ds,$$

где интеграл по поверхности КЭ S_e рассчитывается исходя из симплекс аппроксимации переменной F на КЭ [7].

Численное исследование задач о разгоне многослойных наборов и оболочек

Рассматривается задача о метании плоской, цилиндрической и сферической детонационной волной многослойного набора, состоящего из n слоев одинаковой толщины, зарядом ВВ, массой m , либо при заданной зависимости изменения давления на внутренней поверхности набора. Процесс расширения продуктов детонации (ПД) описывается политропой $P = Ar^3$. Материал слоев считается баротропной жидкостью. Уравнение состояния материала получено с использованием аппроксимации экспериментальных данных по ударному сжатию углеродистых сталей

$$P = 450[(\rho/\rho_0)^4 - 1] \quad \text{для } P < 156 \text{ кбар},$$

$$P = 142.5(\rho/\rho_0)^6 - 67.1 \quad \text{для } P > 156 \text{ кбар},$$

где ρ_0 - начальная плотность материала слоя.

Начальные условия в ПД задаются на основе решения соответствующей автомодельной задачи о распространении детонационных волн. В метаемых слоях начальные условия $U(0, R) = 0$, $P(0, R) = 0$.

Граничные условия: на левой границе системы либо $U = 0$, либо $P = 0$ (плоский случай, истечение в пустоту); на правой границе $P = 0$; на границах контакта «ПД - слой» и «слой - слой» скачки по давлению и по скорости равны нулю $[P] = 0$ и $[U] = 0$. При отделении слоев контактная поверхность распадается на две свободные границы. Условием отделения пластин и, следовательно, смены граничных условий является приход волны разгрузки в контакт «слой - слой». В момент касания слоев при догоне происходит смена граничных условий с $P = 0$ на $[P] = 0$ и $[U] = 0$.

На рис.1 приводятся зависимости средних скоростей слоев от времени $V_i(\bar{t})$ ($\bar{t} = t/(ID)$) в случае плоской симметрии ($N = 0$) при истечении ПД в пустоту для различных значений определяющих параметров $\beta = m/M$, (M - суммарная масса метаемых слоев).

После выхода УВ на свободную поверхность вглубь набора распространяется волна разгрузки, в которой происходит последовательное отделение слоев, причем максимальную скорость приобретает первый слой. К моменту выхода волны на поверхность контакта с ПД все слои движутся отдельно с различными скоростями. Слой, одна из границ которого имеет контакт с ПД, приобретает минимальную скорость, однако, вследствие уменьшения метаемой массы после разделения набора происходит ее интенсивное ускорение, догон и

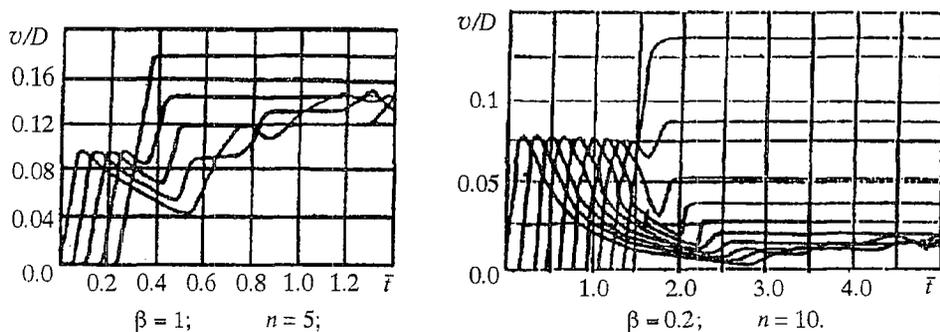


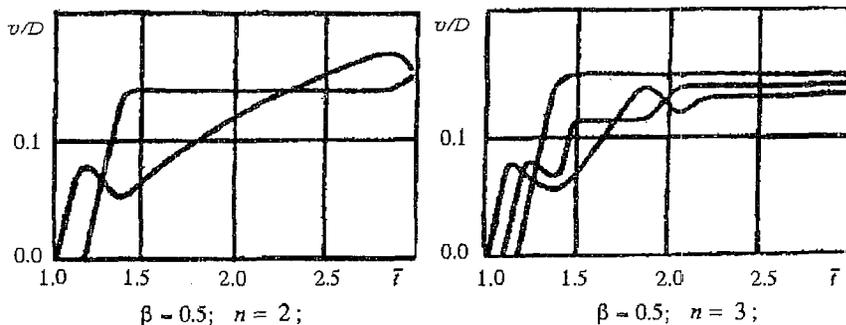
Рис. 1

взаимное соударение слоев. Результатом является образование и распространение от поверхности контакта двух ударных волн. При отражении одной из них от поверхности образуется волна разгрузки. В момент выхода ее на поверхность контакта между слоями происходит отскок одного из слоев, скорость его несколько увеличивается. Если приобретенная скорость становится больше скорости последующего догона и отскока, процессы, аналогичные описанному, повторяются. Интенсивный ударно-волновой процесс догона и последовательного соударения (с увеличением n число взаимодействий увеличивается) приводит к сокращению разницы в скоростях, то есть к более однородному потоку.

Анализ зависимости средней скорости набора от количества составляющих его слоев показал, что средняя скорость набора практически не изменяется с увеличением величины n и близка к скорости метания несжимаемой пластины или оболочки при таком же значении коэффициента нагрузки b и соответствующих моментов времени.

Полученные закономерности справедливы также для цилиндрической ($N=1$) и сферической ($N=2$) симметрий (рис.2).

$N = 1$



$N = 2$

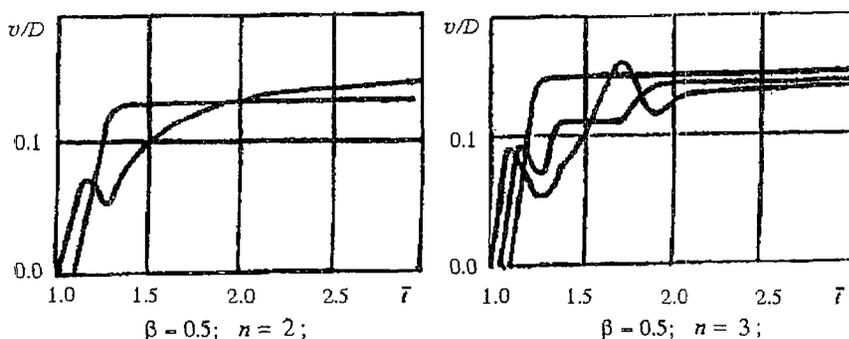


Рис. 2

На графиках представлены законы разгона двух- и трехслойных оболочек. При метании двухслойных оболочек интенсивного ударно-волнового взаимодействия не происходит. После отделения слоев происходит отделение последнего слоя и постепенный догон первого слоя. Применение трехслойных оболочек ведет к увеличению интенсивности взаимодействий, вследствие чего слои оболочки приобретают практически равные скорости.

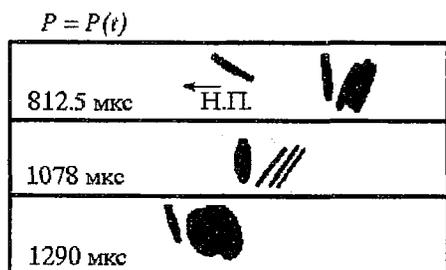


Рис. 3

Таблица

№ слоя	$\beta_0=0.515$			$\beta_0=0.31$		
	$v_{расч.}$ м/с	$v_{эксп.}$ м/с	$\frac{v_{расч.}}{v_{эксп.}}$	$v_{расч.}$ м/с	$v_{эксп.}$ м/с	$\frac{v_{расч.}}{v_{эксп.}}$
1	310	320	0.97	830	800	1.02
2	230	238	0.97	705	755	0.935
3	175	215	0.815	640	734	0.875
4	184	208	0.885	700	723	0.97
5	200	208	0.96	670	705	0.95

Аналогичные зависимости были получены при расчетах разгона многослойных наборов и оболочек по заданному закону изменения давления $P=P(t)$ на контакте ПЛ - слой.

Экспериментальная проверка полученных результатов проводилась с помощью рентгено-импульсной съемки (рис. 3), при метании набора 5 стальных пластин при различных значениях β . Сопоставление экспериментальных и расчетных результатов представлено в таблице. Результаты экспериментального исследования показали удовлетворительное совпадение с расчетом и полное соответствие качественной картины процесса с выбранной моделью.

Численное моделирование взрывного воздействия на конструкции сложной формы: двумерные задачи

На рис. 4, а показана схема расположения зарядов внутри тонкостенной стальной оболочки, залитой водой. Высота оболочки 1 м и толщина от 5 до 25 см. Конструкция закреплена снизу на жесткой плите. В верхней части между зарядами оболочка ослаблена - в этом месте при достижении критического растягивающего

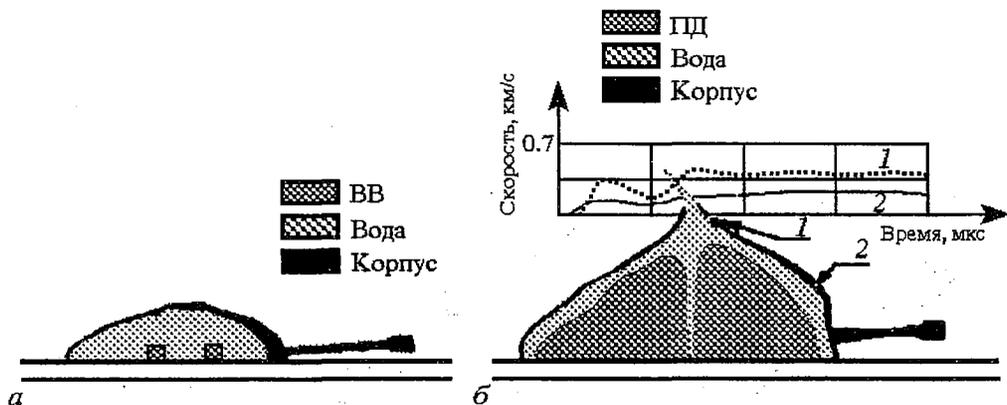


Рис. 4

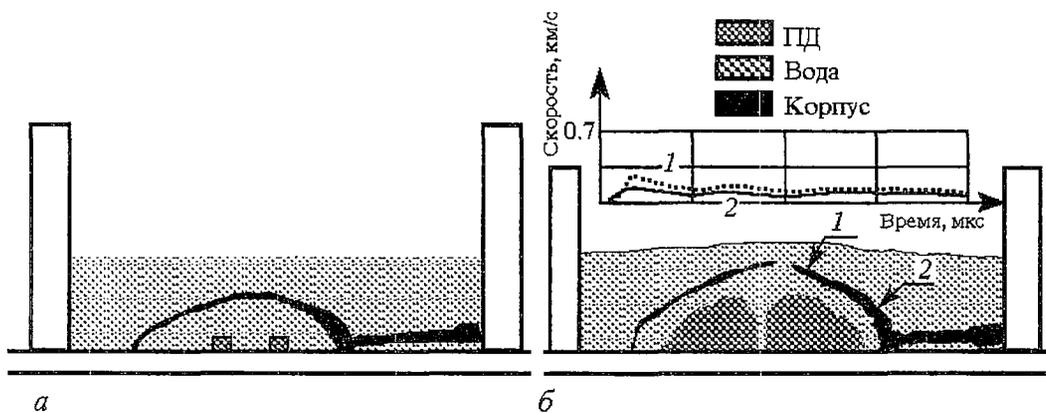


Рис. 5

напряжения происходит ее разрыв. Заряды ВВ разнесены на 1м, имеют размеры 25x25 см, плотность $\rho = 1700 \text{ кг/м}^3$, скорость детонации $D=7000 \text{ м/с}$, показатель политропы для газов - продуктов детонации $\gamma=3$. На рис. 4, б показаны результаты численного эксперимента - раздутая взрывом оболочка через 4 мкс после подрыва. В верхней части рис. 4, б представлены графики скорости оболочки в двух помеченных точках на ее поверхности в зависимости от времени.

График скорости в 1-й точке имеет два максимума: первый связан с приходом ударной волны по воде, второй - с приходом первого импульса от вытесненной газовым пузырем (ПД) воды. Скорость оболочки в 1-ой точке достигает 400 м/с. 2-ая точка, вследствие близости большой присоединенной массы, значительно более инертна - скорость здесь приблизительно вдвое меньше. Скорость разлета оболочки устанавливается через 2 мкс. Если записать уравнение баланса энергии, считая, что вся кинетическая энергия продуктов детонации пошла на разгон оболочки (без присоединенной массы) и воды с некоторой средней скоростью, то получим величину средней скорости равной около 290 м/с. Максимальная скорость оболочки достигается в точке разрыва между зарядами.

На рис. 5 а, б представлена аналогичная задача с той разницей, что вся конструкция погружена в ванну с водой. Скорость оболочки теперь значительно ниже 80-100 м/с.

Расчеты задач со сложной пространственной геометрией: трехмерные задачи

На рис. 6, 7 показаны расположения зарядов ВВ в начальный момент времени в металлическом корпусе, залитым водой. Были рассмотрены два вида корпусов - половина трехосного эллипсоида вращения и оболочка, составленная из плоских разнотолщинных граней. Габариты обоих корпусов: $5 \times 2.5 \times 1 \text{ м}^3$, толщина

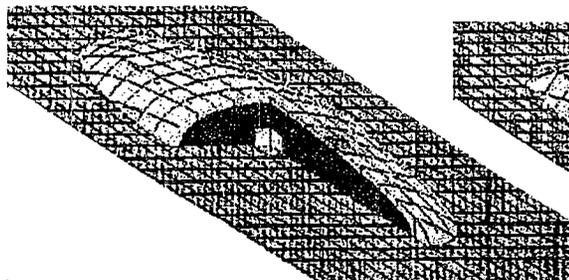


Рис. 6

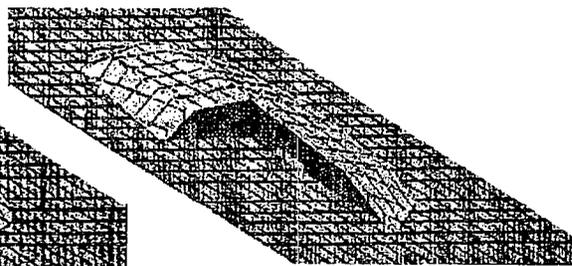


Рис. 7

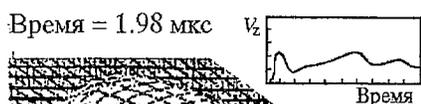


Рис. 8

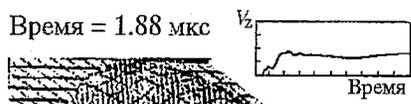


Рис. 9

меняется от 10 см сверху до 30 см по краям. Заряды с параметрами $\rho=1700$ кг/м³ $D=8$ км/с $\gamma=3$, имеют размеры $0.5 \times 0.5 \times 0.5$ м³. В первом случае один заряд расположен в центре внизу корпуса (см. рис.6), во втором - два заряда вдвое меньшей высоты (25 см) разнесены симметрично относительно плоскости $x=0$ на 1.5 м (см. рис.7). Для наглядности на рисунках не показана ближайшая четверть корпуса, воды и заряда и по поверхности проведены через 0.25 м изолинии $u=\text{const}$ и $x=\text{const}$.

Через 2 мкс после подрыва заряда рассчитанная геометрия имеет вид, показанный на рис. 8, 9. В правом верхнем углу рисунков показаны графики зависимости от времени вертикальной составляющей скорости наружной части металлического корпуса на оси z ($x=y=0$). Цена деления по осям графиков: 500 м/с и 0.2 мкс.

Библиографический список

1. Седов Л.И. Механика сплошной среды. М.: Наука, 1970. Т.1-2.
2. Бурого Н.Г. Формулировка уравнений механики сплошной среды в подвижных адаптивных координатах // Численные методы в механике деформируемого твердого тела. М.: ВЦ АН СССР, 1984. С. 38.
3. Иванов В.Д., Кондауров В.И., Петров Б.И., Холодов А.С. Расчет динамического деформирования и разрушения упруго-пластических тел сеточно-характеристическими методами // Математическое моделирование. 1990. Т.2, № 11. С. 11.
4. Селиванов В.В., Соловьев В.С., Сысоев Н.Н. Ударные и детонационные волны // Методы исследования. М.: Изд-во МГУ, 1990. 256 с.
5. Заппаров К.И., Кукуджанов В.Н. Математическое моделирование задач импульсного взаимодействия и разрушения упругопластических тел. Препринт № 280. Москва: ИПМ АН СССР, 1986. 67 с.
6. Кукуджанов В.Н., Кудряшов Ю.И. Решение смешанных задач нестационарного взаимодействия газообразных сред с твердыми деформируемыми телами. Препринт № 472. Москва: ИПМ АН СССР, 1990. 29 с.
7. Образцов И.В., Савельев Л.М., Хазанов Х.С. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов // М.: ВШ, 1985.
8. Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967. С. 212.
9. Горюнов Д.Г., Кудряшов Ю.И., Кудряшова И.В., Сысоев Н.Н., Трофимов М.М. Методика численного исследования нестационарных пространственных задач. Препринт № 4/193. Вып.1. Москва: МГУ, физ. ф-т, 1993. 12 с.
10. Бурого Н.Г., Кукуджанов В.Н. Решение упругопластических задач методом конечных элементов. Препринт № 326. Москва: ИПМ АН СССР, 1988. 63 с.

Московский государственный
университет

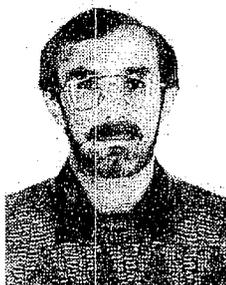
Поступила в редакцию 1.12.94

NUMERICAL INVESTIGATION FOR NON-LINEAR PROBLEMS OF EXPLOSIVE TECHNOLOGIES

Y.I. Kudryashov, V.V. Rozanov, N.N.Sysoev, L.F. Uskov

Applied codes to solve the problems of high velocity medium and bodies interactions were produced. Bodies may be compound geometrical shapes and various physical and mechanical properties. The finite element algorithm is based on numerical approximations of integral laws of mass, momentum and energy conservation. This algorithm is completely conservative. There were carried out numerical investigations of nonlinear problems concerned the explosive technology applications:

- multiply assemblies of frames and shells throwing by plate, cylindrical and spherical detonation waves;
- impact interactions of elastic and plastic bodies;
- underwater explosive actions on compound constructions;
- problems of working operation optimizations for explosive divisions of the military and civil technique frames.



Кудряшов Юрий Иванович - родился в 1955 году в Москве. Окончил Московский физико-технический институт (1978). После окончания МФТИ работал в НИИ ТП (Москва). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в МФТИ (1983) по специальности физика жидкостей, газа и плазмы. Старший научный сотрудник МФТИ, а с 1993 - Центра гидродинамических исследований физического факультета МГУ. В настоящее время занимается вопросами численного моделирования задач высокоскоростного взаимодействия в механике сплошных сред. Соавтор ряда статей по указанной тематике.



Сысоев Николай Николаевич - родился в 1946 году во Владимире, окончил Московское высшее техническое училище им. Н.Э. Баумана (1972). После окончания МВТУ работал на физическом факультете МГУ. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в МГУ (1980) в области физической газодинамики. Старший научный сотрудник МГУ, директор Центра гидродинамических исследований физического факультета МГУ. Область научных интересов - физика ударных и детонационных волн. Соавтор монографии «Ударные и детонационные волны. Методы исследования» и учебника «Ударные волны в газах и конденсированных средах». Опубликовал более 70 научных статей по указанной тематике.



Усков Леонид Федосьевич - родился в 1948 году в с. Боговарово Октябрьского района Костромской области. Окончил Московское высшее техническое училище им. Н.Э. Баумана (1972). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук в МВТУ (1975) и доктора технических наук в Военной академии им. Ф.Э. Дзержинского (1993). Профессор кафедры математики в Высшем военном командно-техническом училище ракетных войск. Область интересов - математическое моделирование динамических процессов при взрывном нагружении. Опубликовал множество статей по данной тематике.



ВЛИЯНИЕ СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА РОСТ И ФОТОСИНТЕТИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ ЛИСТЬЕВ БОБОВ

А.И. Акимов, А.Н. Баранов, А.М. Салецкий

Изучены медленные индукционные изменения флуоресценции листьев бобов *Vicia faba* L. сорта «Русские черные», выращенных на дистиллированной воде, обработанной слабым переменным магнитным полем с амплитудным значением напряженности 12.3 А/м и частотой 156.3 Гц, и действие такой обработки на рост бобов. Обнаружено стимулирующее действие магнитной обработки воды на фотосинтез и рост бобов.

В последнее время широкий интерес вызывает воздействие магнитных полей на жизнедеятельность различных организмов [1]. Сообщалось также о влиянии магнитных полей на прорастание семян пшеницы и ячменя [2], однако до сих пор не предложено сколько-нибудь обоснованного механизма такого воздействия. Высказывалось лишь предположение об универсальном характере влияния магнитного поля на воду, содержащуюся в любой биологической системе [1], но оно не было подтверждено какими-либо физическими исследованиями свойств воды при обработке магнитным полем. В работе [3] было обнаружено, что при длительном воздействии на воду модулированного магнитного поля $H = H_r + H_0 \cos 2\pi ft$ (где H_r - напряженность вертикальной составляющей геомагнитного поля) при $H_0 < H_r$ и строго фиксированном соотношении между амплитудой H_0 и частотой f наблюдаются экстремальные изменения ряда структурно-чувствительных параметров воды. Причем, после выключения поля вода сохраняет «память» (порядка 6-8 часов) о таком воздействии. Проведенные в [4] исследования показали, что в водных растворах белков изменение динамической структуры сетки водородных связей воды, вызванное воздействием переменного магнитного поля, приводит к конформационным изменениям молекул белка.

Цель данной работы - изучение влияния обработки воды слабым переменным магнитным полем на рост бобов и фотосинтетический процесс в их листьях.

Объектами исследования служили листья и проростки бобов *Vicia faba* L. «Русские черные», выращенные в лабораторных условиях с дополнительным освещением лампами накаливания общей мощностью 500 Вт с расстояния 0.5 м, при близкой к естественной смене периодов света и темноты.

В опытах использовалась дистиллированная вода с $pH=7.1$ и проводимостью $\kappa=1.2 \cdot 10^{-6}$ Ом⁻¹см⁻¹. Обработка воды производилась в катушках Гельмгольца, подключенных к генератору Г6-15, частота которого допол-

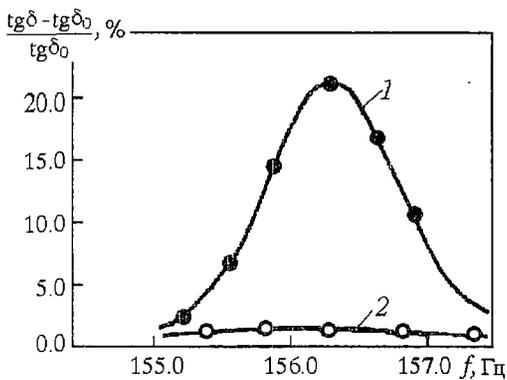


Рис. 1. Зависимость относительного изменения тангенса угла диэлектрических потерь воды, обработанной переменным магнитным полем, по сравнению с тангенсом угла диэлектрических потерь не подвергавшейся обработке воды, $(\text{tg}\delta - \text{tg}\delta_0) / \text{tg}\delta_0$ в процентах от частоты магнитного поля для $H_0 = 12.3$ А/м (кривая 1) и $H_0 = 17.2$ А/м (кривая 2)

полем $H = H_0 \cos 2\pi f t$, от частоты f для $H_0 = 12.3$ А/м. Результаты измерений показаны на рис.1, кривая 1: видно, что на частоте 156.3 Гц находится максимум изменения $\text{tg}\delta$ обработанной магнитным полем воды по сравнению с $\text{tg}\delta$ необработанной воды. Этот максимум практически совпадает с наблюдавшимся ранее в [4]. Время достижения стационарного значения $\text{tg}\delta$, как и в [4], около 2 часов. Такое изменение $\text{tg}\delta$ свидетельствует о изменении структуры воды. Аналогичные измерения, проведенные для воды, обработанной переменным магнитным полем с $H_0 = 17.2$ А/м не показали существенного изменения $\text{tg}\delta$ (рис. 1, кривая 2) от частоты магнитного поля в исследованном интервале частот, что говорит об отсутствии изменений в структуре воды. Поэтому для исследования влияния обработки воды слабым переменным магнитным полем была выбрана частота 156.3 Гц и два значения амплитуды поля, первое «резонансное» $H_0 = 12.3$ А/м при котором возникают изменения $\text{tg}\delta$, а значит структуры воды, и второе «нерезонансное» $H_0 = 17.2$ А/м, при котором таких изменений не возникает.

Около двух десятков бобов примерно одного размера замачивались и проращивались в обработанной магнитным полем воде и, для контроля, в не подвергавшейся магнитной обработке воде. На 14-е сутки проростки переносились на 14 суток в гидропонические условия и выращивались на водных растворах при описанных условиях освещения. Результаты усреднялись по пяти сериям измерений.

Биометрические показатели растений (длина корешков и длина стеблей), выращенных в воде, обработанной переменным магнитным полем с частотой $f = 156.3$ Гц для двух значений H_0 : 12.3 А/м и 17.2 А/м, а также контрольных растений приведены в таблице. Из нее следует, что обработка воды «резонансным» магнитным полем с $H_0 = 12.3$ А/м и $f = 156.3$ Гц приводит к более интенсивному росту в ней растений по сравнению с необработанной водой и водой, обработанной «нерезонансным» переменным магнитным полем с $H_0 = 17.2$ А/м. и $f = 156.3$ Гц. Следует отметить, что наиболее сильно стимулирующее действие поля проявлялось на стадии прорастания. Процент семян, проросших в первую неделю после замачивания в обработанной «резонансным» переменным магнитным поле воде, увеличивался, а разброс величин контролируемых биометрических параметров уменьшался по сравнению с контрольными.

нительно контролировалась частотомером ЧЗ-33. Измерения были выполнены для двух значений напряженности магнитного поля в центре катушек Гельмгольца $H_0 = 12.3$ и $H_0 = 17.2$ А/м. Для получения информации об изменениях свойств воды при такой обработке, измерялась зависимость от частоты тангенса угла диэлектрических потерь $(\text{tg}\delta)$, являющегося, как было показано в [3], наиболее структурно-чувствительным параметром воды. Время обработки воды составляло 6 часов, причем дальнейшее увеличение времени обработки не приводило к дополнительному изменению $\text{tg}\delta$. Измерение $\text{tg}\delta$ проводилось на куметре ВМ-409 фирмы «Tesla» на частоте $f_{\text{из}} = 160$ МГц (начало дебаевской дисперсии). Первоначально исследовалась зависимость $\text{tg}\delta$ воды, обработанной переменным магнитным

Таблица

Показатель	Контроль	$H_0=17.2$ А/м $f=156.3$ Гц	$H_0=12.3$ А/м $f=156.3$ Гц
Длина корешков на 8-й день после замачивания, см	0.8 ± 0.2	0.8 ± 0.2	1.4 ± 0.2
Длина корешков на 13-й день после замачивания, см	1.7 ± 0.2	1.7 ± 0.3	2.4 ± 0.2
Длина стебля на 21-й день после замачивания, см	8.3 ± 2.2	8.0 ± 3.0	13.2 ± 2.3
Длина стебля на 28-й день после замачивания, см	10.0 ± 1.3	10.5 ± 2.4	22.8 ± 2.0
M/T для листьев, отн.ед.	1.4	1.4	1.7

На 28-е сутки после замачивания, помимо биометрических показателей, измерялась медленная индукция флуоресценции (МИФ) листа, которая позволяет судить об эффективности проходящих в нем фотосинтетических процессов [5]. Возбуждение флуоресценции листа осуществлялось аргоновым лазером ЛГ-106 с длиной волны излучения $\lambda=488$ нм. Луч лазера ослаблялся нейтральными светофильтрами так, чтобы плотность мощности излучения была порядка 2 Вт м^{-2} , для устранения эффектов насыщения. Флуоресценция на длине волны 686 нм, соответствующей максимальной интенсивности, выделялась двойным монохроматором МДР-6 и регистрировалась с помощью ФЭУ-79 и усилителя на самописце. Запись интенсивности флуоресценции начиналась одновременно с включением лазерного излучения. Длительность записи составляла 80 с, при этом интенсивность флуоресценции выходила на стационарное значение и далее не изменялась. Для нормировки начальных условий перед регистрацией МИФ листья освещались в течение 1 минуты, а затем 5 минут адаптировались к темноте. На рис. 2 показаны характерные кривые МИФ листьев бобов. В работе [5] отмечалось, что фотоиндуцированные изменения интенсивности флуоресценции хлорофилла на участке $S-M/T$ (см. рис. 2) предположительно связаны с перераспределением энергии возбуждения между фотосостояниями, с изменениями величины градиента протонов на тилакоидной мембране, а также с дополнительным окислением вследствие активизации реакции углеродного цикла. При этом форма кривой МИФ может служить тестом на структурно-функциональную целостность фотосинтетического аппарата, а относительное тушение флуоресценции после второго максимума (M/T) может служить показателем эффективности фотосинтеза [6]. Как видно из рис. 2, магнитная обработка воды не приводит к

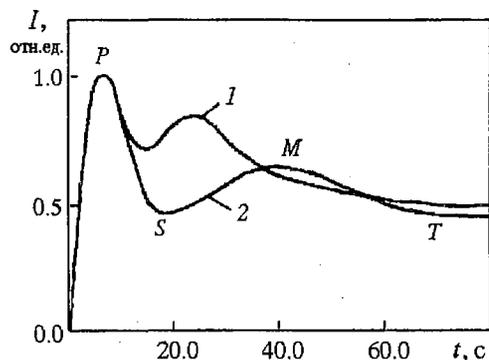


Рис. 2. Кривые медленной индукции флуоресценции листьев бобов, выращенных на обработанной переменным магнитным полем воде с $H_0=12.3$ А/м и $f=156.3$ Гц (кривая 1) и листьев контрольных бобов (кривая 2)

существенному изменению формы кривой индукции (сохраняется двухвершинный характер МИФ), что свидетельствует о сохранении механизмов, ответственных за отдельные стадии МИФ. Вместе с тем, заметно уменьшаются времена достижения второго максимума и стационарного уровня флуоресценции (см.рис. 2), а отношение M/T увеличивается (см. таблицу). Это указывает на более эффективную регуляцию в системе световых и темновых реакций фотосинтеза в случае растений, выращенных на подвергнутой «резонансной» магнитной обработке воде.

Сравнение параметров МИФ и биометрических показателей (см. таблицу) показывает, что наблюдается корреляция между степенью тушения флуоресценции на участке $M-T$ кривой МИФ и основными биометрическими показателями: размером корешков и стеблей проростков. Это согласуется с литературными данными о стимулирующем действии магнитной обработки воды на эффективность сопряжения световых и темновых реакций и на фотосинтетическую активность, поскольку фотосинтез является предпосылкой роста, обеспечивая последний в энергетическом и материальном отношении. Следовательно, обработка воды переменным магнитным полем (с $H_0=12.3$ А/м и $f=156.3$ Гц) стимулирует фотосинтетическую активность.

Таким образом, переменное магнитное поле влияет на фотосинтез и биометрические показатели растений опосредовано, изменяя физические параметры воды. Влияние его на воду резонансное, причем зависит от соотношения амплитуды и частоты магнитного поля. Кроме изменения $\text{tg}\delta$ при обработке воды переменным магнитным полем наблюдаются резонансные изменения и ряда других физических характеристик воды: электропроводности, теплопередачи, величины переохлаждения, светорассеяния и др. (см., например, [3, 4, 7]). Нерезонансное магнитное поле не влияет на воду и поэтому не влияет на растения. В дальнейшем представляет интерес поставить сравнительные исследования по влиянию подобной магнитной обработки воды на физиологию других биосистем для выявления биологически значимых физических параметров воды.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, гранты 94-02-0407а и 95-02-05186а.

Библиографический список

1. *Копанев В.И., Шакула А.Н.* Влияние гипوماгнитного поля на биологические объекты // М.: Наука, 1986. С.100.
2. *Махнев В.П.* Влияние магнитного поля на прорастание семян // Биологические механизмы и феномены действия низкочастотных и статических электромагнитных полей на живые системы. Томск, 1984. С.24.
3. *Семихина Л.П., Киселев В.Ф., Левшин Л.В., Салецкий А.М.* Влияние слабых магнитных полей на некоторые оптические свойства воды // Журн. прикл. спектр. 1988. Т. 48, № 5. С.841.
4. *Киселев В.Ф., Салецкий А.М., Семихина Л.П.* О влиянии слабых магнитных полей и СВЧ-излучения на некоторые диэлектрические и оптические свойства воды и водных растворов // Журн. теоретич. и эксперим. химии. 1988. № 3. С. 330.
5. *Карпетян Н.В., Бухов Н.Г.* Переменная флуоресценция хлорофилла как показатель физиологического состояния растений // Физиология растений. 1986. Т. 35, вып.5. С.1013.
6. *Караваев В.А., Шагурина Т.Л.* Медленная индукция флуоресценции и CO_2 - газообмен листьев бобов в присутствии различных химических агентов // Физиология растений. 1988. Т. 35, вып.5. С. 962.
7. *Березин М.В., Ляпин Р.Р., Салецкий А.М.* Препринт № 22. М.: МГУ, физ. ф-т, 1988.

Московский государственный
университет

Поступила в редакцию 01.12.94
после переработки 13.12.95

WEAK MAGNETIC FIELDS INFLUENCE ON GROWTH AND LEAVES PHOTOSYNTHESIS ACTIVITY OF BEANS

A.I. Akimov, A.N. Baranov, A.M. Saletsky

Slow induced leaves fluorescence changes of beans (*Vicia faba* L. sort Russian black), grown on distilled water and worked up by weak variable magnetic field with amplitude 12.3 A/m and frequency 156.3 PPS and also influence of such water processing on beans growth have been studied. It is shown that the magnetic field processing of water stimulates beans growth and photosynthesis.



Акимов Анатолий Иванович - родился в 1922 году, окончил Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (1947). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в МГУ (1959) в области атомной спектроскопии. Старший научный сотрудник МГУ. Область научных интересов - квантовая электроника, люминесцентные и генерационные свойства сложных органических соединений, применение оптических методов в различных областях физических исследований. Опубликовал свыше 100 научных статей по направлениям, названным выше. Лауреат Государственной премии СССР.



Баранов Анатолий Николаевич - родился в 1955 году, окончил физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (1978). После окончания работал в Физическом институте им. П.Н. Лебедева АН СССР, в настоящее время ассистент физического факультета МГУ. Область научных интересов - квантовая электроника, газовая динамика, межмолекулярные взаимодействия, применение оптических методов исследования в различных областях физических исследований. Опубликовал около 30 научных статей по указанным направлениям.



Салецкий Александр Михайлович - родился в 1952 году, окончил физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (1979) и аспирантуру (1981). Тогда же защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в области молекулярной спектроскопии, доцент МГУ. Область научных интересов - квантовая электроника, молекулярная спектроскопия сложных органических соединений, межмолекулярные взаимодействия. Автор монографий «Люминесценция и ее измерения» и «Лазеры на основе сложных органических соединений». Опубликовал около 200 статей по вышеуказанным направлениям.



СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА О ГИГИЕНИЧЕСКОМ РЕГЛАМЕНТИРОВАНИИ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ШТАММОВ В ОБЪЕКТАХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Ю. П. Пивоваров, В. В. Королик

В работе впервые определены количественные критерии и схема первичной санитарно-гигиенической оценки патогенных свойств штаммов, предлагаемых для использования в биотехнологии. Получены результаты, доказывающие негативное воздействие биотехнологических штаммов на биоценоз и процессы самоочищения воды водоемов и почвы. Дано деление производственных штаммов на группы по выраженности их патогенных свойств и степени воздействия на объекты окружающей среды. Обоснована необходимость комплексных гигиенических исследований при регламентировании промышленных микроорганизмов в окружающей среде. Даны основные этапы исследований при разработке гигиенических регламентов содержания биотехнологических штаммов в окружающей среде.

Достижения современной науки открыли новые возможности широкого использования микроорганизмов в народном хозяйстве. В медицинской промышленности - это биосинтез аминокислот, антибиотиков, ферментов, вакцинных и целого ряда других препаратов; в сельском хозяйстве - биологические средства защиты растений, белково-витаминные концентраты, кормовые дрожжи, ветеринарные фармацевтические препараты и т.д.; в пищевой промышленности - переработка пищевых продуктов, использование микроорганизмов в приготовлении ряда продуктов питания; в области охраны окружающей среды - переработка отходов различных отраслей промышленности, исключение применения ядохимикатов.

В связи с развитием биотехнологии возрастает роль биологического компонента загрязнения окружающей среды, который включает в себя промышленные микроорганизмы и продукты их жизнедеятельности, способные оказывать прямое или косвенное воздействие на здоровье человека. Многочисленные исследования свидетельствуют о том, что производимые и применяемые микробные препараты при определенных условиях могут вызывать у человека пищевые отравления, различные аллергические заболевания, заболевания кожи. Взрослые люди и, особенно, дети в несколько раз чаще болеют ларинготрахеитами, пневмониями, ангинами и отитами в случаях проживания в районах расположения биотехнологических производств.

Доказано, что воздушные выбросы и сточные воды предприятий биотехнологии, а также применение микробиологических средств защиты растений являются мощным источником поступления микроорганизмов-продуцентов в окружающую среду: атмосферный воздух, водные объекты, почву, растительные

продукты питания. В результате наблюдается значительное загрязнение всех объектов окружающей среды, в связи с чем может произойти нарушение микробиоценозов, процессов самоочищения, увеличение сроков выживания патогенных микроорганизмов в воздухе, воде и почве. Все это способно повлечь негативные эпидемиологические и экологические последствия.

Указанные обстоятельства выдвигают в качестве чрезвычайно важной проблемы гигиеническое нормирование микроорганизмов-продуцентов в различных объектах окружающей среды.

Многое в этом направлении уже достигнуто. По мнению ряда исследователей нормированию подлежат штаммы промышленных микроорганизмов, прошедшие первичную санитарно-гигиеническую оценку патогенных свойств с использованием наиболее доступных методов исследования. Соответствующие методические рекомендации на основании многолетних исследований разработаны нами [1]. Согласно этому документу, первичная гигиеническая оценка микроорганизмов-продуцентов заключается в следующем.

Первый этап исследований - постановка эксперимента на животных с определением средневирulentной дозы, диссеминации штаммов во внутренних органах экспериментальных животных, определения «пороговой» дозы и токсичности. В случае установления хотя бы одного из перечисленных показателей в определенных количественных значениях, исследования можно закончить на этом этапе. Такие штаммы следует отнести к группе микроорганизмов, не рекомендуемых к использованию на предприятиях биотехнологии.

В противном случае, необходимо перейти ко второму этапу исследований, включающему определение «ферментов патогенности». Для этого количественно изучается гиалуронидазная активность, определение гемолизина, желатиназной, лецитиназной и декарбоксилазной активности штаммов. На основании полученных данных и разработанных количественных критериев решается вопрос о возможности применения микроорганизмов в биотехнологии. В соответствии с критериями оценки патогенных свойств все штаммы-продуценты делятся на три группы:

- штаммы, не рекомендуемые к использованию;
- штаммы, находящиеся на грани риска их применения;
- штаммы, рекомендуемые к промышленному применению.

Подходы к нормированию остаточных количеств микробных инсектицидов в продуктах питания разработаны в ряде исследований [2 - 4]. Эти подходы существенно отличаются от таковых при нормировании химических веществ, поскольку показатели токсичности не являются критериями вредности данных препаратов. Определяющими здесь служат патогенность микроорганизмов, входящих в препарат и их антагонистическое действие по отношению к нормальной микрофлоре; выживаемость этих микроорганизмов в процессе кулинарно-технологической обработки продуктов, а также их размножение в готовых продуктах при различном температурном режиме хранения в зависимости от массивности обсеменения растительного сырья, вида растительного продукта, характера кулинарной обработки.

Принципы гигиенического нормирования микробных препаратов в воздухе рабочей зоны также сформулированы и основаны на определении патогенности микробного аэрозоля, видовой чувствительности макроорганизма к исследуемым штаммам, выживаемости последних в воздухе. Методы исследования патогенных свойств, обоснование ПДК промышленных микроорганизмов в воздухе рабочей зоны, атмосферном воздухе изложены в соответствующих методических указаниях [5].

Наименее изученными вопросами являются вопросы гигиенического нормирования штаммов-продуцентов в воде водоемов и в почве. К нормированию микроорганизмов-продуцентов, по нашему мнению, следует подходить комплексно. Основными этапами исследований должны быть: определение патогенных свойств микроорганизмов-продуцентов, их выживаемость в воде и почве, влияние на микробиоценоз и процессы самоочищения этих объектов.

Учитывая качественное отличие изучаемых агентов (живые клетки),

принципы их гигиенического нормирования существенно отличаются от таковых, используемых при обосновании ОБУВ и ПДК химических вредных веществ, в том числе продуктов микробиологического синтеза (кормовых белков, аминокислот и др.). Так, по мнению многих исследователей, показателями опасности действия непатогенных (не вызывающих у человека инфекционных процессов) микроорганизмов-продуцентов является транзитное бациллоносительство (диссеминация во внутренних органах), а также специфическое влияние на иммунную систему (иммунотоксичность) и на нормальную микрофлору макроорганизма (дисбиотическое действие) [4,5]. В соответствии с этими положениями предлагается следующая схема исследований: проведение хронического эксперимента для выявления лимитирующего критерия вредности (иммунотоксического, дисбиотического или по диссеминации микроорганизма во внутренних органах). На основании полученных данных устанавливают порог хронического действия.

Следующим необходимым этапом работы являются исследования по изучению воздействия микроорганизмов-продуцентов на микробиоценоз и процессы самоочищения воды водоемов и почвы. Этому вопросу были также посвящены настоящие исследования.

Основным этапом в изучении воздействия микроорганизмов-продуцентов на микробиоценоз и процессы самоочищения воды водоемов и почвы было моделирование условий, максимально приближенных к естественному протеканию этих процессов в природных условиях. В эксперимент были взяты штаммы-продуценты, относящиеся к различным таксономическим группам: спорообразующие бактерии, неспорообразующие бактерии и грибы. В задачу исследования входило изучение воздействия штаммов-продуцентов, в условиях однократного и многократного загрязнения воды и почвы, на следующие объекты:

- микроорганизмы, которые являются основными участниками процессов самоочищения воды и почвы от органического и микробного загрязнения;
- микроорганизмы, которые используются в качестве показателей оценки качества воды и почвы в отношении эпидемической опасности;
- химические показатели самоочищения воды и почвы.

В отношении воды водоемов целесообразно изучение влияния штаммов-продуцентов на обитателей водоемов. В соответствии с этим, воздействие микроорганизмов-продуцентов на процессы самоочищения, водный микробиоценоз и сроки выживания в воде патогенных и санитарно-показательных микроорганизмов определялось с помощью учета следующих показателей:

- идентификация до родов и количественный учет сапрофитных микроорганизмов, выделенных из воды;
- определение числа сапрофитных микроорганизмов;
- определение числа лактозоположительных кишечных палочек;
- определение бактерий группы кишечных палочек;
- определение количества микроорганизмов физиологических групп (протеолитов, аммонификаторов, нитрификаторов);
- количество и сроки выживания патогенных энтеробактерий *S. typhimurium* в воде;
- определение рН воды, растворенного кислорода, биохимического потребления кислорода, азота аммиака, азота нитритов, азота нитратов;
- показатели жизнеспособности обитателей водоемов (рачков *Daphnia magna* и рыб - гуппи).

Воздействие микроорганизмов-продуцентов на процессы самоочищения почвы, на почвенный биоценоз и сроки выживания в почве патогенных и санитарно-показательных микроорганизмов изучалось с помощью следующих критериев:

- общая численность сапрофитных микроорганизмов;
- общее число и процент почвенных бактерий;
- количество почвенных грибов и актиномицетов;
- концентрация азота, аммония и нитратов;

- динамика разрушения клетчатки;
- сроки выживания в почве тест-микроорганизмов (*E.coli* и *S.typhimurium*);
- токсичность почвы к тест-микроорганизмам.

Естественно что при оценке воздействия промышленных микроорганизмов на биоценоз и процессы самоочищения водных объектов и почвы нет единых количественных критериев, характеризующих процессы самоочищения, жизнеспособность обитателей водоемов, микробиоценоз воды и почвы. Это зависит от целого ряда условий: климатических, типов почвы и водоемов, вида земле- и водопользования и других причин. Действие микроорганизмов-продуцентов следует учитывать по достоверному изменению вышеуказанных показателей во времени в эксперименте, относительно контрольных образцов, не содержащих микроорганизмов-продуцентов.

Экспериментальные исследования воздействия биотехнологических штаммов на микробиоценоз и процессы самоочищения воды водоемов выполнялись на модельных водоемах с нативной речной водой из р. Москвы. Модельные водоемы содержались при комнатной температуре на рассеянном свете. Концентрации микроорганизмов, вносимых в водоемы, соответствовали их количеству в местах выпуска сточных вод. *S.typhimurium*, как представителей патогенной микрофлоры, вносили в количествах 10-50 кл/мл, *E.coli* - 10⁴ кл/мл. Микроорганизмы-продуценты вносили в концентрациях 10⁴, 10⁶ и 10⁸ кл/л, то есть в количествах возможного попадания в воду водоемов с промышленными, ливневыми водами или с сельскохозяйственных полей. В одной серии опытов штаммы-продуценты вносились однократно, в другой - 3 раза с интервалом в 5 суток. Определяли влияние промышленных микроорганизмов на водный микробиоценоз. Идентификация микроорганизмов-сапрофитов осуществлялась в соответствии с разработанным нами кодом-определителем [6].

В основу исследований по почве положена методика «почвенных закладок» [7]. Экспериментальную почву обсеменяли культурами тест-микроорганизмов из расчета: *E.coli* - 10⁶ клеток на 1 г почвы, *S.typhimurium* - 10⁴ кл/г, то есть в количествах, близких к естественному фекальному загрязнению почв. В почву опыта вносились микроорганизмы-продуценты в количествах 10⁸ кл/г почвы. В одной серии опытов обсеменение почвы промышленными микроорганизмами проводилось однократно, в другой серии - 5 раз с интервалом в 10 суток. Для оптимизации процессов нитрификации использовали методику Н.И. Хлебникова [8]. Почву помещали в лабораторные сосуды и сетчатые капроновые мешки для проведения лабораторных и натуральных экспериментов. Капроновые мешки опускали в грунт опытного участка. Кроме того, в изучаемую почву опыта и контроля закладывали полоски ткани из чистого льна [9].

Результаты исследований показали, что загрязнение почвы биотехнологическими штаммами родов *Pseudomonas* и *Candida* вызывает разбалансировку почвенного микробиоценоза и подавляет самоочищающую способность почвы, что необходимо учитывать при разработке гигиенического нормирования данных микроорганизмов в окружающей среде. Напротив, микроорганизмы-продуценты рода *Bacillus* не подавляют процессов самоочищения почвы и не оказывают отрицательного действия на почвенный микробиоценоз. С этих позиций загрязнение почвы такими микроорганизмами может не учитываться при разработке гигиенических регламентов поступления этих штаммов в окружающую среду.

Данные исследований по загрязнению воды водоемов промышленными микроорганизмами на примере *Bac.thuringiensis* и *Brevi Bact.flavum* показали, что при попадании в воду изученные штаммы сохраняются в ней в течение длительного времени - полутора и более месяцев. Интенсивное и особенно многократное загрязнение воды клетками продуцентов приводит к изменению структуры сапрофитной микрофлоры. Процессы самоочищения воды, содержащей высокие концентрации промышленных микроорганизмов, протекали менее интенсивно. Содержание в экспериментальной воде кишечных палочек и бактерии этой группы было значительно выше, чем в контроле, а сроки выживания патогенных энтеробактерий *S.typhimurium* - более длительные. Установлено, что в условиях

массивного и многократного загрязнения штаммами-продуцентами воды процессы биохимического окисления органических веществ подавляются, а содержание растворенного кислорода в воде водоемов снижается.

Воздействие штаммов *Bac.thuringiensis* и *Brevi Bact.flavum* на жизнедеятельность и выживаемость рыб и ракообразных не выявлено.

Таким образом, по степени воздействия на объекты окружающей среды все штаммы-продуценты, предлагаемые к использованию в биотехнологии, можно разделить на 3 группы.

1-я группа - штаммы-продуценты, которые не могут быть использованы в биотехнологии и не подлежат гигиеническому нормированию. К этой группе следует относить штаммы-продуценты, способные к размножению в воде водоемов и почве.

2-я группа - штаммы-продуценты, которые могут быть использованы в биотехнологии и не подлежат гигиеническому нормированию (с позиций отсутствия воздействия на окружающую среду). К этой группе следует относить штаммы-продуценты, не размножающиеся в окружающей среде и не обладающие негативным воздействием на микробиоценоз и процессы самоочищения воды водоемов и почвы.

3-я группа - штаммы-продуценты, которые могут быть использованы в биотехнологии при условии гигиенического нормирования этих микроорганизмов в объектах окружающей среды. К этой группе следует относить штаммы-продуценты, не размножающиеся в воде водоемов и почве и воздействующие на микробиоценоз и процессы самоочищения воды водоемов и почвы в определенных концентрациях.

На основании результатов собственных исследований и данных литературы должны быть сделаны следующие выводы:

1. Регламентирование биотехнологических штаммов в объектах окружающей среды возможно лишь при комплексной гигиенической оценке воздействия этих микроорганизмов на окружающую среду и здоровье человека.

2. Обязательными этапами исследований при разработке гигиенических нормативов в водных объектах и почве являются:

первичная санитарно-гигиеническая оценка патогенных свойств производственных штаммов;

постановка хронического эксперимента на лабораторных животных;

изучение выживаемости микроорганизмов-продуцентов в воде и почве и оценка воздействия этих штаммов на процессы самоочищения и микробиоценоз воды водоемов и почвы.

Библиографический список

1. Критерии оценки патогенных свойств штаммов-продуцентов, предлагаемых для использования в промышленности микробиологического синтеза: Методические рекомендации. М., 1992. 23 с.

2. *Ивашина С.А.* Биологическая и гигиеническая оценка энтомопатогенных микроорганизмов из группы *Bac.cereus*, применяющихся в производстве бактериальных препаратов: Автореф. дисс. канд. биол. наук. М., 1974. 24 с.

3. *Дабуров К.Н.* Гигиеническое обоснование регламентов применения бактериальных инсектицидов на основе *Bacillus thuringiensis* в сельском хозяйстве: Автореф. дисс. канд. мед. наук. М., 1980. 24 с.

4. *Омельянец Т.Г.* Гигиенические аспекты охраны окружающей среды в связи с применением в сельском хозяйстве микробных препаратов на основе неспорообразующих микроорганизмов: Автореф. дисс. докт. мед. наук. М., 1982. 38 с.

5. Методические указания по экспериментальному обоснованию ПДК микроорганизмов-продуцентов и содержащих их готовых форм препаратов в объектах производственной и окружающей среды. М., 1991. 22 с.

6. *Пивоваров Ю.П., Меренюк Г.В., Лапенков М.И.* Определитель санитарно-значимых микроорганизмов. Кишинев: «Штиинца», 1982. 156 с.

7. *Соболева К.П., Волкова Д.А., Тарков М.И.* Размножение патогенных клостридий в почве. Кишинев: «Штиинца», 1977. 143 с.

8. *Хлебников Н.И.* Исследования по обеззараживанию промышленных сточных вод на сельскохозяйственных полях. М., 1965. С.5.

9. *Востров И.С., Петрова А.Н.* Определение биологической активности почвы различными методами // Микробиология. 1961. Т.30, вып.4. С. 665

2-й Московский медицинский институт

Поступила в редакцию 1.12.94
после переработки 13.12.95

Российский государственный медицинский университет

A MODERN CONSIDERATION OF THE PROBLEM OF HYGIENIC NORMS OF BIOTECHNOLOGICAL BACTERIA CULTURES IN ENVIRONMENT

Y.P. Pivovarov, V.V. Korolik

This work is the first to define the quantitative criteria and scheme of initial sanitary-hygienic evaluation of pathogenic characteristics of cultures of bacteria, proposed for biotechnological use. The reserved results prove the negative action of biotechnological cultures of bacteria on biocoenosis and processes of self-purifying of water in natural sources and soil. The division of industrial cultures of bacteria in groups according to the manifestation of their pathogenic characteristics and degree of action on environmental objects are given. The necessity of complex hygienic research work for finding out the normal concentration of industrial microorganisms is motivated. The main stages of research for hygienic norms of environmental concentration of biotechnical culture are described.



Пивоваров Юрий Петрович - родился в 1936 году в Луганске, окончил лечебный факультет 2-го Московского медицинского института (1962). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата медицинских наук (1966) и диссертацию на соискание доктора медицинских наук (1971) во 2-м Московском медицинском институте. Профессор, чл.-корр. РАМН. Область научных интересов - экология, санитарная микробиология и гигиена питания. Автор нескольких монографий, в том числе: «Определитель санитарно-значимых микроорганизмов», «Справочник по санитарной микробиологии» и трех учебников. Опубликовал более 150 научных статей по направлениям, указанным выше. Зам.председателя секции «Новые медицинские технологии» Головного Совета «Экология и здоровье», председатель секции «Гигиенические аспекты биотехнологии и микробного загрязнения окружающей среды» Проблемной комиссии «Научные основы экологии человека и гигиены окружающей среды», зам. председателя секции по преподаванию вопросов экологии Всероссийского учебно-методического Совета МЗ РФ.



Королик Виктор Вячеславович - родился в Москве в 1952 году. Окончил лечебный факультет 2-го Московского медицинского института (1976) и работает на кафедре гигиены этого института. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата медицинских наук в Ленинградском санитарно-гигиеническом институте (1981). Доцент кафедры гигиены Российского государственного медицинского университета. Область научных интересов: экология, санитарная микробиология, гигиена питания. Опубликовал более 30 научных статей по указанным выше направлениям. Член секции «Гигиенические аспекты биотехнологии и микробного загрязнения окружающей среды» Проблемной комиссии «Научные основы экологии человека и гигиены окружающей среды».



ДИНАМИЧЕСКИЙ ГОМЕОСТАЗ: РАВНОВЕСИЕ, СТАЦИОНАРНОЕ СОСТОЯНИЕ, ХАОС?

Т. Н. Воробьева

Для различных биологических систем возможность достичь некоторой стабильности (толерантности) реализуется либо при переходе в равновесие, либо путем поддержания стационарного состояния, когда ключевые характеристики системы остаются неизменными. Существование нескольких стационарных состояний, которые могут быть как устойчивыми, так и неустойчивыми, предполагает возможность возникновения в системе триггерных эффектов - переключения из одного режима в другой, колебаний функциональных характеристик, а также могут быть основой для так называемого хаотического поведения системы. Специфические гомеостатические реакции, составляющие механизм общей адаптации, проявляются как варианты реализации в организме устойчивых и неустойчивых стационарных состояний и переходов между ними. Анализируется ряд существующих математических моделей, которые включают представления об устойчивости нелинейных уравнений динамики систем: электронного и трансмембранного биологического переноса, а также ритмики сердечно-сосудистой системы.

Название статьи умышленно перекликается с работой А. Гольдбергера «Нормальное сердцебиение - хаотично или гомеостатично?» [1]. Это следствие того, что применение идеи хаоса к описанию поведения биологических систем, особенно по отношению к экологическим и медико-биологическим проблемам не только «витают в воздухе», но также воплощается в результатах конкретных исследований [2]. Название оканчивается вопросительным знаком, так как утвердительные формулировки здесь, пожалуй, преждевременны. Хотя есть уже некоторые позиции, которые сегодня могут быть обозначены общими усилиями специалистов указанных смежных областей.

Биологические системы являются очень сложными, как говорится, «по определению». Сложный динамический характер живых систем состоит в одновременном протекании сопряженных процессов, а проявляется через характерные отклики отдельных подсистем и в реакции системы в целом на изменение условий окружающей среды. Две особенности - динамический неравновесный характер протекающих в них процессов и закодированная в ДНК информационная природа управления ими - задают степень сложности математического моделирования. По-видимому, следует согласиться с А. М. Молчановым, утверждающим, что в современной науке хотя и дошло дело до создания математической биологии, однако математика еще «не доросла» до решения задач клеточной биологии (устное сообщение). Такие фундаментальные задачи, входящие в представление о живых системах, как процессы

самоорганизации, роста, развития, приспособления (адаптации), воспроизведения, регенерации, старения и смерти, в настоящее время могут решаться с привлечением математики лишь фрагментарно.

Как показывают кинетические исследования на математических моделях, существенной особенностью биологических процессов являются их нелинейность и необратимость отдельных стадий [3-5]. Задача исследования регуляции биологических процессов и систем различного уровня организации усложнена наличием множества связей между элементами, изменчивостью их во времени. Эти обстоятельства оказываются предпосылкой возникновения сложных динамических эффектов, проявляющихся как через свойственные биосистемам структурную и функциональную организации, возникновение различных режимов поведения во времени, среди которых важное место занимают колебательные процессы, так и через возникновение беспорядка, хаоса [6-8]. Последние из перечисленных явлений как бы делают бесспорной всеобщность применения динамических систем и провоцируют постановку целого комплекса философских вопросов [9].

При исследовании механизмов различных биологических процессов особо важным оказывается проводить анализ и давать описание стационарных состояний - стационарных режимов функционирования системы. Фактически, отличие живой системы от неживой находится на грани между возможностью «уйти» в так называемое равновесное состояние и, с другой стороны, способностью системы поддерживать стационарное состояние, когда ее ключевые характеристики остаются неизменными. Часто при анализе конкретных биологических и физиологических систем эти два понятия смешивают, так как они оба означают достижение системой некоторой стабильности. Однако, в состоянии термодинамического равновесия «покой» системы состоит в том, что характеристики системы не изменяются вследствие того, что в ней ничего не происходит. Стационарное же состояние реализуется за счет того, что в системе одновременно протекают процессы (термодинамические потоки), стационарный режим которых означает неизменность не только параметров (характеристик), но и скоростей изменения переменных характеристик.

В физиологии равным по значимости понятию стационарного состояния (СС) является представление о гомеостазе [10,11]. Не случайно при применении представлений о СС и о гомеостазе первоначально ссылались на принцип Ле Шателье - Брауна, который устанавливает, что внешнее воздействие, выводящее систему из состояния термодинамического равновесия, вызывает в системе процессы, стремящиеся ослабить эффект воздействия. Принцип смещения равновесия в зависимости от температуры высказан голландским физико-химиком Я. Вант-Гоффом (1884), в общем виде установлен французским химиком А. Ле Шателье (1884) и термодинамически обоснован немецким физиком К. Брауном (1887). Принцип задает (позволяет определять) направление смещения равновесия термодинамических систем без детального знания условий равновесия [12]. В 1935 году Э.С. Бауэром был сформулирован принцип устойчивого неравновесия: «Все и только живые системы никогда не бывают в равновесии и исполняют за счет своей свободной энергии постоянно работу против равновесия, требуемого законами физики и химии при существующих внешних условиях» [13]. Понятие устойчивого неравновесия Э.С. Бауэра фактически соответствует современному понятию стационарного состояния открытых систем [14]. Стационарное состояние неравновесно; оно может быть устойчивым или неустойчивым и безусловно относится не только к живым, но и к множеству физико-химических систем. И хотя Э.С. Бауэр считал, что принцип Ле Шателье неприменим к живым системам и утверждал, что устойчивое неравновесие (стационарное состояние) характерно и специфично только для живых систем, с точки зрения современной термодинамики необратимых процессов эти два принципа объясняют поведение открытых биологических систем в окрестности равновесного и стационарного состояний, а уравнения Бауэра [14] аналогичны уравнениям термодинамики необратимых процессов [15].

При использовании метода математического моделирования в исследовании

биологических систем задают некоторую конструкцию системы - схему сопряжения в ней различных процессов. Механизм взаимодействия ее элементов математически выражают через особую форму зависимости скорости каждого потока от параметров. Уже при качественном анализе соответствующей математической модели удается составить представление о возможных режимах ее функционирования. Известно, что в динамической системе могут быть «запрограммированы» ее структурой и одно, и несколько стационарных состояний, которые могут быть как устойчивыми, так и неустойчивыми. Тип особой точки и характер устойчивости определяют динамику системы, например, возможность реализации в ней колебательных режимов функционирования. Информация о характере колебаний - затухающие или незатухающие, периодах, фазах, амплитудах - отражена в фазовом портрете модели.

Важно также различать так называемые локальную устойчивость стационарных состояний и циклов, с одной стороны, и структурную устойчивость, с другой. Локальная устойчивость системы может изменяться при варьировании ее параметров, характеристик окружающей среды и взаимодействия между ними. При изменении параметров локальная устойчивость стационарных состояний и циклов может изменяться, проходя при этом через бифуркационную точку. Инициирование, равно как и прекращение колебаний в физиологической или другой системе с математической точки зрения могут быть описаны бифуркациями. Структурная устойчивость стационарного состояния системы предполагает, что при возмущении (сколь угодно малом) самой структуры уравнений, то есть и той биологической системы, которую они описывают, и связей в ней, ее основные качества остаются неизменными.

Стационарное сопряжение процессов на клеточном, тканевом, органном и организменном уровне является основой поддержания гомеостаза каждого живого организма. При некотором изменении внешних условий возможно отклонение некоторых из подсистем организма от своего стационарного состояния. Насколько дальнейшее функционирование организма изменится в результате приложения конкретного воздействия, зависит прежде всего от числа и характера устойчивости стационарных состояний у каждой из его подсистем. По-видимому, в связи с утверждением такого представления о гомеостазе, в настоящее время применяют термин «динамический гомеостаз организма» [1,11].

Характерной особенностью организации сложной живой системы является существование двух или нескольких различных стационарных режимов функционирования входящих в нее подсистем, переходы между которыми и составляют основу регуляции системы в целом. В системе фотосинтетических реакций, как это видно из исследованных нами ранее на математических моделях особенностей электронно-транспортных процессов различных фотосинтезирующих организмов [16-23], разнообразное по кинетическим проявлениям поведение системы переноса электрона начальных стадий фотосинтеза реализуется в рамках ее кинетической устойчивости. Кинетический анализ редокс превращений компонентов фотосинтетических реакционных центров бактерий и двух фотосистем высших растений показал, что такие механизмы регуляции на уровне пигмент-белковых комплексов фотосинтетических реакционных центров существуют как регуляторные переходы между различными функциональными состояниями типа «темнота» - «свет» - «темнота» (см., например, [19,20]). Идентификация констант скоростей переноса электрона на отдельных участках электрон-транспортной цепи в разных условиях эксперимента показала универсальный характер световой регуляции фотосинтетических реакционных центров (ФРЦ). Фиксируемое при идентификации параметров математических моделей различие эффективных значений констант скоростей переноса электрона между отдельными компонентами ФРЦ на свету и в темноте свидетельствует о наличии различных конформационных состояний ФРЦ. Эти состояния отличаются взаимным расположением активных групп донорных и акцепторных компонентов и, как следствие, отличающимися реакционной способностью и кинетическими характеристиками.

Устойчивость регуляторных систем ФРЦ выявляется и при анализе кинетических характеристик мультиферментных комплексов - фрагментов, выделенных из нативных фотосинтезирующих организмов. Они свидетельствуют о сохранении в этих фрагментах способности эффективно осуществлять первичные реакции разделения зарядов и главного регуляторного свойства таких систем - конформационной подвижности. Переходные процессы, исследованные нами на фотосинтезирующих ор-ганизмах, имеют сходную природу с циркадными ритмами на разных уровнях организации живых систем (см. [6, с. 263-306]). Именно выработанная всем ходом эволюции временная иерархия многочисленных физиологических и биохимических реакций, протекающих в функциональных системах различных организмов, является предпосылкой согласования различных ритмических процессов и обеспечивает устойчивую адаптацию к условиям окружающей среды.

В других моделях, описывающих ионный транспорт в бислойных липидных мембранах [24], мы имеем пример возникновения на основе локальной неустойчивости колебаний концентрации ионов, а также способность резонансного отклика на внешнее переменное воздействие (например, электрическое поле). Разнообразие кинетического поведения продемонстрировано на многочисленных моделях систем биологического мембранного транспорта, при качественном анализе которых наблюдаются фазовые портреты различного типа и, соответственно, возможна реализация многообразия колебательных режимов. В наших математических моделях системы трансмембранного переноса ионов (K^+ и H^+) посредством переносчика (Т), с образованием комплексов (КТ и НТ), появление множественных стационарных состояний сопряжено с усложнением системы, при котором учитывается неравновесность реакций на границе мембрана - водный раствор в присутствии буфера. S-образная кривая зависимости протонного потока от концентрации буфера возникает в модели, учитывающей гипотетическую возможность диффузии буфера через непроницаемый слой к мембране. Нелинейность стационарного потока проявляется в кинетике реакций переноса ионов: фазовый портрет системы в координатах НТ - H^+ представляет собой устойчивый фокус, кинетические кривые - затухающие колебания концентрации ионов и комплексов соответственно. Рассмотрение отклика нелинейной модельной системы трансмембранного переноса на периодическое электрическое поле малой интенсивности (предполагалось, что полем модулируется параметр скорости притока ионов) продемонстрировало возможность резонансного отклика исследуемой системы. Воздействие электрического поля низкой интенсивности может усиливаться за счет нелинейности системы и внешний слабый сигнал приводит к значительным изменениям концентрации ионов в примембранном слое: вынужденные колебания, в отличие от собственных, носят незатухающий характер и значительно превосходят их по амплитуде.

Возможно, что подобные регуляции и отклики осуществляются и на внеклеточном уровне в живых системах. Установлено, что важнейшей чертой физиологической организации является система связей, главная функция которой не возбуждение и поддержание колебаний, а их согласование по частоте и фазе (см. [6, с. 263-306]). При этом надо учитывать, что в сложноорганизованных системах имеет место целая иерархия циклических колебаний и биологический ритм каждой функциональной системы обычно является результатом согласования и интеграции ряда более элементарных колебаний (так называемой хроноструктурной упорядоченности и организованности [25]).

Система мембранного транспорта ионов, подобная исследованной нами, в некоторых условиях может представлять собой резонансную систему и на выделенных частотах осуществлять периодическое выделение ионов (например, протонов) во внутримембранную среду. Амплитуды таких колебаний могут быть весьма значительными. В свою очередь локальные примембранные концентрации протонов служат граничными условиями для процессов реакции-диффузии во внутримембранном пространстве. Неоднородность граничных условий может

приводить к образованию автоволновых режимов и диссипативных структур, создающих предпочтительные условия для протекания отдельных биологически значимых реакций. Целесообразным представляется развитие модели для решения вопроса об эндогенной и экзогенной природе отдельных биологических ритмов. Подобные системы с резонансным откликом, по-видимому, способны осуществлять синхронизацию биоритмов - основу пространственно-временной самоорганизации живых систем. За счет механизмов синхронизации циркадианная динамика, являясь основой гомеостаза, способна обеспечить не только управление срочными адаптационными изменениями, но и достижение состояния устойчивой сопротивляемости организма.

Адаптация - сохранение энергетики организма и поддержание вегетативного или функционального гомеостаза, обеспечивается, в частности, и специфическими сдвигами в тканях и органах, повышающими устойчивость к изменяющимся условиям среды [26]. В адаптационном процессе выделяют ряд стадий, каждая из которых - состояние системы с некоторым набором параметров. В процессах гомеостатической регуляции выделяют помимо гомеостаза покоя различные варианты деятельности. Так называемые «гомеостатические кривые» - изменение отклика физиологической системы организма на некоторое воздействие - содержат «нерасшифрованную» информацию о возможностях реализации в системе различных стационарных состояний и режимов поведения.

Два направления экологической физиологии (*environmental physiology*) - физиология ответов (*response physiology*) и физиология устойчивости (*tolerance physiology*) изучают неспецифическую устойчивость - резистентность организма к внешним воздействиям и исследуют физиологические реакции - ответы на различные изменения среды, включающие неспецифические стресс-реакции и вызываемые ими состояния «общего напряжения организма» [27]. По сути перечисленные явления - варианты реализации в организме устойчивых и неустойчивых стационарных состояний и переходов между ними, идентификация которых составляет перспективную задачу для математического моделирования физиологических процессов.

В упомянутой вначале статье А. Гольдбергера [1] проведена трактовка изменений показателей сердечной ритмики именно в терминах нелинейной динамики. Фазовый портрет в системе переменных - характеристик: частота сердечных сокращений (ЧСС)/показатель спада ЧСС, позволил автору утверждать, что фазовое пространство, характерное для нормального синусового ритма (у здорового пациента) соответствует типу фазового портрета - так называемому странному (хаотическому) аттрактору. Сердечная ритмика больного человека носит колебательный характер и фазовый портрет - периодический аттрактор (так называемый предельный цикл). Тип особой точки (СС) на фазовом пространстве - так называемый устойчивый узел - характерен для глубокой патологии (связанной со старением и смертью). Таким образом на основе анализа динамических особенностей сложной нелинейной системы геометрически прослеживается переход в фазовом пространстве от «фрактальной природы здорового хаоса нормального сердцебиения» (нормального синусового ритма) через убывание хаотичности по мере возникновения патологий к устойчивому режиму (при состоянии ритмики, близкой к летальной).

Более того, в [2] определен количественный и качественный диагностический признак, характеризующий реакцию сердечно-сосудистой системы человека или животного на внешнее воздействие. Энтропия сигнала, нормированная на его энергию, позволила авторам количественно оценивать степень хаотизации динамики сердечно-сосудистой системы при малых внешних возмущениях медико-биологической системы (стрессах).

В заключение ничего не остается, как вопрос, вынесенный в заголовок, дополнить вопросами, поставленными в [9]. Главную проблему, имеющую непосредственное отношение к живым системам, К. Глой определяет так: «Что такое детерминистический хаос - тотальная бесформенность или тотальность

форм?». Чем не задача о структурно-функциональной организации биологических процессов? А другой вопрос, поставленный этим автором: «Хаос и хаотическое поведение с точки зрения теории познания предстает как непроницаемость будущего поведения, хотя это поведение и протекает детерминистически?» - перекликается с проблемой адекватности моделей биологических систем [28].

Библиографический список

1. *Goldberger A.L.* Is the normal heartbeat Chaotic or Homeostatic? // *News in Physiol. Sciences.* 1991. Vol.6. P. 87.
2. *Анищенко В.С., Сапарин П.И.* Нормированная энтропия как диагностический признак реакции сердечно-сосудистой системы человека на внешнее воздействие // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика.* 1993. Т. 1, № 3,4. С. 54.
3. *Раишевски Н.* Некоторые медицинские аспекты математической биологии. М.: Медицина, 1966.
4. *Романовский Ю.М., Степанова Н.В., Чернавский Д.С.* Математическое моделирование в биофизике. Физика жизненных процессов. М.: Наука, 1975.
5. *Рубин А.Б., Пытьева Н.Ф., Ризниченко Г.Ю.* Кинетика биологических процессов. М.: Изд-во Московского ун-та, 1987.
6. Биологические часы / Перевод с англ. и ред. С.Э. Шноль. М.: Мир, 1964.
7. Биологические ритмы / Под ред. Ю.Ашоффа. В 2-х т. М.: Мир, 1984.
8. *Гласс Л., Мэки М.* От часов к хаосу. Ритмы жизни. М.: Мир, 1991.
9. *Глой К.* Проблема последнего обоснования динамических систем // *Вопросы философии.* 1994. №3. С.94.
10. *Селье Г.* Очерки об адаптационном синдроме. М.: Медгиз, 1960.
11. *Харди Р.* Гомеостаз. М.: Мир, 1986.
12. Физический энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1984.
13. *Бауэр Э.С.* Теоретическая биология. М.-Л.: Изд. ВИЭМ, 1935.
14. *Воробьева Т.Н., Зотин А.И.* Теоретические взгляды Э.С. Бауэра и современная биология // *Журн. общей биологии.* 1973. Т. 34, №1. С. 90.
15. *Николис Г., Пригожин И.* Самоорганизация в неравновесных системах. От диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации. М.: Мир, 1979.
16. *Воробьева Т.Н., Кренделева Т.Е., Ризниченко Г.Ю., Рубин А.Б.* Эндогенный электронный транспорт в субхлоропластных частицах, обогащенных фотосистемой 1. Математическая модель // *Studia biophysica.* 1981. Т.86, №3. С. 14.
17. *Воробьева Т.Н., Лукашев Е.П., Ризниченко Г.Ю.* Исследование функциональной организации акцепторного участка электрон-транспортной цепи в реакционных центрах фотосинтезирующих бактерий *Rh.sphaeroides* // *Научные доклады высшей школы. Биологические науки.* 1982. № 7. С. 44.
18. *Воробьева Т.Н., Кренделева Т.Е., Шайтан К.В., Рубин А.Б.* Функциональная роль пластоцианина в электронном транспорте фрагментов фотосистемы 1 высших растений. Математическая модель и физические представления // *Молекулярная биология.* 1983. Т. 17, № 10. С. 82.
19. *Воробьева Т.Н., Ризниченко Г.Ю., Шайтан К.В., Рубин А.Б.* Особенности функциональной организации акцепторного участка электрон-транспортной цепи фотосистемы 1 высших растений // *Studia Biophysica.* 1984. Т.100, №1. С.65.
20. *Воробьева Т.Н., Ризниченко Г.Ю., Рубин А.Б., Шайтан К.В.* О физических механизмах регуляции переноса электрона между первичным хиноном и пигментом в реакционных центрах фотосинтезирующих бактерий *Rh. sphaeroides* при переходе от освещения к темновым условиям // *Молекулярная биология.* 1986. Т. 20, №5. С.1203.
21. *Храброва Е.Н., Воробьева Т.Н., Ризниченко Г.Ю., Рубин А.Б.* Идентификация параметров электростатических взаимодействий платоцианина с пигмент-белковыми комплексами фотосистемы 1 высших растений // *Биофизика.* 1989. Т. 34, № 3. С.429.

22. *Riznitchenko G.Yu., Vorobjeva T.N., Krabrova E.N.* Identification of kinetic parameters of plastocyanin and P700 interactions in chloroplasts and pigment-protein complexes of photosystem 1 // *Photosynthetica*. 1990. Vol.24, №3. P. 495.

23. *Ризниченко Г.Ю., Воробьева Т.Н., Храброва Е.Н., Рубин А.Б.* Сравнительный анализ кинетических и конформационных характеристик солюбилизированных и встроенных в липосомы пигмент-белковых комплексов фотосистемы 1 высших растений // *Биофизика*. 1986. Т. 31, №1. С. 793.

24. *Ризниченко Г.Ю., Плюснина Т.Ю., Воробьева Т.Н., Аксенов С.И., Черняков Г.М.* Модель отклика мембранной транспортной системы на переменное электрическое поле // *Биофизика*. 1993. Т. 38, вып. 4. С. 667.

25. *Агаджанян Н.А., Власова И.Г., Алпатов А.М.* Адаптация и биоритмы. Адаптация животных и человека к экстремальным условиям внешней среды. М.: УДН, 1985. С. 138.

26. *Виру А.А.* Механизм общей адаптации // *Успехи физиологических наук*. 1980. Т.11, №4. С.27.

27. *Слоним А.Д.* Физиологическая адаптация и поддержание вегетативного гомеостаза // *Физиология человека*. 1982. Т.8, № 3. С. 355.

28. *Воробьева Т.Н.* Иерархичность биологических систем и адекватность их моделей // Тр. Междунар. конгресса ассоциации «Женщины-математики». Волгоград: Перемена, 1994. 133 с.

*Медицинский факультет Российского
университета дружбы народов*

*Поступила в редакцию 1.12.94
после переработки 22.11.95*

DYNAMIC HOMOEOSTASIS: EQUILIBRIUM, STEADY STATE, CHAOS?

T.N. Vorobjeva

The steady state (s.s.) is a very important notion for understanding of nature and functional mechanisms on various biological systems. Physiological homoeostasis is one of the notions connected with mathematic notion of the s.s. The character of organisms functional changes under variation of environmental conditions depends on the number of s.s. and types of stability, which are programmed by the system's structure. At complex nonlinear dynamic system as a result of the system's nonstability the regimes known as «trigger», «oscillator» and «chaos» may arise. A set of mathematical models is analysed, which demonstrate different regimes: the biological electron and membrane transport systems, the heart rate dynamics.



Воробьева Татьяна Николаевна - родилась в 1942 году в Москве, окончила кафедру биофизики физического факультета МГУ (1968). После окончания МГУ работала в Институте физических проблем, а с 1968 по 1992 год - на кафедре биофизики биологического факультета МГУ. Диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук защитила в 1983 году. С 1992 года - старший научный сотрудник Проблемной лаборатории «Физиологические механизмы адаптации» медицинского факультета Российского университета дружбы народов. Область научных интересов - теоретическая биофизика (кинетика и термодинамика биологических процессов, математическое моделирование). Планирует организовать постоянно действующий семинар по применению математических методов в медицине: с предложениями обращаться по телефону: (095) 434-52-66, 434-53-00 (секретарь).



**МОДЕЛИРУЮЩИЕ СИСТЕМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ
ДЛЯ ЗАДАЧ КЛАССИФИКАЦИИ:
новая информационная технология для работы
с плохо формализованными знаниями**

М. Г. Крейнс

Рассмотрены методологические основы, принципы реализации и практического применения новой информационной технологии работы с плохо формализованными знаниями при решении задач классификации. Основной особенностью предлагаемой технологии является предоставление пользователю эффективной помощи в поиске актуальных для решения конкретной задачи знаний и данных в результате моделирования объектов профессионального мира пользователя.

Введение

Компьютерные системы представления знаний, которым посвящена данная работа, моделируют профессиональные ситуации и объекты профессионального мира и создают на основе моделей своеобразное игровое пространство, которое с удовольствием используются в качестве среды для упражнений и поддержки принятия решений обучаемые, преподаватели и профессионалы. На сегодня системы, созданные в рамках рассматриваемой технологии, регулярно и эффективно используются при обучении и профессиональной переподготовке студентов-медиков и врачей (более подробно см. [1]).

Основное содержание статьи - обобщение результатов и конкретного опыта, накопленных при разработке информационной технологии и при создании конкретных моделирующих систем представления знаний для задач медицинской диагностики. Не вина автора, что временами это обобщение приобретает общефилософский характер: такова специфика предмета. Многолетние усилия математиков, программистов и инженеров сделать что-нибудь полезное с плохо формализованными знаниями в рамках имеющихся навыков и умений требуют достаточно широкого осмысления. Уже простое понимание причин нежелания или невозможности для врачей использовать статистические методы или методы искусственного интеллекта при решении практических задач далеко выходит за рамки чисто технической проблемы. Так получилось, что это осмысление шло практически параллельно с формированием отчетливых представлений о функциях, структуре, возможностях моделирующих систем представления знаний для задач классификации и с накоплением опыта реализации этой новой информационной технологии для задач медицинской диагностики. Поэтому значительное место в статье занимают рассуждения о принципиальных основах

и базовых структурах профессиональной интеллектуальной деятельности в плохо формализованных предметных областях.

Человек настолько ограничен (интеллектуально и во времени) и так устроен, что ему необходимо прибегать к чужому опыту и знаниям для решения сложных задач. При поверхностном взгляде на вопрос кажется, что компьютер, имитирующий рассудочную деятельность специалиста, - идеальное средство, облегчающее применение чужих или же отчужденных знаний к решению задач, возникающих перед данным пользователем.

Реальные проблемы появляются, если речь идет о сложной и плохо формализованной предметной области, когда имеется необходимость использования для эффективной деятельности определенной системы теоретических знаний в качестве руководства и отсутствуют надежные критерии отбора моделей и методов, способных привести к успеху в решении конкретной задачи. Ведь тогда пользователь, чтобы получить результат, под которым он мог бы подписаться сам, вынужден выбрать или индивидуализировать применительно к своей задаче компьютерные способы имитации рассудочной деятельности специалиста - те именно способы, которые он планирует использовать. Однако, решение этих проблем наталкивается на два препятствия. Во-первых, осмысленный выбор неявно предполагает, что пользователь не менее мудр, опытен и профессионален, чем источник применяемого знания. (А тогда почему бы ему не решить задачу самому?) Во-вторых, осмысленная индивидуализация возможна лишь в случаях, когда компьютерная система ориентирована на конструктивную гибкую модель представления знаний, допускающую учет ранее не предусмотренных в модели факторов и обстоятельств. Но существование таких моделей представления знаний противоречит гипотезе об отсутствии достоверных критериев отбора эффективных методов решения практических задач в плохо формализованных предметных областях. (Действительно, если предположить существование подобной модели, то в ее рамках естественным образом формулируются условия адекватного применения способов имитации рассудочной деятельности и нет оснований говорить о предметной области как о плохо формализованной.)

Для сложных и плохо формализованных областей деятельности распространение компьютерной техники остро ставит вопрос о создании безопасных информационных технологий: таких информационных технологий, использование которых не маскирует (в том числе, ссылками на авторитет, научность или традицию) безответственного применения имитаций чужого сознания. В докомпьютерную эру, пока знания передавались с помощью книги и живой традиции, ученик должен был перерасти учителя, чтобы стать профессионалом. С другой стороны, приобретенное человеком знание включалось в общую систему индивидуальных знаний и представлений о мире и, в принципе, не существовало вне фактов и обстоятельств, напрямую с конкретным знанием не связанных. В такой ситуации обращение к авторитетному учителю с конкретной задачей и просьбой решить ее или подсказать способ решения было естественным и эффективным. Прежде всего потому, что при этом происходило обращение не к определенной совокупности знаний, а к целостной личности, не только владеющей профессиональными знаниями и навыками их применения, но и со сформировавшимся взглядом на мир в целом - взглядом, являющимся основой для интерпретации и индивидуализации профессиональных знаний применительно к данной задаче.

Базовая идея создания моделирующих систем представления знаний

Рассмотренная в данной работе технология работы со знаниями гарантирует сохранение духа европейской книжной традиции и живой преемственной связи с учителем. Принципиальная идея этой информационной технологии заключается

в следующем. Мы научились с помощью компьютера строить и поддерживать базы знаний, отражающие профессиональные взгляды конкретных специалистов (см. [1, 2]). Далее, мы научились решать на компьютере на основании таких баз знаний задачи моделирования объектов профессионального мира нашего специалиста и строить их описания (см. [1, 2]). Также мы научились описывать реальные объекты на профессиональном языке нашего специалиста и освоили методы измерения соответствующих параметров у объектов реального мира. При этом можно использовать результаты измерений лишь некоторых параметров для задания частичного описания реальных объектов (в противоположность полному описанию, когда для конкретного объекта фиксированы значения всех параметров, на основе которых формулируются профессиональные взгляды специалиста). Наконец, мы научились, используя решение задачи моделирования, достраивать частичные описания реальных объектов до полного описания смоделированных объектов гипотетических объектов профессионального мира нашего специалиста (см. [2]). В принципе, решение такой задачи домоделирования не единственно: им может быть любой модельный объект, не противоречащий знаниям из базы знаний, описывающим моделируемый класс объектов. Теперь если выбрать конкретный реальный объект и начать работать с его частичными описаниями, то выясняется удивительное свойство «популяции» смоделированных объектов (для каждого частичного описания мы будем много раз решать задачу домоделирования). Чем меньше мы знаем об объекте (или предполагаем, что знаем, ибо мы можем включить свои предположения в описание реального объекта как гипотетические результаты измерений), тем более разнообразными будут представители популяции смоделированных объектов. По-существу, чем больше мы знаем о решаемой задаче (реальном объекте, с которым мы столкнулись), тем более однозначной будет реакция нашей моделирующей системы. В частности, если мы знаем о реальном объекте все, что можно знать, - его полное описание, то мы сможем смоделировать только это же описание, если, разумеется, оно соответствует профессиональным знаниям, включенным в базу знаний. Если такого соответствия нет, то в данном случае решить задачу домоделирования окажется вообще невозможным из-за противоречивости имеющихся данных и знаний. (На практике, в междисциплинарном коллективе, руководимом автором, поэтапная процедура моделирования для различных по степени детализации описаний реальных объектов широко используется в качестве средства верификации медицинских баз знаний).

Если взглянуть на описанные принципы работы моделирующих систем представления знаний с точки зрения математика, то легко увидеть, что наши системы не прибегают к решению обратных задач, а решают только прямые задачи. Более того, наши системы структурно не приспособлены к решению обратных задач - над базами знаний в них отсутствуют машины логического вывода.

Другими словами, рассматриваемая в данной работе информационная технология - не способ имитировать сознание специалиста, а способ моделировать профессиональный мир, каким он представляется специалисту. Для человека это - удивительное средство осознания и сохранения собственного внутреннего профессионального мира. Для его учеников это - средство обучения и поддержки принятия решений, обладающее знаниями учителя и, одновременно, не пытающееся влиять на формирование целей и на оценки полезности способов поведения учеников при решении конкретной профессиональной задачи. Вопрос об ответственности учителя за поддержку принятия решений не возникает - система консультирует только по поводу моделей. Это средство, моделирующее объекты профессионального мира учителя, соответствующие задачам учеников, - своеобразная виртуальная реальность, порождаемая интеллектом учителя.

Дальнейшее рассмотрение будет проведено на примере моделирующих систем, ориентированных на задачи медицинской диагностики. По существу, для обобщения изложенного на произвольные задачи классификации требуются лишь терминологические изменения.

Особенности знаний и рассуждений в плохо формализованных предметных областях (на примере медицинской диагностики)

С точки зрения моделирования целенаправленного поведения особенности медицинского мышления определяются непростыми соотношениями формализованного знания типа «знаю как» с персональным глубинным знанием типа «знаю что». По существу, речь идет, с одной стороны, о формализованных описательных моделях (о возможных вариантах проявления болезней) и о процедурных моделях (о ступеньках процесса понимания совокупности симптомов как проявлений конкретного заболевания) и, с другой стороны, о моделях прагматики поведения (об оценках полезности для данного врача тех или иных действий по отношению к конкретному больному в условиях имеющейся симптоматики, базирующихся на неформализованных образах, личных впечатлениях и опыте), которые могут служить основой не только для отбора и объяснения описательных или процедурных моделей, но и для их пересмотра. Для врача «знаю что» без «знаю как» бессмысленно и немислимо «знаю как» без «знаю что».

В клинической медицине основные формализованные структуры медицинского знания: описательные модели (модели семиотики заболеваний) и процедурные модели, в сущности, модели способов понимания (модели семантики) - характеризуются значительным разнообразием, противоречивостью и иерархичностью взаимосвязей. Ведь процедуры понимания клинической ситуации в конечном итоге основаны на определенном упрощении и идеализации описательных моделей заболеваний [2 - 4], а формы проявления заболеваний весьма переменчивы. Разнообразие и противоречивость моделей семиотики и семантики делает для врача каждый раз необходимым выбор фиксированной модели из множества существующих моделей или модификацию выбранной модели для конкретного клинического случая. Применение нескольких моделей одновременно либо бессмысленно (если все модели дадут один результат), либо все равно потребует выбора (если какие-либо из использованных моделей дадут разные результаты). Выбор моделей или их модификация в рамках возможностей, предоставляемых формализованным медицинским знанием, реализуются врачом на основании персонального знания - личных моделей прагматики поведения. Модели прагматики поведения определяются ценностными установками врача и причинно-следственными связями. К последним естественно отнести и представления о принципиально возможном и невозможном. К сожалению, в медицине не удается строить причинно-следственные модели, соответствующие стандартам точных наук. (В медицине связь причины и следствия почти в той же степени вопрос веры и интуиции, что и в Истории.)

Таковы, в общих чертах, основные содержательные факты, которыми недопустимо пренебрегать при создании и внедрении в медицину, как и в практически любую плохо формализованную предметную область, новых методов и средств информатики. Дело в том, что только ориентация на особенности профессионального мышления и знания способна обеспечить реальный успех создаваемых компьютерных систем. Например, широко и разносторонне обсуждается факт непопулярности у практиков медицинских компьютерных систем, ориентированных на поддержку принятия решений и профессиональное обучение [3 - 7]. Высказываются разнообразные и, зачастую, противоречивые причины такой непопулярности - от недостаточных технических возможностей ЭВМ до консерватизма врачей [5 - 7]. Следует отметить, что большинство подобных аргументов выглядит откровенно неубедительно, хотя бы рядом с историей стремительного внедрения и распространения в медицинской практике компьютерной томографии.

Выделение в структуре медицинского диагностического знания трех типов моделей: семиотики, семантики и прагматики, - позволяет предложить простое и логичное объяснение указанной группы явлений. Врач не хочет, чтобы компьютер определял прагматику поведения при принятии решений (в том числе, диагностических решений). А именно прагматику поведения, по существу,

навязывают байесовские классификаторы и системы искусственного интеллекта, «помогающие» в формировании стратегий диагностического поиска или критикующие поведение врача [8]. Врачу нужна информация о моделях семиотики и семантики, связанная с конкретным клиническим случаем и выдвигаемыми самим врачом диагностическими гипотезами. Эти знания врач использует для формирования стратегии сбора данных о больном и для интерпретации собранных данных. В принципе, необходимую информацию врач получает из литературы, но нужно суметь найти в книгах и в журналах конкретные знания, связанные с конкретной задачей. В рамках технологии моделирующих систем представления знаний такая постановка задачи позволяет ограничить функции вычислительной системы решением только прямых задач [2,4,9,10] (см. подробнее следующий раздел).

Моделирующие системы представления знаний позволяют эффективно работать с моделями семиотики и семантики, соответствующими конкретной практической ситуации, и при этом не вмешиваются в прагматику поведения врача. Речь идет о системах представления знаний, фактически, реализующих новый вариант активной, но не переходящей границ навязчивости, компьютерной книги. Существовало, что в рамках рассматриваемой технологии компьютер не просто перелистывает страницы, а реализует совершенно новые, ранее недоступные функции. Например, наша «обобщенная» компьютерная книга способна сама рисовать иллюстрации к собственному содержанию, позволяет читателю стать действующим лицом и самому сочинять сюжет. Эта книга готова проконсультировать читателя по поводу разумных способов поведения при различных перипетиях сюжета и проверить рациональность поведения читателя и соответствие поведения излагаемым в книге моделям (в нашем случае - моделям семиотики и семантики заболеваний).

Использование нашей нестандартной компьютерной книги обеспечено ее содержанием - описанием на некотором формальном языке предметных знаний - моделей семиотики и семантики отдельных заболеваний и их групп, связей между значениями параметров, представлений о возможном в природе и о распространенности заболеваний и различных форм их проявления. Такое описание содержательных знаний - база знаний системы для конкретной предметной области - выполняется в рамках модели представления медицинских диагностических знаний [2,9,11].

Основные задачи, решаемые моделирующей системой представления знаний

В рассматриваемой нами технологии основной механизм поиска и применения экспертных знаний, актуальных при решении конкретных задач пользователя, реализуется решением задачи моделирования профессиональной ситуации на основании базы знаний. Алгоритмы такого моделирования подробно рассмотрены в [2, 9, 12] и ориентированы на конкретную структуру баз знаний [2, 9], основанную на модели представления диагностических знаний [2, 11]. Последняя отражает не только модели семиотики и семантики для конкретных заболеваний и их групп (и, по существу, включает знания об иерархии проявления заболеваний), но и знания о иерархической организации и структуре самого пространства параметров, в рамках которого описываются представления эксперта - знания о том, какие параметры являются определяющими для других параметров и каковы функциональные или статистические зависимости между параметрами. Для описания структуры пространства параметров важно выделить группы параметров, для значений которых существенно наличие совместных ограничений: вектор параметров может принимать значения лишь из подмножества декартова произведения множеств значений компонентов. Следует подчеркнуть, что задание зависимостей само по себе не определяет иерархическую организацию пространства параметров, которая характеризует причинно-следственные связи между параметрами. Например, значения двух параметров

могут быть пропорциональны друг другу, но один из них причинно определяет значение второго, и его место в иерархии будет выше. Подобные иерархические отношения возможны и для групп параметров.

Решение базовой (для нашей технологии) задачи моделирования ситуации положено в основу достижения пяти главных для пользователя целей создания моделирующих систем представления знаний, формализованных как следующие задачи:

Задача 1. Моделирование клинической ситуации, соответствующей выбранному заболеванию (нескольким заболеваниям, группе заболеваний).

Задача 2. Проверка соответствия конкретных данных о больном принятому врачом диагностическому решению (успешное решение задачи домоделирования частично описанной ситуации для выбранного врачом диагноза).

Задача 3. Проверка достаточности конкретных данных о больном для формального подтверждения предложенного врачом диагностического решения (успешное решение задачи домоделирования частично описанной ситуации только для выбранного врачом диагноза и невозможность ее решения для других диагнозов).

Задача 4. Выявление (локализация на клиническом алгоритме) ошибок пользователя (отступлений от предусмотренных в системе моделей семиотики и семантики), допущенных при анализе конкретной клинической ситуации.

Задача 5. Определение диагностических критериев для гипотез, предусмотренных в системе, и проверка соответствия указанным критериям данных о клиническом случае.

Решение задачи моделирования клинической ситуации (**задача 1**) основано на отыскании произвольной точки в пространстве параметров, удовлетворяющей условиям, описанным в базе знаний, и выполняется простым методом случайного поиска. Эти условия налагаются моделями семиотики (или семантики) выбранного заболевания и включающих его групп заболеваний, а также связями между значениями параметров.

Трудоемкость вычислений оказывается приемлемой благодаря иерархической организации пространства параметров. Действительно, задача поиска допустимой точки каждый раз решается для подмножества пространства параметров, определяемого совместными ограничениями на значения параметров, которое обычно имеет небольшую размерность. Вначале рассматривается набор взаимосогласованных параметров с максимальным уровнем иерархии, затем - со следующим уровнем иерархии и т.д. При этом найденные допустимые значения параметров из подпространств более высокой иерархии считаются зафиксированными. Если на каком-либо уровне иерархии система не может отыскать допустимую точку за априори заданное число случайных шагов, то происходит возврат к набору параметров с максимальным уровнем иерархии. Такая, по существу, эмпирическая процедура хорошо работает на практике [2, 9, 12].

Проверка соответствия конкретных данных о больном принятому врачом диагностическому решению (**задача 2**) реализуется с помощью решения задачи 1 для заболевания, выбранного пользователем. В процессе домоделирования база знаний формально дополняется данными, описывающими конкретный клинический случай. Если такая задача домоделирования решается успешно, это свидетельствует о соответствии данных о конкретном больном модели выбранного врачом заболевания. Неудача в решении может означать, что данные противоречат условиям, предусмотренным базой знаний.

Проверка достаточности конкретных данных о больном для формального подтверждения предложенного врачом диагностического решения (**задача 3**) реализуется многократным безуспешным решением задачи 2 для диагностических гипотез, исключая тех, которая была выдвинута врачом. Если же решение задачи моделирования для некоторой альтернативной гипотезы оказалось успешным, то это - свидетельство ее необоснованного исключения пользователем

из дальнейшего рассмотрения, то есть недостаточности имеющихся данных для доказательств гипотезы врача.

Выявление и интерпретация ошибок (отступлений от предусмотренных в системе моделей семиотики и семантики или связей между параметрами), допущенных пользователем при анализе конкретной клинической ситуации (**задача 4**), также основаны на решении задачи моделирования. Только теперь, в отличие от предыдущего случая, отыскивается ближайшая вышестоящая по отраженной в базе знаний иерархии диагностическая гипотеза, для которой решение задачи моделирования еще является успешным, и тем самым определяется локализация ошибки.

Необходимо отметить, что использование для решения задачи моделирования алгоритма случайного поиска делает безусловно значимым только удачное решение задачи моделирования. Ведь то, что методом случайного поиска за определенное число итераций не удалось отыскать допустимую точку, строго говоря, можно трактовать лишь в вероятностном смысле. Однако, несколько повторных неудач для конкретной гипотезы должны заставить пользователя задуматься. При регистрации числа шагов, необходимых для отыскания допустимой точки в диагностическом тренажере по анемиям (обучающей системе, использующей моделирование клинических ситуаций [3,4,9]), неожиданно выявилось достаточно хорошее соответствие относительных объемов многомерных параллелепипедов, представляющих модели семиотики различных групп заболеваний, описанных в базе знаний системы, оценкам относительной распространенности этих групп заболеваний. Может быть, мы хвораем от того, что природа раскидывает нас по допустимым областям в пространстве параметров?

Определение диагностических критериев или параметров, включенных в диагностические критерии, для диагностических гипотез, предусмотренных в системе (**задача 5**) и проверка соответствия указанным критериям конкретного набора клинических данных выполняется непосредственно по информации из базы знаний системы.

Возможно также самостоятельное формирование пользователем с помощью решения задач 1-5 достаточно сложных сценариев анализа клинических ситуаций. Вот пример такого сценария. Выявлена недостаточность данных о больном для формального подтверждения принятого врачом решения и выявлен перечень альтернативных решений, не противоречащих имеющимся данным. Используя решение задачи 1, можно просмотреть типичные клинические ситуации для каждого из найденных диагнозов. Задача 5 подскажет, какие данные представляют наибольший интерес. При формировании стратегии сбора дополнительной информации полезно сначала умозрительно предположить, что определенные обследования уже выполнены и дали тот или иной результат, и для разных вариантов решить задачи 2, 3, 4. Таким образом, пользователю моделирующей системы предоставляется возможность игры (познавательной, обучающей и увлекательной) с модельными или гипотетическими клиническими ситуациями, а также с «полумодельными» ситуациями, полностью соответствующими реальному больному в значениях зарегистрированных у него параметров (оставшиеся неизвестными для реального больного показатели фиксируются в результате решения задачи домоделирования).

Применяя технологию моделирующих систем представления знаний, мы создаем новый тип компьютерной книги, предназначенной одновременно для человека читающего и для человека играющего. Способность системы моделировать клинические ситуации позволяет обеспечить квазиинтеллектуальное поведение системы.

Использование различных моделей семантики и семиотики наряду с допустимостью игнорировать собранную о больном информацию или определенные компоненты моделей дают пользователю возможность продумывать модели прагматики собственного поведения и даже экспериментировать с ними в «игровом» режиме работы моделирующей системы. Целесообразно еще раз подчеркнуть важную особенность функционирования моделирующих систем

представления знаний в качестве систем поддержки принятия решений. Наши системы не навязывают пользователю «собственное мнение», а в различных формах предоставляют знания, связанные с конкретной ситуацией принятия решений.

Заключение

Сегодня мало внимания уделяется серьезной опасности, связанной с развитием и проникновением во все сферы жизни средств и методов информатики - от простейших калькуляторов до современных вычислительных комплексов, позволяющих моделировать сложнейшие процессы и явления. Следствием такого проникновения информатики в жизнь является создание комфортных условий для применения чужих знаний к конкретным задачам пользователя, или, что тоже самое, создание привлекательной модельной среды, которая готова подменить собой реальный мир. По существу, речь идет о важной общепсихологической и моральной проблеме: об ответственности за адекватность и за результаты применения отчужденного знания. Корень проблемы в том, что информация и знания, применение которых само по себе требует определенных профессиональных навыков, становятся доступными для использования широкой публикой, не имеющей необходимых навыков. Заметим, это было не так, пока основным источником информации и знаний были книги и живая традиция.

Много десятилетий назад великий лингвист Сепир [13] говорил о естественном стремлении человека ограничить сферу распространения порождаемых им текстов. Сепир видел за этим стремление человека-автора сохранить свою индивидуальность. Быть может, сегодня главная опасность для человечества - потеря индивидуальности людьми, с удовольствием и безответственно пользующимися отчужденными информацией и знаниями и готовыми охотно их распространять.

Речь должна идти о создании новой научной дисциплины - экологии информатики, то есть экологии информационных технологий. Ее основная задача - исследование условий безопасного, в широком смысле слова, применения отчужденных знаний и информации. Здесь следует изучать с точки зрения функционирования в рамках человеческих сообществ: профессиональные знания и социально значимую информацию, рекламу и призывы к насилию.

Моделирующие системы представления знаний - первый шаг в данном направлении. Для широкого и практически интересного класса задач (задач классификации в плохо формализованных предметных областях) на базе методологии анализа целенаправленного поведения не только проведено теоретическое исследование проблемы, но и сформулированы критерии выделения «экологически грязных» информационных технологий, предложены методология и методы создания и практического применения экологически чистых информационных технологий. Эффективность разработанных информационных технологий в обучении около 2000 студентов-медиков продемонстрирована практикой [1,2,14,12].

Особенностью предлагаемых в данной работе информационных технологий является сохранение традиций активной сознательной деятельности человека, как профессионала и как личности, при широком использовании любых вспомогательных средств, в том числе и мощного арсенала средств и методов современной информатики.

Данная работа выполнена благодаря поддержке Министерства науки и технической политики РФ (в рамках проекта «Разработка моделирующей системы представления знаний для поддержки диагностических решений», проект № 1110 федеральной научно-технической программы «Перспективные информационные технологии») и Российского фонда фундаментальных исследований (в рамках проекта «Разработка и исследование модели рассуждений при решении задач в плохо формализованных предметных областях», грант 95-01-01583).

Библиографический список

1. Крейнес М.Г., Сумароков А.В., Удальцов Ю.А., Погромов А.П., Ершов В.И. Активные компьютерные системы для медицинского образования: подход и реализация // Вестник РАМН. 1994. № 9.
2. Крейнес М.Г. Модели семиотики, семантики и прагматики в компьютерных системах для медиков // Проблемы информатизации. 1993. Вып. 3-4. С. 57.
3. Крейнес М.Г. Использование средств и методов информатики в обучении медиков: аналитический обзор // Медицинский реферативный журнал. Раздел XXII. 1987. № 12. С. 30.
4. Gremy F. Person and computers in medicine and health // Meth.Inform. 1988. Vol.27, № 1. P. 3.
5. Eddy D.M. Clinical decision making: from theory to practice // JAMA. 1990. Vol. 263, № 2. P. 287.
6. Greens R.A., Shortliffe E.H. Medical Informatics - an emerging academic discipline and institutional priority // JAMA. 1990. Vol.263, № 8. P. 1114.
7. Seelos H.-J. A new paradigm of medical informatics // Meth. Inform. Med. 1992. Vol.31, № 2. P. 79.
8. Selected topics in medical artificial intelligence / Ed. P.L. Miller. N-Y.: Springer-Verlag. 1988. 231 p.
9. Крейнес М.Г. Компьютерные моделирующие системы представления знаний для врача и больного // Вестник Всесоюзного общества информатики и вычислительной техники. 1991. № 1. С. 52.
10. Miller R.A., Masarie F.E. Use of the Quick Medical Reference(QMR) program as a tool for medical education // Meth. Inform. Med. 1989. Vol. 28, № 4. P. 340.
11. Крейнес М.Г. Математическая модель диагностического процесса как средство представления содержательных медицинских знаний // Проблемы проектирования экспертных систем. М.,1988. С. 144.
12. Kreines M., PurtoV V., Udaltsov Y. Diagnostic trainer-approach, model and software // East-West Conference on Emerging Computer Technologies in Education, 6-9 April 1992, Moscow, Russia, Conference Proceedings. M., 1992. С. 181.
13. Сепур Э. Избранные труды по языкознанию и культурологии. М.: Издательская группа «Прогресс». 1993. С. 215.
14. Крейнес М.Г., Сучков А.В., Ершов В.И. К задаче создания машинной обучающей системы для студентов медиков на основании математической модели диагностического процесса // Вопросы применения экспертных систем. Минск, 1988. С. 206.

Московский специализированный центр
новых информационных технологий
на базе Московской медицинской
академии

Поступила в редакцию 14.07.95
после переработки 15.01.96

MODELLING KNOWLEDGE BASED SYSTEMS FOR CLASSIFICATION PROBLEMS: new information technology for insufficiently formalized knowledge

M. G. Kreines

We discuss methodological base, ways of realization and problems of practical usage of the new information technology for insufficiently formalized knowledge. This technology gives user the effective help in gathering essential for the problem knowledge and information and does not disturb the pragmatic of the user.



Крейнес Михаил Григорьевич - родился в 1953 году в Москве. Окончил Московский авиационный институт (1975). После окончания института работает в Московской медицинской академии над проблемами использования математического моделирования в биологии и медицине. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, посвященную моделированию систем поддержки решений, в Вычислительном центре АН (1989). Создал и возглавил Московский специализированный (по медицинским специальностям) центр новых информационных технологий на базе Московской медицинской академии (1993). В настоящее время основные области научных интересов: изучение и моделирование профессиональных рассуждений человека в плохо формализованных предметных областях, создание на базе этих теоретических исследований новых типов компьютерных обучающих систем и систем поддержки принятия решений для медиков.



KNOWLEDGE BASED COMPUTER SYSTEMS FOR DECISION SUPPORT AND LEARNING DIAGNOSTIC TRAINER

Diagnostic Trainer is a new word in the educational computer systems in medical diagnostics. It is based on the original mathematical model of medical knowledge, human diseases, diagnostic methods and effective strategies of diagnostic problem solving.

A user can run Diagnostic Trainer in form of a game, during which the system simulates clinical cases, while user analyzes them. Diagnostic Trainer uses its knowledge base for simulations and doesn't need any clinical cases to be prepared in advance. Diagnostic Trainer is a «patient» and «tutor» at the same time. As a patient it simulates the description of patient's clinical case, while, as a tutor, it consults user on the diagnostic process and simultaneously checks the validity of users actions and efficiency of decision making strategy. The combination of patient and tutor provides a really personal educational process, effective feedback, helps user to acquire practical skills and effective theoretical approaches to the diagnostic decision making - how to collect and to interpret clinical information.

The first member of the Diagnostic Trainer family is the Diagnostic Trainer for anaemia cases - Anaemia Diagnostic Trainer. It is in regular use in Internal Disease Department of the Moscow Medical Academy. Anaemia Diagnostic Trainer simulates infinite number of different clinical cases of some 90 diseases, leading to anaemia manifestations of different types. The Anaemia Diagnostic Trainer's knowledge base expresses the points of view of the leading Russian medical experts and educators.

Diagnostic Trainer can create realistically appearing simulated clinical cases using a large number of interrelated clinical parameters (medical history, laboratory data, special investigation data, clinical signs etc.). Diagnostic Trainer's algorithms guarantee the limitless variety of clinical cases for all diseases involved and intellectual behaviour of the system itself. Diagnostic Trainer always «knows» the right answer, i.e. the diagnose corresponding to the clinical case offered to user, thus it can effectively respond to the user's actions. The system's responses achieve thought-provoking learning experience. User interface of the Diagnostic Trainer is based on the hierarchic menu based on the hypertext technology. If the user needs any help or advice, he can ask for system's opinion on the effective diagnostic strategy and its interpretation of collected information.

Anaemia Diagnostic Trainer runs under MS DOS on all IBM compatibles with 640 Kb RAM or more. Anaemia Diagnostic Trainer installation needs only 360 Kb memory on Hard or Floppy disk.

Diagnostic Trainer never forces You, but always fixes your attention on the essential points and possible contradictions between the patient's data and your problem solving strategy. We have documentation in Russian, in Spanish and in English.

Mikhail Kreines,

Ph.D., the Head of Moscow Center for New Information Technology in Medical Education

Russia, 119435, Moscow, B.Pirogovskaya str., 2-6,
Moscow Medical Academy, Moscow Center
for New Information Technology in Medical Education
E-mail: Nnovik@sms.ccas.msk.su





Изв. вузов «ПНД», т.4, № 1, 1996

ЛЬЮИС КЭРРОЛЛ КАК НЕЛИНЕЙНОЕ ЯВЛЕНИЕ¹

Ю.А. Данилов

Стилистические особенности и пространственно-временные характеристики творчества и жизнеописания Льюиса Кэрролла позволяют рассматривать его как нелинейную систему с четко выраженными аттракторами в области парадоксов, нонсенса и любви к детям. Следует подчеркнуть, что переход из области притяжения одного аттрактора в область притяжения другого не сопровождается у Льюиса Кэрролла катастрофами и бифуркациями, а происходит плавно.

Если бы жизнь Льюиса Кэрролла нужно было оценить одним словом, то очень подошло бы слово «парадокс». Попробуем проследить поведение этой крайне интересной личности в окрестности «особых точек» его жизни. Начнем с $t=0$ - с момента рождения. Итак, вблизи этой точки, да и далее, никакого Льюиса Кэрролла не существовало: был

Charles Lutwidge Dod(g)son
Чарльз Лютвидж Додсон.

Он родился 27 января 1832 года в небольшой деревушке Дэрсбери (графство Чешир) и закончил свой жизненный путь 14.01.1898 года в Гилфорде. Тот, которого звали Льюис Кэрролл, родился гораздо позднее - 1 марта 1856 года. Родился при нескольких необычных обстоятельствах, а установить дату его кончины невозможно, поскольку он стал бессмертным...

Их было двое, очень родных и непохожих: скучный педант и неистощимый фантазер, никому не известный преподаватель математики (master of house - магистр в своем колледже) и знаменитый сказочник, автор ученого трактата по логике, почтенный член колледжа Св.Троицы в Оксфорде в сане дьякона, и создатель особого жанра «лепых нелепиц». Один из них жил в тихом провинциальном Оксфорде, другой - в волшебной Стране Чудес. Они были неразлучны, хотя всячески отрицали, что знают друг друга («Мистер Додсон не претендует на авторство каких-либо книг, не подписанных его фамилией»). Но самое удивительное в этой паре было то, что они были одним человеком - Чарльзом Лютвиджем Додсоном, писавшим под псевдонимом Льюис Кэрролл. Эта двойственность нашла отражение в «Алисе в Зазеркалье», когда Алиса встретила с Твиддлдумом и Твиддлби:

Алиса не знала, что ей делать: пожать руку сначала одному, а потом другому?
А вдруг второй обидится? Тут ее осенило: она протянула им обе руки сразу.

Фантазия и скептицизм ученого сочетались у Льюиса Кэрролла с детства. Узнав, что земляные черви не сражаются друг с другом, он подумал: «Быть может это

¹ По материалам лекции, прочитанной 14.03.75 в Горьком на III школе по нелинейным колебаниям и волнам в распределенных системах.

потому, что у них нет оружия?» Он вооружил их деревянными пиками и только после этого (а они опять не сражались!) поверил в их кроткий нрав.

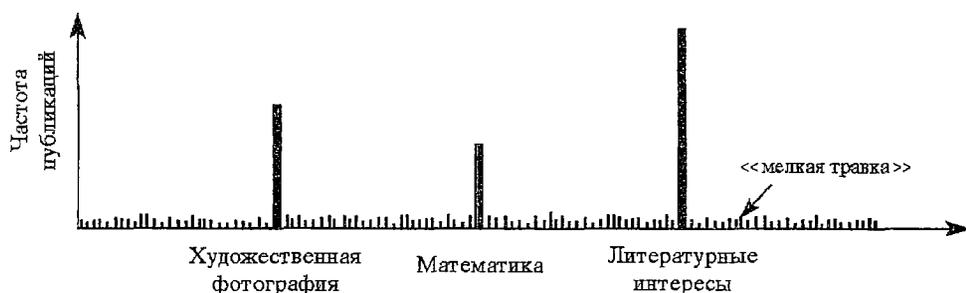
Через всю жизнь Кэрролл пронес два увлечения, ярко проявившиеся еще в детстве: любовь к необычайным экспериментам в области языка и удивительное умение подмечать малейшие ошибки, противоречия, парадоксы в рассуждениях, встречающихся в повседневной жизни. Об этом прозорливо писал отцу двенадцатилетнего Льюиса Кэрролла мистер Тэйт, директор Ричмондской грамматической школы, в которой учился будущий автор «Алисы»:

Он... только что превосходно сдал экзамен по математике, продемонстрировав при этом органически присущую ему любовь к точным рассуждениям... В то же время он нередко сводит к нулю все представления Вергилия или Овидия о силлабическом стихосложении. Кроме того, он с необычным остроумием заменяет обычные окончания существительных и глаголов, описанные в наших учебниках грамматики, более точными аналогиями или более удобными рифмами своего собственного изобретения.

Знаменитая Верлюка Льюиса Кэрролла ничуть не хуже знаменитой «глокой куздры» академика Щербы:

Было супно. Кругтелся, винтясь по земле,
Склипких козей царapistый рой.
Тихо мисиков стайка грустела во мгле,
Зеленавки хрущали порой.

Если изобразить спектрограмму интересов Льюиса Кэрролла, то она будет выглядеть, как представлено на рисунке. Причем, все линии имеют тонкую структуру. Мало кто знает о первой «палочке» в спектрограмме. Однако, наиболее известные портреты художника Ренкина и Фарадея принадлежат Льюису Кэрроллу. Один из снимков Кэрролла попал в число двух (!) фотографий XIX столетия, демонстрировавшихся наряду с работами самых выдающихся фотомастеров современности.



Жизнь Льюиса Кэрролла вряд ли можно назвать богатой событиями: бременная оболочка Льюиса Кэрролла своим монотонным (чтобы не сказать унылым) существованием как бы компенсировала те удивительные приключения, которые переживал его дух. В тихом провинциальном Оксфорде он провел большую часть своей жизни, лишь изредка покидая его, чтобы посетить выставку картин или интересный спектакль в Лондоне, провести рождественские каникулы в кругу своих многочисленных сестер. И лишь однажды (в 1867 году), привычный круг был разорван: вместе со своим коллегой преподобным Лиддоном (отцом той самой Алисы, которой посвящены знаменитые сказки) Льюис Кэрролл отправился в Россию. Если изобразить его путешествия графически, то на графике будет лишь один δ -образный пик - путешествие в Россию.



Выбор маршрута был далеко не тривиален: большой любитель парадоксов, Льюис Кэрролл и здесь остался верен себе. Кэрроллоеды долгое время пытались разгадать, что побудило двух англичан отправиться за тридевять земель в неизведанную Россию. Ныне усилиями библиофила А.М. Рушайло и библиографа В.В. Лобанова тайну удалось раскрыть: преподобные Лиддон и Додсон отправились на празднование юбилея митрополита Московского Леониды. Результатом путешествия явились дорожные заметки «Дневник путешествия в Россию в 1867 году». Итак, Оксфорд - Лондон - Дувр - Кале - Брюссель - Кельн - Берлин (первая продолжительная остановка). Посещение Потсдама с его знаменитыми парками и скверами навело Льюиса Кэрролла на следующие размышления:

... Мне кажется, что архитектура Берлина основана на двух принципах. Если на крыше найдется удобное местечко, туда необходимо поставить фигуру человека. Лучше всего, если он будет стоять на одной ноге. Если местечко найдется на земле, то на нем следует расставить по кругу бюсты на пьедесталах так, чтобы лицом они были обращены внутрь и как бы совещались о чем-то между собой, или воздвигнуть гигантскую фигуру человека, убивающего, намеревающегося убить или убившего (предпочтение отдается настоящему времени) какое-нибудь живое существо. Чем больше шипов у этого существа, тем лучше. Наиболее подходящим считается дракон, но если изобразить его художнику не под силу, то можно ограничиться львом или свиньей. «Принцип умерщвления живых тварей» проведен всюду с такой неукоснительной последовательностью, что некоторые районы Берлина выглядят как гигантская бойня доисторических животных.

Далее были Данциг - Кенигсберг и, наконец, Петербург.

Среди попутчиков Льюиса Кэрролла и преподобного Лиддона оказался англичанин мистер Мюр, совладелец известной фирмы Мюр и Мерилиз, проживший в Петербурге 15 лет и возвращавшийся в Россию после поездки в Париж и Лондон. Они много беседовали относительно того, что стоит посмотреть в Петербурге, о трудности русского языка:

В качестве примера необычайно длинных слов, встречающихся в русском языке, наш спутник привел слово «защищающихся», которое, если его записать английскими буквами, выглядит так: zashtsheeshtshayoushtsheekhshya.

В Петербурге Льюис Кэрролл, по его словам, открыл много чудес:

Неподалеку от Адмиралтейства стоит великолепная конная статуя Петра Великого... Лошадь поднялась на дыбы, а у ее задней ноги извивается змея, на которую, как мне кажется, лошадь наступила. Если бы этот памятник был воздвигнут в Берлине, то Петр, несомненно, был бы самым деятельным образом вовлечен в убийство чудовища. Здесь же он не обращает на змею никакого внимания: «теория умерщвления» в России не признана. Мы обнаружили также две гигантские фигуры львов, бывших до такой степени трогательно ручными, что каждый из них, как котенок, катил перед собой большой шар.

После Петербурга последовала Москва, затем знаменитая Нижегородская ярмарка, опять Москва, Троице-Сергиевская лавра. И снова звучит голос путешественника-парадоксалиста:

Во второй половине дня мы посетили патриарший дворец и были представлены патриарху митрополитом Леонидом. Патриарх мог говорить только по-русски, поэтому беседа между ним и Лиддоном (весьма интересная и продолжавшаяся более часа) велась чрезвычайно оригинальным способом. Патриарх произносил фразу по-русски, митрополит переводил ее на английский язык, затем Лиддон отвечал по-французски, а митрополит переводил его ответ на русский язык для патриарха. Таким образом, разговор двух людей велся на трех языках!

Потом был опять Петербург, Кронштадт, Варшава, Бреславль, Дрезден, Лейпциг, Эмс, Париж, Кале, Дувр...

Странствуя по Европе и России, Льюис Кэрролл как бы все время оставался в центре магического круга, расщепчивая необычайными узорами своего восприятия то, что ускользало от внимания всех остальных людей. Перефразируя слова Королевы из Зазеркалья, можно сказать, что бега его хватило только на то, чтобы оставаться на том же месте. Чтобы попасть в другое место, нужно было бежать вдвое быстрее.

Вернемся теперь к тому, как появился на свет Льюис Кэрролл. Когда впервые появилась необходимость в литературном псевдониме, то первые два Льюис Кэрролл составил из букв своих имен

Edgar Cuthwellis
Edgar U.C. Westhill.

Правда, оба они были забракованы издателем. Тогда Льюис Кэрролл перевел два своих имени на латынь

Carolus Ludovicus,

и, переставив, выполнил обратный перевод на английский. Так 1 марта 1856 года появился на свет

Louis (Lewis) Carroll.

Льюис Кэрролл был болезненно застенчив, заикался, был крайне педантичен и консервативен (в том числе и в преподавании, а преподавал он классическую геометрию «по Евклиду»). Дав обет безбрачия, что было необходимо для принятия духовного сана, обязательного для членов колледжа Св.Троицы, он тратил все свое душевное тепло на детей. С ними автор «Алисы» чувствовал себя прекрасно, с ними он всегда находил общий язык, с ними он всегда был в Стране Чудес. Для них он выдумывал, например, такие задачи:

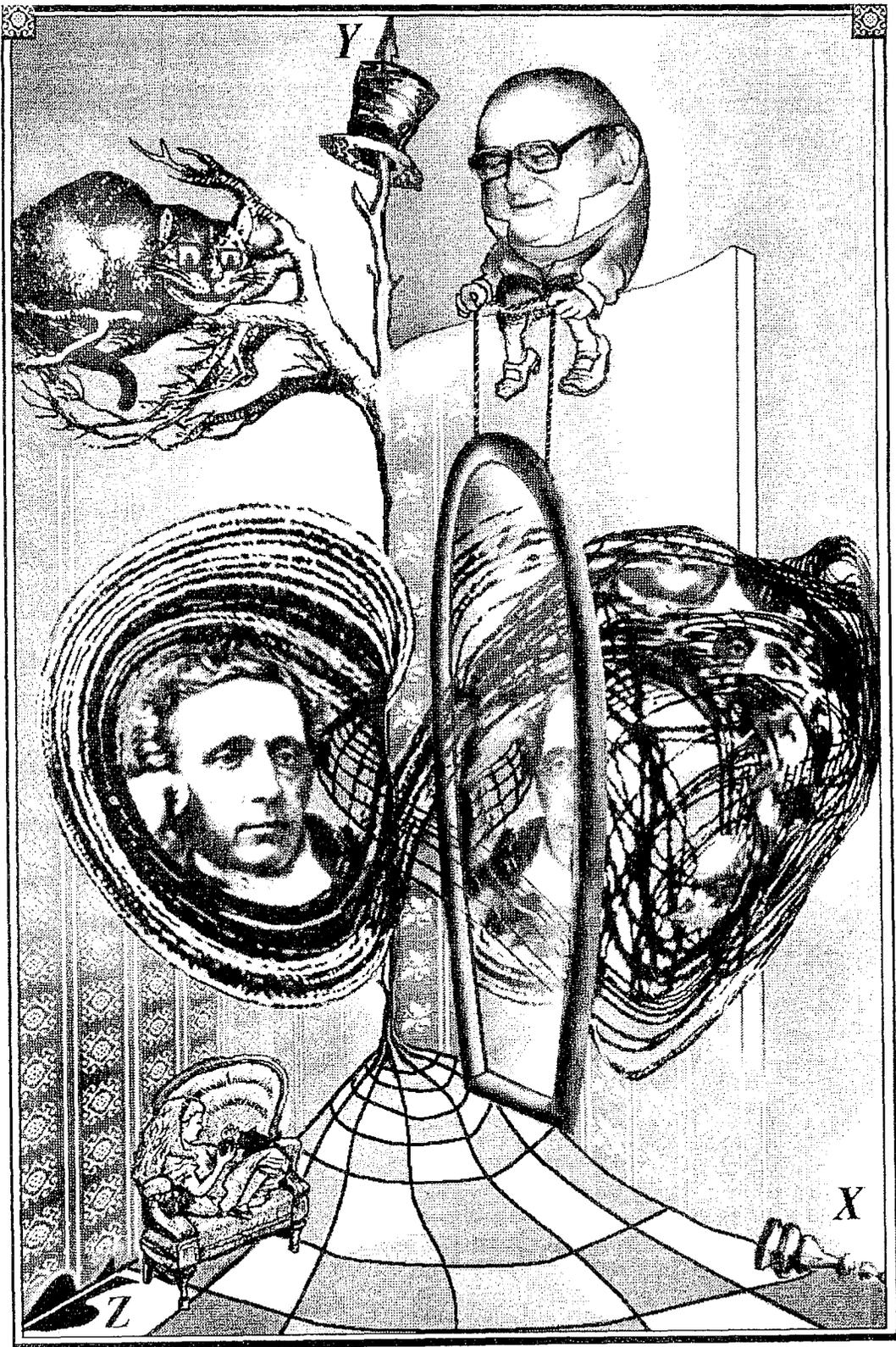
Кошка съедает мышку за 1 минуту, за сколько минут кошка съест $6 \cdot 10^6$ мышек? (Ответ: Не скоро, скорее мышки съедят кошку.)

Именно одной из его юных приятельниц Эдит Рике² была посвящена «История с узелками». Это для детей он написал сказку «Охота на снарка» (to snark - рычать, Snark - «рычун»), в подзаголовке к которой стоит «агония в 5 приступах». Несколько героев охотятся на Снарка, некое несуществующее чудовище, но в конце поэмы выясняется, что они охотятся не на Снарка, а на Буджума - другое несуществующее чудовище. Парадоксы, парадоксы...

В письме к одной девочке от 30.11.1879 года Льюис Кэрролл писал:

...Я был очень занят - мне пришлось отправлять пачки, почти полные тележки писем. Это занятие настолько утомило меня, что я стал ложиться спать через минуту после того, как вставал, а иногда даже за минуту до того, как вставал! Слышала ли ты, чтобы кто-нибудь уставал до такой степени?

² Эта девушка стала впоследствии вычислителем в обсерватории.



У Льюиса Кэрролла были все основания для усталости: журналы, куда Льюис Кэрролл заносил краткое содержание любого полученного или отправленного им письма, насчитывали N «входящих» и «исходящих», где $N = 98721$. Замкнутый и чопорный со взрослыми, Льюис Кэрролл писал детям письма-сказки, письма-поэмы. Впрочем, Винни Пух легко распознал бы в некоторых из них письма-«ворчалки», письма- «дразнилки» и т.д.

И еще одно увлечение было у Льюиса Кэрролла - увлечение логикой. Оно привело к созданию «Логической игры», «Символической логики», замечательных парадоксов «Что черепаха сказала Ахиллу» и «Аллен, Браун и Карр».

Заглянув в учебник логики, мы обнаружим, что силлогизмом называется особый прием рассуждения, при котором «из двух категорических суждений (посылок), имеющих вполне определенную, а именно, субъективно-предикатную логическую структуру, связанных общими средними терминами и содержащих утверждения о присущности или не присущности предиката субъекту, с необходимостью следует третье суждение, называемое заключением». Затем обычно следует пример силлогизма:

Все люди смертны.
Кай- человек.

Кай смертен.

Подобное определение несомненно способно лишь отпугнуть от изучения логики. Но по Льюису Кэрроллу нет худа без добра. Логическая терминология (суждение, термин суждения, субъект, предикат и т.п.) может оказаться «необычайно полезной, если кому-нибудь из ваших приятелей придет в голову поинтересоваться, не приходилось ли вам когда-либо изучать логику. Не забудьте употребить в вашем ответе все (известные вам) термины и ваш приятель, став не только мудрее, но и печальней, удалится потрясенный». На протяжении вот уже ста лет логики оживляют свои учебники, открыто заимствуя (или тайно похищая) примеры у непревзойденного мастера логической эксцентриады Льюиса Кэрролла. Вот примеры:

Все философы рассуждают логично.
Человек, не умеющий рассуждать логично, всегда упрям.

Некоторые упрямые люди не философы.

Ни одному лысому созданию расческа не нужна.
Ни у одной ящерицы нет волос.

Ни одной ящерице расческа не нужна.

Ничто разумное никогда не ставило меня в тупик.
Логика ставит меня в тупик.

Логика не разумна.

Чушь? Нелепость? Нет, серьезная вещь, облаченная в шутовской наряд, силлогизмы под маской «силлигизмов» (неологизм Льюиса Кэрролла, образованный от английского *silly* - глупый).

Самый процесс решения логических задач Льюис Кэрролл сумел превратить в интеллектуальную забаву, в игру на специальной диаграмме с фишками двух цветов - красными и черными. «Чтобы играть в эту игру, - поясняет Льюис Кэрролл, - необходимо иметь 9 фишек - 4 красных и 5 черных. Кроме того, необходимо иметь по крайней мере одного играющего. Мне не известна ни одна пара, в которой число участников было бы меньше»³.

³ Логические и математические работы Льюиса Кэрролла в какой-то мере изложены в [4].

Много еще можно было бы рассказывать о Кэрролле, но, остановившись, мы всегда вправе повторить за Шахерезадой: «Но эта история - ничто по сравнению с той, которую мы расскажем в следующий раз».

Автор выражает свою глубокую дружескую признательность Д.И. Трубецкову, чьи записи позволили восстановить текст лекции, и Н.Н. Лёвиной, чья мягкая настойчивость способствовала реализации давней мечты автора привлечь внимание тех, кто занимается нелинейной динамикой, к сильно нелинейному неравновесному объекту, каким был и навсегда останется Льюис Кэрролл.

Библиографический список

1. Данилов Ю.А. Логика в стране чудес // Знание - сила. 1973. № 12. С.26.
2. Данилов Ю.А. Льюис Кэрролл в России // Знание - сила. 1974. № 9. С.44.
3. Данилов Ю.А. Льюис Кэрролл и его «восемь или девять мудрых слов о том, как писать письма» // Знание - сила. 1975. № 2. С.46.
4. Кэрролл Л. История с узелками / Пер. с англ. Ю.А. Данилова; Под ред. Я.А. Смородинского. М.: Мир, 1973.
5. Кэрролл Л. Логическая игра / Пер. с англ. [и предисл.] Ю.А. Данилова. М.: Наука, 1991.

Курчатовский научный центр

Поступила в редакцию 11.01.96

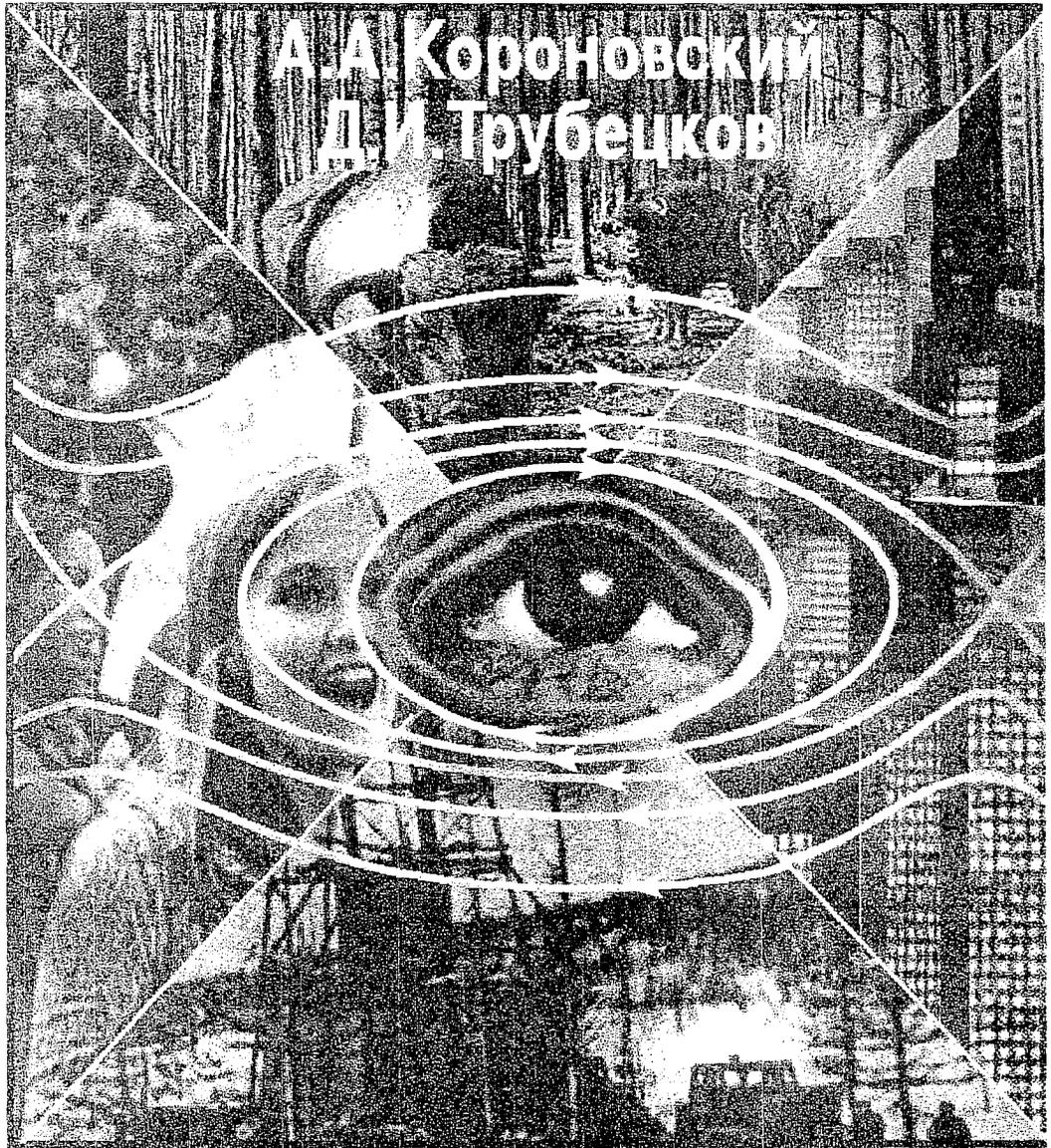
LEWIS CARROLL AS NONLINEAR PHENOMENON

Yu. A. Danilov

Stylistic peculiarities and space-time characteristics of creative activity and biography of Lewis Carroll enable us to consider him as nonlinear system with clear-cut attractors in the domains of paradoxes, nonsense fiction and love for children. It is worth of mentioning that the transition from the basin of one attractor to that of another one in the case of Carroll is not accompanied with catastrophes and bifurcations but takes place smoothly.

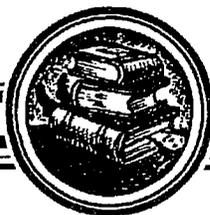


Данилов Юлий Александрович - родился в 1936 году в Москве. Окончил физический факультет МГУ (1963). Старший научный сотрудник Курчатовского научного центра. Область интересов - симметрия в физике, нелинейная динамика. Имеет более 50 научных публикаций по этим направлениям. Много лет занимается переводами трудов А.Эйнштейна, Г. Кирхгофа, А. Пуанкаре, В. Паули, И. Пригожина, которые выходят в свет в серии «Классики науки».



А. А. Короновский
Д. И. Трубецков

**НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА
В ДЕЙСТВИИ**



Изв.вузов «ПНД», т.4, № 1, 1996

УДК 51.001.57:3

**НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА В ДЕЙСТВИИ:
как идеи нелинейной динамики проникают
в экологию, экономику и социальные науки**

А.А. Короновский., Д.И. Грубецков

Учебное пособие для студентов естественных факультетов, а также для студентов гуманитарных специальностей университетов и всех, кто интересуется применением методов нелинейной динамики в различных науках. 130 с.; ил.; библиогр. 40 назв.

ISBN 5-900641-23-6

© ГосУНЦ «Колледж», Саратов, 1995.

В 90-ые годы XX столетия человечество занимает проблемы не только политические, но и социальные, экономические и экологические; они тесно взаимосвязаны, носят глобальный характер и оказывают воздействие на всех и на все.

Э. Ласло

Предисловие

В этой небольшой книге собраны лекции, которые в разное время и в разных аудиториях были прочитаны авторами. Как правило, эти лекции вызвали интерес, поэтому было решено собрать их и напечатать.

Их главная цель - показать, как нелинейная динамика (новое научное мировоззрение нашего времени) проникает в разные науки, и в первую очередь, в науки, далекие от физики. Выбор рассматриваемых моделей и задач определяется вкусами авторов; нет претензий и на полноту библиографического списка; в книгу включены также результаты, полученные авторами (эти разделы помечены символом *). Помимо задач, решение которых основано на методах нелинейной динамики, включены также вопросы, для исследования которых используются физические аналогии и различные математические подходы.

Особенностью данной книги является относительная простота рассматриваемых моделей, ибо все они - качественные. Эти модели не дают, да и не могут дать количественного соответствия реально протекающим социально-экономическим процессам. Все рассматриваемые модели иного плана - они «выхватывают» лишь самое существенное, самое первостепенное, оставляя за границами поля зрения множество других факторов, которые также оказывают влияние на динамику рассматриваемых систем. Попытка же учета всех этих

факторов приводит к тому, что математическая модель становится излишне громоздкой (среди таких моделей подчас встречаются настоящие «монстры»). Качественные же модели как раз и хороши тем, что они «прозрачны» для понимания. Осознав, что происходит в рассматриваемой модели, мы можем, в той или иной степени, понять сущность реально происходящих социально-экономических процессов.

Оглавление

1. Модели развития и взаимодействия в экологии	4
1.1. Модель Мальтуса и её обобщение Ферхюльстом	4
1.2. Модель Вольтерра -Лотки	6
1.3. Детерминированный хаос в экологических моделях. Модель «хищник-пища-жертва»	11
1.4. Модель логистической популяции, учитывающая распространение особей по ареалу	13
2. Феномен логистического уравнения	14
3. Элементарные экономические модели	18
3.1. Линейная модель - экономический осциллятор	18
3.2. * Модель государственного регулирования производства	21
3.3. Модели Гудвина циклов капиталистической экономики	27
3.3.1. Модель 1	27
3.3.2. Модель 2	29
3.3.3. Модель 3	33
4. Экономика и линейные и нелинейные неравенства	35
5. Физика и математическая экономика	45
5.1. Экономическая динамика и уравнения Гамильтона	46
6. * Простейшие социальные модели	52
6.1. * Взаиммиграции городского и сельского населения	52
6.2.* Модель динамики уровня преступности в обществе	56
7. Математическая модель сосуществования производителей и управленцев	63
8. Нелинейные модели Вайдлиха и их применение к экономическим и социальным задачам	74
8.1. Взаимодействие народа и правительства	81
8.2. Экономические циклы	82
8.3. Цикл ресторана	83
9. * Хаос и структуры в социально-экономических моделях	85
9.1. * Развитие системы образования в условиях конкуренции	87
9.2. * Формирование общественного мнения	90
9.3. * Эволюционирующий рынок	93
10. Теория эпидемий	98
10.1. Простые эпидемии	98
10.2. Общий случай эпидемии	100
10.3. Повторяющиеся эпидемии	102
10.4. * Пространственная эпидемия	103
11. Математическая модель роста народонаселения мира	117
Вместо заключения	123
Библиографический список	124

Для определения тиража 2-ого издания пособия просим заинтересованных читателей направить в адрес издательства заказы с указанием обратного адреса заказчика и количества экземпляров.



Начало см. с. 58

Вакуумная электроника - 25 лет спустя

Солнцев В.А. Три лекции по теории лампы с бегущей волной
Маненков А.Б., Клеев А.И. Возбуждение резонаторов
Солнцев В.А., Галдецкий А.В., Клеев А.И. Приборы вакуумной СВЧ микроэлектроники со средним углом пролета
Соколов Д.В., Трубецков Д.И. Сверхвысокочастотные приборы вакуумной микроэлектроники со скрещенными полями
Олейник М.В., Трубецков Д.И. Линейная теория gyroприборов с бегущими волнами
Кураев А.А., Синицын А.К. Пениотрон: факторы, ограничивающие максимально достижимые КПД в оптимальных режимах
Кураев А.А., Синицын А.К. Энергия попарного взаимодействия электронов на конечном интервале: ее изменение определяется только релятивистским фактором
Григорьев Ю.А. Матричные углеродные автоэмиссионные катоды - экспериментальные результаты и перспективы применения в приборах СВЧ
Амиров В.Р., Калинин Т.Е., Колобаева Т.Е., Лазерсон А.Г., Сухов А.В. СВЧ приборы с пространственно-развитыми электронными пучками и электродинамическими системами
Рыскин Н.М. Моделирование нестационарных нелинейных процессов в клистроде при помощи гидродинамических уравнений

Разовые лекции и доклады

Клеев А.И., Кюркчан А.Г. Метод диаграммных уравнений в задачах дифракции
Лазерсон А.Г. Две лекции по теории распространения волн в распределенных системах.
Гречушкин К.В., Шараевский Ю.П. Нелинейное затухание поверхностной магнитоэлектрической волны при параметрическом резонансе
Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Шлепкин В.Н. Применение метода электронного зонда для исследования анодного блока магнетронов миллиметрового диапазона

Нелинейные волны, хаос и структуры в электронике

Архипов А.В., Богданов Л.Ю., Воскресенский С.В., Дворецкая Н.В., Левчук С.А., Лукаш О.И., Саминский Г.Г. Пространственно-временные характеристики электронных потоков мощных СВЧ устройств
Безручко Б.П., Прохоров М.Д., Селезнев Е.П. Моделирование нелинейных осцилляторов по экспериментальной наблюдаемой
Иванов Р.Н., Прохоров М.Д. Закономерности в спектрах колебаний LR-диод цепи на пороге перехода к хаосу
Астахов В.В., Безручко Б.П., Пономаренко В.И., Селезнев Е.П. Мультистабильность и хаос в замкнутой цепочке элементов с удвоением периода (физический и численный эксперимент)
Безручко Б.П., Ракитин С.А. Размерность хаотических аттракторов в системе диссипативно связанных квадратичных отображений
Анфиногентов В.Г., Калинин Ю.А. Экспериментальное исследование колебательных явлений в электронном пучке с виртуальным катодом
Ватрунин В.Е., Дубинов А.Е., Селемир В.Д., Степанов Н.В. Самосинхронизация турбулентного электронного потока вблизи виртуального катода
Князико С.В. Рождение спиральных волн и дислокации в параметрически возбуждаемой капиллярной ряби
Мчедлова Е.С. Феноменологическая модель электронной турбулентности
Курин А.Ф. Локализация заряженных частиц высокочастотными полями и вынужденные процессы в ловушке
Запезалов В.Е., Цимринг Ш.Е. Экспериментальное исследование интенсивных винтовых пучков с захваченными электронами
Мануилов В.Н., Фикс А.Ш. Современные коллекторные системы мощных МЦР

Высокочастотная релятивистская электроника и электроника больших мощностей

Дубинов А.Е., Жданов В.С., Коновалов И.В., Рожнов И.В., Селемир В.Д., Шибалко К.В. Генерация СВЧ-излучения в длиннопольном виркаторе с поперечным ленточным пучком
Селемир В.Д., Дубинов А.Е., Коновалов И.В., Нижегородцев Ю.Б., Степанов Н.В., Суворов В.Г., Шибалко К.В. Комплекс методов диагностики мощных одиночных наносекундных импульсов СВЧ-излучения на основе СВЧ-пробоя газа

Разовые лекции и доклады

Салий И.Н., Хованова Н.А. Математические модели связанных канонических нерегулярных линий передачи
Бровко А.В., Хохлов А.В. Обратная задача СВЧ-радиополяриметрии
Мясников А.В., Хохлов А.В. Исследование точности поляризационного анализа структуры СВЧ-излучения дифференциально-коммутиационным методом
Каиштанов В.В. О дуальности электрических цепей при переходных процессах

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Правила оформления рукописей

1. Статьи объемом не более 16 страниц должны быть напечатаны на белой бумаге через два интервала и представлены в двух экземплярах. При компьютерном наборе размер шрифта - не меньше стандартного машинописного.

2. На первой странице перед текстом статьи должны быть напечатаны: индекс УДК, название статьи, инициалы и фамилии авторов, *краткий реферат статьи, составленный по форме удобной для непосредственного включения его в РЖ «Физика», издаваемый ВИНТИ* (см. ниже). К статье прилагаются:

а) перевод на английский язык названия статьи, инициалов и фамилий авторов, краткого реферата;

б) краткие сведения об авторах с фотографиями любого формата.

Приложения даются в двух экземплярах.

3. Весь иллюстративный материал представляется в двух экземплярах. Рисунки выполняются тушью на белой бумаге. Рисунки, полученные машинной графикой, должны быть достаточно четкими и яркими. На обороте указываются: порядковый номер рисунка, фамилии авторов, название статьи. Подрисовочные подписи печатаются на отдельном листе и не должны дублировать внутритекстовое описание рисунка.

4. Все формулы должны быть вписаны черными чернилами четко и ясно. Формулы должны быть размечены во всех случаях, когда строчные и прописные буквы одинаковы по начертанию и отличаются только своими размерами (С и с, V и v, U и u, W и w, S и s, P и p, K и k, X и x, Y и y, Z и z, Q и q, J и j) Необходимо прописные буквы подчеркивать простым карандашом двумя черточками снизу ($\underline{\underline{C}}$, $\underline{\underline{V}}$), а строчные - двумя черточками сверху ($\overline{\overline{c}}$ и $\overline{\overline{v}}$). При написании необходимо также делать ясное различие между буквами J и I и пояснять их на полях. Буква O подчеркивается двумя черточками снизу, цифра 0 не подчеркивается. Особенно четко следует вписывать схожие по написанию l и e (l подчеркивается зеленым карандашом), k (русское) и k (латинское), h и n, q и g, «,» (запятую), «'» (штрих), «1» (единицу), «2» (двойку), r и z. Особое внимание должно быть обращено на аккуратное написание индексов и показателей степеней. Надстрочные знаки нужно отчеркивать дугой - \cup , подстрочные дугой - \cap . Индексы, являющиеся сокращениями слов, должны быть пояснены отдельно. В вещественных числах ставится десятичная точка.

5. Греческие буквы подчеркиваются красным карандашом, прописные указываются особо. Для обозначения вектора используются стрелки над буквой, для усреднения величины - черта сверху.

6. В библиографическом списке нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок на них в тексте. В списке должны быть указаны:

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.

Ссылки на неопубликованные работы нежелательны.

7. Статьи, направляемые авторам на переработку, должны быть возвращены в редакцию не позднее двух месяцев после получения. При нарушении этого условия статья рассматривается как вновь поступившая.

Статьи, присланные без соблюдения перечисленных выше правил, к рассмотрению редакцией не принимаются.

Рекомендации по составлению «краткого реферата» и «сведений об авторах»

1. *Публикация реферата преследует две основные цели:*

а) помочь ученым, работающим над теми же вопросами, по которым написана статья, уточнить, имеет ли смысл читать статью полностью;

б) упростить и ускорить работу реферативных журналов, которые получают возможность немедленно перепечатывать авторские рефераты;

Реферат должен представлять собой самостоятельное законченное сообщение объемом не более 200-250 слов. В нем должны быть обозначены основные идеи и результаты, содержащиеся в статье. Авторы должны иметь в виду, что рефераты могут оказаться единственными материалами, которые будут прочитаны.

2. *Краткие сведения об авторах составляются по следующей форме:*

Иванов Петр Сидорович - 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 соавтор учебника «Волны в экологии». Опубликовал много 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».

Статьи принимаются на дискетах для компьютера IBM PC, формат MS DOS - 5,25" или 3,5". Текстовые файлы записываются в ASC II- кодировке. Иллюстрации - в виде файлов в формате PCX, TIFF или GIF. Наличие текста на дискете не исключает необходимость представления размеченной распечатки статьи (в двух экз.), с которой работает рецензент и из которой вносятся формулы в макет статьи. В конце статьи авторы должны указать наименование программы, в рамках которой выполнена работа, или наименование фонда поддержки.

Редакция

E-mail: and@ccollege.saratov.su
E-mail: casand@scnit.saratov.su

для писем
для статей

Зав. редакцией *Н.Н. Лёвина*
Редакторы *М.В. Попова, Н.Н. Лёвина*
Художник *Д.В. Соколов*
Оригинал - макет подготовлен *Г.А. Суминой, И.А. Пономаревой*
на компьютерной системе Apple Macintosh

Распространение журнала по подписке и предварительным заявкам осуществляется Государственным учебно-научным центром «Колледж» при Саратовском государственном университете.

Банковские реквизиты - р/с № 000609446 в КБ «Экономбанк»
г. Саратова, МФО 251279, корсчет банка 700161122, РКЦ, МФО 251008

Подписка на I-ое полугодие 1997 года
по каталогу «Газеты и журналы», индекс 73498
см. по алфавиту

Сдано в набор 5.04.96. Подписано к печати 5.06.96. Формат 70x108/16
Бумага финская. Печать офсетная. Гарнитура Латинская
Усл. печ.л. 11,55 (8,25). Уч.-изд. л. 13,8. Тираж 200 экз. Заказ 15

Издательство ГосУНЦ «Колледж»
410026, Саратов, ул. Астраханская, 83.
Тел. (845-2)514298, факс (845-2) 240446
E-mail:and@ccollege.saratov.su

Отпечатано на ризографе RA 4200 издательства ГосУНЦ «Колледж»

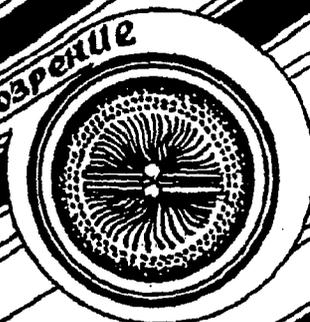
© Издательство ГосУНЦ «Колледж»



© Оформление художника Д.В. Соколова, 1996



КНИЖНОЕ ОБОЗРЕНИЕ



EDITOR-IN-CHIEF

Yu.V. Gulyaev, Member of the Russian Academy of Sciences, Institute of Radioengineering and Electronics, 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, Institute of Radioengineering and Electronics, Saratov University

EDITORIAL BOARD

V.S. Anishchenko, Professor, Saratov University

Yu.A. Danilov, Kurchatov Scientific Centre, Moscow

B.A. Kalinikos, Professor, St. Petersburg Electrotechnical University

V.I. Krinsky, Professor, Institute of Experimental and Theoretical Biophysics, Puschino

S.P. Kuznetsov, Professor, Institute of Radioengineering and Electronics, Saratov

P.S. Landa, Professor, Moscow University

L.A. Ostrovsky, Professor, Institute of Applied Physics, Nizhny Novgorod

Yu.M. Romanovsky, Professor, Moscow University

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

V.V. Tuchin, Professor, Saratov University

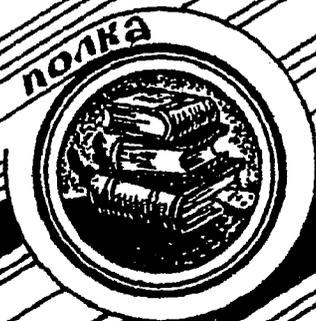
V.K. Yulpatov, Professor, Institute of Applied Physics, Nizhny Novgorod



для студентов и преподавателей в журнале



КНИЖНАЯ ПОЛКА
СТУДЕНТА



ВСЕМИРНАЯ ИСТОРИЯ и ПИД Италия XIII-XIV вв

ДАНТЕ - БОТТИЧЕЛЛИ

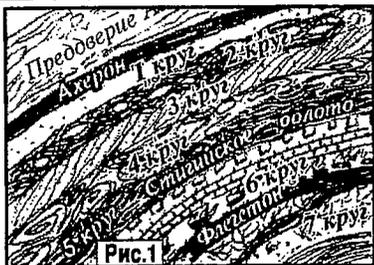


Рис.1



К вопросу о фрактальности структуры Ада в «Божественной Комедии»

I. Сходство со странным аттрактором, которое сразу бросается в глаза при первом взгляде на фрагмент план-схемы дантовского ада (рис.1), является не случайным и последовательно подчеркивается автором на протяжении всех этапов его исследования Преисподней, «Кружащийся во мгле неозаренной, Как бурным вихрем возмущенный прах» Адского преддверия - этой сепаратриссы между миром живых и мертвых - затем дробится и многократно множится бесчисленными вихрями, потоками, смерчами кипящего, бурлящего, клокочущего месива воды, огня, растерзанной плоти, смолы и пыли.

II. Спрессованные воедино века и поколения, страны и народы, все эти вложенные друг в друга пространственные и временные пласты определяют весьма сложную структуру дантовского Ада. Зримые отображения этой структуры, ее трехмерные сечения - обломы и провалы, ущелья и щели, разделенные скалистыми валами с нависающими над ними гребнями и каменными сводами, описаны Данте подробно и скрупулезно. С почти физиологической точностью передано им ощущение сгущенно-спертого, тягучего пространства, переполненного, битком набитого огневой, жидкой, ледяной, каменной, животной и дьявольской материей. Несомненно, ему было ясно, что фрактальная размерность этого пространства больше трех и, по-видимому, увеличивается со временем. В частности, Данте отмечает, что одна из бифуркаций, приведшая к существенному усложнению адской структуры, связана с землетрясением в момент смерти Христа.

III. Поразительно, но дантовские прозрения, оказались воспринятыми его ближайшими потомками, свидетельством чему служит приведенная здесь одна из ста иллюстраций к «Божественной Комедии», выполненных Сандро Боттичелли (рис.2). Сюжет относится ко второму поясу седьмого круга, в котором души самоубийц прорастают кустами и деревьями, крылатые гарпии питаются их листьями, причина мучения, а псы обламывают ветви и сучья. Правда, изображение страданий мало волнует Боттичелли, его интересует единство и взаимосвязь трех стихий - растительной, животной и духовной, ему хочется выявить структуру этой новой целокупности. Наглядно-образно здесь выражена сама идея и суть фрактальности: линия, заполняющая почти равномерно весь рисунок, при увеличении и пристальном рассмотрении пластично-зримо выявляет множество сцен и фигур (рис.3).

IV. Можно предположить, что принцип фрактальности был телеологически предопределен функциональным предназначением Адского пространства. Следует напомнить, что до прихода Спасителя траектория странствия любой земной души попадала в сферу притяжения АДтрактора, и только после искупительной жертвы Христа для людей открылась надежда на спасение. Однако заселение Ада, которое в отличие от строго лимитного формирования Рая и Чистилища*, основывалось на принципе всеобщего и равного включения, продолжалось все возрастающими темпами. Учитывая ограниченный объем Адской полости, следовало бы предположить, что там уже давно должны были произойти и экологическая, и демографическая катастрофы. Тем не менее, принципы фрактальной организации пространственной структуры сумели обеспечить устойчивое динамическое равновесие и стабильность этой сверхсложной системы, составленной из столь разнородных и, казалось бы, несовместимых элементов.

V. Через четыре года, на пороге нового тысячелетия, уже сейчас явственно грозящего нам неисчислимыми бедами, связанными с неизбежным перенаселением планеты, мы будем отмечать 700-ую годовщину дантовского нисхождения в Ад. Вместе с ним мы вновь ужасаемся тем бесчеловечным средствам и методам, которыми достигается вековечное существование этой системы. Но было бы преступным недомыслием не попытаться изучать, развивать и использовать те структурально-континуальные идеи фрактальной коммунализации общественного бытия, которые убедительно доказали свою жизнеспособность и которые буквально лежат у нас под ногами! Дантовская книга - этот бесценный учебник Преисподней нелинейной динамики - должна, наконец, стать настольной книгой каждого настоящего ученого XXI века.

* Например, монахи XIII в. определяли соотношение грешников и праведников как 1:10000.

