

Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной физики Российской академии наук  
Национальный исследовательский  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

# **НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ – 2018**

## **XVIII научная школа**

*26 февраля – 4 марта 2018 года, Нижний Новгород*

## **ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ**

Нижний Новгород  
ИПФ РАН  
2018

## ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

акад. РАН А.Г. Литвак – председатель, ИПФ РАН, Н. Новгород  
д.ф.-м.н. А.В. Слюняев – ученый секретарь, ИПФ РАН, Н. Новгород  
член-корр. РАН К.В. Анохин, НИЦ «Курчатовский институт», Москва  
акад. РАН А.О. Глико, ИФЗ РАН, Москва  
проф. С.Н. Гурбатов, ННГУ, Н. Новгород  
акад. РАН В.П. Дымников, ИВМ РАН, Москва  
акад. РАН В.Е. Захаров, ФИАН, Москва  
акад. РАН Л.М. Зеленый, ИКИ РАН, Москва  
д.ф.-м.н. В.Б. Казанцев, ННГУ, Н. Новгород  
член-корр. РАН И.Ю. Костюков, ИПФ РАН, Н. Новгород  
член-корр. РАН Вл.В. Кочаровский, ИПФ РАН, Н. Новгород  
акад. РАН Е.А. Кузнецов, ФИАН, Москва  
д.ф.-м.н. В.В. Курин, ИФМ РАН, Н. Новгород  
член-корр. РАН Е.А. Мареев, ИПФ РАН, Н. Новгород  
проф. В.И. Некоркин, ИПФ РАН, Н. Новгород  
акад. РАН Р.И. Нигматулин, ИО РАН, Москва  
акад. РАН О.В. Руденко, МГУ, Москва  
акад. РАН А.М. Сергеев, РАН, Москва  
акад. РАН В.И. Таланов, ИПФ РАН, Н. Новгород  
д.ф.-м.н. Ю.И. Троицкая, ИПФ РАН, Н. Новгород  
член-корр. РАН Д.И. Трубецков, СГУ, Саратов  
д.ф.-м.н. А.М. Фейгин, ИПФ РАН, Н. Новгород  
член-корр. РАН Е.А. Хазанов, ИПФ РАН, Н. Новгород  
проф. Е.В. Чупрунов, ННГУ, Н. Новгород

## ОРГАНИЗАЦИОННО-ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

- Федеральное агентство научных организаций
- Президиум Российской академии наук
- Российский фонд фундаментальных исследований (гранты № 18-02-20012, 18-02-20013, 18-05-20005)
- Закрытое акционерное общество «Научно-производственное предприятие «ГИКОМ»

В сборник вошли работы молодых ученых, аспирантов и студентов, представленные на конференцию молодых ученых, организованную в рамках XVIII научной школы «Нелинейные волны – 2018» (Нижний Новгород, 26 февраля – 4 марта 2018 г.). Целями школы является обсуждение мировых достижений последних лет в области фундаментальной нелинейной физики и ее приложений, координация усилий российских ученых в наиболее актуальных направлениях физики нелинейных волновых процессов и ориентация научной молодежи на активное участие в исследованиях, ведущихся в научных центрах нашей страны.

Тематика школы и конференции молодых ученых включает следующие направления исследований:

- современные проблемы теории нелинейных колебаний и волн;
- нелинейные процессы в геофизике;
- нелинейные явления в астрофизике и космологии;
- физика экстремальных световых полей и мощных лазеров;
- нелинейные процессы в нейросистемах;
- нелинейная динамика квантовых систем.

В работе школы принимают участие около 150 молодых ученых, представляющих около 40 устных докладов и более 90 стендовых выступлений. В этом году ожидается приезд молодых исследователей из Нижнего Новгорода, Москвы, Саратова, Перми, Самары, Санкт-Петербурга, Новосибирска, Екатеринбурга, Владивостока, Воронежа, Казани, Ярославля.

Программа школы включает лекции известных российских ученых, а также приглашенных зарубежных ученых. Среди них д.ф.-м.н., проф. В.С. Анищенко (СГУ), член-корр. РАН К.В. Анохин (НИЦ «Курчатовский институт», МГУ), проф. И.С. Аронсон (Университет штата Пенсильвания, США), проф. В.С. Афраймович (Университет Сан-Луис Потоси, Мексика), д.ф.-м.н. С.И. Бадулин (ИО РАН), д.ф.-м.н. С.П. Вятчанин (МГУ), д.ф.-м.н. А.В. Глазунов (ИВМ РАН), д.ф.-м.н., проф. В.В. Жмур (ИО РАН), проф. А.В. Кавокин (Саутгемптонский университет, Великобритания), проф. Жан-Клод Киффер (Национальный научно-исследовательский институт, Канада), член-корр. РАН Ю.Ю. Ковалев (ФИАН), акад. РАН Е.А. Кузнецов (ФИАН), член-корр. РАН Г.А. Леонов (СПбГУ), проф. РАН А.А. Лутовинов (ИКИ РАН), проф. М.А. Малков (Калифорнийский университет, США),

член-корр. РАН Е.А. Мареев (ИПФ РАН), д.ф.-м.н., проф. В.И. Некоркин (ИПФ РАН), акад. РАН Р.И. Нигматулин (ИО РАН), к.ф.-м.н. О.В. Палашов (ИПФ РАН), проф. А.С. Пиковский (Потсдамский университет, Германия), член-корр. РАН В.М. Пудалов (ФИАН), проф. А.М. Пухов (Дюссельдорфский университет им. Генриха Гейне, Германия), д.ф.-м.н. М.Ю. Решетняк (ИФЗ), акад. РАН В.А. Рубаков (ИЯИ РАН), акад. РАН О.В. Руденко (МГУ), д.ф.-м.н. А.В. Самохвалов (ИФМ РАН), акад. РАН А.М. Сергеев (РАН), д.ф.-м.н. А.В. Слюняев (ИПФ РАН), д.ф.-м.н. М.В. Стародубцев (ИПФ РАН), д.ф.-м.н. Ю.И. Троицкая (ИПФ РАН), член-корр. РАН Д.И. Трубецков (СГУ), член-корр. РАН А.В. Турлапов (ИПФ РАН), д.ф.-м.н., проф. А.В. Устинов (Технологический институт Карлсруэ, Германия, МИСиС, Российский квантовый центр), к.ф.-м.н. А.М. Федотов (МИФИ), д.ф.-м.н. М.В. Фролов (ВГУ), к.ф.-м.н. А.В. Юлин (Университет ИТМО).

Лекции, прочитанные на XVIII научной школе «Нелинейные волны – 2018», по традиции будут изданы отдельной книгой. Дополнительная информация о школе размещена на сайте <http://www.nonlinearwaves.scinpnov.ru/>.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ СВЯЗАННЫХ ГИРОТРОНОВ В РЕЖИМЕ ЖЕСТКОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

*А.Б. Адилова<sup>1</sup>, С.А. Герасимова<sup>1</sup>, Н.М. Рыскин<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

<sup>2</sup>Саратовский филиал Института радиотехники и электроники

им. В.А. Котельникова РАН

AdilovaAB@info.sgu.ru

Электронно-циклотронный нагрев плазмы в установках термоядерного синтеза – одно из основных направлений применения гиротронов. Для этих целей разрабатываются комплексы из нескольких гиротронов. Например, в проекте ITER планируется использование 26 гиротронов мощностью 1 МВт на частоте 170 ГГц [1]. Важно обеспечить когерентную работу всех гиротронов, поэтому исследование процессов синхронизации является сейчас актуальным [2]. В данной работе проводится моделирование синхронизации двух связанных гиротронов. При этом принципиальную роль играет запаздывание, которое обусловлено конечным временем распространения сигнала от одного гиротрона к другому.

Моделирование проводится на основе известных уравнений нестационарной теории гиротрона с фиксированной структурой поля [3]. В рамках этой теории уравнение движения электронов имеет вид

$$\frac{dp_{1,2}}{d\zeta} + i\left(\Delta_H + |p_{1,2}|^2 - 1\right)p_{1,2} = iA_{1,2}f_s(\zeta). \quad (1)$$

Здесь  $p_{1,2}$  – безразмерные поперечные импульсы электронов,  $A_{1,2}$  – безразмерные комплексные амплитуды поля рабочей моды (индексы «1» и «2» относятся к первому и второму гиротронам соответственно),  $\zeta = (\beta_{\perp}^2/2\beta_{\parallel})\omega_0 z/c$  – безразмерная продольная координата,  $\omega_0$  – опорная частота, которая выбрана равной собственной частоте рабочей моды,  $\beta_{\parallel} = v_{\parallel 0}/c$ ,  $\beta_{\perp} = v_{\perp 0}/c$ ,  $\Delta_H = 2(\omega_0 - \omega_H)/(\beta_{\perp}^2\omega_0)$  – циклотронная расстройка. Функция  $f_s(\zeta)$  описывает распределение поля в резонаторе. Далее рассматривается гауссово распределение поля.

Амплитуды  $A_{1,2}$  подчиняются уравнениям возбуждения [4]

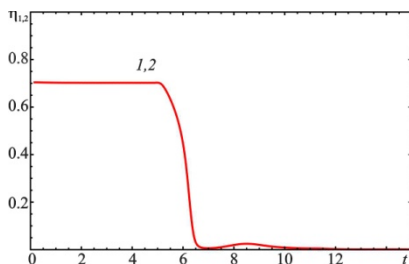
$$\frac{dA_{1,2}}{dt} + i\frac{\Delta}{2}A_{1,2} = iI_s \int_0^{\mu} J_{1,2}(\zeta, t) f_s^*(\zeta) d\zeta + \rho e^{-i\psi} A_{2,1}(t - \tau), \quad (2)$$

где  $t = (\omega_0 t')/(2Q)$  – безразмерное время,  $Q$  – добротность резонатора,  $\Delta$  – расстройка собственных частот,  $I_s$  – безразмерный параметр тока,  $\mu = (\beta_{\perp}^2/2\beta_{\parallel})\omega_0 L/c$  – безразмерная длина резонатора,  $\rho$  – безразмерный

коэффициент связи,  $\tau = \omega_0 t_d / (2Q)$  – нормированное время задержки  $t_d$ ,  $\psi = \omega_0 t_d$ . За исключением малой расстройки собственных частот, все остальные параметры полагаем одинаковыми.

В работе [4] было проведено исследование системы (1)–(2) в случае «мягкого» возбуждения ( $\Delta_H = 0,4$ ). В данной работе исследуется динамика вышеуказанной системы в случае «жесткого» возбуждения. Выбраны следующие значения параметров:  $\mu = 15$ ;  $I_s = 0,06$ ;  $\Delta_H = 0,53$ , что соответствует режиму максимального КПД (около 70 %).

Был обнаружен ряд отличий от хорошо изученной картины синхронизации генератора с мягким возбуждением. На рис. 1 приведен пример зависимостей КПД от времени при достаточно большом коэффициенте связи. Оба гиротрона стартуют с одинаковых начальных амплитуд. Как видно из рисунка, вначале происходит возбуждение колебаний в обеих подсистемах, КПД достигает максимального значения. Однако при  $t > \tau$  сигнал из одного гиротрона начинает поступать в другой. В результате происходит полное подавление колебаний обоих гиротронов. При несколько различных начальных условиях происходит подавление колебаний только одного из гиротронов.



**Рис. 1.** Зависимость КПД первого и второго гиротрона от времени при  $\Delta_H = 0,53$ ;  $I_s = 0,06$ ;  $\rho = 0,5$ ;  $\psi = 0,15\pi$ ;  $\tau = 5$

Аналогичные расчеты для модели связанных многомодовых гиротронов показали, что в этом случае вместо срыва генерации происходит возбуждение паразитной моды.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-32-00124.

### Литература

1. Sakamoto K. Progress of high-power-gyrotron development for fusion research // Fusion Sci. &Tech. 2007. Vol. 52. P. 145–153.
2. Rozental R.M., Ginzburg N.S., Glyavin M.Yu., Sergeev A.S., Zotova I.V. Mutual synchronization of weakly coupled gyrotrons // Phys. Plasmas. 2015. Vol. 22. Art. 093118.
3. Nusinovich G.S. Introduction to the Physics of Gyrotrons. Baltimore ; London : The Johns Hopkins University Press, 2004.
4. Adilova A.B., Gerasimova S.A., Ryskin N.M. Synchronization of delay-coupled gyrotron oscillators // EPJ Web of Conferences. 2017. Vol. 149. Art. 04029 ; doi: 10.1051/epjconf/201714904029.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВОЗМУЩЕНИЙ ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЫ В ПОЛЕ МОЩНОГО РАДИОИМПУЛЬСА НА КРУПНОМАСШТАБНОМ СТЕНДЕ «КРОТ»

*Н.А. Айдакина, М.Е. Гушин, И.Ю. Зудин, С.В. Коробков, А.В. Стриковский*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
aidakina@appl.sci-nnov.ru

Воздействие на  $F$ -слой ионосферы мощного излучения нагревных стенов, таких как «Сура» или HAARP, приводит к развитию искусственной ионосферной турбулентности [1, 2]. В последнее время при постановке и интерпретации активных ионосферных экспериментов большое внимание уделяется вторичной турбулентности. Генерация вторичной турбулентности может отвечать за появление неоднородностей плотности и температуры с различными масштабами далеко вне областей резонансного взаимодействия нагревного излучения с магнитоактивной плазмой [2].

В настоящей работе исследованы особенности генерации и переноса возмущений плотности плазмы и магнитного поля при радиоимпульсном воздействии. Эксперименты проводились на крупномасштабном плазменном стенде «Крот» (ИПФ РАН, г. Н. Новгород). В проводимых экспериментах длительность импульса накачки выбиралась таким образом, чтобы тепловые эффекты не успевали развиться; основным механизмом, ответственным за формирование неоднородностей, было перераспределение плазмы за счет усредненной пондеромоторной силы. В экспериментах детально исследована пространственная структура и динамика плазменных неоднородностей, формируемых при воздействии импульсов электромагнитного излучения широкого диапазона длительностей и мощности. Показано, что при высоком уровне мощности накачки время развития и релаксации плазменной неоднородности может существенно превышать длительность импульса накачки. Установлено, что процессы переноса неоднородностей плотности вдоль внешнего магнитного поля имеют достаточно сложный характер. Анализ возмущений магнитного поля в совокупности с пространственно-временными картами возмущений плотности указывает на наличие нескольких характерных скоростей переноса вдоль магнитного поля. В работе обсуждается несколько механизмов переноса возмущений плазмы.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-02-01156а).

## Литература

1. Фролов, В.Л. Тонкая структура дактов плотности, формирующихся при активном радиочастотном воздействии на лабораторную и космическую плазмы / В.Л. Фролов, В.О. Рапопорт, Е.А. Шорохова, Н.А. Айдакина, М.Е. Гушин,

И.Ю. Зудин, С.В. Коробков, А.В. Костров, М. Парро, Ж.-Л. Рош // Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 101, № 5. С. 342–346.

2. Фролов, В.Л. Исследование процессов переноса в верхней ионосфере Земли с помощью искусственной ионосферной турбулентности, создаваемой пучком мощных КВ-радиоволн / В.Л. Фролов, Е.Н. Сергеев, П. Штуббе // Изв. вузов. Радиофизика. 2002. Т. 45, № 2. С. 121–143.

## **ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ПОККЕЛЬСА НА СПЕКТР СПОНТАННОГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА**

*Д.О. Акатьев, А.А. Калачев*

Казанский физико-технический институт ФИЦ КазНЦ  
akatevdmirij@gmail.com

Однофотонные состояния, полученные на основе спонтанного параметрического рассеяния (СПР) света, широко используются в современной квантовой оптике для проведения экспериментов по различным направлениям, таким как реализация оптических квантовых компьютеров, в устройствах квантовой криптографии и квантовой метрологии [1]. В устройствах квантовой памяти однофотонные состояния должны взаимодействовать с резонансными системами атомов, линия поглощения которых составляет порядка нескольких десятков мегагерц. Если спектр СПР сужается до нескольких десятков мегагерц, то существенными становятся влияния на генерацию однофотонных состояний внешних условий: температурные колебания, стабильность лазера накачки и т.п. В связи с этим становится актуальным вопрос о методах стабилизации однофотонных источников на основе СПР.

В данной работе разрабатывается метод управления спектром спонтанного параметрического рассеяния света с помощью внешнего однородного электрического поля, действующего на нелинейный кристалл.

Спонтанное параметрическое рассеяние света представляется как процесс уничтожения фотона накачки в квадратично нелинейной среде и рождения двух фотонов: сигнального и холостого. Вектор состояния параметрического рассеяния:

$$|\Psi\rangle = |0\rangle + \iint d\omega_s d\omega_i F(\omega_s, \omega_i) |\omega_s\rangle |\omega_i\rangle, \quad (1)$$

где  $F(\omega_s, \omega_i)$  – спектральная амплитуда бифотона. В случае коллинеарного режима генерации амплитуда бифотона

$$F(\omega_s, \omega_i) = |A|^2 \cdot \text{sinc}(\Delta kL / 2), \quad (2)$$

где  $|A|^2$  – коэффициент взаимодействий,  $\Delta k = k_p - k_i - k_s - 2\pi/\Lambda$  – расстройка волновых векторов,  $\Lambda$  – период модуляции нелинейности,  $k_m = \omega_m n(\omega_m)/c$  – волновой вектор. В случае, когда мы прикладываем однородное электрическое поле к нелинейной среде, получаем [2]

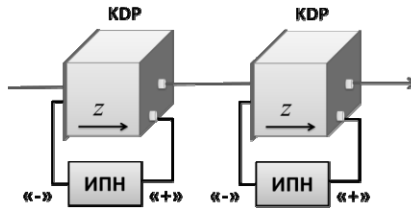
$$k_m = \omega_m n(\omega_m, \vec{E}) / c. \tag{3}$$

В работе [2] нами было показано, на примере кристалла титанил-фосфата калия, что возможно производить перестройку длин волн без влияния на поляризацию состояния, если прикладывать электрическое поле вдоль оси Z.

Рассмотрим кристалл KDP (дигидроортофосфат калия). Для кристалла дигидроортофосфата калия ненулевые  $r_{41} = r_{52}$  и  $r_{63}$ . Если приложить электрическое поле вдоль оптической оси, то происходит следующая модификация эллипсоида показателей преломления:

$$(x/n_o)^2 + (y/n_o)^2 + (z/n_e)^2 + 2r_{63}E_z xy = 1. \tag{4}$$

Кристалл KDP становится слабодвуостным, и происходит поворот принципиальных осей эллипсоида показателя преломления относительно оси Z на  $45^\circ$ . Если бы в кристалле существовал коллинеарный режим генерации (например, 0-типа синхронизма), а поляризация сигнального и холостого фотона была направлена вдоль оси X или Y, интенсивность СПР света упала бы в 2 раза, произошел бы сдвиг по частоте генерации и поворот поляризации бифотонного поля.



**Рис. 1.** Схема генерации перепутанных состояний на основе эффекта Погкельса: Z – оптическая ось кристалла, ИПН – источник постоянного напряжения, «+» и «-» – заряд электродов

Прикладывая электрическое поле в первом и во втором кристаллах сонаправленно и противоположно оптической оси соответственно, возможно добиться генерации поляризационно перепутанных пар фотонов в схеме, приведенной в работе [3].

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (№ 11263ГУ/2017).

### Литература

1. *Takeuchi, S.* Recent progress in single-photon and entangled-photon generation and applications / S. Takeuchi // Japanese Journal of App. Phys. 2014. V. 53, Iss. 3. P. 030101.

2. *Акатьев, Д.О.* Частотная стабилизация однофотонного источника на основе спонтанного параметрического рассеяния света с помощью внешнего электрического поля / Д.О. Акатьев, А.А. Калачев // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40, № 1. С. 26–30.

3. *Steinlechner, F.* A high-brightness source of polarization-entangled photons optimized for applications in free space / F. Steinlechner, P. Trojek, M. Jofre, H. Weier, D. Perez, T. Jennewein, H. Weinfurter // Optics Express. 2012. V. 20, Iss. 9. P. 9640–9649.

## УПРАВЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫМИ ЛОКАЛИЗОВАННЫМИ ВОЛНАМИ В МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

*И.Д. Антонов, А.В. Порубов*

Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург  
antoidco@gmail.com

Исследования в области нелинейных динамических процессов в сложных механических системах привлекают серьезное внимание. Одно из перспективных направлений связано с континуальными пределами исходных дискретных моделей, т.е. с исследованиями решений нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. Такие уравнения могут обладать решениями в виде уединенных волн деформации с постоянной формой и скоростью, однако существование последних обусловлено различными ограничениями как на вид уравнения, так и на начальные и граничные условия. Сами по себе решения интересны с точки зрения исследования переноса энергии деформации и исследования переноса информации о свойствах среды, в которой волны распространяются.

В последнее время обнаружена возможность добиваться распространения волн постоянной формы, описываемых аналитическими решениями, за счет методов управления с обратной связью. Реализация алгоритма управления с обратной связью особенно эффективна при помощи метода скоростного градиента. Предыдущие исследования [1, 2] показали возможность реализации алгоритма управления с обратной связью методом скоростного градиента для управления формой и скоростью нелинейной волны уравнения синус-Гордона, а также подобных алгоритмов для других уравнений, встречающихся при моделировании динамики сложных решеток. Управление позволяет обеспечивать распространение достаточно произвольной волны с постоянной формой и скоростью.

Однако рассмотренные уравнения и применяемые алгоритмы не привязаны к какой-либо конкретной механической задаче [3]. В докладе предлагается к рассмотрению сильно нелинейный упругий изотропный слой, нижняя граница которого контактирует с морозным грунтом, а на верхнюю

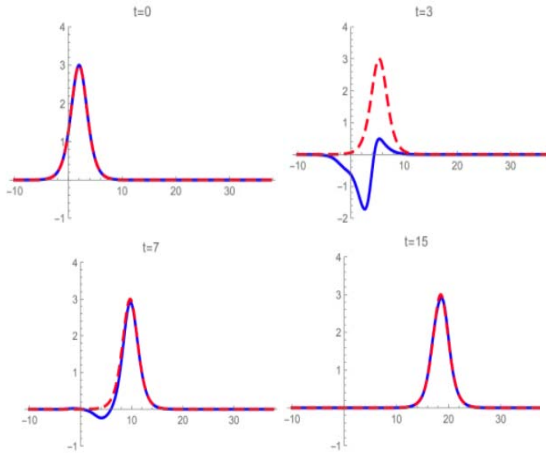
границу действуют нормальные и касательные напряжения. Уравнения движения, описывающие данный слой, асимптотически редуцируются к безразмерному модельному одномерному уравнению синус-Гордона, в котором нормальная нагрузка играет роль управления:

$$W_{tt} - W_{xx} + \sin W = f_N - (a_1 W + a_2 W_t).$$

Здесь  $W(x, t)$  – смещения,  $f_N$  – нормальная нагрузка,  $a_1$  и  $a_2$  – параметры системы. Предлагается метод, согласно которому в системе реализуется механизм распределенного управления в случае, если  $f_N$  принимает следующий вид:

$$f_N = (a_1 W^* + a_2 W^*_t).$$

Здесь  $W^*(x, t)$  означает цель управления, или целевую функцию. В качестве целевых функций выбираются локализованные волны разных типов для апробации модели управления. Расчеты производятся в программном пакете Wolfram Mathematica. В качестве примера приведены результаты расчетов, иллюстрирующих восстановление формы солитона средствами управления:



Пунктирной линией обозначена целевая функция в разные моменты времени, сплошной – результаты расчета. Управление включается в момент времени  $t = 5$ . Видно, как форма солитона восстанавливается при  $t = 7$  и  $t = 15$ . Эти и другие основные результаты исследований будут подробно продемонстрированы в докладе.

Работа поддержана грантом РНФ № 14-29-00142.

### Литература

1. Fradkov A.L., Andrievskiy B.R., Porubov, A.V., Antonov I.D. Control of localized non-linear strain waves in complex crystalline lattices // International Journal of Non-Linear Mechanics. 2016. Vol. 86. P. 174–184.

2. *Porubov, A.V., Antonov I.D.* Control of coupled localized nonlinear wave solutions // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 788, № 1, Art. 012029.

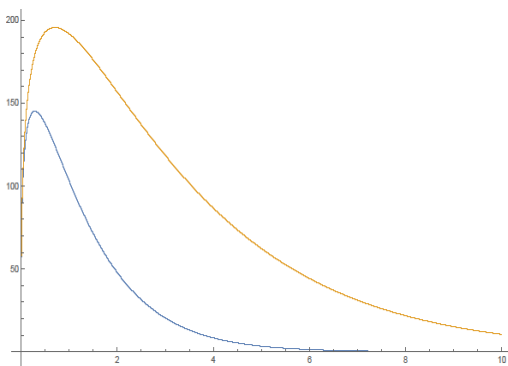
3. *Порубов, А.В., Антонов И.Д., Индейцев Д.А., Фрадков Д.А.* Mechanical system allowing distributive control with feedback // Mechanics Research Communications. 2017. [in press].

## СИНХРОТРОН-ЧЕРЕНКОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В ВАКУУМЕ

*И.И. Артеменко, Е.Н. Неруш, И.Ю. Костюков*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
vanek-4991@mail.ru

Излучение Вавилова – Черенкова хорошо исследованный эффект, который можно наблюдать в среде. Хорошо известно, что электрон в вакууме не излучает при движении с постоянной по величине и направлению скоростью. Однако всё может измениться в сильном поле, поскольку в этом случае у вакуума также появляется показатель преломления [1].



**Рис. 1.** Сравнение спектров синхротронного излучения в вакууме (нижняя кривая) и при наличии отличного от единицы показателя преломления (верхняя кривая)

В данной работе вычисляется мощность синхротрон-черенковского излучения в поляризованном вакууме и обсуждается возможность экспериментальной регистрации данного эффекта.

### Литература

1. *Narozhny N.B.* // Zh. Eksp. Teor. Fiz. 1968. Vol. 55. P. 714–721.

## УПРАВЛЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЕМ СВЯЗЕЙ В НЕЙРОННОЙ СЕТИ С STDP-ПЛАСТИЧНОСТЬЮ

*М.В. Бажанова<sup>1</sup>, С.А. Лобов<sup>1</sup>, К.И. Балашова<sup>1</sup>, В.А. Макаров<sup>1,2</sup>,  
В.Б. Казанцев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

<sup>2</sup>Universidad Complutense de Madrid  
arksinus-bmw@yandex.ru

Функционирование мозга достаточно долго оставалось для человека загадкой, и даже в наше время еще не все механизмы являются до конца изученными. Сейчас нейронные сети представляют особый интерес для исследователей. Построенные по принципу и организации настоящих нейронных сетей, модельные сети могут быть использованы в различных областях, например при обработке различных сигналов, для классификации признаков [1], в управлении механизированными устройствами и роботами [2–4], для построения систем управления [5]. В то же время проблема, связанная с контролем сетевой активности, возникающей под действием электрической стимуляции от различного числа электродов, до сих пор остается в значительной мере нерешенной. В данной работе мы исследуем изменения характера связей в нейронных сетях, возникающие под действием внешней стимуляции, и возможность направленного формирования связей.

По правилу STDP-пластичности стимуляция постсинаптического нейрона после пресинаптического приводит к усилению связи [6, 7]. Таким образом, стимулируя отдельные нейроны в нужной последовательности, можно добиться распространения импульсов в заданном направлении. Однако при обучении в масштабе нейронных сетей протокол STDP работает неоднозначно и требует дополнительного рассмотрения. Для преодоления этого ограничения мы предлагаем использовать структурированную нейронную сеть и показываем, что она хорошо поддается обучению и позволяет получить активность, циркулирующую в сети после отключения стимуляции.

Чтобы изучить возможность управления активностью и, соответственно, обучением в полномасштабной сети, была исследована связь между относительным положением электродов стимуляции и характерными направлениями сформированных связей под действием STDP-пластичности. Известно, что при воздействии единичного электрода веса связей изменяются таким образом, что векторное поле весов становится направленным радиально от стимулятора, в связи с чем можно наблюдать волну возбуждения, исходящую от него [8]. Было выяснено, что при подключении двух работающих синхронно электродов на достаточно большом расстоянии друг от друга для связей, находящихся между ними, вектора весов формируются случайным образом. Предположительно, это связано с тем, что влияние конкретного стимулятора постепенно ослабляется с увеличением расстоя-

ния в результате воздействия внешних шумов, из-за случайности в расположении связей, а также благодаря действию тормозных нейронов. Данные условия в совокупности приводят к неуправляемому перераспределению весов сначала вдали от стимуляторов, после чего усиленные случайные связи постепенно начинают управлять динамикой вблизи электродов. Этот фактор стоит учитывать при обучении сетей, когда в результате требуется получить определенную реакцию на стимул. Уменьшение расстояния между электродами позволяет избавиться от «зоны неопределенности» и приводит к ситуации, когда возникает четкое разграничение областей влияния двух стимуляторов. Стоит отметить, что в отличие от синхронной стимуляции введение задержки между электродами ведет к разрушению этого равновесия и неоднозначному направлению распространения активности. Поведение сети зависит также от количества электродов. Если на связи будет действовать уже суперпозиция нескольких сигналов, то в присутствии шума топология связей в результате может приобретать сложный характер.

Однако структуризация позволяет достичь хороших результатов при обучении, так как, во-первых, исключает помехи со стороны остальных электродов, во-вторых, уменьшает количество связей, по которым распространяются шумовые сигналы, в-третьих, учитывает область влияния электродов стимуляции.

Работа поддержана грантом РНФ № 15-12-10018.

### Литература

1. *Saravan, K.* Review on classification based on artificial neural networks / K. Saravan, S. Sasithra // *International Journal of Ambient Systems and Applications (IJASA)*. 2014. V. 2, № 4.
2. *Lobov, S.A.* A spiking neural network in sEMG feature extraction / S.A. Lobov, V.I. Mironov, I.A. Kastalskiy, V.B. Kazantsev // *Sensors*. 2015. V. 15, № 11. P. 27894–27904.
3. *Lobov, S.* Spiking Neurons as Universal Building Blocks for Hybrid Systems / S. Lobov, V. Kazantsev, V. A. Makarov // *Adv. Sci. Lett.* 2016. V. 22. P. 2633–2637.
4. *Villacorta-Atienza, J.A.* Limb Movement in Dynamic Situations Based on Generalized Cognitive Maps / J.A. Villacorta-Atienza, C. Calvo, S.A. Lobov, V.A. Makarov // *Math. Model. Nat. Phenom.* 2017. V. 12, № 4. P. 15–29.
5. *Tamer, A.* Adaptive control for MIMO nonlinear systems based on PID neural networks / A. Tamer, Al Zohairy, S. Salem Khaled // *International Journal of Engineering and Computer Science*. 2016. V. 5, № 8. P. 17673–176780.
6. *Abbott, L.F.* Competitive Hebbian learning through spike-timing-dependent synaptic plasticity / L.F. Abbott, Song Sen, K.D. Miller // *Nature Neuroscience*. 2000. V. 3, № 9. P. 919–926.
7. *Stuart, G.J.* Dendritic coincidence detection of EPSPs and action potentials / G.J. Stuart, M. Häusser // *Nature Neuroscience*. 2001. V. 4, № 1. P. 63–71.
8. *Lobov, S.* A spiking neural network in sEMG feature extraction. / S. Lobov, K. Balashova, V. Makarov, V. Kazantsev // *Neurotechnix*. 2017. P. 15–21.

# ТОКОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННОЙ ПЛАЗМЫ В СВЕРХСИЛЬНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ПОЛЯХ: ДИНАМИКА УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

*А.В. Башинов, Е.С. Ефименко, А.В. Ким*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
abvk@inbox.ru

Развитие лазерных комплексов позволит в скором времени преодолеть рубеж мощности излучения в 10 ПВт. Такое сверхмощное излучение позволит достичь ультрарелятивистских интенсивностей полей, в которых частицы будут испытывать сильные радиационные потери и излучать фотоны с энергиями много большими энергии покоя электрона. При оптимальной фокусировке поля достаточно мощности излучения 7–8 ПВт [1, 2], чтобы фотоны могли быстро распадаться на электрон-позитронные пары, которые впоследствии снова могли бы генерировать высокоэнергичные фотоны. Совокупность цепных процессов излучения фотонов и их распада называется электродинамическим каскадом. Если темп рождения новых частиц будет выше, чем темп их ухода из области сильного поля, то произойдет «пробой», в результате которого плотность плазмы начнет экспоненциально быстро возрастать. Таким образом, в лазерном поле электродинамический каскад может являться источником плотной электрон-позитронной плазмы, которая, в свою очередь, может оказывать существенное влияние на распространение лазерных импульсов в среде [3, 4].

Взаимодействие лазерного излучения с электрон-позитронной плазмой обладает рядом отличительных свойств, обусловленных равенством масс противоположно заряженных частиц. Например, электрон-позитронная плазма характеризуется отсутствием эффекта Фарадея [5], усилением стимулированного бриллюэновского и подавлением рамановского рассеяний [6]. Среди этих характерных особенностей и новый вид токовой неустойчивости, инициируемой релятивистски сильными лазерными полями. Она приводит к неустойчивости плазмы, изначально однородно распределенной вдоль магнитного поля стоячей волны. Электроны и позитроны, ускоряясь под действием электрического поля в противоположных направлениях в лазерном поле, создают ток, возмущения которого вызывают генерацию магнитного поля, ортогонального магнитному полю волны. Генерируемое магнитное поле усиливает модуляцию тока, вследствие чего возрастает плотность тока и само магнитное поле. В результате развития неустойчивости образуются токовые слои. Изначально они возникают в большом количестве, однако затем притягиваются и сливаются за счет взаимодействия одинаково направленных токов. В итоге может быть сформирована квазиплоская плазменная структура, состоящая из одного-двух токовых слоев, лежащих в одной плоскости. Проведенное численное моделирование показало, что эта неустойчивость развивается в различных конфигурациях по-

лей (встречные лазерные импульсы, дипольная и цилиндрическая волны). Гидродинамический подход к анализу данной неустойчивости позволил оценить темп ее развития, и эта оценка согласуется с результатами численного моделирования. Также показано, что в релятивистски плотной плазме время развития неустойчивости может быть меньше периода поля.

Стоит отметить, что данная неустойчивость может существенно изменить угловое распределение излучения плазмы. Например, в результате развития каскада в дипольной волне изначально формируется аксиально-симметричное распределение плазмы, причем траектория каждой частицы лежит в плоскости, проходящей через ось симметрии. Для отдельной частицы угловой разброс излучения составляет около 100 мрад относительно оси. При этом ввиду аксиальной симметрии ширина углового распределения излучения, генерируемого плазмой, определяется обратным гамма-фактором частиц и составляет примерно 1 мрад [7]. В результате развития неустойчивости аксиальная симметрия нарушается, распределение плазмы становится плоским и ширина диаграммы направленности возрастает до 100 мрад. Такая взаимосвязь между распределением плазмы и излучения может предоставить способ определения структуры и динамики плазмы в будущих экспериментах на мультитераваттных лазерных установках.

Работа выполнена при поддержке фонда РФФИ (грант № 16-12-10486).

### Литература

1. *Gelfer, E.G.* Optimized multibeam configuration for observation of QED cascades / E.G. Gelfer, A.A. Mironov, A.M. Fedotov, V.F. Bashmakov, E.N. Nerush, I.Yu. Kostyukov, N.B. Narozhny // *Phys. Rev. A.* 2015. V. 92, № 2. P. 022113-1 – 022113-5.
2. *Gonoskov, A.* Ultrabright GeV Photon Source via Controlled Electromagnetic Cascades in Laser-Dipole Waves / A. Gonoskov, A. Bashinov, S. Bastrakov, E. Efimenko, A. Ilderton, A. Kim, M. Marklund, I. Meyerov, A. Muraviev, A. Sergeev // *Phys. Rev. X.* 2017. V. 7, № 4. P. 041003-1 – 041003-8.
3. *Fedotov, A.M.* Limitations on the Attainable Intensity of High Power Lasers / A.M. Fedotov, N.B. Narozhny, G. Mourou, G. Korn // *Phys. Rev. Lett.* 2010. V. 105, № 8. P. 080402-1 – 080402-4.
4. *Bulanov, S.S.* Schwinger Limit Attainability with Extreme Power Lasers / S.S. Bulanov, T.Zh. Esirkepov, A.G.R. Thomas, J.K. Koga, S.V. Bulanov // *Phys. Rev. Lett.* 2010. V. 105, № 22. P. 220407-1 – 220407-4.
5. *Tsyтович, V.* Laboratory electron-positron plasma – a new research object / V. Tsyтович, C.B. Wharton // *Comments Plasma Phys. Controlled Fusion.* 1978. V. 10, № 18. P. 91–100.
6. *Edwards, M.R.* Strongly Enhanced Stimulated Brillouin Backscattering in an Electron-Positron Plasma / M.R. Edwards, N.J. Fisch, J.M. Mikhailova // *Phys. Rev. Lett.* 2016. V. 116, № 1. P. 015004-1 – 015004-5.
7. *Bashinov, A.V.* Towards attosecond-scale highly directed GeV gamma-ray sources with multipetawatt-class lasers / A.V. Bashinov, E.S. Efimenko, A.A. Gonoskov, A.V. Korzhimanov, A.A. Muraviev, A.V. Kim, A.M. Sergeev // *J. Opt.* 2017. V. 19, № 11. P. 114012-1 – 114012-9.

## ПРИМЕНЕНИЕ БАЗОВЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ВАЛИДАЦИИ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

*М.В. Беликович, М.Ю. Куликов, А.А. Нечаев, Т.С. Ермакова, А.М. Фейгин*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
belikovich@ipfran.ru

В докладе представлен метод статистической фильтрации одновременных спутниковых измерений нескольких химических компонент атмосферы, а также некоторые математические особенности его применения на примере обработки базы данных одновременных спутниковых измерений дневных распределений  $\text{OH}$ ,  $\text{HO}_2$  и  $\text{O}_3$  на высотах мезосферы (в диапазоне 50–80 км), полученных прибором MLS на спутнике Aura.

Данный метод [1] является упрощенным вариантом статистического подхода, развиваемого в работе [2]. Он основан на том, что локальная эволюция конкретных химических компонент ( $\text{OH}$ ,  $\text{HO}_2$  и  $\text{O}_3$ ) в дневной мезосфере может быть описана простыми алгебраическими соотношениями, получаемыми в результате описания эволюции мезосферной фотохимической системы с помощью базовой динамической модели [3]. Посредством анализа и упрощения данных соотношений выведено алгебраическое уравнение, связывающее измеряемые компоненты между собой и зависящее только от констант фотохимических реакций, концентрации и температуры воздуха. Необходимо отметить, что метод построения базовых динамических моделей не позволяет четко определять количественные границы применимости и соответствующую точность полученной упрощенной модели. По этой причине был проведен расчет годового цикла эволюции мезосферной фотохимии с помощью трехмерной химико-транспортной модели мезосферы и нижней термосферы, разработанной в Leibniz-Institute of Atmospheric Physics at the University Rostock, Kühlungsborn, Германия. Данная модель хорошо известна и многократно верифицировалась в ряде работ [4]. Проведенное моделирование показало, что дневные значения  $\text{OH}$ ,  $\text{HO}_2$  и  $\text{O}_3$  хорошо соответствуют алгебраическому соотношению в диапазоне высот от 50 до 100 км с отклонением не более 3–4 % в зависимости от сезона и географического положения.

В разработанном методе принимается во внимание, что спутниковые измерения содержат случайную погрешность, которая предполагается гауссовой, то есть результат каждого однократного измерения  $\text{OH}$ ,  $\text{HO}_2$  и  $\text{O}_3$  на некой высоте подчиняется трехмерному нормальному распределению, а возможные истинные значения измеряемых компонент находятся с точки зрения теории вероятностей. Метод заключается в следующем: 1) построение на каждой высоте совместной вероятности значений концентраций  $\text{OH}$ ,  $\text{HO}_2$  и  $\text{O}_3$  при условии конкретных данных измерений этих компонент и справедливости полученного алгебраического соотношения;

2) вычисление первых моментов этого распределения (прежде всего, математического ожидания и дисперсии для каждой компоненты); 3) усреднение моментов по времени и пространству и сравнение полученных распределений с исходными экспериментальными данными. Отметим, что алгебраическое соотношение считается априорным ограничением, поэтому результирующее распределение  $\text{OH}$ ,  $\text{HO}_2$  и  $\text{O}_3$ , в отличие от исходных данных измерений, является негауссовым.

В докладе представлены результаты обработки одного года данных MLS Aura в сравнении с исходными данными. Показано, что одновременно измеренные профили  $\text{OH}$ ,  $\text{HO}_2$  и  $\text{O}_3$  в среднем плохо соответствуют алгебраическому соотношению вследствие ошибок измерений  $\text{HO}_2$ . В частности, распределения  $\text{HO}_2$  существенно и регулярно занижают положение мезосферного минимума и максимума данной компоненты. Данные выводы подтверждаются результатами реанализа (offline retrieval) первичных данных MLS [5], в котором восстановление профилей  $\text{HO}_2$  производилось не по однократным измерениям спектров собственного излучения молекулами  $\text{HO}_2$  в миллиметровом диапазоне длин волн, а по результатам их (спектров) усреднения по времени и зональной координате в некоторых диапазонах.

В докладе также описаны математические особенности введения априорного ограничения, следующего из алгебраического соотношения, обусловленные известным парадоксом Бореля – Колмогорова.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (соглашение № 15-17-10024).

### Литература

1. *Kulikov M.* Technical Note: Evaluation of simultaneous measurements of mesospheric  $\text{OH}$ ,  $\text{HO}_2$ , and  $\text{O}_3$  under photochemical equilibrium assumption: Statistical approach / M.Yu. Kulikov, A.A. Nechaev, M.V. Belikovich, T.S. Ermakova, A.M. Feigin // Atmospheric Chemistry and Physics Discussion in review. 2017.

2. *Нечаев А.А.* Определение концентраций малых газовых составляющих на высотах нижней и средней мезосферы по временным рядам концентрации озона / А.А. Нечаев, Т.С. Ермакова, М.Ю. Куликов // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 7. С. 605–619.

3. *Feigin A.M.* Toward an understanding of the nonlinear nature of atmospheric photochemistry Essential dynamic model of the mesospheric photochemical system / A.M. Feigin, I.B. Kononov, Y.I. Molkov // J. Geophysical Research. 1998. V. 103, № D19. P. 25447–25460.

4. *Sonnemann G.R.* On the winter anomaly of the night-to-day ratio of ozone in the middle to upper mesosphere in middle to high latitudes / G.R. Sonnemann, P. Hartogh, C. Jarchow, M. Grygalashvyly, U. Berger // Advances in Space Research. 2007. V. 40. P. 846–854.

5. *Millán L.* Stratospheric and mesospheric  $\text{HO}_2$  observations from the Aura Microwave Limb Sounder / L. Millán, S. Wang, N. Livesey, D. Kinnison, H. Sagawa, Y. Kasai // Atmospheric Chemistry and Physics. 2015. V. 15. P. 2889–2902.

# **УСИЛЕНИЕ АЛЬФВЕНОВСКИХ ВОЛН В РЕЗУЛЬТАТЕ НЕЛИНЕЙНОГО ОРТОГОНАЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С БЫСТРОЙ МАГНИТОАКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНОЙ В ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ ПРОВОДЯЩЕЙ СРЕДЕ**

*С.А. Белов, Н.Е. Молевич, Д.И. Завершинский*

Самарский национальный исследовательский университет  
Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН  
mr\_beloff@mail.ru

Альфвеновские волны с энергией достаточной для разогрева спокойной солнечной короны и ускорения солнечного ветра были зафиксированы сравнительно недавно [1]. Природа возникновения подобных альфвеновских волн в нижних слоях атмосферы до сих пор не выяснена полностью. Одним из возможных механизмов возникновения альфвеновских волн с большой амплитудой является параметрическая перекачка энергии от сильных магнитоакустических волн слабым альфвеновским волнам. Пример такого взаимодействия был рассмотрен в работах [2, 3], где показано, что в изэнтропически неустойчивой тепловыделяющей плазме в областях с доминирующим газодинамическим давлением возможно эффективное усиление альфвеновских волн в результате параметрического распада магнито-акустических волн, распространяющихся вдоль магнитного поля. Другим примером подобного параметрического взаимодействия является взаимодействие между быстрыми магнитоакустическими волнами, ортогонально направленными к направлению магнитного поля, и альфвеновской волной, распространяющейся вдоль магнитного поля [4, 5]. Механизм данного взаимодействия, названного в [4] свинг-волновым взаимодействием (swing wave-wave interaction), заключается в том, что магнитоакустическая волна влияет на компоненту магнитного поля, вдоль которой распространяется альфвеновская волна, тем самым периодически воздействуя на скорость распространения альфвеновской волны.

В настоящей работе рассмотрено влияние тепловыделения и конечной электрической проводимости на развитие свинг-волнового взаимодействия. В слабо нелинейном приближении было получено уравнение, описывающее ортогональное взаимодействие альфвеновской волны с быстрой магнито-акустической волной, которое в отсутствие тепловыделения и проводимости является уравнением Матьё. Таким образом, при отсутствии тепловыделения и проводимости происходит экспоненциальный рост амплитуды альфвеновской волны в результате взаимодействия с быстрой волной. Учет конечной проводимости приводит к пороговому условию возникновения параметрического усиления альфвеновских волн и ограничению на время существования режима усиления.

Учет тепловыделения в среде приводит либо к дополнительному затуханию быстрых МА-волн и уменьшению времени существования парамет-

рического усиления, либо в условиях изоэнтропической неустойчивости, наоборот, к их беспороговому усилению, сопровождающемуся биекспоненциальным ростом амплитуды альфвеновской волны из-за параметрического взаимодействия с неустойчивой быстрой магнитоакустической волной. Ограничением этого роста будет не учитываемая в настоящем слабо-нелинейном рассмотрении потеря энергии МА-волны в результате параметрической перекачки энергии в альфвеновскую волну. Подобные результаты для коллинеарной геометрии взаимодействия магнитогазодинамических волн были получены ранее в [3, 4].

Работа частично поддержана Минобрнауки РФ в рамках Программы повышения конкурентоспособности СГАУ на 2013–2020 гг. и государственного задания вузам и научным организациям в сфере научной деятельности (проект № 3.1158.2017/ПЧ) и грантом РФФИ 17-42-630224 p\_a.

### Литература

1. *McIntosh, S.W.* Alfvénic waves with sufficient energy to power the quiet solar corona and fast solar wind / S.W. McIntosh, B. de Pontieu, M. Carlsson, V. Hansteen, P. Boerner, M. Goossens // *Nature*. 2011. V. 475, Iss. 7359. P. 477–480.

2. *Zavershinsky, D.I.* Alfvén wave amplification as a result of nonlinear interaction with a magnetoacoustic wave in an acoustically active conducting medium / D.I. Zavershinsky, N.E. Molevich // *Tech. Phys. Lett.* 2014. V. 40. P. 701.

3. *Zavershinsky, D.I.* Parametrical amplification of Alfvén waves in heat-releasing ionized media with magnetoacoustic instability / D.I. Zavershinsky, N.E. Molevich // *Astrophysics and Space Science*. 2015. V. 358, Iss.1.

4. *Zaqarashvili, T.V.* Swing wave-wave interaction: coupling between fast magnetosonic and Alfvén waves / T.V. Zaqarashvili, B. Roberts // *Physical Review E*. 2002. V. 66. Art. 026401.

5. *Shergelashvili, B.M.* “Swing absorption” of fast magnetosonic waves in inhomogeneous media / B.M. Shergelashvili, T.V. Zaqarashvili, S. Poedtsl, B. Roberts // *A&A*. 2005. V. 429. P. 767–777.

## БРИЗЕРНЫЕ ХИМЕРЫ В СИСТЕМЕ ФАЗОВЫХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ

*М.И. Болотов<sup>1</sup>, Л.А. Смирнов<sup>2,1</sup>, Г.В. Осипов<sup>1</sup>, А.С. Пиковский<sup>3,1</sup>*

<sup>1</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

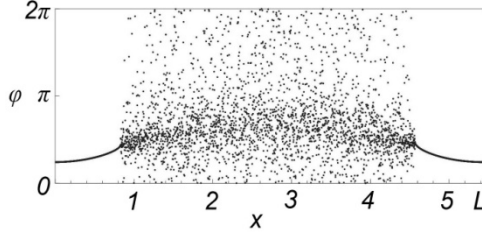
<sup>2</sup> Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

<sup>3</sup> Потсдамский университет, Потсдам, Германия

maksim.bolotov@itmm.unn.ru

На сегодняшний день одним из привлекательных и интригующих эффектов является образование в ансамблях идентичных элементов химерных состояний, которые характеризуются сосуществованием синхронных и

асинхронных групп осцилляторов (см. рис. 1). Возможность формирования таких долгоживущих нетривиальных состояний впервые была обнаружена в Я. Курамото и Д. Баттогтоком [1]. Химерные режимы были найдены численно в большом наборе пространственно распределенных моделей. Кроме того, наличие данных режимов подтверждено экспериментально [2].



**Рис. 1.** Фазы осцилляторов  $\varphi(x, t)$ , соответствующие химерному режиму

В представленной работе рассматривается система из большого числа  $N$  нелокально связанных идентичных фазовых осцилляторов, обладающих собственной частотой  $\omega$  и равномерно распределенных в интервале  $[0, L]$ , на концах которого выполнены периодические граничные условия. Такая конфигурация эквивалентна ситуации, когда элементы одномерной осцилляторной среды расположены на кольце длиной  $L$ . Данную систему будем описывать с помощью динамических переменных  $\varphi(x_n, t)$ , заданных в точках  $x_n \in [0, L]$  и подчиняющихся уравнениям первого порядка [3]

$$\frac{d\varphi_n}{dt} = \omega + \text{Im} \left[ \exp(-i\varphi(x_n, t) - i\alpha(H(x_n, t))) H(x_n, t) \right], \quad (1)$$

где  $H(x_n, t)$  – действующее на осцилляторы макроскопическое поле:

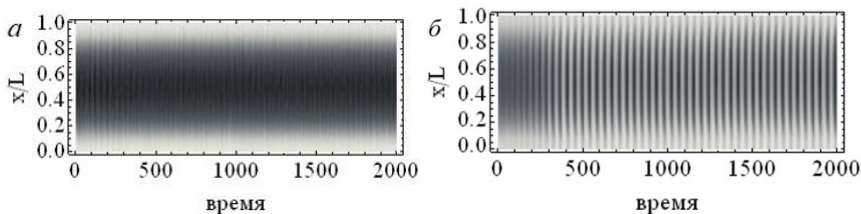
$$H(x_n, t) \sum_m G(x_n - \tilde{x}_m) \exp(i\varphi(\tilde{x}_m, t)), \quad (2)$$

определяется через оператор дискретной свертки. Его ядро  $G(x)$  характеризует взаимодействие внутри среды. В качестве  $G(x)$  выберем функцию

$$G(x) = \frac{1}{2\text{sh}(L/2)} \text{ch}(|x| - L/2), \quad (3)$$

которая достаточно адекватно описывает эффекты слабой нелокальности и может быть использована как модельная [3]. Величина  $\alpha(|H|) = \alpha_0 + \alpha_1 |H|^2$  в (1) определяет нелинейный фазовый сдвиг действующей на осцилляторы силы [4].

Основной целью проведенных исследований является изучение возможных состояний рассматриваемой одномерной осцилляторной среды в зависимости от ее длины  $L$ . При анализе этой системы использованы переход к континуальному пределу, основанный на возможности введения плотности функции распределения фазы  $\varphi(x, t)$  в каждой точке  $x$  интервала  $[0, L]$



**Рис. 2.** Поле  $H(x, t)$ , соответствующее режимам стационарной химеры (а) и бризерной химеры (б)

при  $N \rightarrow \infty$ , и редукция Отта – Антонсена [3–5]. С помощью данного подхода и методов, развитых нами в работе [3], построены «стационарные» химеры и рассмотрена их линейная устойчивость, а затем на основе численного моделирования в рамках исходной модели показано, что такие структуры при определенном выборе параметров могут трансформироваться в периодически изменяющиеся во времени долгоживущие химерные состояния (см. рис. 2, б) или переходить в более сложные режимы с нерегулярным поведением макроскопических полей [6].

Обнаруженный эффект возникновения бризерных химер при изменении параметров нелокального взаимодействия в ансамбле идентичных элементов является новым и ранее не наблюдался. По своей сути данный эффект представляет собой бифуркацию Андронова – Хопфа [6].

Работа выполнена при поддержке РФФ, проект № 17-12-01534.

### Литература

1. Kuramoto Y., Battogtokh D. Coexistence of Coherence and Incoherence in Nonlocally Coupled Phase Oscillators // Nonlinear Phenom. Complex Syst. 2002. V. 5. P. 380.
2. Panaggio M.J., Abrams D.M. Chimera states: coexistence of coherence and incoherence in networks of coupled oscillators // Nonlinearity. 2015. V. 28. P. R67.
3. Smirnov L.A., Osipov G.V., Pikovsky A. Chimera patterns in the Kuramoto-Battogtokh model // J. Phys. A: Math. Theor. 2017. V. 50. P. 08LT01.
4. Bordyugov G., Pikovsky A., Rosenblum M. Self-Emerging and Turbulent Chimeras in Oscillator Chains // Phys. Rev. E. 2010. V. 82. P. 035205.
5. Ott E., Antonsen T.M. Low dimensional behavior of large systems of globally coupled oscillators // Chaos. 2008. V. 18. P. 037113.
6. Bolotov M.I., Smirnov L.A., Osipov G.V., Pikovsky A. Breather chimeras in the system of phase oscillators // JETP Lett. 2017. V. 106, Iss. 6.

## НЕЙРОНОПОДОБНЫЙ ГЕНЕРАТОР С ИМПУЛЬСНОЙ И ПАЧЕЧНОЙ ДИНАМИКОЙ

*Д.И. Большаков, М.А. Мищенко, В.В. Матросов*

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
denis.bolhakov@gmail.com

Задача аппаратной реализации нейронов и их сетей возникла в конце XX века. Было разработано множество различных схмотехнических реализаций нейронов, отличающихся по степени детализации и биологической правдоподобности, по количеству воспроизводимых динамических режимов.

В данной работе рассматривается модель нейроноподобного элемента на основе системы фазовой синхронизации с полосовым фильтром. Ранее в работе [1] было проведено теоретическое исследование такой модели и показано, что в этой системе при всех значениях параметров реализуется режим биений, при этом сигнал, генерируемый на выходе полосового фильтра, качественно похож на динамику мембранного потенциала нейрона. Кроме того, в работе [2] было получено теоретическое разбиение пространства параметров на области существования различных автоколебательных режимов.

Разработан действующий прототип данной системы [3]. За основу прототипа была взята специализированная микросхема ФАП фирмы Texas Instruments. В состав этой микросхемы входят фазовый компаратор, реализующий функцию «Исключающее ИЛИ» и генератор, управляемый напряжением. Кроме того, был разработан полосой фильтр с возможностью управления его параметрами. На разработанном прототипе были получены автоколебательные режимы, аналогичные известным из теоретического анализа, и получено экспериментальное разбиение пространства параметров на области существования различных динамических режимов. Следует отметить, что полученные данные хорошо согласуются с результатами численного эксперимента.

Кроме автоколебательных режимов нейроноподобных генераторов большое значение имеет процесс возбуждения колебаний в ответ на внешнюю стимуляцию. В работе [4] проведено теоретическое исследование по отклику предлагаемого нейроноподобного генератора в невозбужденном режиме в ответ на периодическую внешнюю импульсную стимуляцию. Показана возможность синхронизации откликов генератора стимулирующим сигналом с различными соотношениями частот в зависимости от амплитуды стимуляции.

Для разработанного прототипа нейроноподобного генератора показана возможность возбуждения колебаний в ответ на внешнюю периодическую стимуляцию импульсными сигналами. Обнаружена синхронизация откликов нейроноподобного генератора со стимулирующей импульсной последо-

вательностью с различными соотношениями частот в зависимости от амплитуды стимуляции.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-31-60080 мол\_а\_дк), а также при поддержке гранта Президента МК-2726.2017.2.

### Литература

1. Мищенко М.А., Шалфеев В.Д., Матросов В.В. // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2012. Т. 20, № 4. С. 122–130.
2. Matrosov V.V., Mishchenko M.A., Shalfeev V.D. // Eur. Phys. J. Spec. Top. 2013. Vol. 222, № 10. P. 2399–2405.
3. Mishchenko M.A., Bolshakov D.I., Matrosov V.V. // Tech. Phys. Lett. 2017. Vol. 43, № 7. P. 596–599.
4. Жукова Н.С., Мищенко М.А. // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика : тез. докл. XII Всерос. конф. молодых ученых. Саратов : Техно-Декор, 2017. С. 63–64.

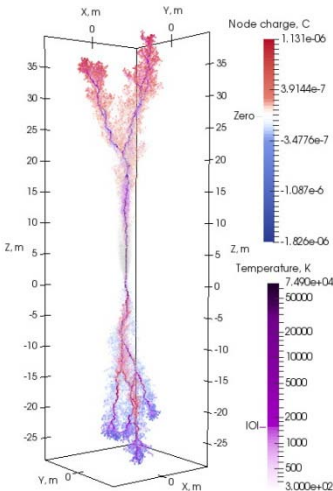
## ТРАНСПОРТНАЯ САМООРГАНИЗУЮЩАЯСЯ МОДЕЛЬ ИНИЦИАЦИИ МОЛНИИ

А.А. Булатов, Д.И. Иудин

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
AlexeyABulatov@yandex.ru

Инициация и развитие молнии – сложный физический процесс, протекающий в широком диапазоне пространственных, временных и энергетических масштабов. Необходимость воспроизведения сложной геометрии исключает аналитическое моделирование процесса и накладывает определенные условия на численные модели.

Созданная численная модель является развитием работы [1]. В основе модели лежит представление проводящих структур разряда в виде динамического графа, вложенного в трехмерное пространство. Вершинам и ребрам графа соответствуют определенные динамические переменные и параметры. Модель описывает как непрерывную эволюцию динамических переменных, так и бифуркации, связанные с возникновением или исчезновением элементов графа. Пример моделирования инициации молнии приведен на рисунке.



Ключевыми особенностями модели являются отсутствие сетки, вероятностное ветвление разряда в непрерывный диапазон углов, учет асимметрии развития положительных и отрицательных стримеров, моделирование развития стримерно-лидерного перехода за счет параметризации перегретой неустойчивости. Разработанная модель может рассматриваться как усовершенствование дискретных моделей, основанных на клеточных автоматах.

#### Литература

1. *Iudin D.I.* Advanced numerical model of lightning development: Application to studying the role of LPCR in determining lightning type / D.I. Iudin, V.A. Rakov, E.A. Mareev, S.S. Davydenko, F.D. Iudin, A.A. Syssoev // *J. Geophys Res.* 2016JD026261R.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ КАРТ КОХОНЕНА ДЛЯ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОГО УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ

*Т.М. Волкова<sup>1</sup>, Е.Н. Неруш<sup>1,2</sup>, И.Ю. Костюков<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

<sup>2</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
tmk93@yandex.ru

Исследована возможность применения нейронных сетей на основе самоорганизующихся карт Кохонена [1] для анализа результатов моделирования лазерно-плазменного взаимодействия. Был программно реализован алгоритм, использующий самоорганизующиеся карты Кохонена. Предложены различные способы подготовки данных перед обработкой в нейронной сети. Разработанная вычислительная программа на основе данного метода была применена для анализа результатов моделирования лазерно-плазменного взаимодействия и для выявления различных режимов взаимодействия. Такой анализ важен для выбора оптимальных параметров при проектировании лазерно-плазменных ускорителей заряженных частиц.

Результаты проведенного исследования позволяют сказать, что применение алгоритма делает удобным анализ полученных результатов численного моделирования различных процессов. Отпадает необходимость вручную просматривать результаты исследований и анализировать огромные многопараметрические массивы полученных данных. Предложенная автоматизация представляет результаты моделирования в наглядном и удобном виде: наглядно отображается соответствие между параметрами лазерно-плазменного взаимодействия и выделенными картой режимами взаимодействия.

#### Литература

1. *Kohonen T.* Self-Organizing Maps. Third Extended Edition. New York, 2001.

# ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ МИ-РЕЗОНАНСНЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ С ОБЪЕМНОЙ КВАДРАТИЧНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ

*И.И. Волковская, Д.А. Смирнова*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
volkovskaya.ira@mail.ru

С использованием аналитических и численных методов в работе изучается резонансно усиленная генерация второй гармоники (ГВГ) диэлектрическими наночастицами из материалов с высоким значением показателя преломления и тензорной объемной квадратичной нелинейностью (AlGaAs и BaTiO<sub>3</sub>). Возбуждение ми-резонансов в таких наночастицах позволяет достичь рекордно высокой эффективности нелинейного преобразования [1].

Мы описываем ГВГ от сферических наночастиц AlGaAs и BaTiO<sub>3</sub>, оптически возбуждаемых линейно поляризованной плоской волной  $\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \hat{\mathbf{x}}_0 e^{i(k_0 z - \omega t)}$  вблизи дипольных резонансов. Частица характеризуется частотно-зависимой диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon(\omega)$  и окружена вакуумом. Задача о линейном рассеянии света на сфере решается с использованием мультипольного разложения в соответствии с теорией Ми. Особое внимание мы уделяем диэлектрическим наночастицам, размеры которых соответствуют резонансному возбуждению ведущей магнитной дипольной моды на фундаментальной длине волны лазера, и анализируем ее влияние на характеристики генерируемого излучения [2].

В сферической системе координат, связанной с осью  $z$ , совпадающей с направлением распространения волны, электрическое поле на основной частоте внутри частицы хорошо аппроксимируется одномодовым магнитодипольным приближением и может быть представлено в виде

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) \approx E_0 A_M(1,1) j_1(k(\omega)r) [\cos \varphi \hat{\boldsymbol{\theta}} - \cos \theta \sin \varphi \hat{\boldsymbol{\phi}}], \quad (1)$$

где  $k(\omega) = k_0 \sqrt{\varepsilon(\omega)}$ ,  $j_1$  – функция Бесселя первого порядка, коэффициент  $A_M(1,1)$  известен из теории Ми [3]. Компоненты вектора нелинейной электрической поляризации связаны с электрическим полем внутри частицы формулой  $P_i^{(2\omega)} = \chi_{ijk}^{(2)} E_j^{(\omega)} E_k^{(\omega)}$ . Нелинейная поляризация для AlGaAs и BaTiO<sub>3</sub> существенно зависит от ориентации электрического поля падающей волны по отношению к главным кристаллическим осям.

Для определения мультипольного состава генерируемого на удвоенной частоте излучения мы анализируем индуцированные в наночастице нелинейные источники. Общие выражения для электрических и магнитных мультипольных коэффициентов  $a_{E,M}(l,m)$  на длине волны второй гармоники определяются интегралами перекрытия электрического тока  $\mathbf{j} = 2i\omega \mathbf{P}^{(2\omega)}$  и заряда  $\rho = \nabla \cdot \mathbf{P}^{(2\omega)}$  со сферическими гармониками  $Y_{l,m}$  [3]:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_E(l, m) = \frac{4\pi k^2(2\omega)}{i\sqrt{l(l+1)}} \int Y_{l,m}^* \left( \begin{array}{l} \rho \frac{\partial}{\partial r} [r j_l(k(2\omega)r)] + \\ + \frac{ik(2\omega)}{c} (\mathbf{r} \cdot \mathbf{j}) j_l(k(2\omega)r) \end{array} \right) d^3\mathbf{r}, \\ a_M(l, m) = \frac{4\pi k^2(2\omega)}{i\sqrt{l(l+1)}} \int Y_{l,m}^* \nabla \cdot \left[ \frac{\mathbf{r} \times \mathbf{j}}{c} \right] j_l(k(2\omega)r) d^3\mathbf{r}. \end{array} \right. \quad (2)$$

Расчеты показывают, что в рамках одномодового магнитодипольного приближения (1) мультипольный состав характеризуется магнитным квадруполем (MQ) и электрическим октуполем (EO) для AlGaAs; и электрическим диполем (ED), MQ и EO для BaTiO<sub>3</sub>. Если угол между электрическим полем на основной частоте и кристаллической осью [001] равен  $\pi/2$ , магнитные мультипольные коэффициенты равны нулю, мы получаем только ED и EO. Проведенный анализ подтверждается численным моделированием и может быть применен для проектирования высокоэффективных нелинейных наноантенн.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-02-00381.

#### Литература

1. *Kruk S. et al.* Nonlinear optical magnetism revealed by second-harmonic generation in nanoantennas // *Nano Lett.* 17 (6), 3914–3918 (2017).
2. *Smirnova D., Smirnov A.I., Kivshar Y.S.* Multipolar second-harmonic generation by Mie-resonant dielectric nanoparticles // *Phys. Rev. A* 97, 013807 (2018).
3. *Джексон Дж.* Классическая электродинамика. М. : Мир, 1965. 702 с.

## НОВЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ ДЛЯ ЭМПИРИЧЕСКОЙ ПРОГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЬ-НИНЬО

*А.С. Гаврилов, А.Ф. Селезнев, Д.Н. Мухин, Е.М. Лоскутов, А.М. Фейгин*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
gavrilov@ipfran.ru

Задача эмпирической реконструкции сложных пространственно-распределенных систем в настоящее время становится все более актуальной в таких системах, как нейросистемы, климатическая система Земли, ввиду роста количества данных высокого разрешения об этих системах, а также неидеальности существующих моделей из первых принципов при решении

ряда задач в этих областях. В данной работе предлагается новый метод построения эмпирической прогностической модели оператора эволюции системы, который затем применяется к данным поверхностной температуры океана в тропическом поясе.

Метод включает два основных этапа:

1) поиск главного низкоразмерного многообразия, описывающего существенную часть наблюдаемой динамики, и получение новых переменных посредством проекции исходных пространственно-распределенных данных на это многообразие;

2) поиск нелинейного стохастического оператора эволюции в низкоразмерном пространстве полученных переменных.

Классическим и наиболее известным методом решения первой задачи является разложение данных по базису эмпирических ортогональных функций (ЭОФ), в результате которого строится линейное многообразие, описывающее максимально допустимую часть вариации наблюдаемых данных. В настоящей работе для решения данной задачи предлагается метод линейных динамических мод (ЛДМ), являющийся частным случаем ранее разработанного авторами метода нелинейных динамических мод (НДМ)

[1–3]. В то время как высокая ресурсоемкость задачи поиска НДМ на данный момент не позволяет их точно вычислять при размерности многообразия  $d > 2$ , ЛДМ в этом случае могут быть рассчитаны точно. Таким образом, в результате ЛДМ-разложения строится линейное многообразие, которое описывает меньшую часть вариации исходных данных, чем при ЭОФ-разложении, но учитывает простую динамическую связь между последовательными временными отсчетами.

На втором этапе в данной работе строится эмпирическая стохастическая модель оператора эволюции, основанная на ранее разработанном авторами подходе с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС) для параметризации ее нелинейной детерминированной компоненты [4, 5]. Модель также учитывает возможную медленную нестационарность оператора эволюции и его возможную зависимость от явно заданных внешних воздействий. Важным этапом построения модели является выбор оптимальных структурных параметров ИНС и оптимальной глубины памяти модели с помощью байесова критерия оптимальности [4].

Разработанный подход применяется к анализу пространственно-распределенного поля поверхностной температуры океана в тропическом поясе с 1960 по 2007 год. При различных значениях размерности многообразия показывается, что оптимальная эмпирическая модель оператора эволюции на основе ЛДМ-переменных имеет лучшую прогностическую способность, чем такая же модель на основе ЭОФ-переменных. При этом наиболее предсказуемыми регионами являются центральный и восточный регионы экваториального Тихого океана, в которых наблюдается явление Эль-Ниньо.

Более детальный анализ свойств модели в данном регионе на обучающем интервале времени (1960–2007) и за его пределами (2008–2017) показывает, что она не уступает ведущим мировым моделям (как эмпирическим, так и моделям из первых принципов), дающим прогноз индекса Эль-Ниньо.

Работа выполнена при поддержке Правительства Российской Федерации (соглашение № 14.Z50.31.0033 с Институтом прикладной физики РАН) и гранта Российского научного фонда № 16-12-10198.

### Литература

1. *Mukhin, D.* Nonlinear reconstruction of global climate leading modes on decadal scales / Mukhin, D., Gavrilov, A., Loskutov, E., Feigin, A., Kurths, J. // *Climate Dynamics*. 2017. 1–10. URL: <http://doi.org/10.1007/s00382-017-4013-2>.

2. *Gavrilov, A.* Method for reconstructing nonlinear modes with adaptive structure from multidimensional data / Gavrilov, A., Mukhin, D., Loskutov, E., Volodin, E., Feigin, A., Kurths, J. // *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. 2016. V. 26(12). Art. 123101.

3. *Mukhin, D.* Principal nonlinear dynamical modes of climate variability / Mukhin, D., Gavrilov, A., Feigin, A., Loskutov, E., Kurths, J. // *Scientific Reports*. 2015. V. 5. Art. 15510.

4. *Gavrilov, A.* Bayesian optimization of empirical model with state-dependent stochastic forcing / Gavrilov, A., Loskutov, E., Mukhin, D. // *Chaos, Solitons & Fractals*. 2017. V. 104. P. 327–337.

5. *Mukhin, D.* Predicting Critical Transitions in ENSO models. Part II : Spatially Dependent Models / Mukhin, D., Kondrashov, D., Loskutov, E., Gavrilov, A., Feigin, A., Ghil, M. // *Journal of Climate*. 2015. V. 28(5). P. 1962–1976.

## НЕЛИНЕЙНЫЕ ПРОДОЛЬНЫЕ ВОЛНЫ ДЕФОРМАЦИИ В ТОНКИХ СЛОИСТЫХ ВОЛНОВОДАХ

*Ф.Е. Гарбузов<sup>1,2</sup>, Я.М. Бельтюков<sup>2</sup>, А.М. Самсонов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

<sup>2</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
[fedor.garbuzov@gmail.com](mailto:fedor.garbuzov@gmail.com)

Распространение длинных нелинейных продольных волн деформации в тонких однородных волноводах (стержне, пластине и оболочке) описывается нелинейным уравнением в частных производных – уравнением с двумя дисперсиями (УДД) для продольной компоненты деформации  $u$ :

$$u_{tt} = \left[ p(x) \left( a(x)u + d(x)u^2 + f(x)u_{tt} + (b(x)u_x)_x \right) \right]_x, \quad (1)$$

где функции  $p$ ,  $a$ ,  $d$ ,  $f$  и  $b$  представляют собой комбинации модулей упругости и геометрических характеристик волновода [1, 2].

В работе построена модель распространения нелинейных продольных волн в тонких *слоистых* пластинах и стержнях и выведена система из трех уравнений движения на основании принципа наименьшего действия. Используя упрощающие предположения и разложения перемещения в степенной ряд по поперечной координате, систему из трех уравнений удалось свести к одному, имеющему вид (1). С помощью численного решения нелинейных уравнений теории упругости спектральным методом была подтверждена корректность использованных предположений и разложений.

Аналитическое решение (1) известно только при постоянных коэффициентах  $p$ ,  $a$ ,  $d$ ,  $f$  и  $b$ . Это решение при определенных условиях имеет вид двух уединенных волн – *солитонов деформации*, распространяющихся в противоположных направлениях:

$$u(x,t) = \frac{3(V^2 / p - a)}{2d} \operatorname{ch}^{-2} \left( \sqrt{\frac{(V^2 / p - a)}{4(-fV^2 + b)}} (x \pm Vt) \right). \quad (2)$$

Общее решение (1) неизвестно, вследствие чего моделирование распространения нелинейных волн осуществимо только на основании численного решения УДД. С помощью консервативной конечноразностной схемы, предложенной в [3], проведено моделирование эволюции объемного солитона деформации при скачкообразном изменении упругих модулей вдоль направления распространения солитона в слоистом волноводе. Изучено влияние изменения модулей упругости на параметры солитона – его амплитуду и длину. Установлено, что изменение модулей третьего порядка (модулей Мурнагана) слабее влияет на солитон, нежели изменение модулей второго порядка, в частности модуля Юнга. Найдены зависимости амплитуды и ширины солитона от изменения упругих модулей.

Результаты работы могут быть применены в технологии неразрушающего контроля, поскольку экспериментально доказано, что солитоны деформации распространяются на большие расстояния практически без затухания.

Авторы благодарят Российский научный фонд (проект № 17-72-20201) за финансовую поддержку.

### Литература

1. *Samsonov, A.M.* Strain Solitons in Solids and How to Construct Them / A.M. Samsonov. Chapman & Hall/CRC, 2001. 222 p.
2. *Dreiden, G.V.* Strain solitary waves in a thin-walled waveguide / G.V. Dreiden, A.M. Samsonov, I.V. Semenova, A.G. Shvartz // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 105. P. 211906.
3. *Christov, C.I.* Conservative Difference Scheme for Boussinesq Model of Surface Waves // Proceedings ICFD 5. 1996. P. 343–349.

## СОЛИТОННАЯ И БРИЗЕРНАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ В НУШ

*А.А. Гелаш<sup>1,2</sup>, Д.С. Агафонцев<sup>1,3</sup>*

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет

<sup>2</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе, СО РАН, Новосибирск

<sup>3</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова, РАН, Москва  
agelash@gmail.com

Статистическое поведение ансамблей солитонов и бризеров НУШ является важным разделом общей проблемы под названием «интегрируемая турбулентность» [1, 2].

Точные многосолитонные решения нелинейных интегрируемых уравнений являются одним из самых известных результатов метода обратной задачи рассеяния. Они могут быть получены, например, как результат факторизации интегральных уравнений Гельфанда – Левитана – Марченко (ГЛМ) к системе линейных алгебраических уравнений [3]. Оказывается, что при большом числе солитонов  $N_s$  данная система уравнений, а вместе с ней и построение многосолитонных решений, является плохо обусловленной задачей. То есть попытка построить волновое поле для известных параметров солитонов приведет к численным ошибкам на этапе использования точных формул (уже при  $N_s \sim 10$ ). Эта неустойчивость носит исключительно численный характер, и о физической неустойчивости решений речь не идет.

В этой работе мы рассматриваем одну из самых известных и фундаментальных интегрируемых моделей физики нелинейных волновых процессов – нелинейное уравнение Шредингера (НУШ). Для того чтобы преодолеть проблему плохой обусловленности задачи, мы предлагаем: 1) использовать рекуррентную схему метода одевания Захарова – Шабата (в варианте Захарова – Михайлова) для построения многосолитонных решений НУШ; 2) использовать арифметику произвольной точности. Первый шаг позволяет продвинуться в область  $N_s \sim 30$ , а дополнение метода одевания арифметикой произвольной точности позволяет вычислять многосолитонные решения для  $N_s \sim 200$ .

Возможность вычислять волновое поле многосолитонных решений НУШ позволило нам исследовать задачу о турбулентности плотного солитонного газа. Мы использовали статистические ансамбли 64 и 128 солитонных решений в качестве начальных условий для численного моделирования в ящике с периодическими граничными условиями. Параметры солитонов выбирались таким образом, чтобы в начальный момент времени они были хорошо локализованы в численном ящике. Затем в результате взаимных столкновений солитонный газ быстро стохастизировался и становился пространственно однородным. В данной работе мы представим результаты исследования поведения PDF волновых амплитуд в зависимости от плотности солитонного газа и распределения параметров солитонов.

Бризерами НУШ называют солитоны, которые распространяются на некотором ненулевом фоне и по этой причине могут осциллировать и проявлять другие интересные формы взаимодействия с фоном. Математическая процедура построения многобризерных решений аналогична процедуре построения многосолитонных решений и также приводит к плохо обусловленной задаче при большом числе бризеров  $Nb$ . В работе [4] мы рассматриваем различные сценарии формирования волн большой амплитуды (волн-убийц) из малых возмущений плоской волны, которая играет для бризеров роль фона. Для вычисления волнового поля многобризерных решений мы обобщаем процедуру метода одевания с арифметикой произвольной точности, что позволяет нам исследовать задачи с большим  $Nb$ . Мы изучаем случайные ансамбли многобризерных решений (бризерную турбулентность) и демонстрируем, при каких параметрах они могут описывать формирование волн большой амплитуды из малых возмущений плоской волны.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-02-00042.

### Литература

1. *Zakharov, V.E.* Turbulence in integrable systems // *Studies in Applied Mathematics*. 2009. V. 122, № 3. P. 219–234.
2. *Agafontsev, D.S.* Integrable turbulence and formation of rogue waves / *Agafontsev D.S., Zakharov V.E.* // *Nonlinearity*. 2015. V. 28, № 8. P. 2791.
3. *Захаров, В.Е.* Теория солитонов. Метод обратной задачи / В.Е. Захаров, С.В. Манаков, С.П. Новиков, Л.П. Питаевский. М. : Наука, 1980. 317 с.
4. *Gelash, A.A.* Formation of rogue waves from the locally perturbed condensate : preprint / *Gelash A.A.* – 7 p. – arXiv:1709.01913:2017.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ЭВТРОФИКАЦИИ ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

*Д.С. Гладских<sup>1,2</sup>, Д.А. Сергеев<sup>1</sup>, Г.А. Байдаков<sup>1</sup>, И.А. Соустова<sup>1</sup>,  
Ю.И. Троицкая<sup>1</sup>, А.В. Иванов<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

<sup>2</sup>Нижегородский государственный технический университет

<sup>3</sup>Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет  
daria.gladskikh@gmail.com

Одной из важнейших характеристик внутренних водоемов является распределение температуры по глубине. Оно оказывает существенное влияние на экологическое состояние озер и водохранилищ и является одной

из причин эвтрофикации (загрязнения воды биогенными массами). В [1, 2] установлена зависимость распространения фитопланктона от температурного распределения.

Для расчета термических режимов водных объектов мы воспользовались моделью, основанной на одномерном уравнении теплопроводности, которая реализована в программном комплексе LAKE [3], разработанном В.М. Степаненко. Для параметризации турбулентного теплообмена используется E-ε-параметризация [4], основанная на уравнениях кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации. Нами была предложена модификация программного комплекса и его валидация для условий равнинного водохранилища среднего размера на примере озерной части Горьковского водохранилища (56,7° с.ш., 43,3° в.д.). Результаты численных расчетов с использованием модифицированной версии были использованы для прогнозирования цветения в водоеме озерного типа, богатом биогенными веществами.

Модификация программного комплекса LAKE затронула процедуру задания начального температурного профиля и обеспечила возможность использования данных натурных измерений в начале сезона в качестве стартовых профилей. Также было сделано уточнение параметризации напряжения трения на границе вода – атмосфера. Модификация позволила более точно воспроизводить основные формы температурной стратификации.

Для валидации модели были использованы данные натурных измерений температурного распределения с помощью свободно падающего STD-зонда, полученные в ходе экспедиционных работ в период 2014–2017 годов на полигоне Горьковского водохранилища. Также использовались данные архивов метеостанции г. Городец и данные глобального метеорологического реанализа NCEP/NCAR.

Для анализа результатов были рассмотрены значения температуры в контрольных точках (поверхность, 1 м, 3 м и 8 м), проведено сравнение форм профилей для характерных случаев и найдено среднеквадратическое отклонение по всему ансамблю реализаций. Результаты численных расчетов с использованием модифицированной версии в достаточной мере описывают сезонные изменения температурного режима в Горьковском водохранилище, однако наилучшего совпадения удалось достичь для режимов сильного перемешивания с практически нулевой стратификацией – такие профили наблюдались в 2017 году. Рассчитанное среднеквадратичное отклонение не превысило 1,5 °С для 2014 года, когда были получены профили, отличающиеся сильной стратификацией, а для однородных профилей 2017 года – 0,8 °С, что является очень неплохим результатом по сравнению с использованием первоначальной версии [3].

Прогноз эвтрофикации основан на исследуемой авторами зависимости концентрации водорослей от температуры, солнечной радиации и интенсивности процессов перемешивания. Задача такого прогнозирования ус-

ложнена как необходимостью учета факторов, влияющих на ветровое перемешивание, так и требованиями учета параметров, влияющих на видовой состав планктона. На основе анализа натуральных исследований и численных расчетов для прогнозирования результата эвтрофикации выбрана модифицированная модель Бредфорда – Майеро, учитывающая температуру верхнего перемешанного слоя (ВПС), толщину ВПС и прозрачность, измеренную с помощью диска Секки, а также присутствие в воде абиотической взвеси [5]. Результатом такого моделирования является концентрация клеток планктона в единице объема, являющаяся важнейшим показателем оценки цветения.

Работа выполнена в рамках проекта РФФ 15-17-20009 (численное моделирование) и проектов РФФИ 17-05-41117, 15-45-02580 (натурные измерения).

### Литература

1. *Пежева, М.Х.* Основные факторы, влияющие на развитие микроорганизмов в рыбоводных прудах Кабардино-Балкарской республики / М.Х. Пежева, Ф.А. Халилова, Д.В. Жантеголов, С.Ч. Казанчев // *Фундаментальные исследования*. 2014. Вып. 5-5. С. 1025–1029.
2. *Bernard, O.* Validation of a simple model accounting for light and temperature effect on microalgal growth / O. Bernard, B. Rémond // *Bioresource Technology*. 2012. V. 123. P. 520–527.
3. *Степаненко, В.М.* Численное моделирование термического режима мелких водоемов // *Вычислительные технологии*. 2005. Т. 10, ч. 1. С. 100–106.
4. *Лыков, В.Н.* О проблеме замыкания моделей турбулентного пограничного слоя с помощью уравнений для кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1992. Т. 28. С. 696–704.
5. *Ivanov, A.* Online monitoring of water quality in the lake type reservoir based on in situ measurements, assessment and forecast / A. Ivanov, S. Guseinova // *16th International multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2016 Conference Proceedings. Section: Hydrology and Water Resources*. 2016. Book 3. V. 1. P. 537–544.

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В СИЛЬНО НЕЛИНЕЙНОЙ КИЛЬВАТЕРНОЙ ВОЛНЕ

*А.А. Голованов<sup>1</sup>, И.Ю. Костюков<sup>1</sup>, Й. Томас<sup>2</sup>, А.М. Пухов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

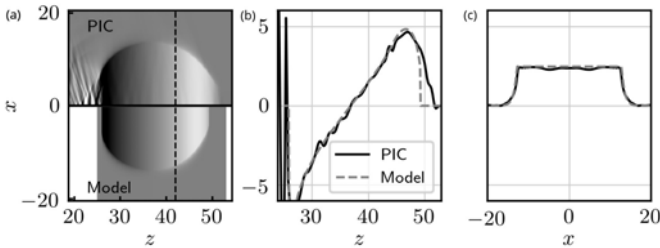
<sup>2</sup>Институт теоретической физики I, Университет Дюссельдорфа, Дюссельдорф, Германия

agolovanov@appl.sci-nnov.ru

Одним из перспективных направлений исследований в современной физике являются плазменные методы ускорения заряженных частиц, основанные на использовании электрического поля кильватерной волны в плаз-

ме [1]. Они позволяют добиться на несколько порядков больших градиентов ускорения, чем в классических ускорителях, основанных на использовании радиочастотных резонаторов. Для возбуждения кильватерной волны в качестве «драйвера» может использоваться мощный ультракороткий лазерный импульс или сгусток заряженных частиц. При достаточно высокой интенсивности лазерного импульса или плотности тока в сгустке реализуется сильно нелинейный режим кильватерной волны, при котором позади «драйвера» формируется полость сферической формы, практически полностью свободная от электронов плазмы, а на ее границе образуется тонкий электронный слой, экранирующий плазменную полость от окружающей плазмы. Сильно нелинейный режим особо примечателен тем, что в нем наблюдается самоинжекция электронов плазмы внутрь плазменной полости с последующим их захватом и ускорением. Это позволяет получать сгустки ускоренных электронов, используя лишь лазерный импульс и не имея при этом внешнего источника электронов, поэтому данный режим считается особенно перспективным для создания плазменных ускорителей.

Для исследования сильно нелинейного режима часто используется трехмерное численное моделирование методом частиц в ячейках, однако большой интерес представляет и теоретический анализ. Одним из главных достижений в теоретическом описании этого режима было создание модели плазменной полости в случае как однородной [2], так и поперечно-неоднородной плазмы [3]. Данная модель позволяет описать границу плазменной полости с учетом воздействия «драйвера» и ускоряемых электронных сгустков при помощи обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка.



**Рис. 1.** (a) Распределение продольного электрического поля  $E_z$  в плазменной полости, возбужденной релятивистским электронным сгустком в численном моделировании (вверху) и нашей модели (внизу). Распределения поля в моделировании и в модели вдоль прямых  $x = 0$  (b) и  $z = 42$  (c)

В данной работе, основываясь на модели для границы плазменной полости, мы создаем модель для описания распределений компонент электромагнитного поля внутри и снаружи плазменной полости [4]. Для этого мы предполагаем малость толщины электронного слоя по сравнению с раз-

мером плазменной полости. Это позволяет использовать отношение между толщиной слоя и размером полости как малый параметр и построить теорию возмущений по этому параметру в наименьшем порядке. В результате могут быть найдены явные выражения для всех компонент электромагнитного поля (продольного и поперечного электрического и азимутального магнитного поля) как внутри плазменной полости, так и снаружи от нее.

Для проверки модели было проведено численное моделирование трехмерным кодом *Smilei*, основанном на методе частиц в ячейках. На рис. 1 показано сравнение результатов данного моделирования с предсказаниями разработанной нами модели для продольного электрического поля  $E_z$ . Сравнение показывает, что наша модель хорошо описывает как распределение поля внутри полости, так и закон его спада при удалении от границы полости (на рис. 1, *с*). Аналогичные результаты были получены и для двух оставшихся компонент электромагнитного поля.

### Литература

1. *Esarey, E.* Physics of laser-driven plasma-based electron accelerators / E. Esarey, C.B. Schroeder, and W.P. Leemans // Rev. Mod. Phys. 2009. V. 81, № 3. P. 1229.
2. *Lu, W.* Nonlinear theory for relativistic plasma wakefields in the blowout regime / W. Lu, C. Huang, M. Zhou, W.B. Mori, T. Katsouleas // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 96, № 16. P. 165002.
3. *Thomas, J.* Non-linear theory of a cavitated plasma wake in a plasma channel for special applications and control / J. Thomas, I.Yu. Kostyukov, J. Pronold, A. Golovanov, A. Pukhov // Phys. Plasmas. 2016. V. 23, № 5. P. 053108.
4. *Golovanov, A.A.* Analytic model for electromagnetic fields in the bubble regime of plasma wakefield in non-uniform plasmas / A.A. Golovanov, I.Yu. Kostyukov, J. Thomas, A. Pukhov // Phys. Plasmas. 2017. V. 24, № 10. P. 103104.

## ДВУМОДОВЫЙ ГЕНЕРАТОР ВАН-ДЕР-ПОЛЯ КАК БАЗОВЫЙ ЭЛЕМЕНТ МОДЕЛИ ЦЕНТРАЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА РИТМА

*А.П. Гулай, С.В. Астахов*

Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.  
gulai.artem@gmail.com

Центральный генератор ритма – система, генерирующая ритмически упорядоченные моторные сигналы без обратной связи. Создание центральных генераторов ритма, применяемых в робототехнике, основано на нескольких подходах, среди которых можно выделить векторные отображения, коннекционные модели, нейронные сети и системы связанных нелинейных осцилляторов [1].

В большинстве проведенных исследований центральные генераторы ритма представляются в виде достаточно сложных моделей, либо состоящих из большого количества элементов, либо имеющих сложную систему в качестве базового элемента, либо являющихся математическими абстракциями [1]. В то же время при проектировании ЦГР важны такие свойства системы, как простота, надежность, возможность физической реализации.

С другой стороны, используемые в настоящее время модели центральных генераторов ритма обладают одним существенным недостатком. Совокупность осцилляторов, связанных определенным образом, способна генерировать только один периодический режим, соответствующий одному поведению робота. Возможность разнообразного поведения робота достигается путем изменения топологии связи между осцилляторами [2].

Одним из возможных способов устранения данного недостатка является использование многомодовой автоколебательной системы (см., например, [3]), способной выступать в качестве базового элемента центрального генератора ритма. Такая система позволяет получать периодические режимы с различным сдвигом фаз при неизменных управляющих параметрах. Чем большее число различных режимов может быть реализовано в системе, тем большим числом различных «походов» может обладать робот.

В качестве базового элемента центрального генератора ритма предлагается использовать достаточно простую модель многомодовой автоколебательной системы. В основе данной системы лежит генератор Ван-дер-Поля, связанный с дополнительным пассивным колебательным контуром [3]. Выбор данной системы обусловлен следующими причинами. Во-первых, в такой системе при малой отстройке частоты контура от частоты генератора, и даже в ее отсутствие, реализуется режим бистабильности. В связанных системах следует ожидать реализации развитой мультистабильности. Это позволит переключаться между различными паттернами активности внешним воздействием без необходимости изменения управляющих параметров, сопровождающегося длительными переходными процессами. Во-вторых, предлагаемая модель допускает весьма простую физическую реализацию в виде электронной схемы на доступной элементной базе радиоэлектроники.

Математическая модель генератора Ван-дер-Поля с дополнительным колебательным контуром записывается в виде следующей системы обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 = (\varepsilon - x_1^2) \dot{x}_1 - \omega_1^2 x_1 + \gamma(x_2 - x_1), \\ \ddot{x}_2 = -2\beta_2 \dot{x}_2 - (\omega_1 p_2)^2 x_2 + \gamma(x_1 - x_2). \end{cases}$$

Для оценки возможности построения центрального генератора ритма на основе двумодовых генераторов Ван-дер-Поля необходимо иметь исчерпывающее представление о динамике парциальной системы, устройстве фазового пространства и структуре пространства параметров связанных систем.

При этом немаловажную роль играет способ связи парциальных элементов в ансамбле. Таким образом, целью настоящей работы является бифуркационный анализ структуры пространства параметров системы, состоящей из двух двумодовых генераторов, механизмов формирования сосуществующих автоколебательных режимов. Особое внимание уделяется влиянию типа связи между парциальными системами на формирование мультистабильности в фазовом пространстве.

В результате проведенных исследований были выявлены бифуркационные сценарии формирования в фазовом пространстве связанных систем сосуществующих предельных циклов, соответствующих колебаниям осцилляторов с различным взаимным сдвигом фаз. Это, в свою очередь, соответствует различным паттернам локомоторной активности шагающего робота.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 17-72-30003).

### Литература

1. *Ijspeert, A.J.* Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: A Review / A.J. Ijspeert // *Neural Networks*. 2008. № 21. P. 642–653.

2. *Arena, P.* An Adaptive, Self-Organizing Dynamical System for Hierarchical Control of Bio-Inspired Locomotion / P. Arena, L. Fortuna, M. Frasca, G. Sicurella // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part B : Cybernetics*. 2004. V. 34, № 4. P. 1822–1837.

3. *Astakhov, S.* Mechanism of Multistability Formation and Frequency Entrainment in a van der Pol Oscillator with and Additional Oscillatory Circuit / S. Astakhov, O. Astakhov, V. Astakhov, J. Kurths // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 2016. № 26. Art. 1650124.

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ В ВЕТРОВОМ ВОЛНЕНИИ ДИСТАНЦИОННЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

*А.А. Демакова, В.В. Баханов, В.И. Тумов*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
d6365@yandex.ru

В работе исследуются нелинейные процессы на морской поверхности по пространственно-временным изображениям, полученным с океанографической платформы в п. Кацивели, Республика Крым. Пространственно-временные, или ДВИ (дальность – время – интенсивность), изображения морской поверхности регистрировались с помощью оптического комплек-

са, состоящего из нескольких приборов с зарядовой связью (ПЗС-линеек) с разными направлениями визирования. По ДВИ-изображениям можно регистрировать длинные поверхностные волны (энергонесущие ветровые волны, волны зыби), определять их спектрально-кинематические характеристики, выявлять волны с аномально большой амплитудой, а также идентифицировать проявления внутренних волн (ВВ) на морской поверхности. Синхронно с регистрацией ДВИ-изображений проводилась запись спектров короткомасштабных поверхностных волн длиной от нескольких сантиметров до метра, полученных путем спектрального анализа изображения поверхности моря.

В работе представлены результаты экспериментальных работ, а именно исследование поля длинных поверхностных волн и спектров короткомасштабных поверхностных волн при различных ветрах. Также обсуждаются механизмы видимости проявлений ВВ на морской поверхности при различных условиях освещения, обсуждаются примеры регистрации проявлений ВВ на морской поверхности, разрабатываются методы определения параметров ВВ (скорость, период и другие), а также методы восстановления статистических характеристик поверхностного волнения в поле ВВ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-05-00858 а.

## **О РОЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ В ДИСПЕРСНЫХ МНОГОФАЗНЫХ СРЕДАХ**

*С.О. Дементьева, Е.А. Мареев*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
svetadem91@mail.ru

В природе встречается множество явлений, сопровождающихся ростом электрического поля и электрическими разрядами. Некоторые из этих явлений (в частности, грозы, пылевые бури и сильные метели) могут представлять опасность для людей и техники вследствие возникновения высоких напряжений и токов, а также ухудшения видимости.

Рост крупномасштабного электрического поля как в грозовых облаках, так и в пылевых бурях происходит за счет разделения заряда на сталкивающихся частицах. Как показали натурные измерения, в грозовых облаках наблюдается высокий уровень турбулентности. Однако в современных исследованиях грозовых облаков и моделях, включающих турбулентную диффузию заряда, принято полагать, что турбулентность приводит к ослаблению электрического поля. В основу данной работы положено предположение о том, что флуктуации относительной скорости частиц в грозовых

облаках, возникающие при их турбулентном перемешивании, могут приводить к росту крупномасштабного электрического поля. Первичные оценки роли турбулентности в электризации слабопроводящих многокомпонентных сред были проведены в статье [1], где показана возможность значительного усиления роста электрического поля за счет турбулентности при разделении заряда на частицах с различными массами. Следует отметить, что данный подход достаточно универсален и подходит, в частности, для описания электризации грозовых облаков и пылевых бурь.

В данной работе изучены особенности индукционного и безындукционного механизмов разделения зарядов при электризации грозовых облаков с учетом эффектов, возникающих за счет турбулентности. Выявлено, что в ряде случаев ток зарядки, появляющийся за счет турбулентного перемешивания, может быть сравним с током зарядки, присутствующим в грозовых облаках без учета турбулентных эффектов, что существенно сказывается на процессах грозовой электризации.

Грозы являются опасными природными явлениями, которые требуют точных методов прогноза с помощью существующих численных моделей. Для решения задач прогнозирования грозовых событий разработанная ранее для модели WRF параметризация электрических процессов [2, 3] была усовершенствована с учетом проведенных исследований турбулентных эффектов в грозовых облаках; проведено численное моделирование грозовых событий на территории Нижегородской области с использованием модифицированной параметризации. Учет турбулентных эффектов при моделировании электрических параметров выявил некоторые отличия в распределении разности потенциалов и электрического поля в грозовом облаке. Полученные результаты в целом соответствуют экспериментальным данным, демонстрирующим усиление процессов электризации в грозовых облаках с высоким уровнем турбулентности, однако для более детального описания роли турбулентности в грозовой электризации требуется дальнейшее совершенствование как теоретических моделей, так и методик экспериментальных исследований.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 16-17-00132).

### Литература

1. *Mareev E.A.* The role of turbulence in thunderstorm, snowstorm, and dust storm electrification / E.A. Mareev, S.O. Dementyeva // *J. Geophys. Res.* 2017. V. 122. P. 6976–6988.

2. *Дементьева С.О.* Расчет электрического поля и индекса молниевой активности в моделях прогноза погоды / С.О. Дементьева, Н.В. Ильин, Е.А. Мареев // Изв. РАН. ФАО. 2015. Т. 51, № 2. С. 210–217.

3. *Шаталина М.В.* Мониторинг и моделирование грозовых событий в Нижегородском регионе: интенсивная гроза 1–2 июня 2015 года / М.В. Шаталина, С.О. Дементьева, Е.А. Мареев // *Метеорология и гидрология.* 2016. № 11. С. 81–87.

# РЕЗОНАНСНЫЕ СТРУКТУРЫ И ИХ БИФУРКАЦИИ В ABC-ПОТОКЕ

А.А. Дидов<sup>1,2</sup>, М.Ю. Улейский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

<sup>2</sup>Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,  
Владивосток  
Kedr\_ad@mail.ru

В 1965 г. В.И. Арнольдом [1] была предложена автономная система дифференциальных уравнений, описывающих адвекцию пассивной частицы потоком жидкости. Система уравнений для стационарного ABC-потока имеет следующий вид:  $\mathbf{V} = (A \sin(x) + C \cos(y), B \sin(x) + A \cos(z), C \sin(y) + B \cos(x))$ , где  $A, B, C$  — параметры системы.

ABC-поток — один из немногих 3D-потоков, представляющих интерес как модель для изучения процессов, происходящих в различных средах. В статье [2] на примере ABC-потока изучаются влияние внутренних свойств системы на возникновение новых структур при изменении управляющих параметров и методы их описания. Система имеет только три управляющих параметра. Зануление одного из данных параметров приводит к разделению системы на две интегрируемые подсистемы (плоское и вертикальное движение). Если один из параметров близок к нулю, то периодическое движение по вертикали можно рассматривать как внешнее возмущение для движения в перпендикулярной плоскости, в результате чего в невырожденной системе частота внешнего возмущения зависит от гамильтониана, что позволяет наблюдать явление, обычно свойственное вырожденным системам: существование нескольких цепочек резонансов одного порядка и пересоединение их сепаратрис при определенных условиях.

Основным результатом исследования является то, что в параметрическом пространстве была найдена дополнительная область (двух решений), несущая информацию о целой группе резонансов (рис. 1), упущенных в ранних работах. На рис. 2 представлены результаты численного исследования.

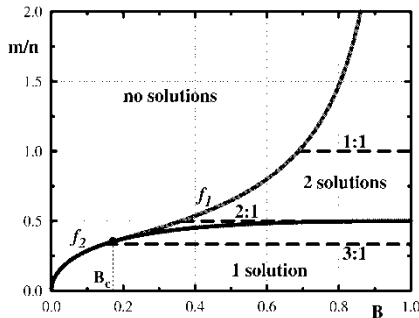
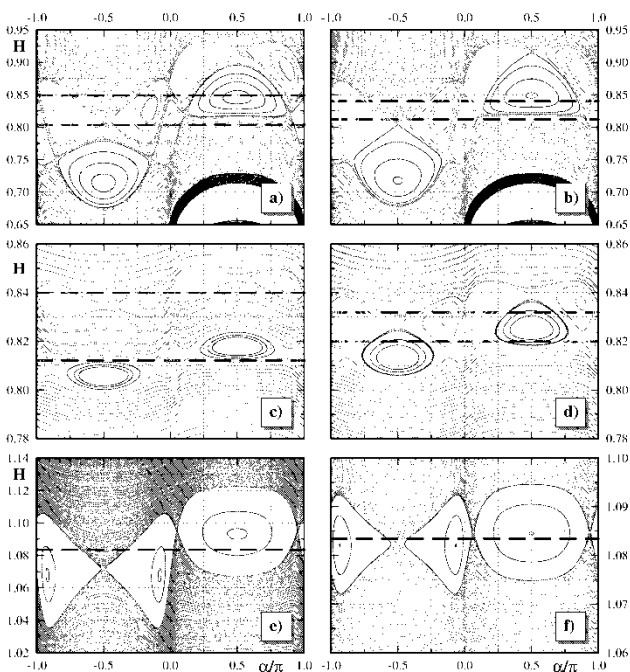


Рис. 1. Область решений, определяющая существование и порядок резонанса в ABC-потоке. Крупные резонансы 1:1, 2:1 и 3:1 показаны штриховой линией



**Рис. 2.** Сечение Пуанкаре в переменных «угол – энергия». Штриховая линия – теоретическое значение энергии соответствующих резонансов: а) резонанс 2:1,  $B = 0,3605$ ,  $C = 0,05$ , б) 2:1,  $B = 0,3602$ ,  $C = 0,05$ , в) 2:1,  $B = 0,3602$ ,  $C = 0,005$ , д) 2:1,  $B = 0,36005$ ,  $C = 0,005$ , е) 3:1,  $B = 0,15$ ,  $C = 0,05$ , ф) 3:1,  $B = 0,15$ ,  $C = 0,005$

Считается, что растяжение материальных линий в потоке за счет динамического хаоса приводит к так называемому «fast dynamo» режиму, в котором магнитное поле растет экспоненциально быстро. Резонансы оказывают довольно серьезное влияние на стохастический слой, как расширяя его за счет образования дополнительного стохастического слоя на сепаратрисе резонанса, так и ослабляя его влияние за счет прилипания. Зная, где в фазовом пространстве находятся резонансы, можно управлять ими с помощью дополнительного малого возмущения, зависящего от времени, например разрушать их, увеличивая общий объем стохастического слоя.

### Литература

1. Arnold V. Sur la topologie des écoulements stationnaires des fluides parfaits / V. Arnold // Comptes Rendus Hebdomadaires des Seances de l'Académie des Sciences. 1965. V. 261. P. 17–20.
2. Didov A.A. Nonlinear resonances in the ABC-flow / A.A. Didov, M.Yu. Uleysky // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 2017. P. 1–9 [принята в печать].

# ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ ВИБРАЦИИ И ЭФФЕКТИВНАЯ ИНВЕРСИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ В ДВУХСЛОЙНОЙ СИСТЕМЕ НЕВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ

*А.В. Долматова<sup>1</sup>, Д.С. Голдобин<sup>1,2</sup>, Т.П. Любимова<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

<sup>2</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет  
anastasiya.v.dolmatova@gmail.com

В данной работе исследуется двухслойная система невязких несмешивающихся жидкостей в поле горизонтальных высокочастотных вибраций. Ранее были исследованы двумерные течения, возникающие в подобной системе [1–5] в случае слоев равной толщины. Динамика границы раздела жидкостей в этом случае описывается уравнениями, идентичными «плюс» уравнению Буссинеска [3, 4]. В работе [2] было показано, что горизонтальные вибрации, в отличие от вертикальных, не могут полностью подавить неустойчивость Релея – Тейлора, но могут приводить к возникновению квазиравновесных состояний на границе раздела жидкостей. Также было показано, что в достаточно тонких слоях невязких жидкостей неустойчивость является подкритической и носит длинноволновый характер.

В настоящей работе исследуются трехмерные течения в системе с произвольным отношением толщин слоев. Для данной задачи может быть сформулирован аналог теоремы Сквайра, согласно которой порог линейной неустойчивости становится тем выше, чем больше угол между волновым вектором и направлением вибраций:

$$B_0(\beta) = \frac{B_0(0)}{\cos^2 \beta},$$

где  $\beta$  – угол между волновым вектором и направлением вибраций. Следовательно, наиболее опасные моды возмущений параллельны направлению вибраций (что соответствует двумерному случаю, рассмотренному в [3]). Для возмущений, имеющих одинаковый масштаб по обоим горизонтальным направлениям, порог линейной неустойчивости значительно превышает порог линейной неустойчивости для двумерных волн, поэтому интерес представляют только те возмущения, скорость изменения которых в направлении вибраций гораздо больше скорости их изменения в перпендикулярном направлении. Уравнения эволюции границы раздела в такой системе описывается следующим уравнением:

$$\ddot{\eta} \mp \eta_{xx} - \eta_{yy} + \left( (3/2) \eta^2 + \eta_{xx} \right)_{xx} = 0$$

(ниже и выше порога линейной неустойчивости соответственно).

Особый интерес к изучению вибрационного воздействия на стратифицированные системы несмешивающихся жидкостей объясняется тем, что в

некоторых случаях это воздействие может приводить к устойчивости «инверсного» состояния системы, при котором более тяжелая жидкость находится поверх более легкой. Полученные уравнения динамики границы раздела позволяют описать эволюцию инверсного состояния:

$$\ddot{\eta} \pm \eta_{xx} + \eta_{yy} - \left( (3/2) \eta^2 + \eta_{xx} \right)_{xx} = 0$$

(выше и ниже порога линейной неустойчивости соответственно).

На первый взгляд, уравнение, описывающее динамику инверсного состояния выше порога линейной неустойчивости, полностью соответствует уравнению Буссинеска для гравитационных волн на мелкой воде. Однако это совершенно не означает, что система характеризуется теми же свойствами устойчивости, что и тонкий слой жидкости под действием гравитационного поля. Дело в том, что описываемая система действительно обладает коротковолновой неустойчивостью, тогда как при описании гравитационных волн на мелкой воде эта неустойчивость возникает вследствие принимаемых упрощений и лежит за пределами области применимости уравнения Буссинеска для реальных систем. Тем не менее сходство этих двух уравнений указывает на то, что длинноволновая динамика инверсного состояния под действием сильных вибраций имеет те же свойства устойчивости, что и гравитационные волны на мелкой воде.

Все результаты получены в рамках длинноволнового приближения, которое обосновано тем, что линейный анализ неустойчивости в системе выявляет ее длинноволновый характер для случая достаточно тонких слоев [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 14-21-00090).

### Литература

1. Любимов Д.В., Любимова Т.П., Черепанов А.А. Динамика поверхностей раздела в вибрационных полях. М. : Физматлит, 2003. 216 с.
2. Любимов Д.В., Черепанов А.А. О возникновении стационарного рельефа на поверхности раздела жидкостей в вибрационном поле // Изв. АН СССР. МЖГ. 1986. № 6. С. 8–13.
3. Goldobin D.S., Pimenova A.V., Kovalevskaya K.V., Lyubimov D.V., Lyubimova T.P. Running interfacial waves in a two-layer fluid system subject to longitudinal vibrations // Physical Review E. 2015. Vol. 91. Art. 053010.
4. Goldobin D.S., Kovalevskaya K.V., Lyubimov D.V. Elastic and inelastic collisions of interfacial solitons and integrability of a two-layer fluid system subject to horizontal vibrations // Europhysics Letters. 2014. Vol. 108. Art. 54001.
5. Pimenova A.V., Goldobin D.S., Lyubimova T.P. Comparison of the effect of horizontal vibrations on interfacial waves in a two-layer system of inviscid liquids to effective gravity inversion // Microgravity Science and Technology. 2017. P. 1–10.

# ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЕ МАГНИТНЫХ ЧАСТИЦ В УГЛЕРОДНОЙ НАНОТРУБКЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА

*Р.С. Евстигнеев<sup>1,2</sup>, Д.В. Чуриков<sup>2</sup>, А.Р. Сафин<sup>3</sup>, О.В. Кравченко<sup>1,2</sup>,  
С.С. Харламова<sup>1,2</sup>, М.Ф. Булатов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

<sup>2</sup>Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

<sup>3</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

evstigneev24031997@icloud.com

В последние годы наблюдается заметный интерес к исследованиям углеродных нанотрубок (УНТ) в свете нанoeлектроники и материаловедения [1]. Одностенные УНТ представляют собой полые протяженные цилиндры радиусом в доли нанометров и длиной в сотни микрометров. Изучение свойств УНТ в сочетании с магнитными материалами (например, вкраплениями ферромагнитных наночастиц) является одним из перспективных направлений исследований [2] в связи с потенциальными приложениями для магнитооптической памяти. При расположении одномоментных ферромагнитных наночастиц в УНТ уменьшается магнитное взаимодействие между ними и при этом уменьшается величина эффективного магнитного поля, необходимого для переориентации их магнитного момента. Особый интерес вызывает прохождение поляризованного света сквозь такие материалы, которое могло бы изменить направление магнитного момента наночастиц [3].

В данной работе исследуется математическая модель процессов перемагничивания ферромагнитных частиц в УНТ под действием поляризованного света. Эффективное магнитное поле, действующее на единичную частицу, складывается из внешнего магнитного поля, полей анизотропии и размагничивания. Связь между ферромагнитными частицами – магнитодипольная, а распределение ферромагнитных частиц по нанотрубке – случайное, с равномерным распределением. Построенная модель позволяет рассчитать время переключения из одного состояния в другое, а также величину поля, необходимую для перемагничивания частиц из одного состояния в другое (из состояния логического нуля в логическую единицу). Данная методика может эффективно использоваться для создания нового типа памяти на основе углеродных нанотрубок и спинтроники.

## Литература

1. Дьячков П.Н. Электронные свойства и применение нанотрубок. М. : БИНОМ, 2010.
2. Weissker U., Hampel S., Leonhardt A., Buchner B. Carbon nanotubes filled with ferromagnetic materials // Materials. 2010. V. 3. P. 4387–4427.
3. Kirilyuk A., Kimel A.V., Rasing T. Ultrafast optical manipulation of magnetic order // Rev. Mod. Phys. 2010. V. 82. P. 2731–2784.

# **МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРНЫХ ФАЗ ПОВЕДЕНИЯ В СВЯЗАННЫХ СИСТЕМАХ, НАХОДЯЩИХСЯ В РЕЖИМЕ ПЕРЕМЕЖАЮЩЕЙСЯ ОБОБЩЕННОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ**

*Е.В. Евстифеев, О.И. Москаленко*

Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
имени Н.Г. Чернышевского  
evstifeev@mail.ru

Хаотическая синхронизация связанных нелинейных систем представляется в настоящее время одним из фундаментальных явлений современной радиофизики [1]. Известны различные типы хаотической синхронизации: фазовая синхронизация, лаг-синхронизация, полная синхронизация и обобщенная синхронизация, последняя из которых представляет наибольший интерес [2]. Явление обобщенной хаотической синхронизации было подробно изучено на примере потоковых систем и систем с дискретным временем, связанных как однонаправленно, так и взаимно (см., например, [2–4]).

Для понимания природы хаотической синхронизации необходимо рассмотреть процессы установления синхронного режима при увеличении параметра связи. Известно, что переход от асинхронного режима к синхронному сопровождается перемежаемостью, когда во временных реализациях систем при фиксированном значении параметра связи существуют ламинарные участки, прерываемые турбулентными всплесками [5]. Известно, что в случае двух однонаправленно связанных хаотических осцилляторов на границе обобщенной синхронизации наблюдается перемежаемость «on-off» типа [6].

Для определения характеристик перемежаемости, имеющей место на границе обобщенной синхронизации, важную роль играют методы выделения характерных фаз поведения по временным рядам. Для систем с однонаправленной связью, как правило, используется «амплитудный» метод, а в качестве анализируемого сигнала рассматривается разность сигналов ведомой и вспомогательной систем [6, 7]. Применение такого подхода для систем с взаимным типом связи не представляется возможным в связи с неработоспособностью метода вспомогательной системы в данном случае [8]. Поэтому важной задачей является разработка метода анализа перемежающегося поведения на границе обобщенной синхронизации, который бы давал корректные результаты в случае как однонаправленной, так и взаимной связи между системами.

В настоящей работе предложен модифицированный метод ближайших соседей [2] для выделения характерных (синхронных и асинхронных) фаз поведения в нелинейных системах, находящихся в режиме перемежающейся обобщенной синхронизации. В качестве объектов исследования рассмотрены однонаправленно и взаимно связанные системы Ресслера, находящие-

ся в режиме ленточного хаоса. В фазовом пространстве систем были выбраны опорные точки и соответствующие им ближайшие соседи. В соответствии с классическим методом ближайших соседей было сделано предположение о том, что фазовые траектории точек, ближайших к опорной, в фазовом пространстве другой системы во время фаз синхронного (ламинарного) поведения будут оставаться близкими друг к другу, а во время асинхронных (турбулентных) всплесков будут достаточно сильно отклоняться друг от друга. На основании этого были выделены фазы, соответствующие синхронному и асинхронному поведению систем. Результаты предложенного метода сопоставлены с результатами метода вспомогательной системы для случая однонаправленной связи. В связи с хорошим соответствием результатов, полученных обоими способами, модифицированный метод ближайших соседей был применен для выделения ламинарных и турбулентных фаз в случае взаимной связи нелинейных систем. Определены статистические характеристики перемежающегося поведения в данном случае.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-12-00224).

### Литература

1. *Boccaletti, S.* The synchronization of chaotic systems / S. Boccaletti, J. Kurths, G.V. Osipov, D.L. Valladares, C.S. Zhou // *Physics Reports*. 2002. V. 366. P. 1–101.
2. *Rulkov, N. F.* Generalized synchronization of chaos in directionally coupled chaotic systems / N.F. Rulkov, M.M. Sushchik, L.S. Tsimring, H.D.I. Abarbanel // *Phys. Rev. E*. 1995. V. 51, № 2. P. 980–994.
3. *Pyragas, K.* Weak and strong synchronization of chaos / K. Pyragas // *Phys. Rev. E*. 1996. V. 54, № 5. P. R4508–R4511.
4. *Moskalenko, O.I.* Generalized synchronization in mutually coupled oscillators and complex networks / O.I. Moskalenko, A.A. Koronovskii, A.E. Hramov, S. Boccaletti // *Phys. Rev. E*. 2012. V. 86. P. 036216.
5. *Шустер, Г.* Детерминированный хаос / Г. Шустер. – М. : Мир, 1988. – 253 с.
6. *Hramov, A.E.* Intermittent generalized synchronization in unidirectionally coupled chaotic oscillators / A.E. Hramov, A.A. Koronovskii // *Europhysics Letters*. 2005. V. 70, № 2. P. 169–175.
7. *Abarbanel, H.D.I.* Generalized synchronization of chaos: The auxiliary system approach / H.D.I. Abarbanel, N.F. Rulkov, M.M. Sushchik // *Phys. Rev. E*. 1996. V. 53, № 5. P. 4528–4535.
8. *Moskalenko, O.I.* Inapplicability of an auxiliary-system approach to chaotic oscillators with mutual-type coupling and complex networks / O.I. Moskalenko, A.A. Koronovskii, A.E. Hramov // *Phys. Rev. E*. 2013. V. 87. P. 064901.

## О ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ДНЕВНОГО И НОЧНОГО СПРАЙТА

*А.А. Евтушенко, Ф.А. Кутерин, Н.Н. Слюняев*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
xredor@appl.sci-nnov.ru

Предложена радиально-симметричная самосогласованная модель спрайта на высотах от 60 до 90 км в области радиусом 60 км. Химический блок модели состоит из 267 реакций для 61 химической компоненты. Проведен анализ возмущения концентрации ионов, электронов, нейтральных компонент и интенсивности эмиссий фотонов на высотах мезосферы для спрайта в ночных условиях. Вследствие быстрого вытеснения электрического поля в верхней части диффузной области спрайта на высотах 78–81 км излучение на оси разряда заканчивается ранее, чем во внешней области, что приводит к формированию тороидальной структуры электрического поля и излучения спрайта в первой и второй положительных полосах молекулярного азота. На высотах 83–87 км при развитии разряда наблюдается уменьшение концентрации электронов, связанное с возрастанием роли диссоциативного прилипания к молекулярному кислороду, что существенно уменьшает проводимость на этих высотах [1].

Вопрос генерации дневных спрайтов остается открытым, так как прямая их регистрация невозможна из-за недостаточной интенсивности излучения. Дневные спрайты регистрируются по характерным изменениям магнитного поля. Анализ электромагнитных записей показывает, что для инициации дневного спрайта необходимы дипольные моменты в 3–5 тысяч Кл·км и очень мощные мезомасштабные конвективные системы. Для моделирования дневных условий в систему химических реакций добавлен фотохимический блок и использованы данные электромагнитных наблюдений. Показано, что высота дневного спрайта снижается на 20 км относительно ночного спрайта и возмущение концентрации электронов может достигать 20–30 % в зависимости от высоты.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-05-01182.

### Литература

1. *Евтушенко А.А., Кутерин Ф.А.* Самосогласованная модель ночного спрайта // Известия вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 12. С. 1076–1087.

# ГЕНЕРАЦИЯ ВЫСОКИХ ГАРМОНИК ОТ ЛАЗЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ СРЕДНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА: ЗАКОН СПАДАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ЛАЗЕРА

*А.С. Емелина, М.Ю. Емелин, М.Ю. Рябикин*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва  
ana\_b@rambler.ru

В последнее время достигнут значительный прогресс в разработке мощных фемтосекундных параметрических лазерных источников с центральными длинами волн в диапазоне от 1,5 до 4 мкм и более. Эти достижения открывают новые перспективы в изучении взаимодействия сильного лазерного излучения с веществом. В частности, из-за пропорциональности пондеромоторной энергии электрона квадрату длины волны лазерного излучения плато в спектре высоких гармоник может простирается до существенно более высоких энергий фотонов [1]. С другой стороны, эффективность генерации гармоник, излучаемых отдельными атомами, падает с увеличением длины волны лазерного излучения (обычно как  $\lambda^{-\mu}$ , где  $\mu = 5-6$  для  $0,8 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 4 \text{ мкм}$  [2-4]). Однако это снижение эффективности одноатомного нелинейного отклика может быть в значительной степени компенсировано с помощью фазового синхронизма при генерации гармоник на больших трассах [5]. Поэтому исследование закона спадаения эффективности преобразования с длиной волны лазера является актуальной задачей, в том числе для  $\lambda > 4 \text{ мкм}$ .

Генерация гармоник высокого порядка в длинноволновом режиме имеет ряд важных особенностей, приводящих к существенному изменению спектральных свойств генерируемого излучения по сравнению со случаем использования коротковолновых источников. Во-первых, с увеличением длины волны лазера мощность высоких гармоник становится все более локализованной вокруг положения отсечки, а не более или менее равномерно распределенной между гармониками на всем плато. Во-вторых, эффект электронного магнитного дрейфа становится более важным при продвижении в длинноволновую область, что приводит как к общему снижению выхода гармоник, так и к перестройке спектра излучения, который теряет привычную структуру и становится дугообразным, а не платообразным [6, 7]. Поэтому закон спадаения для выхода гармоник в длинноволновом пределе может значительно отличаться от случая использования коротковолновых источников.

В настоящей работе закон спадаения эффективности генерации высоких гармоник будет изучен для среднего ИК-диапазона ( $2 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 20 \text{ мкм}$ ). Исследование будет основано на квантово-механическом подходе в приближении сильного поля [8], модифицированном таким образом, чтобы

учесть опустошение основного состояния атома и влияние магнитного поля лазерного импульса на динамику электрона [6, 7].

### Литература

1. *Shan, B.* Dramatic extension of the high-order harmonic cutoff by using a long-wavelength driving field / B. Shan, Z. Chang // Phys. Rev. A. 2001. V. 65, № 1. P. 011804(R).
2. *Tate, J.* Scaling of wave-packet dynamics in an intense midinfrared field / J. Tate, T. Augustine, H.G. Muller, P. Salières, P. Agostini, L.F. DiMauro // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 98, № 1. P. 013901.
3. *Frolov, M.V.* Wavelength scaling of high-harmonic yield: threshold phenomena and bound state symmetry dependence / M.V. Frolov, N.L. Manakov, A.F. Starace // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100, № 17. P. 173001.
4. *Frolov, M.V.* Scaling laws for high-order-harmonic generation with midinfrared laser pulses / M.V. Frolov, N.L. Manakov, W.-H. Xiong, L.-Y. Peng, J. Burgdörfer, A.F. Starace // Phys. Rev. A. 2015. V. 92, № 2. P. 023409.
5. *Popmintchev, T.* Bright coherent ultrahigh harmonics in the keV X-ray regime from mid-infrared femtosecond lasers / T. Popmintchev, M.-C. Chen, D. Popmintchev, P. Arpin, S. Brown, S. Ališauskas, G. Andriukaitis, T. Balčiūnas, O.D. Mücke, A. Pugzlys, A. Baltuška, B. Shim, S.E. Schrauth, A. Gaeta, C. Hernández-García, L. Plaja, A. Becker, A. Jaron-Becker, M.M. Murnane, H.C. Kapteyn // Science. 2012. V. 336, № 6086. P. 1287–1291.
6. *Емелина, А.С.* О возможности генерации высоких гармоник с энергиями более 10 кэВ при взаимодействии интенсивного излучения среднего ИК-диапазона с нейтральными газами / А.С. Емелина, М.Ю. Емелин, М.Ю. Рябикин // Квантовая электроника. 2014. Т. 44, № 5. С. 470–477.
7. *Emelina, A.C.* Multi-keV ultrahigh-order harmonics produced in gases with subrelativistically intense mid-IR laser pulses / A.S. Emelina, M.Yu. Emelin, M.Yu. Ryabikin // Journal of the Optical Society of America B. 2015. V. 32, № 12. P. 2478–2487.
8. *Lewenstein, M.* Theory of high-harmonic generation by low-frequency laser fields / M. Lewenstein, Ph. Balcou, M.Yu. Ivanov, A. L'Huillier, P.B. Corkum // Phys. Rev. A. 1994. V. 49, № 3. P. 2117–2132.

## ВОЗБУДИМОСТЬ НЕЙРОНОПОДОБНОГО ГЕНЕРАТОРА НА БАЗЕ СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ АУТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ В ОТВЕТ НА ПЕРИОДИЧЕСКУЮ ИМПУЛЬСНУЮ СТИМУЛЯЦИЮ

*Н.С. Жукова, М.А. Мищенко*

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
NataZh29@yandex.ru

Одним из важнейших свойств нейронов является их электрическая возбудимость. Поскольку нервные клетки взаимодействуют посредством передачи импульсов, актуальным является исследование их поведения в ответ на импульсную стимуляцию. В работе [1] рассмотрена модель нейроноподобного генератора на основе системы фазовой автоподстройки частоты при постоянном воздействии. Режимы такой модели качественно отобра-

жают некоторые режимы изменения мембранного потенциала нейрона, например регулярную импульсную активность и пачечные разряды с различным числом импульсов в пачке, а также хаотические колебания [2]. В данной работе исследуется динамика такой системы в ответ на периодическую импульсную стимуляцию. Также получены результаты при использовании в качестве стимулов сигналов от аналогичной модели, посредством однонаправленной связи.

Рассмотрено влияние параметров периодического стимула на динамику нейроноподобного генератора, когда он может иметь режим квазигармонической активности и пачечный режим с одним импульсом в пачке. Получена зависимость соотношений периодов на входе и выходе нейрона от амплитуды стимула. Отмечено, что при изменении амплитуды стимуляции существуют диапазоны амплитуд, в которых возможно получение откликов с некоторым ограниченным соотношением частот. При этом при малых периодах внешнего воздействия происходит более плавный переход к синхронизации с другим соотношением частот с ростом амплитуды стимуляции, при больших – более резкий.

Результаты исследования возбудимости модели при стимуляции импульсами другого нейроноподобного генератора через синаптическую связь схожи с поведением в ответ на прямоугольные импульсы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-31-60080 мол\_a\_дк), а также при поддержке гранта Президента МК-2726.2017.2.

#### Литература

1. Мищенко М.А. Нейроноподобная модель на основе системы фазовой автоподстройки частоты // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. Т. 5(3) С. 279.4.
2. Мищенко М.А., Шалфеев В.Д., Матросов В.В. Нейроноподобная динамика в системе фазовой синхронизации // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2012. Т. 20, № 4. С. 122–130.

### ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ КВАЗИРЕЗОНАНСНОЕ УСИЛЕНИЕ АЛЬФВЕНОВСКИХ ВОЛН В ТЕПЛОЫДЕЛЯЮЩЕЙ ИЗОЭНТРОПИЧЕСКИ НЕУСТОЙЧИВОЙ ПЛАЗМЕ

*Д.И. Завершинский, Н.Е. Молевич, С.А. Белов*

Самарский национальный исследовательский университет  
Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН  
dimanzav@mail.ru

Нелинейный анализ волн в полностью ионизованной плазме показал, что мощные альфвеновские волны могут распадаться на магнитоакустические и альфвеновские волны с меньшими частотами. Согласно [1] после-

дующее затухание быстрых МА-волн может приводить к нагреву солнечной короны. Более того, альфвеновские волны с энергией достаточной для ускорения солнечного ветра и нагрева короны до ее сверхвысоких температур недавно были зарегистрированы [2]. Однако механизм возникновения альфвеновских волн с наблюдаемыми энергиями остается мало изученным.

С другой стороны, аналитическими и численными методами было показано, что изоэнтропическая неустойчивость среды [3], вызванная процессами нагрева и охлаждения среды, может приводить к усилению акустических и магнитоакустических волн [4–7]. Более того, в среде возможна генерация ударноволновых автосолиitonных импульсов [4–7]. Параметрическое взаимодействие между неустойчивыми магнитоакустическими волнами и устойчивыми альфвеновскими в неустойчивых областях солнечной атмосферы может быть возможным механизмом возникновения мощных альфвеновских волн. Ранее авторами было показано, что в изоэнтропически неустойчивой среде может реализовываться биэкспоненциальное усиление альфвеновских волн как следствие резонансного трехволнового взаимодействия с акустическими волнами [8, 9].

Цель данной работы – изучение квазирезонансного параметрического взаимодействия между акустической волной и двумя альфвеновскими волнами в тепловыделяющей изоэнтропически неустойчивой среде. С помощью полной системы МГД-уравнений, описывающей процессы в тепловыделяющей полностью ионизованной плазме, в слабо нелинейном приближении была получена система укороченных уравнений, описывающая параметрический распад акустической волны. Для полученной системы в приближении длинных волн и заданного поля были найдены аналитические решения, описывающие взаимодействие альфвеновских волн с неустойчивой акустической волной.

Полученные решения сильно зависят от отстройки по частоте. Когда отстройка равна нулю, то усиление альфвеновских волн является резонансным, беспороговым и биэкспоненциальным. С ростом отстройки по частоте параметрическое усиление альфвеновских волн становится медленнее. При дальнейшем увеличении перед биэкспоненциальным усилением наблюдается модуляция. И при дальнейшем росте отстройки становится возможна только модуляция альфвеновских волн.

Причина модуляции, наблюдаемой до усиления, – существование порога для амплитуды. На начальном этапе взаимодействия акустическая волна не имеет достаточной амплитуды для эффективной перекачки энергии. Однако позднее, когда амплитуда акустической волны из-за изоэнтропической неустойчивости превосходит пороговое значение, появляется усиление альфвеновских волн.

Случай модуляции альфвеновских волн указывает на существование пороговой отстройки по частоте. Когда отстройка по частоте больше пороговой отстройки, перенос энергии из акустической волны прекращается.

Данная работа частично поддержана Министерством образования и науки РФ, проект 3.1158.2017, и грантом РФФИ 16-41-630591 p\_a, 17-42-630224 p\_a.

### Литература

1. *Wentzel, D.G.* Coronal heating by Alfvén waves // *Solar Physics*. 1974. V. 39. P. 129–140.
2. *McIntosh, S.W.* Alfvénic waves with sufficient energy to power the quiet solar corona and fast solar wind / S.W. McIntosh, B. de Pontieu, M. Carlsson, V. Hansteen, P. Boerner, M. Goossens // *Nature*. 2011. V. 475, Iss. 7359. P. 477–480.
3. *Field, G.B.* Thermal instability // *Astrophysical Journal*. 1965. V. 142. P. 531–567.
4. *Molevich, N.E.* Traveling self-sustained structures in interstellar clouds with the isentropic instability / N.E. Molevich, D.I. Zavershinskiy, R.N. Galimov, V.G. Makaryan // *Astrophys. Space Sci.* 2011. V. 334. P. 35.
5. *Zavershinskiy, D.I.* A magnetoacoustic autowave pulse in a heat-releasing ionized gaseous medium / D.I. Zavershinskiy, N.E. Molevich // *Tech. Phys. Lett.* 2013. V. 39. P. 676.
6. *Molevich, N.E.* Investigation of the MHD-wave dynamics in thermally unstable plasma / N.E. Molevich, D.I. Zavershinskiy, D.S. Ryashchikov // *Magnetohydrodynamics*. 2016. V. 52. P. 191.
7. *Molevich, N.E.* Influence of thermal conduction on properties of MHD waves in thermally unstable plasma / N.E. Molevich, D.I. Zavershinskiy, D.S. Ryashchikov // *Magnetohydrodynamics*. 2016. V. 52. P. 199.
8. *Zavershinskiy, D. I.* Parametrical amplification of Alfvén waves in heat-releasing ionized media with magnetoacoustic instability / D.I. Zavershinskiy, N.E. Molevich // *Astrophysics and Space Science*. 2015. V. 358, Iss. 1.
9. *Zavershinskiy, D.I.* Alfvén wave amplification as a result of nonlinear interaction with a magnetoacoustic wave in an acoustically active conducting medium / D.I. Zavershinskiy, N.E. Molevich // *Tech. Phys. Lett.* 2014. V. 40. P. 701.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВИСТОВЫХ ВОЛН ВДОЛЬ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В УСЛОВИЯХ ВНЕШНЕЙ ИОНОСФЕРЫ

*И.Ю. Зудин, Н.А. Айдакина, М.Е. Гуцин, Т.М. Заборонкова, С.В. Коробков*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
zudiniy@appl.sci-nnov.ru

Активные эксперименты по воздействию на ионосферу излучением коротковолновых передатчиков «Сура» и HAARP показали, что в результате высокочастотного нагрева модифицируется весь столб ионосферной плазмы. Измерения, выполненные с помощью спутника DEMETER, позволили установить, что модификация плазмы способствует проникновению излучения свистового диапазона частот сквозь ионосферу, а также приводит к значительному уширению его пространственного спектра [1–3].

Непосредственные измерения параметров плазмы на высотах верхней ионосферы показали, что внутри возмущенной области существуют круп-

номасштабные (характерный размер 100 км) и среднемасштабные (порядка 10 км) возмущения. Косвенные измерения демонстрируют возбуждение мелкомасштабных возмущений (10–1000 м), которые, по мнению авторов работы [3], ответственны за уширение пространственного спектра волн свистового диапазона и способствуют их распространению сквозь ионосферную плазму.

В численном эксперименте, описанном в работе [4], был продемонстрирован эффект волноводного распространения свистовых волн вдоль систем мелкомасштабных неоднородностей. Условия, при которых выполнялось моделирование [4], соответствуют лабораторному эксперименту. В основе настоящей работы лежат вычисления, сделанные для параметров невозмущенной плазмы и мелкомасштабных неоднородностей, характерных для реальных натуральных экспериментов. В докладе производится сопоставление результатов экспериментов с результатами расчетов, а также дается интерпретация полученных результатов на основании точных решений.

### Литература

1. Фролов, В.Л. Создание дактов плотности при нагреве ионосферы земли мощным коротковолновым радиоизлучением / В.Л. Фролов, В.О. Рапопорт, Г.П. Комраков, А.С. Белов, Г.А. Марков, Ж.Л. Рош, М. Парро, Е.В. Мишин // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 88, № 12. С. 908–913.

2. Фролов, В.Л. Тонкая структура дактов плотности, формирующихся при активном радиочастотном воздействии на лабораторную и космическую плазмы / В.Л. Фролов, В.О. Рапопорт, Е.А. Шорохова, Н.А. Айдакина, М.Е. Гушин, И.Ю. Зудин, С.В. Коробков, А.В. Костров, М. Парро, Ж.-Л. Рош // Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 101, № 5. С. 342–346.

3. Rapoport, V.O. VLF electromagnetic field structures in ionosphere disturbed by Sura RF heating facility / V.O. Rapoport, V.L. Frolov, S.V. Polyakov, G.P. Komrakov, N.A. Ryzhov, G.A. Markov, A.S. Belov, M. Parrot, and J.-L. Rauch // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. A10322.

4. Зудин И.Ю. Численное моделирование волн свистового диапазона в замагниченной плазме с мелкомасштабными неоднородностями / И.Ю. Зудин, Н.А. Айдакина, М.Е. Гушин, Т.М. Заборонкова, С.В. Коробков, А.В. Костров // Физика плазмы. 2017. Т. 43, № 12. С. 1018–1028.

## КОМПРЕССОР СУБПЕТАВАТТНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В КОМПЛЕКСЕ PEARL

А.С. Зуев<sup>1</sup>, А.А. Шайкин<sup>1</sup>, И.В. Яковлев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

<sup>2</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

В ИПФ РАН (Институт прикладной физики Российской академии наук) создан лазерный комплекс PEARL, работающий на основе метода ОРСПА

(Optical Parametric Chirped Pulse Amplification) [1]. Особенностью нашей схемы до недавнего времени была инжекция в первый параметрический каскад холостого излучения с центральной длиной волны 1,25 мкм, генерируемого фемтосекундным лазером на Cr:Forsterite. В процессе трехволнового взаимодействия в первом каскаде параметрического усиления рождался новый импульс с центральной длиной волны 911 нм, который усиливался в следующих параметрических каскадах и сжимался в четырехрешеточном компрессоре [2].

Был предложен и проведен апгрейд [3] стартовой части лазерного комплекса PEARL. В рамках апгрейда генератор на Cr:Forsterite был заменен генератором на Ti:Sapphire, излучающим широкополосный импульс с центральной длиной волны 910 нм. Теперь в первый параметрический каскад инжектируется сигнальное излучение, которое усиливается во всех параметрических каскадах и после сжимается в компрессоре. Для выполнения условия фазового согласования при сжатии и растяжении импульса был создан новый стретчер взамен старого призмочно-решеточного стретчера.

Для сжатия излучения использовался компрессор с четырьмя решетками с плотностью штрихов 1200 штр/мм производства фирмы Hologra. Размер решеток позволяет пропускать через компрессор пучки диаметром 18 см. Была проведена процедура настройки компрессора [4] с созданным стретчером с триплетом Оффнера, которая включала в себя настройку распространения излучения через компрессор, настройку угла наклона и вертикальности штрихов дифракционных решеток, настройку параллельности плоскостей решеток в первой и второй парах решеток. При настройке компрессора особое внимание уделялось контролю спектра излучения на входе и на выходе, компенсации горизонтального и вертикального угловых чирпов импульсов на выходе системы и минимизации длительности лазерных импульсов. Помимо этого с помощью системы FROG была измерена остаточная спектральная фаза.

На выходе генератора измеренная с помощью автокоррелятора длительность сжатого лазерного импульса равнялась 30 фс. В стретчере импульс был растянут в 10000 раз, его длительность составила 0,6 нс. После стретчера излучение направляли по всей трассе лазерного комплекса PEARL в компрессор, импульс до 43 фс удалось сжать. Учитывая стойкость дифракционных решеток 0,2 Дж/см<sup>2</sup>, данный компрессор способен сжать фемтосекундный импульс до мощности более 1 ПВт.

Апгрейд стартовой части комплекса и настройка компрессора позволили увеличить стабильность и надежность системы, а благодаря возможности сжатия импульсов с частотой следования 80 МГц была облегчена настройка системы «стретчер – компрессор» и элементов диагностики характеристик лазерного импульса. Кроме этого, широкая полоса генерации фемтосекундного лазера на Ti:Sapphire позволяет получить меньшую дли-

тельность излучения на выходе компрессора, что увеличило потенциальную пиковую мощность импульса до 1 ПВт и выше.

### Литература

1. *Lozhkarev, V.V.* Compact 0.56 Petawatt laser system based on optical parametric chirped pulse amplification in KD\*P crystals / G.I. Freidman, V.N. Ginzburg, E.V. Katin, E.A. Khazanov, A.V. Kirsanov, G.A. Luchinin, A.N. Mal'shakov, M.A. Martyanov, O.V. Palashov, A.K. Poteomkin, A.M. Sergeev, A.A. Shaykin, I.V. Yakovlev // *Laser Phys. Lett.* 2007. V. 4. P. 421.

2. *Treasy, E.B.* Optical pulse compression with diffraction gratings // *IEEE Journal of Quantum Electronics.* 1969. V. 5. P. 454–458.

3. *Зуев, А.С.* Стретчер Оффнера для лазерного комплекса PEARL / А.С. Зуев, В.Н. Гинзбург, А.А. Кочетков, А.А. Шайкин, И.В. Яковлев // *Квантовая электроника.* 2017. Т. 47, вып. 8. С. 705–710.

4. *Яковлев, И.В.* Особенности настройки компрессора чирпированных импульсов // *Квантовая электроника.* 2012. Т. 42, вып. 11. С. 996–1001.

## ЧАСТОТНАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ КОНТУРОВ РЕГУЛЯЦИИ КРОВООБРАЩЕНИЯ В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ

*Ю.М. Ишбулатов, А.С. Караваев*

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники  
имени В.А. Котельникова РАН  
ishbulatov95@mail.ru

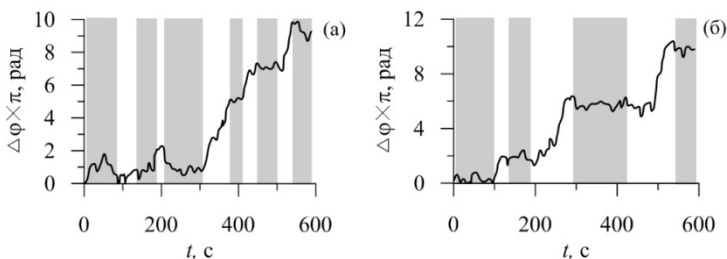
Экспериментальное исследование живых объектов связано с рядом принципиально неразрешимых проблем. Дизайн экспериментов ограничен риском для здоровья испытуемого; измерения часто невозможны из-за технических ограничений; полученные экспериментальные сигналы, как правило, сильно зашумленные и нестационарные. Все это затрудняет обработку экспериментальных данных и осложняет интерпретацию результатов. Математическое моделирование лишено данных проблем и может быть использовано для фундаментального исследования биологических объектов, а также апробирования методов медицинской диагностики и методов анализа экспериментальных данных [1].

Важным биологическим объектом является система вегетативной регуляции артериального давления и частоты сердечных сокращений. Данная система регуляции позволяет организму подстраиваться под изменения окружающей среды и физические нагрузки. В ряде работ результаты исследования говорят в пользу того, что системы регуляции являются автоколеба-

тельными, нелинейными контурами с запаздывающей обратной связью и сигмоидальными нелинейностями [2]. Автоколебаниями объясняют наличие выраженных 0,1 Гц ритмов в спектрах кардиоинтервалограммы и артериального давления (АД). В пользу этой теории говорят также результаты наших исследований [3], в которых наблюдалась частотная синхронизация между данными 0,1 Гц ритмами и, следовательно, самими контурами регуляции частоты сердечных сокращений (ЧСС) и АД.

На данный момент не предложено математической модели вегетативной регуляции кровообращения, которая воспроизводила бы данных эффект, несмотря на его важность для подбора типа и дозировки препаратов при терапии заболеваний сердечно-сосудистой системы (ССС). Поэтому в данной работе мы предлагаем модель ССС, основанную на работах [2, 4, 5] и ориентированную на моделирование индивидуальной и коллективной динамики нелинейных, автоколебательных контуров вегетативной регуляции кровообращения, формирование артериального давления и variability сердечного ритма. Модель реализует сердце в виде синусного узла, представленного integrate-and-fire моделью, а также учитывает влияние дыхания на процессы регуляции.

На рисунке 1 представлен пример диагностики участков фазовой синхронизации по разностям мгновенных фаз исследуемых контуров регуляции, рассчитанных по экспериментальным сигналам и сигналам модели. Видно, что модель позволяет воспроизводить качественный характер динамики разностей мгновенных фаз со спонтанно чередующимися интервалами частотной синхронизации и несинхронного поведения. Полученные результаты позволяют надеяться на адекватность структуры модели, а также на возможность использования ее для развития методов медицинской диагностики и анализа экспериментальных данных, а также фундаментального изучения ССС.



**Рис. 1.** Разность мгновенных фаз составляющих LF-частотного диапазона (0,05–0,15 Гц) сигналов variability сердечного ритма и давления (фотоплетизмограммы). Участки синхронизации показаны серым цветом. *a* – разность фаз, полученная по модельным данным; *b* – разность фаз, полученная по экспериментальным данным

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 14-12-00291).

## Литература

1. *Безручко Б.П.* Математическое моделирование и хаотические временные ряды / Б.П. Безручко, Д.А. Смирнов. – Саратов. : Колледж, 2005. – 320 с.
2. *Ringwood J.* Dynamic relationship between sympathetic nerve activity and renal blood flow: a frequency domain approach / J. Ringwood, S. Malpas // *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* 2001. V. 280, № 4. P. R1105–R1115.
3. *Киселев А.Р.* Внутренняя синхронизация основных 0,1Гц-частотных ритмов в системе вегетативного управления сердечно-сосудистой системой / А.Р. Киселев, А.Б. Беспятов, О.М. Кожирина, В.И. Гриднев, В.И. Пономаренко, М.Д. Прохоров, П.Я. Довгалецкий // *Физиология человека.* 2007. Т. 33, вып. 2. С. 69–75.
4. *Karavaev A.S.* Model of human cardiovascular system with a loop of autonomic regulation of the mean arterial pressure / A.S. Karavaev, J.M. Ishbulatov, V.I. Ponomarenko, M.D. Prokhorov, V.I. Gridnev, B.P. Bezruchko, A.R. Kiselev // *J. Am. Soc. Hypertens.* 2016. V. 10, № 3. P. 235–243.
5. *Seidel H.* Bifurcations in a nonlinear model of the baroreceptor-cardiac reflex / H. Seidel, H. Herzel // *Physica D.* 1998. V. 115. P. 145–160.

## СМЕШАННАЯ ДИНАМИКА В ОБРАТИМЫХ СИСТЕМАХ

*А.О. Казаков*

НИУ Высшая школа экономики, Нижний Новгород  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
kazakovdz@yandex.ru

В настоящий момент считается, что наряду с консервативным (гамилтоновым) хаосом, характерным для консервативных неинтегрируемых систем, и странными аттракторами, присущими диссипативным системам, существует третий тип хаоса – смешанная динамика. Если для консервативного хаоса аттрактор совпадает с репеллером ( $\mathcal{A} = \mathcal{B}$ ), для диссипативного хаоса аттрактор не пересекается с репеллером ( $\mathcal{A} \cap \mathcal{B} = \emptyset$ ), то для смешанной динамики аттрактор пересекается с репеллером, но не совпадает с ним ( $\mathcal{A} \cap \mathcal{R} \neq \emptyset, \mathcal{A} \neq \mathcal{R}$ ).

В докладе будет объяснено, как аттракторы могут пересекаться с репеллерами, будут описаны возможные сценарии возникновения такого явления в обратимых системах. В качестве примеров задач, в которых смешанная динамика является типичным явлением, будут рассматриваться такие задачи неголономной механики (резиновый волчок Чаплыгина на плоскости, кельтский камень и волчок Суслова), а также задача о движении двух точечных вихрей, находящихся под воздействием волнового возмущения.

Работа выполнена при поддержке РФФ, проект № 17-11-01041.

# ДВУХТОЧЕЧНЫЕ КОРРЕЛЯТОРЫ ЗАРЯЖЕННЫХ ФЕРМИОНОВ В ПОСТОЯННОМ ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

*И.В. Карabanов, А.Я. Пархоменко*

Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова  
karabanovilya@rambler.ru

Корреляторы – вакуумные средние от упорядоченного по времени произведения двух или более фермионных токов – естественным образом появляются в квантовой теории поля при вычислении петлевых диаграмм. Поляризационный оператор фотона в вакууме представляет собой тензор второго ранга, и в общем случае тензорная структура задается метрическим тензором и произведением двух четырехмерных векторов импульса фотона. Однако, если виртуальный заряженный фермион находится в фоновом электромагнитном поле, набор возможных тензорных структур, по которым раскладывается тензор второго ранга, увеличивается в силу явной анизотропии внешней активной среды и наличия дополнительных тензорных структур. Изучение свойств бозонов с другими значениями спина и четности требует аналогичного рассмотрения корреляторов, построенных из фермионных токов с квантовыми числами изучаемых частиц. Диагональные и недиагональные корреляторы двух фермионных токов с квантовыми числами скаляра, псевдоскаляра, вектора и аксиального вектора в постоянном однородном магнитном поле были рассмотрены ранее [1], однако тензорный фермионный ток, который реже встречается в физических приложениях, там не рассматривался.

В докладе представлены предварительные результаты вычислений двухточечных корреляторов тензорного фермионного тока как с указанными выше токами, так и с самим собой. Для внешнего электромагнитного поля, которое считается постоянным и однородным, выбраны две допустимые конфигурации – скрещенное поле и чисто магнитное поле. Правильность вычислений проверяется предельным переходом от магнитного поля к скрещенному, так как в случае скрещенного электромагнитного поля чисто полевой инвариант обращается в ноль. Вычисления проводятся в формализме собственного времени Фока – Швингера, который позволяет свести пространственно-временные интегралы, возникающие при построении корреляторов, к обобщенным гауссовым, которые легко берутся.

## Литература

1. Боровков М.Ю. Однопетлевая амплитуда перехода  $j \rightarrow f \bar{f} \rightarrow j'$  во внешнем электромагнитном поле / М.Ю. Боровков, А.В. Кузнецов, Н.В. Михеев // Ядер. физика. 1999. Т. 62, вып. 9. С. 1714–1722.

# ВЗАИМОСВЯЗЬ УСКОРЕНИЙ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ ДНА И ВАРИАЦИЙ ПРИДОННОГО ДАВЛЕНИЯ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ ГЛУБОКОВОДНЫМИ СТАНЦИЯМИ DONET ВО ВРЕМЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ТОХОКУ 2011 ГОДА

*В.А. Карпов<sup>1</sup>, М.А. Носов<sup>1</sup>, Х. Матсумото<sup>2</sup>, Й. Канаэда<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

<sup>2</sup>Японское агентство по морским и наземным исследованиям и технологиям (JAMSTEC), Натсусима, Япония

<sup>3</sup>Институт образования, исследований, и кооперации регионов для кризисного менеджмента, Университет Кагава, Такаматсу, Япония  
va.karpov@physics.msu.ru

В XXI веке донные датчики давления приобрели известность как надежное средство регистрации волн цунами. Серьезным недостатком этой технологии является зашумленность сигнала проявлениями сейсмических и гидроакустических волн. Вдали от источника цунамигенного землетрясения сигнал цунами и шумовой сигнал – проявления сейсмических и гидроакустических волн – разделены во времени. Но в ближайшей зоне сигнал цунами практически неразличим на фоне шума. Для надежного выделения сигнала цунами необходимо иметь четкие представления о природе и механизмах формирования сигналов, регистрируемых донным датчиком давления. Цель настоящей работы состоит в развитии этих представлений на основе одновременной регистрации движений дна и придонного давления, которые были выполнены во время землетрясения Тохоку 2011 года сетью глубоководных станций DONET. Каждая станция оборудована трехкомпонентными сейсмометрами (акселерометрами) и датчиками давления, которые расположены на расстоянии не более 10 м.

В работах [1–4] было высказано предположение, что характер отклика сжимаемого водного слоя на колебания дна с частотой  $f$  определяется ее соотношением с парой критических частот  $f_g = 0,3\sqrt{g/H}$  и  $f_{ac} = c/4H$ , где  $H$  – глубина океана,  $g$  – ускорение силы тяжести,  $c$  – скорость звука в воде. При  $f < f_g$  возбуждаются гравитационные волны, при  $f > f_{ac}$  – гидроакустические волны, а при  $f_g < f < f_{ac}$  никакие волны не возникают, в этом случае водный слой совершает вынужденные колебания. В диапазоне вынужденных колебаний вариации давления и вертикальная компонента ускорения движения дна должны быть связаны в соответствии со вторым законом Ньютона формулой  $p = \rho H a_z$ , где  $\rho$  – плотность воды. Выполненный нами кросс-спектральный анализ данных DONET подтверждает наличие такой связи, тем самым доказывая факт существования диапазона вынужденных колебаний. Однако для некоторых станций квадрат когерентности незначительно отличался от 1, кроме того наблюдался незначительный сдвиг фаз между сигналами вертикального ускорения и давления. Мы выдвинули гипотезу, что эти отклонения связаны с вкладом в вариации давления гори-

зонтальных движений близлежащих подводных склонов. Выполненные нами теоретические оценки показывают, что при удалении от склона вариации давления должны затухать экспоненциально и на расстоянии 2–3 глубин океана этот вклад должен быть фактически неразличимым.

Установлено, что обработка записей DONET с учетом горизонтальных компонент ускорений позволяет либо полностью устранить, либо существенно уменьшить дефекты идеальности кросс-спектра в диапазоне вынужденных колебаний, что подтверждает выдвинутую гипотезу.

### Литература

1. *Bolshakova, A.V.* Hydroacoustic effects in the 2003 Tokachi-oki tsunami source / A.V. Bolshakova, S. Inoue, S.V. Kolesov, H. Matsumoto, M.A. Nosov, T. Ohmachi // Russian Journal of Earth Sciences. 2011. V. 12, № 2. P. 1–14.
2. *Hiroyuki, M.* Analysis of pressure and acceleration signals from the 2011 Tohoku earthquake observed by the DONET seafloor network / M. Hiroyuki, M.A. Nosov, S.V. Kolesov, K. Yoshiyuki // Journal of Disaster Research. 2017. V. 12, № 1. P. 163–175.
3. *Levin, B.* Physics of tsunamis / B. Levin, M. Nosov. – London : Springer, 2016. – 388 p.
4. *Nosov, M.A.* Optimal Initial Conditions for Simulation of Seismotectonic Tsunamis / M.A. Nosov, S.V. Kolesov // Pure and Applied Geophysics. 2011. V. 168, № 6. P 1223–1237.

## КРОСС-ЧАСТОТНАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ В НЕЙРОМОРФНЫХ АНСАМБЛЯХ ВИХРЕВЫХ СПИНТРОННЫХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ

*О.С. Каткова, А.Р. Сафин*

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва  
arnellemorte@gmail.com

Одним из широко встречающихся способов построения искусственных нейронных сетей является осцилляторный [1]. Такие сети являются наиболее приближенными к мозговым, при этом основными структурными единицами их являются осцилляторы. Перспективными являются искусственные нейроморфные осцилляторы, выполненные на основе спинтроники [2], так называемые вихревые спинтронные осцилляторы (ВСО). Объединение в нейроморфную сеть при этом может осуществляться за счет разных механизмов связи. Базовым механизмом связи на данный момент является магнито-дипольная и спин-волновая типы связи, при которых взаимодействие между ВСО осуществляется за счет локальных сил, т.е. зависящих от расстояния между осцилляторами. Важным условием работы осцилляторной нейронной сети является способность к синхронизации ансамблей нейронов [3] как на одной частоте, так и на различных дробно-кратных частотах (кросс-частотах). Поэтому чрезвычайно важной и актуальной является

задача исследования кросс-частотной синхронизации ансамблей ВСО с различной топологией.

В данной работе исследовались иерархические ансамбли взаимосвязанных ВСО на предмет кросс-частотной синхронизации нескольких базовых ритмов. Производился переход от исходных уравнений для магнитной динамики намагниченностей к нормальным координатам, и далее записывались укороченные уравнения для различных нормальных частот. В качестве иерархических сетей были выбраны древовидные сети с количеством ветвей 2 и 3. Проведенные исследования дают возможность определить параметры ВСО (величину магнитного поля, рабочих токов), при которых достигается режим фазовой синхронизации нейронов на кросс-частотах.

Работа выполнена при финансовой поддержке базовой части госзадания РФ № 8.8109.2017/БЧ.

### Литература

1. *Борисюк, Г.Н.* Осцилляторные нейронные сети. Математические результаты и приложения / Г.Н. Борисюк, Р.М. Борисюк, Я.Б. Казанович, Т.Б. Лузянина, Т.С. Турова, Г.С. Цымбалюк // Математическое моделирование. 1992. Т. 4, № 1. С. 3–43.
2. *Locatelli, N.* Spin-torque building blocks / N. Locatelli, V. Cros, J. Grollier // Nat. Mat. 2014. V. 13. P. 11–20.
3. *Dressler, F.* A Survey on Bio-Inspired Networking / F. Dressler, O. Akan // Comp. Net. 2010. V. 54. P. 881–900.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВСТРЕЧНЫХ ВОЛН НА ПОВЕРХНОСТИ ГЛУБОКОЙ ВОДЫ

*Д.И. Качулин<sup>1</sup>, А.И. Дьяченко<sup>1,2</sup>, В.Е. Захаров<sup>1,2,3,4</sup>*

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет

<sup>2</sup>Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, Черноголовка

<sup>3</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева, Москва

<sup>4</sup>Аризонский университет, Тусон, Аризона, США  
d.kachulin@gmail.com

Рассматривается динамика слабонелинейных гравитационных поверхностных волн на глубокой воде. Используя разложение гамильтониана до четвертого порядка по степеням его естественных переменных – профиля свободной поверхности  $\eta(x, t)$  и потенциала на ней  $\psi(x, t)$ , мы применяем каноническое преобразование к новым переменным  $c^+(x, t)$ ,  $c^-(x, t)$ , позволяющее удалить все нерезонансные слагаемые из гамильтониана и существенно упростить члены четвертого порядка. Это преобразование явно использует факт исчезновения коэффициента четырехволновых взаимодействий в условиях резонанса для гравитационных волн для двумерной потен-

циальной жидкости. В новых переменных динамика жидкости описывается системой двух уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial c^+}{\partial t} + i\hat{\omega}c^+ = \partial_x^+ \left[ i \left( |c^+|^2 - |c^-|^2 \right) c_x^+ + c^+ \hat{k} \left( |c^+|^2 - |c^-|^2 \right) - \right. \\ \left. -ic^+c^-c_x^{*-} - c^{*-} \hat{k}(c^+c^-) \right], \\ \frac{\partial c^-}{\partial t} + i\hat{\omega}c^- = \partial_x^- \left[ i \left( |c^-|^2 - |c^+|^2 \right) c_x^- - c^- \hat{k} \left( |c^-|^2 - |c^+|^2 \right) - \right. \\ \left. -ic^-c^+c_x^{+*} + c^{+*} \hat{k}(c^+c^-) \right]. \end{cases}$$

Здесь  $\hat{\omega}, \hat{k}$  – операторы умножения на  $\sqrt{gk}$  и  $|k|$  в фурье-пространстве, \* означает комплексное сопряжение, нижний индекс  $x$  – производную по переменной  $x$ , операторы дифференцирования  $\partial_x^+$  и  $\partial_x^-$  есть  $ik\theta(k)$  и  $ik\theta(-k)$ , где  $\theta(k)$  – функция Хевисайда, а  $c^+$  и  $c^-$  – функции, аналитические в верхней и нижней полуплоскости соответственно. Профиль поверхности  $\eta(x, t)$  и потенциал  $\psi(x, t)$  могут быть восстановлены с помощью канонического преобразования.

Из данной системы уравнений введением огибающих  $c^+ = C^+(x, t)e^{-i\omega_0 t + ik_0 x}$  и  $c^- = C^-(x, t)e^{-i\omega_0 t + ik_0 x}$  для волн с волновым числом несущей  $k_0$  и частотой  $\omega_0$  в приближении слабых модуляций может быть получена следующая система уравнений на огибающие  $C^+$  и  $C^-$ :

$$\begin{cases} \frac{\partial C^+}{\partial t} + v_g C^+ + i \frac{\omega_0}{8k_0^2} C_{xx}^+ + ik_0^2 \left( |C^+|^2 - 2|C^-|^2 \right) C^+ = 0, \\ \frac{\partial C^-}{\partial t} - v_g C^- + i \frac{\omega_0}{8k_0^2} C_{xx}^- + ik_0^2 \left( |C^-|^2 - 2|C^+|^2 \right) C^- = 0. \end{cases}$$

Здесь  $v_g = \omega_0 / (2k_0)$  – групповая скорость. Кроме того, исходная система уравнений имеет простое аналитическое решение:

$$\begin{aligned} c^+ &= A e^{-ik_A x - i\omega_A t}, \\ c^- &= B e^{ik_B x - i\omega_B t}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \omega_A &= \omega_{k_A} + k_A^2 \left( |A|^2 - |B|^2 \right) - k_A k_B |B|^2 + k_A |k_A - k_B| |B|^2, \\ \omega_B &= \omega_{k_B} + k_B^2 \left( |B|^2 - |A|^2 \right) - k_A k_B |A|^2 + k_B |k_A - k_B| |A|^2. \end{aligned}$$

При  $|A|^2 = |B|^2$ ,  $k_A = k_B$  это решение – стоячая волна.

С помощью разработанного численного алгоритма решения системы уравнений проведено моделирование динамики одномерных гравитационных волн на глубокой воде.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ («Волновая турбулентность: теория, математическое моделирование, эксперимент») № 14-22-00174.

## ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖКИ НА КОЛЕБАНИЯ КАПЛИ В НЕОДНОРОДНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

*М.А. Кашина<sup>1</sup>, А.А. Алабужев<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет

<sup>2</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь  
alabuzhev@mail.ru, ya.kashina-marina@yandex.ru

Изучению движения и устойчивости капли жидкости в электрическом поле уделяется много внимания [1–3]. Одним из важных факторов, влияющих на поведение капли и способы управления, является электросмачивание (electrowetting, EW) – влияние электрического поля на смачивание капель твердой подложки [3]. Условие Юнга – Липмана, которое используется в большинстве работ, плохо описывает отклонение краевого угла в сравнении с экспериментальными данными. Авторами данной работы было предложено другое граничное условие [4], использование которого показывает хорошее согласие с экспериментом.

В данной работе исследуются вынужденные колебания капли несжимаемой жидкости с плотностью  $\rho_i^*$ , окруженной другой жидкостью с плотностью  $\rho_e^*$ . Вся система ограничена двумя параллельными твердыми поверхностями, расстояние между которыми равно  $h^*$ . Сосуд замкнут на бесконечности. В равновесии капля имеет форму круглого цилиндра радиусом  $R_0^*$ ; равновесный краевой угол между боковой поверхностью капли и твердой поверхностью прямой. На систему действует переменное электрическое поле с амплитудой  $A^*$  и частотой  $\omega^*$ . Это поле играет роль внешней силы, которая заставляет двигаться контактную линию. В цилиндрической системе координат боковую поверхность капли можно описать функцией  $r^* = R_0^* + \zeta^*(z^*, \alpha, t^*)$ , где  $\zeta^*(z^*, \alpha, t^*)$  – функция, описывающая отклонение боковой поверхности капли от равновесного положения.

Движение линии контакта описывается граничным условием [5] (в главном порядке разложения по малой амплитуде вибраций)

$$z = \mp 1/2, r = 1: \quad \zeta_t = \pm \Lambda(\alpha)(\zeta_z + A \cos 2\omega t), \quad (1)$$

где  $z = z^*/h^*$ ,  $r = r^*/R_0^*$ ,  $\zeta = \zeta^*/A^*$ ,  $\Lambda = \Lambda^* b \sqrt{(\rho_e^* + \rho_i^*) R_0^* / \sigma^*}$ ,  $b = R_0^*/h^*$ ,

$\Lambda^*$  – параметр Хокинга,  $\sigma^*$  – коэффициент поверхностного натяжения.

Однородные пластины были рассмотрены в работе [4]. В качестве примера влияния неоднородности поверхности пластин выбраны две функции в условии (1):  $\Lambda(\alpha) = \lambda |\cos \alpha|$  и  $\Lambda(\alpha) = \lambda |\cos(\cos \alpha)|$ . Решение задачи представлялось в виде ряда по собственным функциям оператора Лапласа.

Данные функции возбуждают только четные азимутальные моды. Таким образом, из-за неоднородности поверхностей энергия из осесимметричной азимутальной моды передается в другие моды колебаний.

Параметр Хокинга  $\lambda$  описывает взаимодействие линии контакта с твердой поверхностью – чем больше  $\lambda$ , тем больше сила взаимодействия.  $\lambda = 0$  соответствует закрепленной линии контакта (краевой угол может меняться),  $\lambda \rightarrow \infty$  – свободной линии контакта (краевой угол постоянный). Для однородных пластин существуют «антирезонансные» частоты, при которых линия контакта неподвижна, а изменяется только краевой угол. Однако для неоднородных пластин такие частоты отсутствуют. При малых значениях параметра  $\lambda$  резонансные эффекты отсутствуют, что объясняется сильным взаимодействием линии контакта с подложкой. При больших значениях  $\lambda$  линия контакта свободно скользит по твердой поверхности, что приводит к хорошо выраженным резонансным эффектам для всех частот собственных колебаний. Кроме того, для малых и конечных значений  $\lambda$  резонансной является только осесимметричная мода, тогда как для больших значений  $\lambda$  появляются резонансы и на частотах других азимутальных мод.

### Литература

1. *Melcher J.R., Taylor G.I.* Electrohydrodynamics: A Review of the Role of Interfacial Shear Stresses // *Ann. Rev. Fluid Mech.* – 1969. – V. 1. – P. 111–146.
2. *Pelekasis N.A., Economou K., Tsamopoulos J.A.* Linear oscillations and stability of a liquid bridge in an axial electric field // *Phys. of Fluids.* – 2001. – V. 13. – P. 3564–3581.
3. *Mugele F., Baret J.-C.* Electrowetting: from basics to applications // *J. Phys.: Condens. Matter.* – 2005. – V. 17. – P. 705–774.
4. *Alabuzhev A.A., Kashina M.A.* The oscillations of cylindrical drop under the influence of a nonuniform alternating electric field // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2016. – V. 681. – Art. 012042.
5. *Кашина М.А.* Влияние неоднородности поверхности подложки на колебания цилиндрической капли в переменном электрическом поле // *Неравновесные процессы в сплошных средах : материалы межд. симп. / Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2017. – Т. 1. – С. 223–225.*

## **ВЫЯВЛЕНИЕ ПАТТЕРНОВ ВООБРАЖАЕМЫХ ДВИЖЕНИЙ НА ЗАПИСИ ЭЭГ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

*Д.В. Кирсанов, Е.Н. Пицик*

Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.  
dankirsdot@gmail.com

Наиболее распространенным способом исследования электрической активности головного мозга, способным дать исчерпывающую информацию о психологическом и физиологическом состоянии человека, является электроэнцефалография [1]. Выявление на записи ЭЭГ характерных паттернов, отражающих конкретные физиологические явления, является важной задачей нейродинамики и нейрофизиологии, имеющей, кроме того, принципиальную значимость как для изучения повседневных процессов, таких как сон [2], так и для исследования механизмов различных заболеваний, например эпилепсии [3]. В данной работе предлагаются методы классификации ЭЭГ-паттернов, соответствующих различным типам воображаемых движений, на основе технологий машинного обучения, а также рассматривается перспектива применения этих методов в разработке системы управления экзоскелетом.

Распознавание воображаемых движений по данным ЭЭГ – актуальная задача, находящаяся на стыке медицины и нейронауки. Решение этой задачи может найти применение, например, для реабилитации людей с ограниченными возможностями с помощью ортезов и протезов, для проектирования роботов, систем управления ими и т.д. При этом одним из наиболее перспективных методов распознавания представляется классификация данных с помощью искусственных нейронных сетей, которые получили широкое распространение в области проектирования интерфейсов «мозг – компьютер» [4–6]. В данном исследовании представлены сравнения результатов работы метода опорных векторов и многослойного персептрона.

Метод опорных векторов (SVM – support vector machine) – набор алгоритмов машинного обучения, способный осуществлять достаточно эффективную классификацию данных. Суть данного метода заключается в переводе классифицируемых объектов (векторов) в пространство высокой размерности, а затем поиск гиперплоскости, разделяющей классы объектов. Минимизация ошибки осуществляется за счет построения двух параллельных гиперплоскостей по обе стороны от разделяющей гиперплоскости и увеличения расстояния между ними: чем больше это расстояние, тем меньше ошибка классификации. Таким образом, точность алгоритма напрямую зависит от выбора разделяющей гиперплоскости.

Второй рассматриваемой моделью является многослойный персептрон (MLP – multilayer perceptron) – нейронная сеть прямого распространения. В общем случае многослойный персептрон состоит из одного входного

слоя, состоящего из входных нейронов, одного выходного слоя, выводящего результат работы сети, и одного или нескольких скрытых слоев с вычислительными нейронами. Обучение нейросети производится по алгоритму обратного распространения ошибки: ответ нейросети сравнивается с ожидаемым результатом, после чего алгоритм обучения изменяет весовые коэффициенты сети таким образом, чтобы минимизировать ошибку на следующем этапе обучения.

В данной работе использовался персептрон с двумя скрытыми слоями, с гиперболической и логистической функциями активации соответственно. Обучение производилось на данных 32-канальной записи ЭЭГ. Данные записывались с частотой дискретизации 250 Гц в течение 3 секунд, во время которых оператор представлял себе движения правой и левой рукой. Результаты классификации представлены в таблице. Метод опорных векторов достигает точности 88,5 % в классификации воображаемых движений правой рукой и 84,5 % для левой руки, в то время как наилучший результат персептрона составляет 85,4 % для правой руки и 78,8 % для левой.

Модель	Для левой руки		Для правой руки	
	Точность	Ошибка	Точность	Ошибка
SVM	83,3%	0,36	88,5%	0,31
MLP	78,8%	0,47	85,4%	0,36

В результате исследования были получены результаты классификации ЭЭГ-паттернов, соответствующих воображаемым движениям. Даже на «сырых» данных, не подвергавшихся пре-обработке и фильтрации, был получен неплохой показатель точности классификации. Однако для применения этих алгоритмов в разработке системы управления движениями экзоскелета необходимо повышать точность прогноза, полученного в результате работы алгоритма. Достижение такого результата планируется за счет пре-обработки данных ЭЭГ с использованием эффективных методов анализа сигнала, например на основе вейвлет-преобразования.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (задания 3.861.2017/ПЧ).

### Литература

1. *Sanei, S., Chambers, J.A.* EEG signal processing. – John Wiley & Sons, 2013.
2. *Motamedi-Fakhr, S.* Signal processing techniques applied to human sleep EEG signals : A review / S. Motamedi-Fakhr, M. Moshrefi-Torbati, M. Hill, C.M. Hill, P.R. White // Biomedical Signal Processing and Control. 2014. V. 10. P. 21–33.
3. *Kumar, Y.* Epileptic seizures detection in EEG using DWT-based ApEn and artificial neural network / Y. Kumar, M.L. Dewal, R.S. Anand // Signal, Image and Video Processing. 2014. V. 8, № 7. P. 1323–1334.
4. *Balakrishnan, D.* Multilayer perceptrons for the classification of brain computer interface data / D. Balakrishnan, S. Puthusserypady // Proceedings of the IEEE 31st Annual Northeast Bioengineering Conference. 2005. P. 118–119.

5. Abdalsalam, E. Classification of Four Class Motor Imagery for Brain Computer Interface / E. Abdalsalam, M.Z. Yusoff, N. Kamel, A.S. Malik, D. Mahmoud // 9th International Conference on Robotic, Vision, Signal Processing and Power Applications. Lecture Notes in Electrical Engineering. 2016. V. 398. P. 297–305.

6. Ilyas, M.Z. Classification of EEG signals for brain-computer interface applications: Performance comparison / M.Z. Ilyas, P. Saad, M.I. Ahmad, A.R.I. Ghani // 2016 International Conference on Robotics, Automation and Sciences (ICORAS). Melaka, 2016. P. 1–4.

## **ВЛИЯНИЕ ОСАЖДЕНИЯ ПРИМЕСИ В РАМКАХ ФРАКТАЛЬНОЙ МОДЕЛИ НА ПРОКАЧКУ СМЕСИ ЧЕРЕЗ ПОРИСТУЮ СРЕДУ**

*Л.С. Клименко<sup>1</sup>, Б.С. Марышев<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

<sup>2</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет  
lyudmilaklimenko@gmail.com, bmaryshev@mail.ru

Настоящая работа посвящена изучению возникновения конвективного течения смеси в горизонтальном слое пористой среды при заданном вертикальном градиенте концентрации, в навязанном внешнем горизонтальном фильтрационном стационарном потоке при учете осаждения примеси. Система находится под действием силы тяжести. На верхней и нижней границах слоя концентрация считается заданной. Задача в аналогичной постановке, но без учета осаждения частиц и в отсутствие внешнего потока впервые была решена в [1]. Было показано, что возникающий конвективный режим представляет собой набор конвективных ячеек, ширина которых равна толщине слоя. Влияние внешнего горизонтального потока на конвективные режимы было исследовано в [2]. Было показано, что хоть наличие внешней прокачки приводит к колебательному характеру неустойчивости, но скорость внешнего потока влияет только на частоту колебаний. Длина волны критических возмущений и критическое значение числа Рейля – Дарси остаются неизменными. Учет осаждения примеси в рассматриваемой задаче был произведен в работе [3]. Были получены карты наблюдающихся режимов конвекции. Было обнаружено, что учет осаждения примеси приводит к тому, что критические значения параметров становятся зависящими от интенсивности внешнего потока. Учет влияния примеси был произведен в рамках МИМ (mobile-immobile medium) модели с линейной кинетикой сорбции [4]. Однако, как показано в работе [5], моделирование процесса осаждения примеси будет более реалистичным, если использовать фрактальную линейную модель мобильно-немобильной среды (fMIM) [6]. Такому моделированию и посвящена настоящая работа. Основной интерес представляет форма наиболее опасных возмущений и зависимость кри-

тических параметров от параметров задачи. Рассмотрено два случая внешнего фильтрационного потока: стационарный и зависящий от времени по гармоническому закону.

В случае стационарного потока получены уравнения, определяющие частоту нейтральных колебаний и критическое значение числа Релея – Дарси. Исследованы зависимости критических параметров от параметров осаждения. Полученные нейтральные кривые имеют нелинейный характер, и с увеличением числа Пекле растут как критическое значение числа Релея – Дарси, так и волновое число. Показано, что учет иммобилизации приводит к увеличению критического значений управляющих параметров с увеличением интенсивности внешнего потока. Были также исследованы асимптотики больших и малых интенсивностей потока; показано, что при большой интенсивности потока влияние осаждения примеси сводится лишь к повышению устойчивости за счет исключения части примеси из потока. При малых интенсивностях потока наблюдается изменение критических значений длины волны и числа Релея – Дарси наиболее опасных возмущений. Численно получены карты устойчивости в широком диапазоне параметров системы.

При нестационарном потоке рассмотрены два случая. Для потока, имеющего малую интенсивность, аналитически получена поправка к критическому числу Релея – Дарси. Она показывает, что для малых скоростей фильтрационного потока модуляция приводит к появлению положительного вклада в критическое число. В результате это выражение для поправки содержит два положительных слагаемых: первое – без внешнего потока, второе связано с модулированным потоком. Таким образом, модулированный поток приводит к стабилизации системы.

Для умеренного потока задача решена численно методом сеток, критические параметры определены методом Флоке. Получены зависимости критических параметров (числа Релея – Дарси и волнового числа) для различной частоты внешнего фильтрационного потока. Показано, что, когда частота потока небольшая, результаты незначительно отличаются от полученных при стационарном случае. С ростом частоты внешнего потока колебания критических параметров становятся значительными, таким образом, наблюдается параметрическое возникновение конвекции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 14-21-00090).

### Литература

1. *Horton C.W., Rogers Jr.F.T.* Convection currents in a porous medium // *J. Applied Physics.* 1945. V. 16, № 6. P. 367–370.
2. *Prats M.* The effect of horizontal fluid flow on thermally induced convection currents in porous mediums // *J. Geophys. Res.* 1966. V. 71, № 20. P. 4835–4838.

3. *Maryshev B.S.* The Effect of Sorption on Linear Stability for the Solutal Horton–Rogers–Lapwood Problem // *Transport in Porous Media*. 2015. V. 109, № 3. P. 747–764.

4. *Van Genuchten M.T., Wierenga P.J.* Mass transfer studies in sorbing porous media I. Analytical solutions // *Soil Science Society of America Journal*. 1976. V. 40, № 4. P. 473–480.

5. *Maryshev B., Cartalade A., Latrille C., Neel M.C.* Identifying Space-Dependent Coefficients and the Order of Fractionality in Fractional Advection–Diffusion Equation // *Transport in Porous Media*. 2017. V. 116, № 1. P. 53–71.

6. *Schumer R., Benson D.A., Meerschaert M.M., Bauemer B.* Fractal mobile/immobile solute transport // *Water Resour. Res.* 2003. V. 39. P. 1–10.

## РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ МЕТОДА РАСЧЕТА СПЕКТРА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЛЯПУНОВА ДЛЯ СИСТЕМ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

*А.Д. Колоскова, О.И. Москаленко, А.А. Короновский*

Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
имени Н.Г. Чернышевского  
adkoloskova@gmail.com

В настоящее время уравнения с запаздыванием широко используются при описании динамических процессов в механике деформируемого твердого тела, термодинамике, электродинамике, экологии, медицине и технике. Одним из способов изучения динамики систем является расчет спектра показателей Ляпунова системы, где наглядно представляется хаос и периодические режимы.

В данной работе был рассмотрен и апробирован метод расчета спектра показателей Ляпунова для систем с запаздыванием. В качестве исследуемой модели было выбрано уравнение генератора с запаздыванием

$$\frac{dx(t)}{dt} = -x(t) + kF(x(t-\tau)), \quad (1)$$

где  $x$  – переменная, характеризующая поведение системы,  $\tau$  – время запаздывания,  $F(x) = a - x^2$ ,  $a, k$  – управляющие параметры, а также рассмотрена модель кроветворения Маккея – Гласса [1]

$$\frac{dx(t)}{dt} = \beta \frac{x(t-\tau)}{1 + x^n(t-\tau)} - \gamma x(t), \quad (2)$$

где  $x(t)$  – число клеток (эритроцитов) в момент времени  $t$ ,  $\tau$  – время запаздывания,  $n, \beta, \gamma$  – управляющие параметры ( $n$  – целое число).

Идея метода заключается в следующем. За основные величины принимается состояние системы и ортогонализированный набор возмущений этого состояния. Каждое возмущение соответствует одному из показателей

в спектре показателей Ляпунова. В данной работе при изучении одномерной системы это скалярные переменные, определенные на интервале времени с длительностью, равной времени запаздывания, при этом верхняя граница интервала совпадает с текущим моментом времени. В начальный момент времени необходимо выбрать возмущения таким образом, чтобы они были ортогональными:

$$(\tilde{x}_i(\zeta), \tilde{x}_j(\zeta)) = \begin{cases} 1, & i = j, \\ 0, & i \neq j, \end{cases} \quad (3)$$

и с единичной нормой:

$$\|\tilde{x}_i(\zeta)\| = 1. \quad (4)$$

Нетрудно получить такой набор функций возмущений опорного состояния при помощи ортогонализации Грама – Шмидта и последующих перенормировок [2]. Далее отслеживается эволюция всех рассматриваемых величин. Через равные промежутки времени вновь осуществляется ортогонализация Грама – Шмидта возмущений опорного состояния и для каждого возмущения вычисляется слагаемое ляпуновской суммы

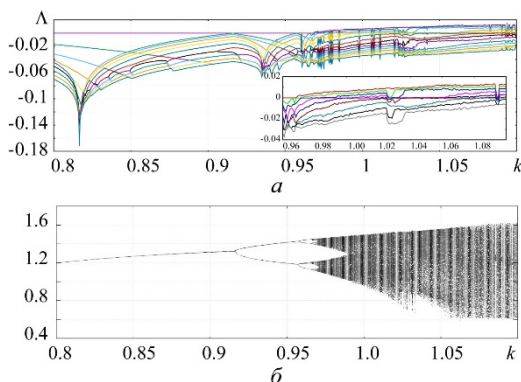
$$S_i(M\Gamma) = \sum_{k=0}^M \ln \|\tilde{x}_i(\zeta)\|, \quad \zeta \in (k\Gamma - \tau, k\Gamma), \quad (5)$$

где  $\Gamma$  – интервал времени между применением процедур ортогонализации и нормировки,  $\Gamma > \tau$ . Наконец, для получения единичной нормы всех возмущений осуществляется перенормировка. Данная последовательность процедур повторяется многократно ( $M$  раз), и на каждом шаге считаются суммы по векторам возмущения до перенормировки и после ортогонализации. Оценки показателей Ляпунова производятся по формулам

$$\hat{\Lambda}_i(M\Gamma) = \frac{S_i(M\Gamma)}{M\Gamma}, \quad (6)$$

$$\Lambda_i = \lim_{M \rightarrow \infty} \hat{\Lambda}_i(M\Gamma). \quad (7)$$

В ходе проведенных исследований было установлено, что показатели Ляпунова полностью соотносятся с динамическими режимами, получаемыми при построении бифуркационной диаграммы. В качестве примера на рисунке 1 представлены расчеты для генератора с запаздыванием (1). Нетрудно заметить, что при значении управляющего параметра  $k \approx 0,96$  на рисунке 1, а старший показатель Ляпунова переходит в положительную область, означая переход к хаотическому поведению. Аналогичный сценарий наблюдается и на рисунке 1, б. Схожие результаты получены для уравнения Маккея – Гласса (2).



**Рис. 1.** Зависимости 9 старших показателей Ляпунова от параметра  $k$  (а) и бифуркационная диаграмма (б) системы (1) при  $a = 1,5$ ,  $\tau = 20$

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-12-00224).

### Литература

1. Mackey, M.C., Glass, L. // Science. 1977. V. 197. P. 287–289.
2. Кузнецов С.П. Динамический хаос / С.П. Кузнецов. – М. : Физматлит, 2006. – 286 с.

## НЕГАТИВНОЕ ВЛИЯНИЕ САМОГЕНЕРИРУЕМЫХ КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ПРОЦЕСС УСКОРЕНИЯ ИОНОВ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ СВЕРХВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

*А.В. Коржманов*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
korzhimanov.artem@gmail.com

Получение пучков высокоэнергичных частиц, в частности протонов, является одним из главных направлений в современной физике взаимодействия сверхмощного лазерного излучения с веществом. На данный момент экспериментально получены протоны с энергией в десятки мегаэлектронвольт с использованием лазерных импульсов интенсивностью до  $10^{20}$  Вт/см<sup>2</sup>. Ожидается, что дальнейший рост энергии протонов, в частности достижение необходимых для их применения в лучевой терапии раковых опухолей сотен мегаэлектронвольт, возможен с освоением области интенсивностей  $10^{21}$  Вт/см<sup>2</sup> и выше.

В данной работе проведено теоретическое исследование процесса ускорения протонов с задней поверхности тонкой (толщиной 1–2 мкм) металлической фольги, облучаемой лазерным импульсом субпикосекундной длительностью (от 30 до 700 фс) и интенсивностью выше  $10^{21}$  Вт/см<sup>2</sup>. Ранее экспериментально было продемонстрировано, что для импульсов длительностью 700–800 фс с ростом интенсивности  $I$  наблюдается отклонение от предсказываемого теорией роста максимальной энергии ускоренных протонов  $\epsilon_p$  по закону  $\epsilon_p \sim I^{1/2}$  в сторону уменьшения энергии [1]. Целью данного исследования являлось выяснение причин наблюдавшегося отклонения.

Ускорение протонов при указанных параметрах происходит в режиме TNSA (Target Normal Sheath Acceleration). В этом режиме лазерное излучение при взаимодействии с поверхностью эффективно нагревает существенную часть электронов до релятивистских температур. Эти электроны образуют облако, простирающееся на относительно большое расстояние за пределы мишени, в том числе с обратной её стороны. В результате формируется квазистатическое поле, ускоряющее нанесённые на заднюю поверхность мишени протоны. Протоны в результате ускорения формируют квазипепловой спектр с некоторой энергией отсечки, определяемой в основном температурой электронов.

Исследование проводилось путём численного самосогласованного моделирования бесстолкновительной плазменно-полевой динамики методом Particle-In-Cell с учётом релятивистских эффектов. Для моделирования был применён программный комплекс PICADOR, разработанный в нашей группе ранее. Была использована двумерная геометрия, а параметры лазерного импульса (длительность, энергия, диаметр фокусного пятна) и мишени (плотность, степень ионизации, толщина) были выбраны близкими к экспериментальным.

В ходе моделирования были выявлены следующие характерные особенности исследованного режима. Во-первых, происходит значительное расширение плазмы с задней границы мишени: в момент прихода максимума лазерного импульса фронт плазмы расположен на расстоянии порядка 20 мкм. Во-вторых, в этой плазме возникает сильное квазистационарное поперечное магнитное поле величиной порядка сотен мегагаусс. Эти два фактора приводят к тому, что у нагреваемых лазерным импульсом электронов гирорадиус становится меньше толщины плазменного слоя, то есть электроны оказываются замагниченными, чего не наблюдается для более низких интенсивностей и более коротких лазерных импульсов, для которых магнитные поля слабее, а размер расширившейся плазмы меньше.

Таким образом электроны, которые были ускорены лазерным импульсом в момент прихода его максимума, при высоких интенсивностях лазерного поля начинают дрейфовать в сгенерированном магнитном поле. Это приводит к эффективному торможению этих электронов. В то же время именно они обладают наибольшей тепловой энергией, которая и определяет в традиционных моделях TNSA максимальную энергию ускоренных

протонов. Протоны же с максимальной энергией находятся на фронте расширяющейся плазмы и к моменту прихода максимума лазерного импульса имеют скорость порядка  $\sim c/4-c/3$  (это соответствует энергиям протонов 30–50 МэВ). Таким образом, скорость дрейфа электронов оказывается ниже скорости движения фронта и не происходит равномерного прогрева расширяющейся плазмы, что в итоге и приводит к заниженным значениям наблюдающейся в результате максимальной энергии протонов.

### Литература

1. *Nakatsutsumi, M.* On magnetic inhibition of laser-driven, sheath-accelerated high-energy protons / M. Nakatsutsumi, Y. Sentoku, A. Korzhimanov, S.N. Chen, S. Bufechoux, A. Kon, B. Atherton, P. Audebert, M. Geissel, L. Hurd, M. Kimmel, P. Rambo, M. Schollmeier, J. Schwarz, M. Starodubtsev, L. Gremillet, R. Kodama, J. Fuchs // Nature Commun. 2018. [Accepted for publication].

## РЕКОНСТРУКЦИЯ АРХИТЕКТУРЫ СВЯЗЕЙ В ЦЕПОЧКЕ ОДНОНАПРАВЛЕННО СВЯЗАННЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ПРИЧИННОСТИ ПО ГРЕЙНДЖЕРУ

*М.В. Корнилов, И.В. Сысоев*

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники  
имени В.А. Котельникова РАН

Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
имени Н.Г. Чернышевского  
kornilovmv@gmail.com

В настоящее время существуют различные подходы к детектированию направленной связанности между элементами сложных систем по их экспериментальным сигналам. Один из самых популярных – метод причинности по Грейнджеру [1]. Если подсистем больше двух, дополнительно к проблеме детектирования наличия и направления связей встает проблема различения прямого и опосредованного взаимодействия. В частности, она представляет собой большой практический интерес для задач радиотехники, нейрофизиологии и климатологии.

В данной работе рассматриваются цепочки из трех однонаправленно связанных подсистем (обозначим их  $X, Y, Z$ ), в качестве которых выступали автогенераторы с полутора степенями свободы и системы Икеды, демонстрирующие колебания с одним или несколькими основными временными масштабами. При этом системы могли находиться в одном из восьми возможных случаев взаимодействия:  $Z \rightarrow Y \rightarrow X$  – опосредованная связь;  $Z \rightarrow Y \rightarrow X$  и  $Z \rightarrow X$  – случай прямой и опосредованной связей одновременно;  $Z \rightarrow Y$  и

$Z \rightarrow X$ ;  $Z \rightarrow X$  и  $Y \rightarrow X$ ; отсутствие связи между  $Z$  и  $X$ , но  $Y \rightarrow X$ ;  $Z \rightarrow X$  и  $Y$ ;  $Z \rightarrow Y$  и  $X$ ; отсутствие каких-либо связей.

После чего для тестовых систем при помощи метода причинности по Грейнджеру с использованием моделей в виде отображений последования с полиномиальными нелинейностями, следуя [2], решается задача о реконструкции архитектуры связей. Целью ставилось определить, насколько верно метод способен распознать архитектуру связей, а также различить прямое и опосредованное взаимодействие. Для этого была предложена методика, основанная на проведении трех тестов, в которых использовались условные причинности по Грейнджеру, для которых улучшение прогноза рассчитывалось по формулам

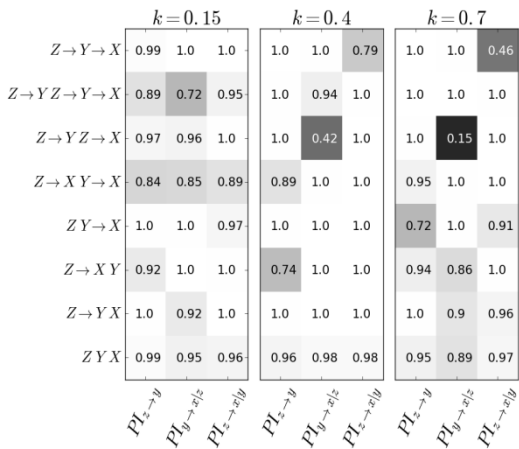
$$x'_{n+\tau|Y} = f_{xy}(\bar{x}_n, \bar{y}_n), x'_{n+\tau|Z} = f_{xz}(\bar{x}_n, \bar{z}_n), x'_{n+\tau|YZ} = f_{xyz}(\bar{x}_n, \bar{y}_n, \bar{z}_n), \quad (1)$$

$$y'_{n+\tau} = f_y(\bar{y}_n), y'_{n+\tau|Z} = f_{yz}(\bar{y}_n, \bar{z}_n),$$

$$PI_{y \rightarrow x} = 1 - \frac{\epsilon_x^2}{\epsilon_{xy}^2}, PI_{z \rightarrow x} = 1 - \frac{\epsilon_x^2}{\epsilon_{xz}^2}, PI_{z \rightarrow y} = 1 - \frac{\epsilon_y^2}{\epsilon_{yz}^2}. \quad (2)$$

Размерность вектора состояния и степень полинома в моделях подбирались по критерию Шварца. Значимость показателей  $PI$  оценивалась при помощи 95 % уровня значимости, полученного на основе суррогатных временных рядов. Для каждой системы выбирались 3 значения коэффициента связи, для них проводилось усреднение по 100 реализациям. Результаты теста для автогенератора с полутора степенями свободы представлены на рис. 1, где метод позволяет точно определить возможную архитектуру связей, когда отношение верных выводов о наличии (отсутствии) связи к общему числу тестов для всех трех моделей стремится к 1.

**Рис. 1.** Проценты верных выводов о наличии (отсутствии) связи между системами по выбранным 8 типам связей для автогенераторов с полутора степенями свободы. На графике для каждого типа прогностической модели градациями серого (белый – 100 %, черный – 0 %) и значениями отмечены отношение верных выводов к общему количеству тестов



В результате численного эксперимента было показано, что с использованием предложенной методики по скалярным временным рядам сложных колебаний трех систем с выраженным характерным временным масштабом можно надежно различить прямое и опосредованное воздействие более чем в 80 % случаев.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 14-12-00291.

### Литература

1. *Granger C.W.J.* Investigating Causal Relations by Econometric Models and Cross-Spectral // *Econometrica*. 1969. V. 37, № 3. P. 424–438.
2. *Chen Y.* Analyzing Multiple Nonlinear Time Series with Extended Granger Causality / *Chen Y., Rangarajan G., Feng J., Ding M.* // *Phys. Lett. A*. 2004. V. 324, № 1. P. 26–35.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГЕНЕРАЦИИ ИМПУЛЬСОВ В МНОГОМОДОВОМ ГЕНЕРАТОРЕ С МОДУЛЯЦИЕЙ ДОБРОТНОСТИ С УЧЕТОМ БЕГУЧЕСТИ ПРИ РЕАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРАХ РЕЗОНАТОРА

*А.П. Коробейникова, И.А. Шайкин, И.В. Корюкин, Е.А. Хазанов*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
nastya.k2594@gmail.com

В работе исследуется процесс генерации импульсов в многомодовом генераторе с модуляцией добротности. Ранее нами была построена модель [1], описывающая генерацию импульсов в подобных генераторах и изменение инверсии населенности в активном элементе во времени. Моделирование производилось в среде программирования MATLAB и основывалось на системе уравнений

$$\begin{cases} \frac{dm_i}{d\tau} = Gm_i \left( g_i \int_{z_0}^{z_0+l} n \Psi_i^2(z) dz - 1 - \beta_{яП}(\tau) - \Delta\beta_i \right), \\ \frac{dn}{d\tau} = A - n \left( 1 + \sum_{i=1}^{N_m} g_i m_i \Psi_i^2(z) \right), \end{cases} \quad (1)$$

где  $\Psi_i$  – собственные моды открытого резонатора:

$$\Psi_i(z) = \sqrt{2} \operatorname{sinc}_i z = \sqrt{2} \sin \left( \frac{\pi}{L} (q_0 + i - 1) z \right), \quad (2)$$

$i = 1, 2, \dots, N_m$  – номер продольной моды,  $q_0$  – номер центральной моды,  $N_m$  – количество мод,  $m_i$  – интенсивность поля  $i$ -й моды резонатора, нормированная на интенсивность насыщения,  $k_i$  – волновой вектор  $i$ -й моды,  $n$  – инверсия населенностей в активном элементе (АЭ),  $\tau = t/\tau_{21}$  – время, нормированное на время релаксации разности населенностей  $\tau_{21}$ ,  $z_0$  – координата начала АЭ,  $l$  – длина АЭ,  $\Psi_i(z)$  – собственная функция  $i$ -й продольной моды резонатора,  $g_i$  – отношение коэффициента усиления  $i$ -й моды к коэффициенту усиления моды, ближайшей к центру линии ( $g_i \leq 1$ ),  $\beta_{яп}$  – потери, связанные с модулятором добротности ячейкой Поккельса (ЯП),  $\Delta\beta_i$  – дополнительные потери для  $i$ -й моды относительно потерь для центральной,  $A$  – параметр накачки, соответствующий инверсии насыщения.

$$G = \frac{\tau_{21}}{\tau_{ph}}, \quad \tau_{ph} = \frac{\tau_c}{-\ln R_1 R_2}, \quad (3)$$

где  $\tau_{ph}$  – время жизни фотона в резонаторе,  $\tau_c$  – время обхода резонатора,  $R_1$  и  $R_2$  – эффективные коэффициенты отражения зеркал резонатора, которые учитывают все потери в резонаторе за обход.

Результаты моделирования хорошо объясняют эффект генерации второго гигантского импульса, обнаруженный ранее экспериментально [2]. Причиной генерации второго гигантского импульса, так называемого пост-импульса, является тот факт, что для разных продольных мод резонатора максимумы их волновых функций разнесены по длине АЭ. Таким образом, существуют области в АЭ, в которых одна продольная мода не усиливается, и остается инверсия населенности, достаточная для развития другой моды. Данный эффект известен как эффект выжигания дыр.

Расчеты производились в приближении стоячих волн, однако в реальности необходимо представлять волны в резонаторе как суперпозицию стоячей и бегущей волн, поскольку из-за вывода излучения из резонатора интенсивности волн, бегущих в противоположных направлениях, различны. Таким образом, волновая функция примет вид

$$\Psi^2(z) = \frac{2\sqrt{R_1}}{R_1 + 1} \cos\left(2\left(\frac{\pi}{L}(q_0 + i - 1)\right)z\right) + 1. \quad (4)$$

Также были рассчитаны все входящие в уравнения коэффициенты в соответствии с реальными значениями параметров резонатора. Параметром, влияющим на время между генерацией двух гигантских импульсов и на их амплитуды, при фиксированных прочих параметрах является разница потерь для продольных мод резонатора.  $\Delta\beta_i$  зависит от значений коэффициента пропускания эталонов Фабри – Перо (ЭФП) при различном положении мод относительно спектра пропускания. Данный спектр был получен при реальном продольном и поперечном распределении поля внутри резонатора.

Был поставлен эксперимент с использованием твердотельного лазерного генератора на Nd:YLF с оптической накачкой, работающего в режиме

модуляции добротности. Одно из зеркал было наклеено на пьезоэлемент таким образом, что подача напряжения на него изменяет оптическую длину резонатора. Это в свою очередь приводит к смещению мод относительно спектра пропускания ЭФП, меняется разность потерь для мод, и мы наблюдаем различные времена возникновения постимпульса и его различную амплитуду. Зависимости данных параметров постимпульса от поданного на пьезоэлемент напряжения, полученные экспериментально и теоретически, совпадают с хорошей точностью, что говорит о корректном построении модели.

### Литература

1. *Korobeynikova A.P., Shaykin A.A., Koryukin I.V., Khazanov E.A.* Mathematical model of an additional laser pulse generating process in a Q-switched generator // International symposium “Topical problems of nonlinear wave physics”, 22–28 July 2017, Moscow – St.-Peterburg. P. 76.

2. *Korobeynikova A.P., Burdonov K.F., Shaykin A.A., Khazanov E.A.* New method of single-mode generation control in the Q-switch lasers // Conf. Nonlinear waves – 2016, Bor. 2016. P. 78.

## ЛАЗЕРНОЕ УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ ГАЗОВОЙ ЯЧЕЙКИ НА ПЕТАВАТТНОМ КОМПЛЕКСЕ PEARL

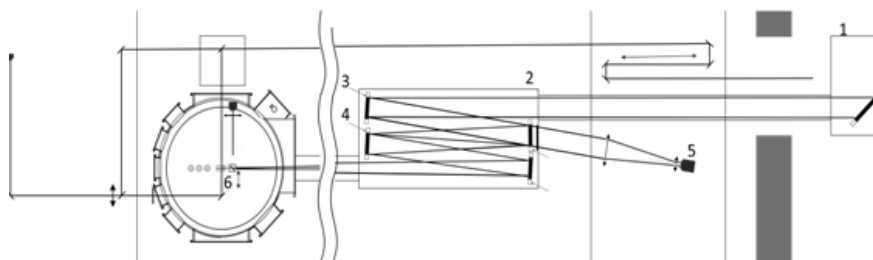
*А.В. Котов, К.Ф. Бурдонов, И.Ю. Костюков, С.Е. Перевалов,  
Д.С. Романовский, А.А. Соловьев, М.В. Стародубцев*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
kotovsanyru@gmail.com

В настоящее время исследование взаимодействия релятивистски сильного оптического излучения с веществом является востребованным и активно развивающимся направлением лазерной физики. Особый интерес представляет возможность ускорения электронов, возникающая при взаимодействии мощного лазерного излучения ультракороткой длительности с плазмой, создаваемой за счет фокусировки такого излучения в газовую мишень [1].

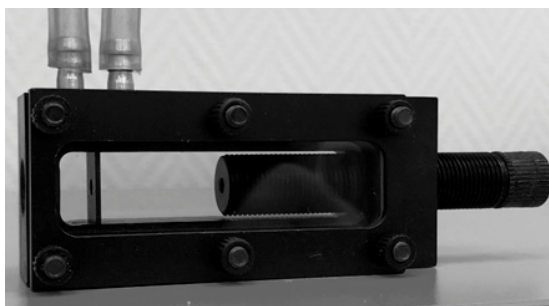
Для создания плазмы используется лазерный комплекс PEARL, способный генерировать импульсное излучение субпетаваттного уровня мощности на длине волны 910 нм при длительности импульса 50–70 фс и энергии до 30 Дж. Схема эксперимента представлена на рис 1. Лазерный импульс с апертурой 180 мм поступает из оптического компрессора 1 в промежуточный вакуумный модуль 2, где происходит коррекция волнового фронта при помощи биморфного деформируемого зеркала 3, далее сферическим зеркалом 4 с фокусным расстоянием 8 м излучение фокусируется в

газовую ячейку 6. Обратная связь в адаптивной системе коррекции волнового фронта осуществляется при помощи датчика Шака – Гартмана 5.



**Рис. 1.** Схема эксперимента

Используемая в эксперименте газовая ячейка представлена на рис. 2. Ячейка состоит из двух объемов, разделенных перегородкой с отверстием. В каждом объеме может находиться различный газ. В первом объеме происходит инжекция электронов в плазменную волну, создаваемую лазерным импульсом, во втором объеме происходит их ускорение. Возможность изменения ускорительного объема позволяет подбирать оптимальную длину ускорения. Для измерения энергий ускоренных электронов используется магнитный спектрометр, состоящий из двух сцинтилляторных экранов и двух магнитов [2]. Для диагностики состояния плазмы в газовой ячейке используется интерферометр Маха – Зандра.



**Рис. 2.** Газовая ячейка

Разработанная схема эксперимента позволяет исследовать параметры ускоренных электронов в зависимости от длины ячейки, интенсивности и поляризации лазерного излучения, концентрации и состава используемых газов, соотношения диаметра канала и пятна фокусировки лазерного излучения и т.д. Пилотные эксперименты показали превосходство данной схемы над использованной в предыдущей серии экспериментов [3].

## Литература

1. *Esarey E. et al.* Physics of laser-driven plasma-based electron accelerators // Reviews of Modern Physics, 81, 1229-1285 (2009).
2. *Soloviev A.A. et al.* Fast electron generation using PW-class PEARL facility // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 653, 35-41 (2011).
3. *Soloviev A.A. et al.* Two-screen single-shot electron spectrometer for laser wake-field accelerated electron beams // Review of Scientific Instruments, 82, 43304 (2011).

## САМОФИЛЬТРАЦИЯ СВЕРХМОЩНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

*А.А. Кочетков, В.Н. Гинзбург, Е.А. Хазанов*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
antkoch2012@gmail.com

В последние годы лазеры тера- и петаваттной мощности получили широкое распространение. При типичной для таких лазеров интенсивности в несфокусированном пучке порядка  $1 \text{ ТВт/см}^2$  в оптических элементах толщиной 1 мм и более возникает мелкомасштабная самофокусировка (ММСФ) [1], приводящая к необратимым разрушениям элемента. В то же время для управления параметрами лазерного излучения требуются как раз оптические элементы, работающие на просвет: удвоители частоты, фазовые пластинки, светоделители, поляризаторы, расширяющие спектр импульса нелинейно-оптические элементы. Использование всех этих элементов ограничено именно ММСФ.

Влияние ММСФ может быть уменьшено сведением к минимуму накопленной нелинейной фазы (В-интеграла), а также уменьшением пространственного шума. В работе [3] был предложен оригинальный метод очистки пучка для подавления ММСФ петаваттного излучения: самофилтрация пучка при распространении в свободном пространстве. Согласно теории ММСФ [1, 2], поперечный волновой вектор шума, при котором коэффициент усиления максимален, пропорционален квадратному корню интенсивности излучения, тогда если оптический элемент расположен на большом расстоянии от источника шума, то самые «опасные» шумовые компоненты выходят из апертуры пучка. В этом случае само свободное пространство является пространственным фильтром.

В настоящей работе экспериментально подтверждено, что самоочистка лазерного пучка от пространственных шумов при распространении в свободном пространстве позволяет эффективно подавлять самофокусировочную неустойчивость без применения пространственных фильтров. Измерения инкремента неустойчивости двумя независимыми методами продемон-

стрировали количественное согласие с теорией и высокую эффективность подавления мелкомасштабной самофокусировки в пучках с интенсивностью порядка тераватт на квадратный сантиметр.

### Литература

1. *Беспалов В.И.* О нитевидной структуре пучков света в нелинейной жидкости / Беспалов В.И., Таланов В.И. // Письма в ЖЭТФ, **3**, 471 (1966).
2. *Розанов Н.Н.* Мелкомасштабная самофокусировка лазерного излучения в усилительных системах / Розанов Н.Н., Смирнов В.А. // Квантовая электроника, **7**, 410-418 (1980).
3. *Mironov S.Y.* Suppression of small-scale self-focusing of high-intensity femto-second radiation / Mironov S.Y., Lozhkarev V.V., Luchinin G.A., Shaykin A.A., and Khazanov E.A. // Appl. Phys. B, **113**, 147-151 (2013).
4. *Poteomkin A.K.* Compact 300 J / 300 GW frequency doubled neodimium glass laser. Part I : Limiting power by self-focusing / Poteomkin A.K., Martyanov M.A., Kochetkova M.S., Khazanov E.A. // IEEE Journal of Quantum Electronics, **45**, 336-344 (2009).

## НЕЛИНЕЙНЫЕ СВЯЗАННЫЕ СОСТОЯНИЯ В КОНТИНУУМЕ И МУЛЬТИСТАБИЛЬНЫЙ ОТКЛИК В ОДНОМЕРНОМ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ

*С.Д. Красиков, А.А. Богданов, И.В. Иорш*

Университет ИТМО, Санкт-Петербург  
s.krasikov@metalab.ifmo.ru

Связанные состояния в континууме (ССК) представляют собой локализованные решения волнового уравнения, энергия которых находится в континууме делокализованных состояний [1]. Они могут быть рассмотрены как резонансные состояния с бесконечной добротностью, возникающие благодаря деструктивной интерференции радиационных каналов системы, и могут быть использованы для усиления нелинейных оптических эффектов. В частности, ССК могут быть использованы для снижения порога возникновения мультистабильного отклика оптической системы, который зависит от нелинейной восприимчивости материала и добротности резонатора.

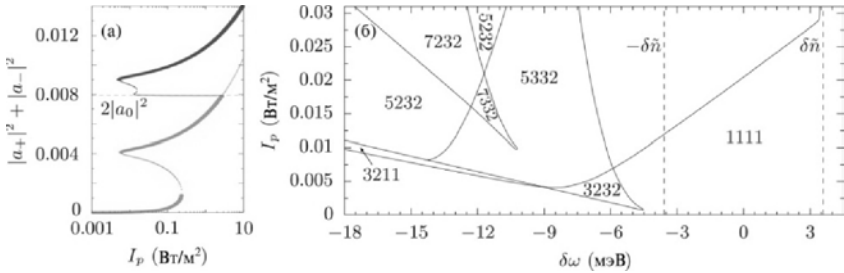
В данной работе мы изучаем влияние ССК на мультистабильный отклик одномерного фотонно-кристаллического волновода с керровской нелинейностью. Такая система может быть описана в рамках теории связанных мод в двухмодовом приближении [2]. В таком случае, с учетом накачки и затухания, волновое уравнение может быть приведено к виду

$$E_{\pm,t} = i\delta n E_{\mp} - \gamma(E_+ + E_-) + iE_{\pm} \left( |E_{\pm}|^2 + 2|E_{\mp}|^2 \right) + \sqrt{\gamma I_p} e^{i\phi_0 - i\delta\omega t}, \quad (1)$$

где  $E_{\pm}$  – амплитуды мод, распространяющихся в прямом и обратном направлении,  $\delta n$  – амплитуда модуляции показателя преломления,  $I_p$  – интенсивность накачки,  $\delta\omega$  – расстройка и  $\gamma \approx k_0^2 \delta n^2$ . Если представить решения данных уравнений в виде  $E_{\pm} = -ia_{\pm} e^{i\phi_0 - i\delta\omega t}$ , можно показать, что система имеет три класса решений: симметричные  $a_+ = a_-$ , антисимметричные  $a_+ \neq a_-$ , и антисимметричные вида  $a_{\pm} = a_0 e^{i\phi_{\pm}}$ , где

$$a_0 = \sqrt{\frac{1}{3}(\delta n - \delta\omega)}, \quad \tan\left(\frac{\phi_+ + \phi_-}{2}\right) = -\frac{\gamma}{\delta n}, \quad \cos\left(\frac{\phi_+ - \phi_-}{2}\right) = \frac{\sqrt{\gamma I_p}}{2a_0 \sqrt{\gamma^2 + \delta n^2}}. \quad (2)$$

В последнем случае интенсивность накачки определяет разность фаз мод, однако не влияет на их амплитуду, что можно рассматривать как аналог эффекта Джозефсона [3]. Кроме того, можно показать, что при частотах меньших, чем частота антисимметричного линейного ССК (то есть при  $\omega < \delta n$ ), всегда существуют полностью антисимметричные неизлучающие состояния. Соответственно, при достаточных плотностях энергии накачки резонансная частота настраивается таким образом, что ССК совпадает с частотой накачки, то есть происходит самонастройка ССК. Также это можно рассматривать как способ возбуждения ССК: при накачке нерезонансным возбуждением происходит самонастройка системы, приводящая к формированию ССК за счет нелинейности.



На графике (а) показана зависимость интенсивности поля от интенсивности накачки. На диаграмме (б) числами вида  $abcd$  кодируется количество решений системы:  $a$  – полное количество решений,  $b$  – количество стабильных решений,  $c$  – количество симметричных решений и  $d$  – количество стабильных симметричных решений. Вычисления произведены для кремниевого волновода в воздухе при длине волны 1 мкм с учетом материальных потерь.

Также мы рассматриваем модуляционную неустойчивость и показываем, что конечные размеры системы могут стабилизировать решения, являющиеся нестабильными в бесконечной системе.

Таким образом, мы показываем, что структуры, поддерживающие ССК, могут использоваться для создания полностью оптических переключателей с приемлемой интенсивностью накачки.

### Литература

1. *Hsu, C.W.* Bound states in the continuum / C. W. Hsu [et al.] // *Nature Reviews Materials*. 2016. V. 1. P. 16048.

2. *Kogelnik, H.* Stimulated emission in a periodic structure / H. Kogelnik, C.V. Shank // *Applied Physics Letters*. 1971. V. 18, № 4. P. 152–154.

3. *Bulgakov, E.* Switching through symmetry breaking for transmission in a T-shaped photonic waveguide coupled with two identical nonlinear micro-cavities / E. Bulgakov, A. Sadreev // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2011. V. 23, № 31. P. 315303.

## ПОСТОЯНСТВО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ КОРОНАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПЕТЕЛЬ

*П.В. Кронштадтов, В.В. Зайцев*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
KronshtadtoVPavel@ya.ru

Наблюдения корональных магнитных петель Солнца свидетельствуют о постоянстве поперечного сечения вдоль всей длины. Данный факт очень интересен, так как длина корональных магнитных петель может достигать нескольких масштабов высот неоднородности атмосферы, и, следовательно, давление может различаться на порядок на разных высотах в магнитной петле. В работе рассмотрен баланс сил в стационарной магнитной трубке с током. Решено гидростатическое уравнение баланса сил в условиях постоянства продольного электрического тока и сохранения потока продольной компоненты магнитного поля. Получены зависимости радиуса магнитной петли от высоты при различных значениях плазменного параметра в магнитной петле. Показано, что если газокINETическое давление внутри трубки мало по сравнению с давлением продольного магнитного поля, то толщина трубки не меняется с высотой в короне, что характерно для большинства наблюдаемых в короне магнитных петель.

## О ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ $\Omega$ -УСТОЙЧИВЫХ ПОТОКОВ НА ПОВЕРХНОСТЯХ

В.Е. Круглов

НИУ Высшая школа экономики, Нижний Новгород  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
kruglovslava21@mail.ru

Традиционный подход к качественному изучению динамики потоков с конечным числом особых траекторий на поверхностях заключается в разбиении несущего многообразия на области с предсказуемым поведением траекторий – *ячеек*. Такой взгляд на непрерывные динамические системы восходит к классической работе А.А. Андронова и Л.С. Понтрягина [1], опубликованной в 1937 году. В этой статье они рассмотрели систему дифференциальных уравнений

$$\dot{x} = v(x),$$

где  $v(x)$  – это  $C^1$  векторное поле на 2-диске, ограниченном кривой без контакта на плоскости, и нашли критерий грубости такой системы.

Более общий класс потоков на 2-сфере рассмотрен в работах Е.А. Леонтович и А.Г. Майера [2, 3], где топологическая классификация таких потоков тоже была основана на разбиении на ячейки, поскольку описание их типов и взаимного расположения (*схема Леонтович – Майера*) полностью определяет качественное разбиение фазового пространства на траектории. Основной трудностью в обобщении этого результата на случай произвольных ориентируемых поверхностей положительного рода является возможность незамкнутой рекуррентной траектории. Отсутствие таких траекторий для грубых потоков без особенностей на 2-торе была доказана А.Г. Майером [4] в 1939 году и позже М. Пейшото [5, 6] для структурно устойчивых потоков на поверхностях любого рода. В 1971 году в работе [7] М. Пейшото обобщил схему Леонтович – Майера для структурно устойчивых потоков на произвольных поверхностях и получил топологическую классификацию таких потоков, опять-таки изучив все допустимые ячейки для них и введя комбинаторный инвариант – *ориентированный граф*, обобщающий схему Леонтович – Майера. В 1976 году Д. Нейманом и Т. О'Брайеном [8] на произвольных поверхностях были рассмотрены так называемые *регулярные потоки*, т.е. потоки без нетривиальных периодических траекторий, которые включают в себя описанные выше потоки как частный случай. Они ввели полный топологический инвариант для регулярных потоков – *орбитальный комплекс*, который представляет собой пространство орбит потока, оснащенное некоторой дополнительной информацией. В 1998 году А.А. Ошемков и В.В. Шарко [9] ввели новый инвариант для потоков Морса, или, что то же самое, градиентно-подобных потоков на поверхностях – *трехцветный граф*. В той же работе они получили полную топологическую класси-

фикацию потоков Морса – Смейла на поверхностях в терминах атомов и молекул, введённых в работе А.Т. Фоменко [10].

Грубые или, что эквивалентно, структурно устойчивые потоки на поверхностях имеют неблуждающее множество, состоящее только из конечного числа особых точек и конечного числа замкнутых траекторий, или предельных циклов, каждая из которых является гиперболической; кроме того, такие потоки не имеют траекторий, соединяющих седловые точки. Нарушение последнего условия приводит к  $\Omega$ -устойчивым потокам на поверхностях, которые уже не являются грубыми. Однако в нашей работе мы доказываем, что топологическая классификация таких потоков также решается комбинаторными методами. Полным топологическим инвариантом является двудольный ориентированный граф, оснащённый четырёхцветными мультиграфами и некоторой другой информацией.

Вокруг каждого предельного цикла потока мы строим окрестность с границей, трансверсально и единственный раз пересекающей траектории и не содержащей неподвижные точки и другие предельные циклы. Удаляем из поверхности границы каждой такой окрестности и таким образом разбиваем несущую поверхность на так называемые *элементарные области*. Компоненту связности получившегося множества мы называем *элементарной областью*. Области подразделяются на четыре типа в зависимости от наличия или отсутствия в них предельных циклов, узловых точек, седловых точек и элементов неблуждающего множества в целом. Затем каждой области ставится в соответствие вершина графа, а граничной окружности – или разрезающей окружности – ребро, направленное в соответствии с направлением движения траекторий через разрезающую окружность.

Затем вершину, соответствующую области, содержащей седловые точки, мы оснащаем *четырёхцветным мультиграфом*, являющимся обобщением трёхцветного графа Ошемкова – Шарко [9]; чтобы это сделать, мы оставляем только саму область, достраиваем её до замкнутой поверхности и на место предельных циклов помещаем узловые точки такого же типа устойчивости. Затем седловыми сепаратрисами делим поверхность на *ячейки*, а каждую ячейку обычной траекторией делим на *многоугольные области*, каждой такой области ставим в соответствие вершину четырёхцветного графа, а стороне этой области – ребро, соединяющее вершины, соответствующие областям, для которых эта сторона является частью границы. После чего нумеруем рёбра, соответствующие сепаратрисам-связкам, в порядке обхода границы многоугольной области в направлении, обратном направлению движения по сепаратрисам, присваивая таким образом каждому ребру два номера.

Вершину, соответствующую области, не содержащей ни неподвижных точек, ни предельных циклов (такие области лежат между двумя областями, содержащими предельные циклы), оснащаем *весом* «+» или «-» в зависимости от взаимной ориентации предельных циклов в областях, приле-

гающих к рассматриваемой области (плюс, если ориентация согласована, и минус в обратном случае).

Далее, рёбра, инцидентные вершине, соответствующей области с седловыми точками, мы оснащаем специальными двухцветными ориентированными циклами четырёхцветного мультиграфа, с помощью которых сможем потом распознать ориентации предельных циклов потока: эти графовые циклы можно вложить в поверхность вместе со всем графом и ориентировать согласованно с предельным циклом, что мы и делаем.

В качестве основного результата нашей работы мы утверждаем, что изоморфизм такого оснащённого графа является полным топологическим инвариантом для класса  $\Omega$ -устойчивых потоков, и приводим для каждого класса изоморфности стандартный поток, а также формулу эйлеровой характеристики его несущей поверхности и критерий её ориентируемости.

Результаты были получены в рамках проекта ЦФИ в 2017 году, при поддержке РНФ (проект № 17-11-01041). Результаты были получены в соавторстве с Д.С. Малышевым и О.В. Починкой. Авторы благодарны участникам семинара «Топологические методы в динамике» за плодотворные обсуждения.

### Литература

1. *Андронов, А.А.* Грубые системы / А.А. Андронов, Л.С. Понтрягин // Доклады Академии наук СССР. 1937. Т. 14, № 5. С. 247–250.
2. *Леонтович, Е.А.* О траекториях, определяющих качественную структуру разбиения сферы на траектории / Е.А. Леонтович, А.Г. Майер // Докл. Акад. АН СССР. 1937. Т. 14, № 5. С. 251–257.
3. *Леонтович, Е.А.* О схеме, определяющей топологическую структуру разбиения на траектории / Е.А. Леонтович, А.Г. Майер // Докл. Акад. АН СССР. 1955. Т. 103, № 4. С. 557–560.
4. *Майер, А.Г.* Грубые преобразования окружности / А.Г. Майер // Уч. зап. ГГУ. Горький : ГГУ, 1939. Т. 12. С. 215–229.
5. *Peixoto, M.* Structural stability on two-dimensional manifolds / M. Peixoto // Topology. 1962. V. 1, № 2. P. 101–120.
6. *Peixoto, M.* Structural stability on two-dimensional manifolds (a further remarks) / M. Peixoto // Topology. 1963. V. 2, № 2. P. 179–180.
7. *Peixoto, M.* On the classification of flows on two manifolds // Dynamical Systems : Proc. Symp. Univ. Bahia, Salvador (Brazil), 1971 / ed. M. Peixoto. New York : Academic Press, 1973. P. 389–419.
8. *Neumann, D.* Global structure of continuous flows on 2-manifolds / D. Neumann, T. O'Brien // J. Diff. Eq. 1976. V. 22, № 1. P. 89–110.
9. *Ошемков, А.А.* О классификации потоков Морса – Смейла на двумерных многообразиях / А.А. Ошемков, В.В. Шарко // Математический сборник. 1998. Т. 189, № 8. С. 93–140.
10. *Болсинов, А.В.* Топологическая классификация интегрируемых гамильтоновых систем с двумя степенями свободы. Список систем малой сложности / А.В. Болсинов, С.В. Матвеев, А.Е. Фоменко // УМН. 1990. Т. 45, № 2(272) С. 49–77.

# ГИПЕРБОЛИЧЕСКИЙ ХАОС В СВЯЗАННЫХ ОСЦИЛЛЯТОРАХ БОНХОФФЕРА – ВАН-ДЕР-ПОЛЯ, ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ РЕЛАКСАЦИОННЫХ АВТОКОЛЕБАНИЙ

*В.П. Круглов<sup>2</sup>, В.М. Дорошенко<sup>1</sup>, В.П. Кузнецов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
имени Н.Г. Чернышевского

<sup>2</sup>Саратовский филиал Института радиотехники и электроники  
имени В.А. Котельникова РАН  
kruglovyacheslav@gmail.com

Мы предлагаем новую модель с аттрактором типа Смейла – Вильямса. Система состоит из двух одинаковых слабо связанных осцилляторов Бонхоффера – Ван-дер-Поля, у которых управляющий параметр медленно изменяется во времени.

$$\begin{aligned} \ddot{x} - \left( f(t/T + 1/4) - x^2 \right) \dot{x} + x &= K + \varepsilon(y - x), \\ \ddot{y} - \left( f(t/T - 1/4) - y^2 \right) \dot{y} + y &= K + \varepsilon(x - y), \end{aligned} \tag{1}$$

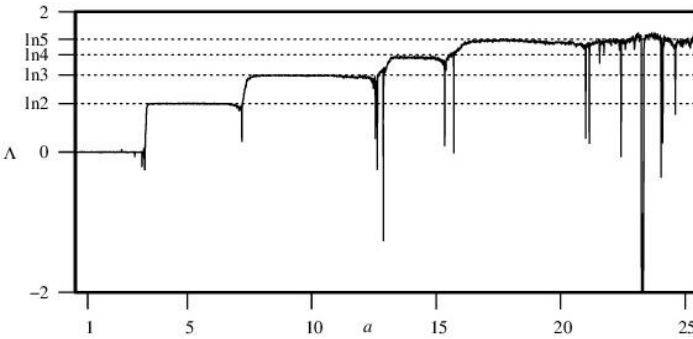
$$f(\tau) = \begin{cases} a, & 0 < \tau \leq \tau_1, \\ \frac{(a-c)\tau + c\tau_1 - a\tau_2}{\tau_1 - \tau_2}, & \tau_1 < \tau \leq \tau_2, \\ \frac{(c-a)\tau + a\tau_2 - c}{\tau_2 - 1}, & \tau_2 < \tau \leq 1, \end{cases}$$

$$f(\tau + 1) = f(\tau).$$

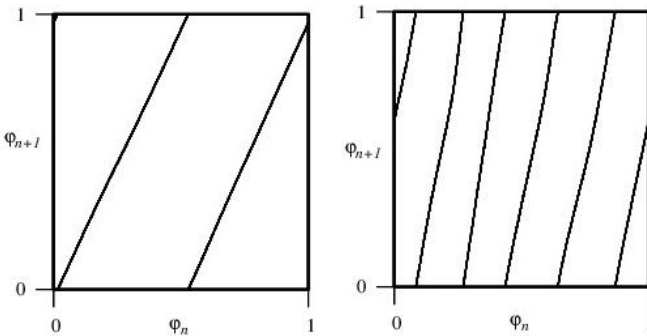
С увеличением управляющего параметра осциллятора Бонхоффера – Ван-дер-Поля основная частота автоколебаний уменьшается. Модулируя управляющий параметр, можно получить периодическое переключение частоты подсистем с  $\omega = 1$  для малых колебаний до  $\omega = 1/M$  ( $M$  – целое) для колебаний с большой амплитудой.

Рассмотрим функционирование системы в режиме с гиперболическим аттрактором. Начнем с ситуации, когда один осциллятор совершает автоколебания, а второй заторможен. Основная частота автоколебания благодаря упоминавшемуся выше подбору параметров в  $M = 2, 3, 4, \dots$  раз меньше, чем частота малых колебаний. Когда второй осциллятор в силу увеличения параметра приближается к порогу возбуждения и переходит его, он начинает раскачиваться резонансным образом благодаря воздействию составляющей с частотой  $\omega = 1$  со стороны первого осциллятора (присутствие четных гармоник автоколебаний обеспечивается наличием членов  $x^2 \dot{x}$  и  $K$  в уравнениях). Поэтому фаза этих колебаний отвечает умноженной на  $M$  фазе

основной составляющей колебаний первого осциллятора. В результате, когда возникшие колебания второго осциллятора приблизятся к установившемуся режиму релаксационных автоколебаний с частотой в  $M$  раз меньшей, чем частота малых колебаний, фаза его будет в  $M$  раз большей в сравнении с начальной фазой первого осциллятора. Далее, процесс повторяется со сменой ролей одного и другого осциллятора. Полный цикл, отвечающий периоду модуляции параметров  $T$ , сопровождается умножением исходной фазы колебательного процесса на фактор  $M^2 = 4, 9, 16, \dots$ , т.е. для нее реализуется растягивающее отображение окружности. При сжатии по остальным направлениям это соответствует построению соленоида Смейла – Вильямса. В отображении, построенном за полпериода модуляции  $T/2$ , фаза умножается на  $M$ .



**Рис. 1.** Зависимость старшего показателя Ляпунова стробоскопического отображения за полпериода модуляции при  $K = 0,5$ ;  $\varepsilon = 0,01$ ;  $T = 400$ ;  $\tau_1 = 0,4$ ;  $\tau_2 = 0,5$ ;  $c = -2$



**Рис. 2.** Диаграммы для фазы первого осциллятора, полученные итерированием стробоскопического отображения за полпериода модуляции: *a* – при  $a = 5$ ;  $K = 0,5$ ;  $\varepsilon = 0,01$ ;  $T = 400$ ;  $\tau_1 = 0,4$ ;  $\tau_2 = 0,5$ ;  $c = -2$  реализуется режим с удвоением фазы (старший показатель Ляпунова  $\Lambda = 0,687 \approx \ln 2$ ), *б* – при  $a = 17,5$ ;  $K = 0,5$ ;  $\varepsilon = 0,01$ ;  $T = 400$ ;  $\tau_1 = 0,4$ ;  $\tau_2 = 0,5$ ;  $c = -2$  реализуется режим с растяжением фазы в 5 раз (старший показатель Ляпунова  $\Lambda = 1,59 \approx \ln 5$ )

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 17-12-01008.

### Литература

1. Смейл С. Дифференцируемые динамические системы // Успехи математических наук. 1970. Т. 25, № 1 (151). С. 113–185.
2. Кузнецов С.П. Динамический хаос и гиперболические аттракторы: от математики к физике. Москва ; Ижевск : ИКИ, 2013.

## КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТА ЛОЖНЫХ СВЯЗЕЙ ИЗ-ЗА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ШУМА И КОРОТКОГО ВРЕМЕННОГО РЯДА

С.Н. Крылов<sup>1</sup>, Д.А. Смирнов<sup>2</sup>, Б.П. Безручко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

<sup>2</sup> Саратовский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
krylov.sn@nxt.ru

Изучение взаимодействий между колебательными системами представляет собой важную задачу в самых разных областях науки и техники, включая геофизику и нейрофизиологию. Одной из наиболее востребованных является задача обнаружения воздействия одной системы на другую по их временным рядам. Для ее решения часто используют идею «причинности по Грейнджеру», что рассматривается, например, в работах [1, 2]. Данная работа посвящена поиску условий проявления эффекта ложных связей в зависимости от интенсивности измерительного шума, длины временного ряда и физических параметров осцилляторов в наиболее простой математической системе, являющейся моделью широкого класса колебательных систем. А именно: использовались линейные стохастические диссипативные осцилляторы с однонаправленной связью, заданные стохастическими разностными уравнениями [3]

$$\begin{aligned}x_n &= a_1 x_{n-1} + a_2 x_{n-2} + \xi_{x,n}, \\y_n &= b_1 y_{n-1} + b_2 y_{n-2} + k x_{n-1} + \xi_{y,n},\end{aligned}\tag{1}$$

где  $n$  – дискретное время, коэффициенты  $a_1 = 2\cos(2\pi/T_x)\exp(-1/\tau_x)$ ,  $a_2 = -\exp(-2/\tau_x)$ ,  $b_1$  и  $b_2$  вычисляются через  $T_y$  и  $\tau_y$  по аналогии с  $a_1$  и  $a_2$  соответственно,  $\xi$  – гауссовские взаимно некоррелированные белые шумы с дисперсией равной 1,  $T$  – период колебаний,  $\tau$  – время релаксации (время спада огибающей автокорреляционной функции до  $1/e$ ), которые выражаются в единицах числа шагов дискретного времени.

Оценки связи по Грейнджеру представляют собой улучшение прогноза (УП) при учете в авторегрессионной модели одного процесса данных от второго. УП при наличии измерительного шума вычисляются точно через определители матриц ковариаций двумерного процесса (1), которые отыскиваются путем решения линейных дифференциальных уравнений для моментов второго порядка [4] без статистической оценки по временным рядам, которая используется для расчета УП в зависимости от длины временного ряда. На практике наиболее «опасна» с точки зрения эффекта ложной связи (т.е. большой величины УП в ложную сторону, здесь для определенности принималось ее пороговое значение 0,01) ситуация умеренных взаимных корреляций, когда исследователь не ожидает таких проблем. Поэтому в работе рассчитывалось максимальное значение взаимной корреляционной функции и выделялись лишь те ситуации, когда оно не превышало 0,5. Измерительный шум добавлялся только к временному ряду ведущего осциллятора, так как это приводит к наиболее сильному увеличению УП в ложную сторону.

Получены следующие результаты. Максимальное УП в ложную сторону из-за шума наблюдения достигается, как правило, когда дисперсия измерительного шума примерно в два раза превосходит дисперсию «чистого» сигнала от ведущего осциллятора, хотя зависимость от уровня шума слаба в широком диапазоне значений дисперсии шума (от 60 % до 400 % дисперсии чистого сигнала). При умеренной связи и значениях периодов и времени релаксации ведущего осциллятора около 20 интервалов выборки максимальное УП в ложную сторону составляет 0,02, причем эта величина существенно зависит от времени релаксации ведущего осциллятора и практически не зависит от других характерных времен. С ростом связи максимальное УП растет и достигает насыщения. Величина насыщения зависит от периодов колебаний и достигает больших значений от 0,1 до 0,15 для характерных периодов и времен релаксации порядка 10–40. Значения уровня шума и силы связи, при которых имеет место эффект ложной связи, зависят от периода колебаний осцилляторов. Граничный уровень шума уменьшается с ростом значений периодов и может быть весьма небольшим – порядка 10–30 % от дисперсии чистого сигнала при периодах 20–25 шагов интервалов выборки. В случае короткого временного ряда эффект ложной связи означал еще и большее число ошибочных выводов, чем задается в аналитическом F-тесте Фишера на статистическую значимость. Проводились оценки связей по ансамблям из тысячи временных рядов фиксированной длины (без дополнительных осложняющих факторов) от единиц до сотен характерных времен (времен релаксации передемпфированных осцилляторов). Было установлено, что при типичных практических частотах выборки (порядка 10 отсчетов на времени релаксации) эффект ложных связей наблюдается, когда длина ряда становится меньше 20 времен релаксации осцилляторов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-02-00307).

### Литература

1. *Smirnov D.A., Bezruchko B.P.* // Europhys. Lett. 2012. V. 100. Art. 10005.
2. *Крылов С.Н., Смирнов Д.А., Осипов Г.В., Безручко Б.П.* // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, № 11. С. 94.
3. *Timmer J., Lauk M., Pflieger W., Deuschl G.* // Biol. Cybern. 1998. V. 78. P. 349.
4. *Smirnov D.A.* // Phys. Rev. E. 2013. V. 87. Art. 042917.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН НА МАЛЫХ РАЗГОНАХ ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМОВ

*А.М. Кузнецова, Г.А. Байдаков, А.С. Досаев, А.А. Кандауров, М.И. Вдовин,  
В.В. Панко, Д.А. Сергеев, Ю.И. Троицкая*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
alexandra@appl.sci-nnov.ru

В настоящей работе предложена адаптация глобальной волновой модели WAVEWATCH III (WW3) [1], первоначально настроенной на условия морей и океанов, к условиям малых разгонов внутреннего водоема среднего размера на примере Горьковского водохранилища. Коллективом сотрудников отдела нелинейных геофизических процессов ИПФ РАН накоплен большой массив экспериментальных данных, полученных в ходе натуральных экспериментов, проведенных в южной части Горьковского водохранилища [2], удобный для настройки модели и ее последующей верификации.

Модель WW3 основана на численном решении уравнения Хассельмана для спектральной плотности волнового действия  $N$  и находится в открытом доступе.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_x \dot{x}N + \frac{\partial}{\partial \sigma} \dot{\sigma}N + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta}N = \frac{1}{\sigma} (S_{nl} + S_{in} + S_{dis}). \quad (1)$$

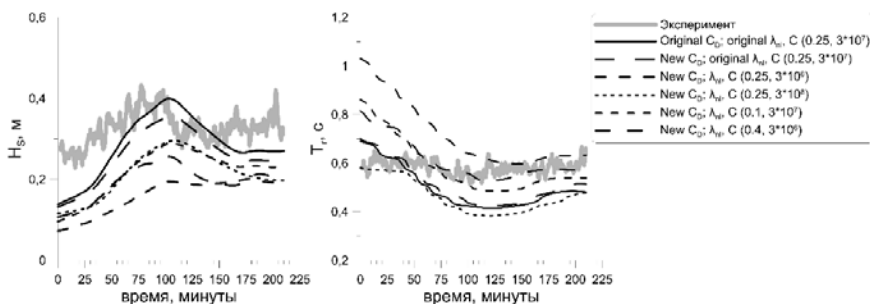
В правую часть уравнения входят динамические слагаемые:  $S_{nl}$  описывает 4-волновое взаимодействие,  $S_{in}$  – нарастание волн под действием ветра и  $S_{dis}$  – диссипацию, обусловленную главным образом обрушением волн. К особенностям волн на малых разгонах водохранилищ средних размеров относится более интенсивная ветровая накачка, пропорциональная отношению скорости трения ветра к фазовой скорости волны [1]. Еще одной особенностью является более сильная нелинейность, вызванная большой крутизной волн. Таким образом, подстройка океанской волновой модели к ус-

ловиям внутренних водоемов средних размеров должна быть осуществлена в два этапа: подстройка ветровой накачки и интеграла столкновений Больцмана. Диссипация из-за опрокидывания волн носит универсальный характер. Первый этап подстройки модели WW3 был реализован в [3] с использованием параметризации  $C_D$  от  $U_{10}$ , полученной в результате серии натуральных экспериментов [2].

Второй этап подстройки связан с адаптацией схемы приближенного вычисления интеграла Больцмана Discrete Interaction Approximation (DIA) [4]. Резонансные нелинейные взаимодействия происходят между четырьмя волновыми компонентами с волновыми числами от  $k_1$  до  $k_4$ . В схеме предполагается, что  $k_1 = k_2$ . Тогда резонансные условия принимают вид

$$\begin{cases} k_1 + k_2 = k_3 + k_4, \\ \omega_1 = \omega_2, \\ \omega_3 = (1 + \lambda_{nl})\omega_1, \\ \omega_4 = (1 - \lambda_{nl})\omega_1. \end{cases} \quad (2)$$

Схема DIA управляется двумя параметрами, первый –  $\lambda_{nl}$ , второй – константа пропорциональности  $C$ , отвечающая за вклад члена нелинейного источника в спектр. Нелинейные взаимодействия обычно вычисляются с использованием только одной комбинации  $(\lambda_{nl}, C)$ . Значения, используемые в WW3 по умолчанию,  $(0,25; 3 \cdot 10^7)$ . Мы рассмотрели другие комбинации  $((0,1; 3 \cdot 10^7), (0,4; 3 \cdot 10^7), (0,25; 3 \cdot 10^6), (0,25; 3 \cdot 10^8))$ . На рис. 1 показано влияние изменения комбинаций на значение периода волны.



**Рис. 1.** Чувствительность расчета средних параметров волнения в модели WW3 при изменении параметров схемы DIA

На основании данной оценки чувствительности модели был подстроен интеграл столкновений, подобраны «оптимальные параметры», отвечающие наилучшему соответствию расчета и данных численного эксперимента.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проекты 17-05-41117 и 15-45-02580). Натурные измерения проведены при поддержке РФФ (проект 15-17-20009).

## Литература

1. Tolman H.L. The WAVEWATCH III Development Group (WW3DG), 2016 : Us. man. and sys. doc. of WAVEWATCH III v. 5.16. Tech. Note 329. NOAA / NWS / NCEP / MMAB, USA. 326 p. + App.

2. Kuznetsova A.M. [et al.] Натурные исследования и численное моделирование ветра и поверхностных волн на внутренних водоемах средних размеров // Метеорология и гидрология. 2016. № 2. С. 85–97.

3. Kuznetsova A.M. [et al.] Adjusting of wind input source term in WAVEWATCH III model for the middle-sized water body on the basis of the field experiment // Adv. in Met. 2016. Vol. 1. ID 574602.

4. Hasselmann S., Hasselmann K. Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. Part I : A new method for efficient computations of the exact nonlinear transfer integral // J. Phys. Oceanogr. 1985. Vol. 15. P. 1369–1377.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ И ИОНОСФЕРЫ В РАМКАХ РАЗВИТИЯ МОДЕЛИ ЗЕМНОЙ СИСТЕМЫ ИВМ РАН

*Д.В. Кулямин*

Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва  
kulyamind@mail.ru

Представленный доклад посвящен проблеме моделирования глобального состояния и изменчивости средней и верхней атмосферы, а также ионосферы Земли. На основе новой модели общей циркуляции атмосферы и нижней ионосферы (для высот 0–130 км), созданной в рамках развития атмосферного блока модели Земной системы INMCM, рассматриваются проблемы идентификации и численного описания механизмов формирования глобальной циркуляции в стратосфере, мезосфере и термосфере, динамического взаимодействия нижних и верхних слоев атмосферы, солнечно-земных связей. В качестве самостоятельной задачи в рамках данной модели решается проблема описания процессов формирования нижних слоев ионосферы (D (60–95 км) и E (95–130 км) слоя) и связанных с ними прикладных радиофизических характеристик. Проблема моделирования глобального состояния взаимодействующей системы «ионосфера – термосфера» (область атмосферы на высотах 90–500 км) рассматривается на основе модельных блоков общей циркуляции термосферы и новой динамической модели F-слоя ионосферы, с их объединением в совместную модель, а также перспективным соединением этой модели с моделями нижних слоев атмосферы в рамках единой модели Земной системы ИВМ РАН.

Работы выполнены в ИВМ РАН при поддержке РФФ (проект 14-27-00126).

## ДИНАМИКА ДИСКРЕТНЫХ БРИЗЕРОВ В ИНТЕГРИРУЕМЫХ МОДЕЛЯХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*Д.В. Лантев*

Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины,  
Харьков  
laptev.denis@mail.ru

Работа посвящена теоретическому исследованию динамики и взаимодействия дискретных бризеров в рамках полностью интегрируемого уравнения нелинейной решетки Хироты, моделирующей одномерный ангармонический кристалл, и эквивалентной ей нелинейной линии передачи. Показано, что эти высокочастотные локализованные в пространстве нелинейные возбуждения решеточных систем упруго взаимодействуют между собой и с другими возбуждениями – ударными и линейными волнами. Для уравнения решетки Хироты получена формула нелинейной суперпозиции, связывающая четыре различные солитонные решения. С ее помощью найдены в явном виде решения, количественно описывающие парные столкновения дискретных солитонов между собой, а также с линейными волнами. В результате точно описаны парные процессы взаимодействия дискретных бризеров и ударных волн «бризер – бризер» и «кинк – бризер» и найдены сдвиги их центров масс и фаз осциллирующих бризеров. Получены предельные выражения, описывающие процессы и данные рассеяния линейных волн на таких дискретных солитонах и найден явный вид связанного состояния бризера и ударной волны – осциллирующего кинка.

Выведены уравнения Гамильтона для дискретных кинков и бризеров, которые рассматриваются как частицеподобные возбуждения нелинейной решетки Хироты. Найдены в явном виде выражения для аналога полевого импульса и адиабатического инварианта дискретного бризера в такой решетке. Получены квазиклассический спектр энергии для движущегося дискретного бризера и энергетический спектр дискретных ударных волн.

Рассмотрены длинноволновый и коротковолновый пределы колебаний в нелинейной решетке Хироты. Показано, что в длинноволновом и малоамплитудном пределе колебания описываются полностью интегрируемым модифицированным уравнением Кортевега – де Фриза, для солитонов и бризеров которого получены уравнения Гамильтона и квазиклассические спектры энергии. В пределе сильной локализации динамика дискретного бризера подобна колебанию одного осциллятора Хироты в поле неподвижных соседей. Найден энергетический спектр такой модели и установлена ее функциональная связь с осциллятором Дюффинга.

Впервые получены точные нелинейные периодические решения, которые описывают бризерные и солитонные сверхрешетки в электрической линии передачи и решетке Хироты, и численно установлены пределы их

стабильности. В терминах эллиптических функций Якоби найден аналог дискретного бризера для системы конечных размеров и показано, что такое колебание бифуркационным образом отщепляется от ветви нелинейных однородных противофазных колебаний. Предложено использование дискретных бризеров в микроэлектронных приборах для компактизации и хранения энергии и информации.

### Литература

1. *Hirota R.* Exact N-soliton solution of nonlinear lumped self-dual network equations / R. Hirota // J. Phys. Soc. Jpn. 1973. V. 35, № 1. P. 289–294.
2. *Bogdan M.M.* Exact discrete breather solutions and conservation laws of lattice equations / M.M. Bogdan, G.A. Maugin // Proc. Est. Acad. Sci. Phys. Math. 2003. V. 52, № 1. P. 76–84.
3. *Laptev D.V.* Nonlinear periodic waves solutions of the nonlinear self-dual network equations / D.V. Laptev, M.M. Bogdan // J. Math. Phys. 2014. V. 55, № 4. P. 042903-1 – 042903-15.

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ НА ДИНАМИКУ АНСАМБЛЯ НЕЙРОНОПОДОБНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*Т.А. Леванова<sup>1</sup>, А.О. Казаков<sup>1,2</sup>, А.Г. Коротков<sup>1</sup>, Г.В. Осипов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

<sup>2</sup>Высшая школа экономики, Нижний Новгород

tatiana.levanova@itmm.unn.ru

В последние несколько лет активно развивается новая область медицины – биоэлектрическая медицина, которая опирается на электрическое воздействие на организм вместо часто используемого в настоящее время химического воздействия [1]. Мишенью такого воздействия являются главным образом нервные волокна, при этом сигналы доставляются с помощью имплантов или носимых устройств. Для разработки новых медицинских технологий и внедрения их в реальное лечение требуется гораздо более глубокое понимание того, как периферическая нервная система участвует в регуляции процессов в организме.

Цель данной работы – изучение влияния внешнего электрического воздействия на режимы нейронной активности в моделях нейронных ансамблей с химическими (синаптическими) и электрическими связями с применением методов нелинейной динамики. Для этого была рассмотрена феноменологическая модель минимального ансамбля 3 неидентичных нейронов с указанными типами связей. Один нейрон моделируется одним осциллятором Ван-дер-Поля. В предыдущей работе авторов [2] был подробно изучен ансамбль идентичных осцилляторов Ван-дер-Поля исключительно с

химическими тормозящими связями. Было описано 3 основных режима нейроноподобной активности, наблюдающихся в описанном ансамбле в зависимости от соотношения сил химических связей: последовательная пачечная активность (случай сильной асимметрии связей), конкуренция с победителем (случай сильных симметричных связей со значениями выше некоторого порогового), а также периодические автоколебания слабосвязанных осцилляторов (случай слабых связей). В данной работе рассматривается эволюция указанных режимов при добавлении в систему электрических связей и частотной расстройки между элементами.

Нами были построены карты старшего ляпуновского показателя на плоскости параметров, отвечающих силе электрической связи  $d$  и частотной расстройке  $\Delta$  между элементами. С их помощью были выделены различные области динамических режимов и определены бифуркационные сценарии перехода между ними. Было показано, что во всех трех случаях существует пороговое соотношение параметров  $d$  и  $\Delta$ , при превышении которого траектории системы начинают уходить в бесконечность. Этот факт хорошо согласуется с данными биологических экспериментов [3], которые показывают, что в реальных биологических системах невозможно бесконечно увеличивать силу связи. В рамках указанного ограничения в системе при различных соотношениях  $d$  и  $\Delta$  наблюдаются периодические, а также квазипериодические и хаотические режимы, которых не наблюдалось при отсутствии электрической связи.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 16-32-00835 и РФФИ 17-12-01534.

### Литература

1. *Birmingham K. et al.* Bioelectronic medicines: a research roadmap // *Nature* **13** (2014) 399.
2. *Levanova T.A. et al.* Sequential activity and multistability in an ensemble of coupled Van der Pol oscillators // *EPJ ST* **222** (2013) 2417.
3. *Nicholls J.G. et al.* From Neuron to brain. 5th ed. Sinauer Associates, 2011.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РАМАНОВСКОЙ КОМПРЕССИИ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ПЛАЗМЕ ДЛЯ УСТАНОВКИ PEARL

*Д.С. Левин<sup>1,2</sup>, А.А. Балакин<sup>1,2</sup>, С.А. Скобелев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

<sup>2</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
levdmit@gmail.com

В настоящее время основным способом для получения мощных лазерных импульсов является использование метода усиления частотно-моду-

лированных импульсов (CPA). Узким местом этого метода является заключительный этап компрессии лазерных импульсов, на котором возможно термическое повреждение дифракционных решеток. Преодолеть данное ограничение можно при использовании плазмы, которая способна выдерживать куда большие плотности потока энергии. В частности, плазму предлагается использовать в схеме обратного рамановского усиления, в которой компрессия лазерного импульса основана на резонансной перекачке энергии между двумя встречно распространяющимися лазерными импульсами, взаимодействующими посредством плазменной волны.

Для данной схемы, однако, характерно наличие множества паразитных эффектов, таких как усиление шумов плазмы, нарушение трехволнового синхронизма из-за релятивистской нелинейности и/или опрокидывания плазменной волны и др. Большая часть этих эффектов может быть ослаблена выбором оптимальных параметров лазерных импульсов и плазмы. В данном докладе будут определены оптимальные параметры для готовящегося эксперимента на установке PEARL в ИПФ РАН.

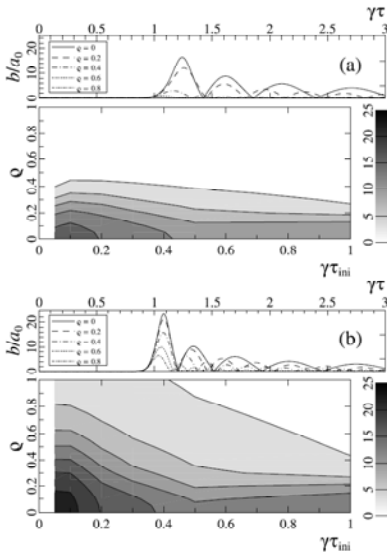
Анализ задачи рамановской компрессии в данной работе проведен в рамках гидродинамического описания плазмы, а также с учетом релятивистского самовоздействия лазерных импульсов. Для описания лазерных импульсов и плазменных колебаний используется квазимонохроматическое приближение. Уравнения на огибающие двух встречных электромагнитных волн  $a$ ,  $b$  и огибающую плазменной волны  $f$ , которая может быть вблизи порога опрокидывания, принимают вид трехволновых уравнений с дополнительными слагаемыми:

$$\begin{aligned}\partial_t a + \partial_z a &= -bf + iKa - i\alpha/2 \partial_{zz} a, \\ \partial_t b - \partial_z b &= -af^* + iKb - i\epsilon|b|^2 b - i\alpha/2 \partial_{zz} b, \\ \partial_t f &= ab^* + i\kappa b + i\chi|f|^2 f - \nu f.\end{aligned}$$

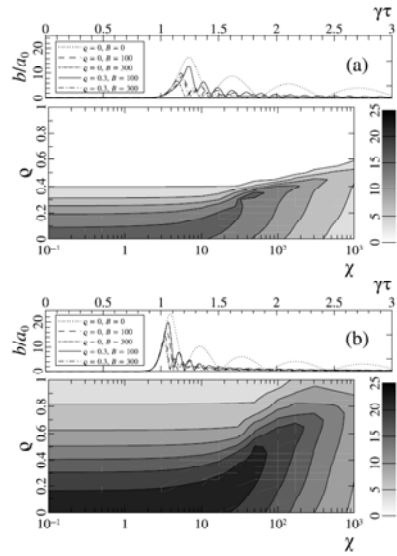
Здесь  $t$  и  $z$  нормированы на обратный инкремент рамановского усиления  $1/\gamma$  и  $c/\gamma$  ( $\gamma = 1/a_0\beta^{1/4}\omega$ ),  $a$  и  $b$  нормированы на амплитуду накачки  $a_0$ ;  $\beta = \omega_p^2/\omega^2$  – отношение плотности плазмы к критической;  $\alpha = a_0\beta^{5/4}$ ,  $\epsilon = 3/4 a_0\beta^{3/4}$ ,  $\chi = 8a_0/\beta^{5/4}$  – безразмерные коэффициенты плазменной дисперсии, релятивистской и гидродинамической нелинейностей,  $\nu = \nu_L/\gamma$  – безразмерный коэффициент затухания Ландау;  $K = \beta/2\gamma\delta n$  и  $\kappa = \beta^{1/2}/\gamma\delta n$  описывают влияние квазистатических неоднородностей плазмы.

Проведено аналитическое и численное исследований данных уравнений при различных значениях параметров. Показано, что основными ограничивающими факторами будут излишне высокая частотная модуляция импульса накачки и слишком редкая плазма, в которой возможно опрокидывание плазменной волны. Из рисунка 1 видно, что короткие импульсы позволяют уменьшить ограничение на максимально допустимую величину частотной модуляции  $Q$  импульса накачки  $a \sim a_0 \exp(iQ\gamma^3 t^2)$ , однако превышение ей значения порядка единицы все равно делает рамановское усиле-

ние затруднительным. Кроме того, мы предлагаем сместить начало области взаимодействия на край плазмы для компенсации излишне большой частотной модуляции накачки.



**Рис. 1.** Профили усиленного сигнала и зависимость его максимальной амплитуды от начальной длительности  $\tau_{ini}$  и величины  $q$  для разных значений начальной амплитуды затравочного импульса:  $0,1a_0$  (a) и  $a_0$  (b)



**Рис. 2.** Профили усиленного сигнала и зависимость его максимальной амплитуды от параметров  $\chi$  и  $q$  для разных значений начальной амплитуды затравочного импульса:  $0,1a_0$  (a) и  $a_0$  (b)

В то же время частотная модуляция накачки  $q \approx 0,5$ , слабо влияя на линейную стадию усиления интенсивного короткого затравочного импульса, способна компенсировать расстройку трехволнового синхронизма из-за близости к порогу опрокидывания плазменной волны вплоть до значений  $\chi \leq 500$  (рис. 2). При планируемой амплитуде накачки  $a_0 \approx 0,01$  от релятивистского значения это позволяет эффективно использовать в эксперименте даже довольно низкие концентрации плазмы – до долей процента от критической плотности ( $\beta \geq 0,002$ ).

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 17-72-20111).

# **РАДИАЦИОННАЯ СИЛА, ДЕЙСТВУЮЩАЯ НА ТВЕРДЫЕ МИКРОЧАСТИЦЫ В СФОКУСИРОВАННОМ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПУЧКЕ**

*М.В. Лесик, В.Г. Андреев*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
marusya\_12-95@mail.ru

Решена задача захвата и перемещения микрочастиц одним сфокусированным преобразователем. Теоретически рассчитано пространственное распределение радиационной силы, действующей на твердые сферические частицы в поле сфокусированного излучателя. Показано, что имеется небольшая область на расстоянии 64 мм от поверхности излучателя, где частицы с диаметром 150 мкм могут быть захвачены при амплитуде колебательной скорости на поверхности излучателя, превышающей 6 см/с. Проведены измерения смещения частиц песка в горизонтальных плоскостях, расположенных на расстоянии 60–70 мм от излучателя. Показано, что радиационная сила приводит к образованию областей чистой поверхности, размеры и положение которых зависят от расстояния до излучателя и интенсивности ультразвука.

# **ГЕНЕРАЦИЯ СПАЙКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМЕ НЕЙРОНОВ ФИТЦ-ХЬЮ – НАГУМО С РАЗЛИЧНЫМ УРОВНЕМ ДЕПОЛЯРИЗАЦИИ**

*А.А. Макеева*

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
mackeeva.an@yandex.ru

Приводятся результаты исследования динамики малой нейронной сети, состоящей из трех нейронов Фитц-Хью – Нагумо, обладающих различным уровнем деполяризации, которые взаимодействуют между собой последовательно через химические синапсы, то есть однонаправленно. Математическая модель сети представляет собой нелинейную систему восьмого порядка релаксационного вида. Будем предполагать, что уровень деполяризации первого нейрона такой, что в отсутствие внешнего воздействия он находится в состоянии покоя, то есть его мембранный потенциал является постоянным. Методами нелинейной динамики и численного моделирования установлены следующие результаты. Начиная с некоторого уровня синаптической связи между первым и вторым нейроном происходит возбуждение второго нейрона, и он становится активным. Установлено, что про-

цесс активации второго нейрона происходит за счет суперкритической бифуркации Андронова – Хопфа. Дальнейшее увеличение коэффициента связи приводит к постепенной деформации формы устойчивого предельного цикла, которая принимает вид так называемой утки. Такие предельные циклы являются релаксационными и формируются быстрыми и медленными движениями, которые проходят в окрестности как устойчивого, так и неустойчивого многообразий. Обоим предельным циклам соответствуют периодические спайковые колебания второго нейрона различной формы. Мы показали, что поведение третьего нейрона существенно зависит от вида спайковых колебаний, генерируемых вторым нейроном. В фазовом пространстве динамической системы, описывающей третий нейрон, установлено существование различных, в зависимости от параметров, аттракторов: инвариантного тора, инвариантного тора-утки, которые при изменении параметров разрушались, и система переходила в режим динамического хаоса. Построена бифуркационная диаграмма, иллюстрирующая этот процесс. На основании диаграммы проведена классификация возможных спайковых режимов нейронной сети.

#### Литература

1. *Horikawa, Y.* Exponential transient propagating oscillations in a ring of spiking neurons with unidirectional slow inhibitory synaptic coupling // *Journal of Theoretical Biology.* 2011. V. 289. P. 151-159.
2. *Szmolyan, P., Wechselberger, M.* Canards in  $\mathbb{R}^3$  // *Journal of Differential Equations.* 2001. V. 172 (2). P. 419-453.

### **ФОРМИРОВАНИЕ ЗАПУТАННЫХ СОСТОЯНИЙ В РЕШЕТКЕ СВЕТОВОДОВ С КВАДРАТИЧНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ**

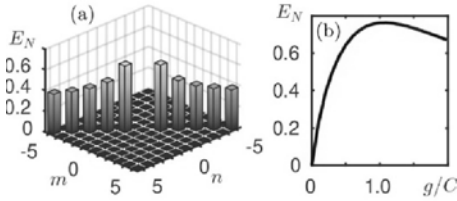
*В.О. Мартынов*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
martvo@appl.sci-nnov.ru

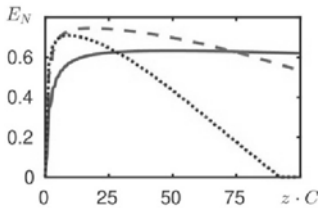
В настоящее время массивы связанных световодов активно изучаются в контексте формирования и управления квантовыми состояниями света [1–3]. В данной работе рассматривается одномерная решетка одномодовых световодов, обладающих квадратичной нелинейностью. В один из световодов, который будем считать центральным, заводится накачка на частоте  $\omega_p$ . Из-за процесса спонтанного параметрического распада в системе генерируется излучение на частоте  $\omega_s = \omega_p/2$ . Эффективность данного процесса при распространении света вдоль решетки определяется параметром  $g$ , который зависит от амплитуды накачки. Решетка устроена таким образом, что моды на частоте  $\omega_s$  соседних волноводов пересекаются, что приводит к линейно-

му взаимодействию их полей. Здесь и далее за  $C$  примем коэффициент, определяющий данное взаимодействие.

Целью данной работы является изучение квантовых свойств оптических полей на частоте  $\omega_S$ , формирующихся в решетке. Для этого на основе формализма Гейзенберга рассчитывается запутанность между парами световодов. В качестве меры запутанности была выбрана логарифмическая отрицательность  $E_N$  [4]. В отличие от работ [2, 3], используемый подход позволяет изучить эффективность формирования запутанных состояний в зависимости от амплитуды накачки  $g$ . Для случая монохроматической накачки результаты вычислений представлены на рис. 1. В процессе распространения света вдоль решетки значение логарифмической отрицательности для отдельных пар световодов выходит на стационарное значение. Более того, только световоды, расположенные симметрично относительно центрального, оказываются запутанными (см. рис. 1, *a*). Стоит также отметить, что существует оптимальное значение амплитуды накачки  $g$ , при котором стационарное значение логарифмической отрицательности становится максимальным.



**Рис. 1.** Стационарное распределение логарифмической отрицательности вычисленной для пар световодов с номерами  $m$  и  $n$  (*a*). Зависимость  $E_N$ , вычисленной для световодов с номерами 1 и  $-1$ , от амплитуды накачки  $g$  (*б*). Рисунки построены для случая монохроматической накачки



**Рис. 2.** Эволюция логарифмической отрицательности  $E_N$ , вычисленной для световодов с номерами 1 и  $-1$ , при распространении света вдоль решетки в случае присутствия фазовых шумов в накачке. Три кривых соответствуют разным значениям амплитуды накачки  $g$ : сплошная –  $0,5C$ , штриховая –  $1,0C$ , пунктирная –  $1,5C$ . Для всех случаев спектральная ширина накачки равна  $D / \omega = 10^{-5} \cdot v_{gr} \cdot C$ , где  $v_{gr}$  – групповая скорость на частоте накачки

Фазовые шумы, которые неизбежно присутствуют в любой реальной накачке, могут оказать существенное влияние на процесс формирования запутанных состояний в параметрических системах [4]. В данной работе исследовалось влияние данного фактора применительно к рассматриваемой системе связанных световодов. Результаты представлены на рис. 2. Наличие фазового шума приводит к тому, что с некоторого расстояния степень запутанности начинает уменьшаться и в конечном счете пропадает полностью. При этом критическое расстояние, после которого квантовые корреляции в системе пропадают полностью, уменьшается с ростом не только спектральной ширины накачки, но и ее амплитуды.

### Литература

1. *Meinecke J.D.A.* Coherent time evolution and boundary conditions of two-photon quantum walks in waveguide arrays / J.D.A. Meinecke, K. Poullos, A. Politi, J. C. F. Matthews, A. Peruzzo, N. Ismail, K. Wörhoff, J. L. O'Brien, M. G. Thompson // *Phys. Rev. A.* 2013. Vol. 88, № 1. P. 012308.
2. *Solntsev A.S. [et al.]* Generation of Nonclassical Biphoton States through Cascaded Quantum Walks on a Nonlinear Chip // *Phys. Rev. X.* 2014. Vol. 4, № 3. P. 031007.
3. *Yang Y.* Manipulation of a two-photon state in a  $\chi^{(2)}$ -modulated nonlinear waveguide array / Y. Yang, P. Xu, L.L. Lu, S.N. Zhu // *Phys. Rev. A.* 2014. Vol. 90, № 4. P. 043842.
4. *Martynov V.O.* Influence of classic noise on entangled state formation in parametric systems / V.O. Martynov, V.A. Mironov, L.A. Smirnov // *Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 2017. Vol. 50, № 8. P. 085501.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПИК-ВОЛНОВЫХ РАЗРЯДОВ С ПОМОЩЬЮ СЛОЖНОЙ СЕТИ НЕЙРОННЫХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ

*Т.М. Медведева<sup>1,2</sup>, М.В. Сысоева<sup>3</sup>, И.В. Сысоев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Саратовский государственный университет

<sup>2</sup>Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва

<sup>3</sup>Саратовский государственный технический университет  
golovatanya@rambler.ru

Абсансная эпилепсия является генерализованной формой эпилепсии, которая характеризуется кратковременными потерями сознания без судорожных проявлений. Эта форма эпилепсии обычно наблюдается у детей и подростков [1], по мере взросления может переходить в другие, судорожные формы [2].

Для понимания механизмов возникновения абсансной эпилепсии важно построить модели, которые воспроизводили бы основные её особенности.

Такие модели известны на различных уровнях организации: от моделей возбуждения индивидуального нейрона вследствие патологического изменения концентрации нейромедиаторов [4] до большой феноменологической модели в виде ансамбля фазовых осцилляторов Курамото [5].

Открытым остаётся вопрос о том, каково значение структуры нейронной сети для возникновения пик-волновых разрядов. Моделирование связей между структурами мозга как сосредоточенными элементами является заметным упрощением. Важная проблема существующих моделей в том, что в них нейроны каждой из рассматриваемых структур формируют интегральный сигнал, который передаётся потом в другие структуры.

Цель данной работы – создание такой модели, которая будет учитывать иерархию организации функциональных единиц нейронных связей, принимающих участие в возникновении и поддержании абсансных разрядов, и воспроизводить некоторые экспериментально наблюдаемые индивидуальные характеристики абсансных сигналов и характеристики связанности.

Модель организована в два уровня. Первый – это модель соматосенсорной области коры мозга, которая считается фокусом эпилепсии [3], модель ветропостериального ядра таламуса и модель внешнего входа – нейронов периферии. Для моделирования групп нейронов были использованы уравнения Фицх-Хью – Нагумо. Второй уровень – это модель связей между внешним входом, таламусом и неокортексом. Она способна воспроизводить хорошо изученные характеристики пик-волновых разрядов: основную частоту и форму колебаний, их амплитуду и среднюю продолжительность. Кроме того, были воспроизведены некоторые характеристики в динамике связанности [4], полученные при оценке связанности реализаций соответствующих отведений ЭЭГ [6].

Таким образом, настоящая модель не претендует заменить существующие модели абсансной эпилепсии, не отрицает результатов, полученных на клеточном уровне и при рассмотрении крупных структур (взаимодействие «таламус ↔ соматосенсорная кора»). Она показывает, что переход к патологическому поведению возможен в результате специфики свойств сети большого числа индивидуально взаимодействующих нейронов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты № 17-02-00307 и № 18-01500418 .

### Литература

1. *Panayiotopoulos, C.P.* Treatment of typical absence seizures and related epileptic syndromes / C.P. Panayiotopoulos // *Paediatric Drugs*. 2001. V. 3. P. 379–403.
2. *Sadleir, L.G.* Electroclinical features of absence seizures in childhood absence epilepsy / L.G. Sadleir, K. Farrell, S. Smith // *Neurology*. 2006. V. 67, № 3. P. 413–418.
3. *Meeren, H.K.* Cortical focus drives widespread corticothalamic networks during spontaneous absence seizures in rats / H.K. Meeren, J.P. Pijn, E.L. van Luijckelaar, A.M. Coenen, F.H. Lopes da Silva // *Journal of Neuroscience*. 2002. V. 22. P. 1480–1495.

4. *Destexhe, A.* A model for 8–10 Hz spindling in interconnected thalamic relay and reticularis neurons / A. Destexhe, D.A. McCormick, T.J. Sejnowski // *Biophys. J.* 1993. V. 65. P. 2473–2477.

5. *Schmidt, H.* Dynamics on networks: the role of local dynamics and global networks on the emergence of hypersynchronous neural activity / H. Schmidt, G. Petkov, M.P. Richardson, J.R. Terry // *PLoS Comput. Biol.* 2014. 10:e1003947.

6. *Sysoeva, M.V.* Dynamics of directional coupling underlying spike-wave discharges / M.V. Sysoeva, A. Luttjohann, G. van Luijtelaa, I.V. Sysoev // *Neuroscience.* 2016. V. 314 P. 75–89.

## ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ГЕНЕРАЦИИ ВЫСОКИХ ГАРМОНИК В ИМПУЛЬСНОМ БИЦИРКУЛЯРНОМ ЛАЗЕРНОМ ПОЛЕ

*А.А. Минина<sup>1,2</sup>, М.В. Фролов<sup>1,2</sup>, Н.Л. Манаков<sup>1</sup>, А.А. Силаев<sup>2</sup>,  
Н.В. Введенский<sup>2</sup>, А.Ф. Старас<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Воронежский государственный университет

<sup>2</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

<sup>3</sup>Университет Небраски, Линкольн, Небраска, США

voronina1801@gmail.com

Поляризационные свойства гармоник (такие как степень циркулярной поляризации и угол смещения эллипса поляризации) определяются индуцированным лазером с дипольным моментом  $D(\Omega)$ . Например, степень циркулярной поляризации гармоники с частотой  $\Omega$  равна

$$\xi = 2 \frac{\text{Im} \left( D_x(\Omega) D_y^*(\Omega) \right)}{\left| D_x(\Omega) \right|^2 + \left| D_y(\Omega) \right|^2}.$$

Совсем недавно генерация аттосекундных импульсов с контролируемой эллиптичностью (близкой к циркулярной) вызвала большой практический интерес. Для генерации такого импульса наложенные гармоники должны иметь одинаковую эллиптичность и сравнимую интенсивность, т.е.  $D_x(\Omega) \approx \pm i D_y(\Omega)$  для широкого диапазона  $\Omega$ . Это можно реализовать для бициркулярного лазерного поля с несущими частотами  $\omega$  и  $2\omega$ , имеющими одинаковые интенсивности и противоположную спиральность [1]. С опорой на правила дипольного отбора было показано, что гармоники с порядками  $(3n+1)\omega$  и  $(3n-1)\omega$  циркулярно поляризованы в противоположных направлениях [2–4]. Таким образом, потенциально аттосекундный импульс (или последовательность импульсов) может быть получен путем суммиро-

вания гармоник из одной группы. Следует отметить, что поляризационные свойства и выход гармоник не зависят от относительной фазы между двумя компонентами, если они являются монохроматическими полями или импульсами с трапецидальной формой. Это свойство ограничивает возможность управлять эллиптичностью генерируемого аттосекундного импульса.

В этой работе предложен альтернативный способ управления эллиптичностью аттосекундного импульса, который основан на использовании двух коротких циркулярно поляризованных лазерных импульсов с временной задержкой и несущими частотами  $\omega$  и  $2\omega$  с одинаковыми пиковыми интенсивностями и противоположной спиральностью. Теоретическая составляющая предлагаемой схемы основана на недавно разработанной теории генерации высоких гармоник в адиабатическом приближении. Если два циркулярно поляризованных импульса являются достаточно короткими, то в рамках развитого приближения (см. [5])  $D(\Omega)$  можно представить в следующем виде (вплоть до общей комплексной константы, которая не влияет на результаты):

$$D(\Omega) = K_1(\Omega) + K_2(\Omega)e^{i\Delta S},$$

где  $K_1$  и  $K_2$  – вещественные векторы, длины которых незначительно зависят от времени задержки ( $K_1 \approx K_2$ ); угол между этими двумя векторами составляет приблизительно  $120^\circ$ . Классическая разность действий  $\Delta S = S_2 - S_1$  находится между двумя соседними событиями ионизации и рекомбинации. Так как  $\Delta S$  чувствительно к временной задержке, изменяя временную задержку между двумя импульсами, можно настроить компоненты  $D(\Omega)$  на те значения, которые обеспечивают желаемую степень циркулярной поляризации:

$$\xi \approx -\frac{\sin \Delta S}{\frac{K_1}{K_2} + \frac{K_2}{K_1} - \sqrt{3} \cos \Delta S}.$$

В этой работе мы показываем, что интерференционные явления в генерации высоких гармоник с помощью бициркулярного поля могут быть использованы в качестве эффективного инструмента для управления поляризационными свойствами гармоник высокого порядка. Также приводятся результаты численных решений временного уравнения Шредингера, которые, как установлено, согласуются с результатами предложенной теоретической модели.

### Литература

1. *Kfir, O.* Generation of brightphase-matched circularly-polarized extreme ultraviolet high harmonics / O. Kfir [et al.] // Nat. Photonics. 2015. V. 9. P. 99.
2. *Long, S.* Model calculations of polarization-dependent two-color high-harmonic generation / S. Long, W. Becker, J.K. Mciver // Phys. Rev. A. 1995. V. 52. P. 2262.

3. *Milosevic, D.B.* Circularly polarized high harmonics generated by a bicircular field from inert atomic gases in the p state: A tool for exploring chirality-sensitive processes / D.B. Milosevic // Phys. Rev. A. 2015. V. 92. Art. 043897.

4. *Medišauskas, L.* Generating Isolated Elliptically Polarized Attosecond Pulses Using Bichromatic Counterrotating Circularly Polarized Laser Fields / L. Medišauskas [et al.] // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 115. Art. 153001.

5. *Минина А.А.* Туннельное приближение для оценки амплитуды генерации высших гармоник в интенсивных лазерных полях: анализ времен ионизации и рекомбинации / А.А. Минина, М.В. Фролов, А.Н. Желтухин, Н.В.Введенский // Квантовая электроника. 2017. Вып. 47, № 3.

## ДИНАМИКА ЛАЗЕРА С КОГЕРЕНТНОЙ ИНЖЕКЦИЕЙ И МОДУЛЯЦИЕЙ НАКАЧКИ

*В.С. Митина<sup>1</sup>, А.А. Кренц<sup>1,2</sup>, Н.Е. Молевич<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет  
им. академика С.П. Королева

<sup>2</sup>Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН  
MilLerik-2@yandex.ru

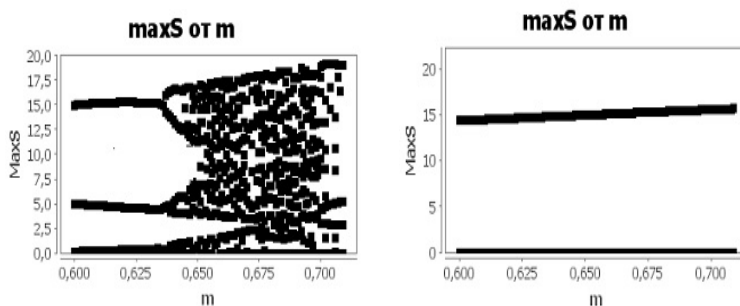
Хорошо известно, что лазерам свойственна сложная, в том числе хаотическая, динамика излучения. В данной работе исследовано влияние инжекции внешнего когерентного излучения на динамику лазера с периодической модуляцией параметра накачки. При частоте модуляции, близкой к частоте релаксационных колебаний, лазерам свойственна сложная хаотическая динамика излучения. Для многих приложений хаотическая динамика выходного излучения является нежелательным эффектом. В данной работе исследована возможность стабилизации излучения лазера с помощью когерентной внешней оптической инжекции.

Основой проведенного анализа является стандартная модель лазера динамического класса В, расширенная с учетом когерентной оптической инжекции:

$$\begin{cases} \frac{dS}{d\tau} = -S(1 + m \cos \beta\tau - D - P_{inj}), \\ \frac{dD}{d\tau} = -\gamma(D - A + SD), \end{cases} \quad (1)$$

где  $S$  – это безразмерная интенсивность генерируемого излучения,  $D$  – безразмерная инверсия населенности,  $A$  – параметр накачки,  $\gamma$  – скорость потерь для инверсии населенности,  $\beta$  – частота модуляции,  $m$  – амплитуда модуляции,  $P_{inj}$  – интенсивность инжектируемого излучения.

Для получения численного решения был использован стандартный метод Рунге – Кутты. Моделирование проводилось при частоте модуляции равной частоте релаксационных колебаний лазера  $\beta$ . На рисунке 1, *а* представлена бифуркационная диаграмма в случае отсутствия инъекции  $P_{inj} = 0$ , иллюстрирующая переход к динамическому хаосу через последовательность бифуркаций удвоения периода. Хорошо видно, что при достаточно большой амплитуде модуляции  $m$  динамика лазера становится хаотической. Моделирование показало, что даже небольшая по интенсивности когерентная инъекция стабилизирует динамику лазера. На рисунке 1, *б* показана бифуркационная диаграмма при  $P_{inj} = 0,05$ . Хорошо видно, что лазер генерирует регулярные импульсы даже при больших амплитудах модуляции  $m$ .



**Рис. 1.** Бифуркационные диаграммы, изображающие максимумы интенсивности  $S$  как функции амплитуды модуляции  $m$ . Параметры, используемые при численном интегрировании:  $A = 1,30$ ,  $\beta = 0,09441$  и  $\gamma = 0,027$ ;  $P_{inj} = 0$  (*а*),  $P_{inj} = 0,05$  (*б*)

Результаты моделирования, полученные в данной работе, показали, что инъекция внешнего когерентного излучения стабилизирует динамику системы, позволяет избавиться от хаоса, возникающего в результате последовательности бифуркаций удвоения периода. Представленные результаты могут быть использованы в высокоскоростных оптических каналах связи.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-32-60151 мол\_а\_дк, государственного задания вузам и научным организациям в сфере научной деятельности (3.1158.2017).

## ФАЗОВЫЕ ШУМЫ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ НЕИЗОХРОННЫХ АВТОГЕНЕРАТОРОВ

*А.А. Митрофанов<sup>1,2</sup>, А.Р. Сафин<sup>1</sup>, Н.Н. Удалов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

<sup>2</sup>ООО «Радиокомп», Москва

mitrofanov\_alexander@mail.ru

Одной из главных характеристик любого автогенератора является уровень фазовых шумов. Низкий уровень фазовых шумов автогенератора – необходимое требование при разработке множества радиолокационных и радиопередающих устройств. Неизохронность автогенераторов, являясь механизмом изменения частоты выходных колебаний, приводит к ухудшению уровня фазовых шумов из-за влияния амплитудных шумов на фазовые [1]. Один из способов их уменьшения – использование синхронизации внешней силой. В качестве внешней силы обычно используется гармоническое воздействие или система фазовой автоподстройки частоты.

В данной работе методом медленно меняющихся амплитуд получены линеаризованные укороченные уравнения для расчета уровня фазовых шумов неизохронного автогенератора, синхронизированного внешним гармоническим воздействием или цепью ФАПЧ:

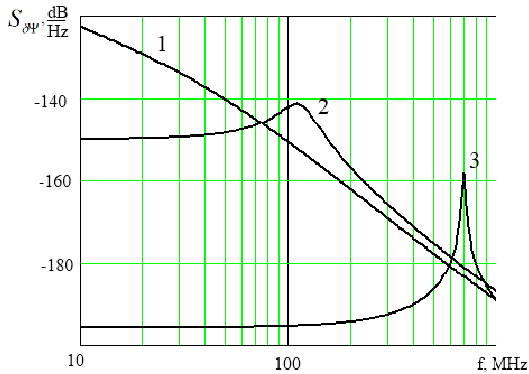
$$\begin{cases} \frac{d\delta u}{dt} = \Gamma\delta u + E\delta\varphi + \sqrt{D}\tilde{f}_n(t); \\ \frac{d\delta\varphi}{dt} = N_l\delta u + \frac{\sqrt{D}}{U_0}\tilde{f}_n(t), \end{cases} \quad (1)$$

где  $\Gamma$  – коэффициент затухания,  $E$  – коэффициент синхронизации,  $N_l$  – линеаризованный коэффициент неизохронности,  $\tilde{f}_n(t)$  – функция, описывающая влияние белого гауссовского шума,  $\delta u$  и  $\delta\varphi$  – малые отклонения амплитуды и разности фаз колебаний автогенератора от стационарных значений соответственно,  $D$  – дисперсия шума,  $U_0$  – стационарное значение амплитуды.

С использованием спектрального метода для укороченных уравнений (1) получены выражения для спектральных плотностей амплитудных и фазовых шумов:

$$\begin{aligned} S_{\delta u} &= D \frac{\omega^2 + E_U^2}{(-\omega^2 - EN_l)^2 + \omega^2 \Gamma^2} S_f, \\ S_{\delta\varphi} &= \left( \frac{D}{U_0^2} \right) \frac{\omega^2 + (N_U + \Gamma)^2}{(-\omega^2 - EN_l)^2 + \omega^2 \Gamma^2} S_f. \end{aligned} \quad (2)$$

Зависимости спектральных плотностей фазовых флуктуаций при разных видах синхронизации показаны на рис. 1.



**Рис. 1.** Фазовые шумы автогенератора автономного неизосинхронного (1); синхронизированного цепью ФАПЧ (2); синхронизированного внешним гармоническим воздействием (3)

Согласно полученным результатам синхронизация внешним гармоническим воздействием обеспечивает лучшее значение фазовых шумов. Причиной этого улучшения является механизм синхронизации внешним гармоническим воздействием, который воздействует непосредственно на фазу колебаний неизосинхронного автогенератора, в отличие от системы ФАПЧ, в которой автоподстройка частоты происходит за счет изменения амплитуды колебаний.

Таким образом, проведен анализ фазовых шумов синхронизированного цепью ФАПЧ и внешним гармоническим воздействием неизосинхронного автогенератора и сравнение фазовых шумов с характеристиками автономного неизосинхронного автогенератора. Также в данной работе приводится сравнение уровня фазовых шумов различных типов автогенераторов, в том числе на сосредоточенных элементах с варикапом, на спин-волновых линиях задержки, и нового перспективного класса автогенераторов – спин-трансферных наноосцилляторов [2]. На основе полученных результатов даются рекомендации по построению систем внешней синхронизации неизосинхронных автогенераторов.

### Литература

1. Савченко М.П., Старовойтова О.В. Способ снижения фазовых шумов в автогенераторе с варикапами // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2016. № 1. С. 71–75.
2. Slavin A., Tiberkevich V. Nonlinear Auto-Oscillator Theory of Microwave Generation by Spin-Polarized Current // IEEE Trans. Magnetics. 2009. V. 45, № 4.

# ВЛИЯНИЕ КОНЕЧНОЙ МАССЫ ИОНОВ НА ЭФФЕКТ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ САМОИНДУЦИРОВАННОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ В НЕОДНОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ

*Н.А. Михейцев*

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
mikheytev.nikita@gmail.com

Современные технологии создания фемтосекундных лазеров со сверх-высокой пиковой мощностью позволили проводить эксперименты по взаимодействию с веществом излучения интенсивностью до  $10^{21}$  Вт/см<sup>2</sup> и выше. Характер взаимодействия при этом носит сильно нелинейный характер, вызванный ультррелятивизмом осциллирующих в поле излучения электронов. Одним из важных эффектов, возникающих в таких системах, является релятивистская самоиндуцированная прозрачность – прохождение излучения через изначально непрозрачный слой закритической плазмы при достижении излучением некоей критической интенсивности. Данная работа посвящена теоретическому исследованию этого эффекта.

Исследовалось нормальное падение релятивистски интенсивной плоской электромагнитной волны на слой закритической плазмы. Первое теоретическое исследование этого вопроса было опубликовано в [1]. Система уравнений, описывающая данную задачу в квазистационарном случае, впервые была получена и решена в работе [2] с рядом приближений: однородность задачи, циркулярная поляризация падающей волны, гидродинамическое описание плазмы, однородность слоя, нулевая температура электронов, неподвижность ионов.

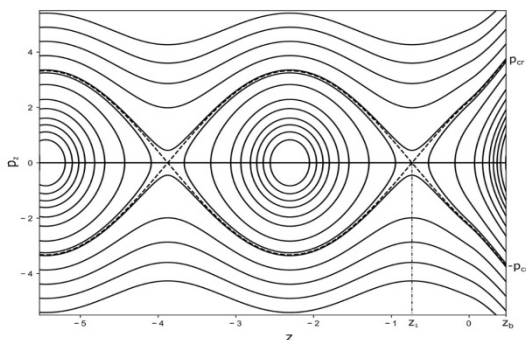
В данной работе произведено обобщение на случай неоднородного начального распределения плазмы. Это позволило, в частности, учесть существование предплазмы, создаваемой лазерным предвестником.

Разработанный алгоритм построения решений позволил учесть также движение ионов, которое может играть роль на временах сравнимых с обратной плазменной частотой ионов. Распределение движущихся ионов при этом было получено из решения промежуточной задачи о релятивистском движении положительно заряженной компоненты плазмы.

Была исследована задача о движении одного электрона вблизи границы слоя. Показано, что для всех полученных решений состояние электрона устойчиво относительно малых отклонений от равновесия.

Также построен фазовый портрет отдельного электрона (рис. 1), из которого видно, что если электрон, находящийся на границе слоя, обладает продольным импульсом большим, чем некоторый критический импульс ( $p_{cr}$  на рисунке), то он покинет слой. Одним из механизмов сообщения электрону такого импульса может быть температура, которая таким образом может снижать порог прозрачности [3]. В работе была исследована зависимость критического импульса от амплитуды лазерного излучения и

концентрации электронов в плазме в случае безграничного однородного слоя при разных длительностях импульса.



**Рис. 1.** Фазовая плоскость движения одного электрона. Излучение падает вдоль оси абсцисс. Начало координат по абсциссе – левая граница ионного слоя, точка  $Z_b$  – левая граница электронного слоя,  $Z_1$  – первая седловая точка вне слоя. Пунктиром обозначены сепаратрисы

Анализ показал, что роль движения ионов, как и ожидалось, растёт с увеличением времени взаимодействия. Было показано, что чем длиннее импульс, тем выше критическая температура, при которой наступает прозрачность плазмы.

### Литература

1. Ахиезер, А.И. Теория волнового движения электронной плазмы / А.И. Ахиезер, Р.В. Половин // ЖЭТФ. 1956. Т. 30. С. 915–925.
2. Marburger, J.H. Nonlinear optical standing waves in overdense plasma / J.H. Marburger, D.F. Tooper // Phys. Rev. Lett. 1975. Vol. 35, Iss. 15. P. 1001–1004.
3. Siminos, E. Effect of electron heating on self-induced transparency in relativistic-intensity laser-plasma interactions / E. Siminos, M. Grech, S. Skupin, T. Schlegel, V.T. Tikhonchuk // Phys. Rev. 2012. Vol. 86, Iss. 5. P. 056404.

## ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС НА РАЗНОСТНОЙ ЧАСТОТЕ В СИСТЕМЕ ДВУХ СВЯЗАННЫХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ

А.В. Мишин<sup>1</sup>, Вл.В. Кочаровский<sup>1</sup>, В.В. Кочаровский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

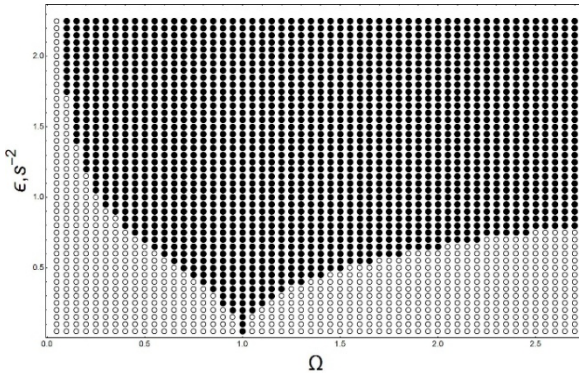
<sup>2</sup>Texas A&M University, Texas, USA

mishin.nn@mail.ru

В квантовой электронике и физике конденсированных сред часто возникает задача о параметрическом возбуждении колебаний в системе двух связанных осцилляторов, обладающих различными частотами; примером

может служить возбуждение колебаний в квантовых трехуровневых системах (молекулах, примесных центрах, квантовых точках) или классических резонаторах с двумя выделенными модами (электромагнитными, акустическими, поляритонными) [1–3].

В данной работе эта задача рассмотрена для мало исследованного случая системы двух связанных осцилляторов со слабым затуханием и близкими парциальными частотами, кратными их разности:  $\omega_1 = \omega_2 + \omega_0 = n\omega_0$ , где целое число  $n \gg 1$  характеризует порядок «двойного» резонанса. Изучены особенности параметрического возбуждения системы в условиях указанного двойного резонанса при модуляции вблизи разностной частоты как коэффициента связи между осцилляторами, так и их парциальных частот. Проведен численный расчет матрицанта [4] и построены диаграммы устойчивости [5] для типичных параметров осцилляторов (см. рис. 1).



**Рис. 1.** Диаграмма устойчивости для двух связанных осцилляторов с частотами  $\omega_1 = 6\omega_0$  и  $\omega_2 = 5\omega_0$ . Черными точками изображена область параметрической неустойчивости. По горизонтальной оси отложена частота  $\Omega = \omega / \omega_0$ , а по вертикальной оси – амплитуда периодического возбуждения коэффициента связи  $\epsilon$

Выяснено, что порог параметрической неустойчивости связанных осцилляторов понижается с уменьшением декремента их затухания, разность фаз возбуждения коэффициента связи 1-го и 2-го осцилляторов слабо влияет на границу устойчивости системы, область неустойчивости сужается с ростом порядка резонанса  $n$ . Изучено также влияние расстройки двойного резонанса на развитие параметрической неустойчивости в широкой области значений параметров системы. Установлено, что наличие двойного резонанса способствует развитию параметрической неустойчивости.

### Литература

1. *Агарьев, Б.Д.* Когерентное пленение населенностей в квантовых системах / Б.Д. Агарьев, М.Б. Горный, Б.Г. Матисов, Ю.В. Рождественский // УФН. 1993. Т. 163, вып. 9. С. 1–35.

2. Железняков, В.В. Волны поляризации и сверхизлучение в активных средах / В.В. Железняков, В.В. Кочаровский, Вл.В. Кочаровский // УФН. 1989. Т. 159, вып. 2. С. 194–256.

3. Рабинович, М.И. Введение в теорию колебаний и волн / М.И. Рабинович, Д.И. Трубецков. – Колледж, 2000. – 560 с.

4. Демидович, Б.П. Лекции по математической теории устойчивости. – СПб. : Лань, 2008. – 480 с.

5. Якубович, В.А. Линейные дифференциальные уравнения с периодическими коэффициентами и их приложения / В.А. Якубович, В.М. Старжинский. – М. : Наука, 1972. – 716 с.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦЕЛОЧИСЛЕННЫХ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ С ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМОЙ ХАРАКТЕРИСТИК

*Н.С. Морозов, В.Н. Бугров, И.Я. Орлов*

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
nsmorozov@rf.unn.ru

Одним из наиболее востребованных алгоритмов цифровой обработки сигналов является, как известно, цифровая фильтрация. Являясь устройствами частотной селекции входного сигнала, цифровые фильтры обычно разрабатываются на основе требований к их частотным характеристикам, таким как требуемые АЧХ, ФЧХ, требуемые характеристики ГВЗ или частотной дисперсии сигнала. В настоящее время появляется множество прикладных задач с весьма сложными требованиями к амплитудной селекции полезного сигнала. Однако классические методы проектирования рекурсивных цифровых фильтров по аналоговому прототипу с применением метода билинейного преобразования либо различных подходов, на нем базирующихся, не позволяют, как это показано в [1, 2], синтезировать БИХ-фильтры с произвольной формой характеристик, не дают возможности удовлетворить постоянно возрастающие селективные требования. Однако идеология ЦНП [1–5] позволяет эффективно проектировать целочисленные рекурсивные фильтры с заданной разрядностью представления данных при максимальном выполнении требований к совокупности противоречивых частотных характеристик фильтра при произвольной форме их задания. Важным достоинством таких целочисленных цифровых фильтров (ЦЦФ) является отсутствие процедуры квантования как коэффициентов фильтра, так и результатов промежуточных вычислений в ходе расчета отклика фильтра в реальном времени, а следовательно, и отсутствие негативных последствий квантования данных, перечисленных выше.

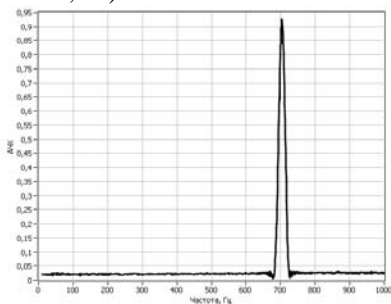
В данной статье приводятся несколько характерных примеров решения задач синтеза рекурсивных целочисленных фильтров со сложными селек-

тивными требованиями численными методами дискретного программирования, примеров, иллюстрирующих принципиальные возможности данного подхода к многофункциональному проектированию цифровых систем.

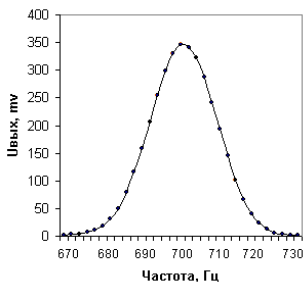
### Примеры:

Узкополосный гауссов фильтр (рис. 1а, 1б).

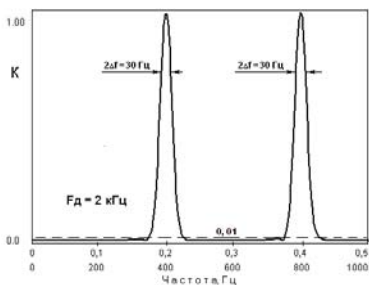
Двухполосный гауссов фильтр с кратными центральными частотами (рис. 2а, 2б).



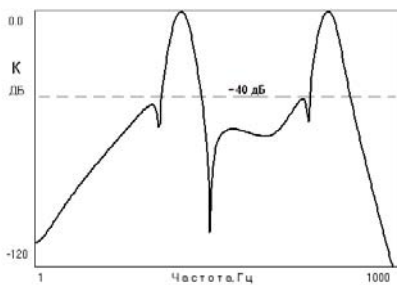
**Рис. 1а.** Измерение АЧХ фильтра в полосе первого резонанса (400 Гц)



**Рис. 1б.** Измерение АЧХ фильтра в полосе второго резонанса (800 Гц)



**Рис. 2а.** АЧХ фильтра на интервале Найквиста



**Рис. 2б.** АЧХ фильтра (дБ)

### Литература

1. Бугров, В.Н. Проектирование цифровых фильтров методами целочисленного нелинейного программирования // Вестник ННГУ. 2009. № 6. С. 61–70.
2. Бугров, В.Н. Целочисленные цифровые фильтры – эффективное решение для 8-битовых цифровых платформ / Шкелев Е.И., Бугров В.Н., Пройдаков В.И., Артемьев В.В. // Компоненты и технологии. 2013. № 10. С. 104–110.
3. Бугров, В.Н. Целочисленное проектирование гауссовых цифровых фильтров // Вестник ННГУ. 2012. № 3. С. 49–54.
4. Бугров, В.Н. Целочисленные цифровые фильтры. – Саабрюккен : Lambert Academic Publishing, 2017. – 156 с. – ISBN 978-3-659-52173-7.
5. Морозов, Н.С. Проектирование целочисленных БИХ-фильтров / Н.С. Морозов, В.Н. Бугров // Современная электроника. 2017. № 8. С. 76–81.

# СХЕМА ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ХАОТИЧЕСКИХ РАДИОИМПУЛЬСОВ

Т.И. Мохсени<sup>1</sup>, А.С. Дмитриев<sup>1</sup>, К. Сьерра<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, Долгопрудный  
chaos@cplire.ru

В докладе предлагается и исследуется новая схема передачи информации с использованием в качестве несущего сигнала динамического хаоса. Предлагаемая схема относится к классу схем с относительным методом передачи [1].

Идея применения относительных методов передачи с использованием хаотических сигналов возникла в середине 1990-х годов, когда выяснилось, что применение хаотической синхронизации в системах передачи информации выдвигает очень жесткие требования к качеству каналов и точности исполнения передатчиков и приемников. Были предложены как минимум две такие схемы: DCSK [2] и CDSK [3]. Первая из них стала достаточно популярной и подробно исследовалась как самими авторами, так и их последователями. Однако она не получила практического развития и применения из-за присутствия в ней элементов с большими временными задержками, которые в аналоговом виде до сих пор не реализуемы в дешевом и компактном варианте.

Поэтому единственным реализованным способом создания беспроводных средств беспроводной связи на сегодняшний день является прямохаотическая схема связи, где в качестве носителя информации используются хаотические радиоимпульсы [4, 5]. Вместе с тем по мере развития средств и элементов для хаотических систем связи возрастает интерес к расширению практически реализуемых схем.

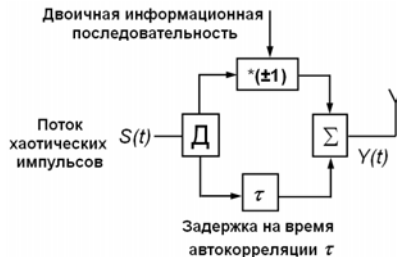


Рис. 1. Схема передатчика

В докладе предлагается относительная схема связи, которая удовлетворяет требованию реализуемости и имеет значительный потенциал для своего развития. Структура передатчика и приемника предлагаемого решения

показаны на рис. 1, 2. В качестве носителя информации в схеме, так же как в исходной прямохаотической системе связи, используются хаотические радиопульсы.



**Рис. 2.** Схема приемника

Теоретический анализ предложенной схемы показывает, что при больших базисах сигнала она обладает высокой устойчивостью к шумам и другим возмущениям в канале. Ее техническая реализация возможна и не должна вызывать больших технических проблем. Поскольку требуемые для нее задержки при полосе сигнала 1 ГГц и больше не превосходят 1–2 нс, то она легко реализуется, например на отрезках современных кабелей длиной до 50 см.

### Литература

1. *Петрович, Н.Т.* Системы связи с шумоподобными сигналами / Н.Т. Петрович, М.К. Размахнин. – М. : Советское радио, 1969. – 232 с.
2. *Kolumban, G.* The role of synchronization in digital communications using chaos. II: Chaotic modulation and chaotic synchronization / G. Kolumban, M.P. Kennedy, L.O. Chua // IEEE Trans. Circuits Sys. I. 1998. V. 45, № 11. P. 1129–1140.
3. *Sushchik, M.* Performance analysis of correlation-based communication schemes utilizing chaos / M. Sushchik, L. Tsiriming, A. Volkovskii // IEEE Trans. Circuits Sys. 2000. V. 47, № 12. P. 1684–1691.
4. *Dmitriev, A.S.* Experiments on direct chaotic communications in microwave band / A.S. Dmitriev, B.Ye. Kyarginsky, A.I. Panas, S.O. Starkov // International Journal of Bifurcation and Chaos. 2003. V. 13, № 6. P. 1495–1507.
5. *Дмитриев, А.С.* Активные беспроводные сверхширокополосные сети на основе хаотических радиопульсов / А.С. Дмитриев, М.Ю. Герасимов, В.В. Ицков, В.А. Лазарев, М.Г. Попов, А.И. Рыжов // Радиотехника и электроника. 2017. Т. 62, № 4. С. 354–363.

## БЕГУЩИЕ СПИРАЛЬНЫЕ ВОЛНЫ В ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУЕ

*Р.И. Мулляджанов<sup>1,2</sup>, Р.Д. Сандберг<sup>3</sup>, С.С. Абдуракипов<sup>1,2</sup>,  
В.К. Джордж<sup>4</sup>, К. Ханъялич<sup>5</sup>*

<sup>1</sup>Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет

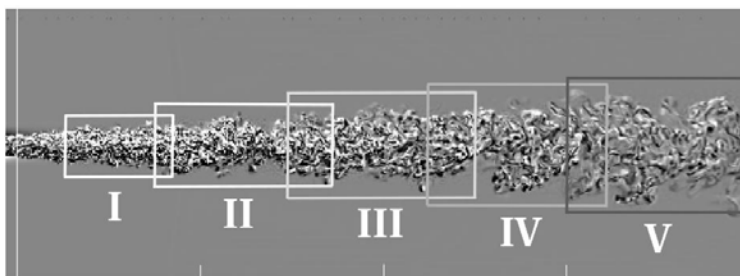
<sup>3</sup>Университет Мельбурна, Австралия

<sup>4</sup>Империял-колледж, Англия

<sup>5</sup>Технический университет Делфта, Нидерланды  
rustammul@gmail.com

Крупномасштабные организованные когерентные структуры играют особенно важную роль в свободных сдвиговых течениях, таких как следы, слои смешения и струи [1]. Эти структуры определяют процессы перемешивания, вовлечения окружающей жидкости в поток и генерации аэроакустического шума.

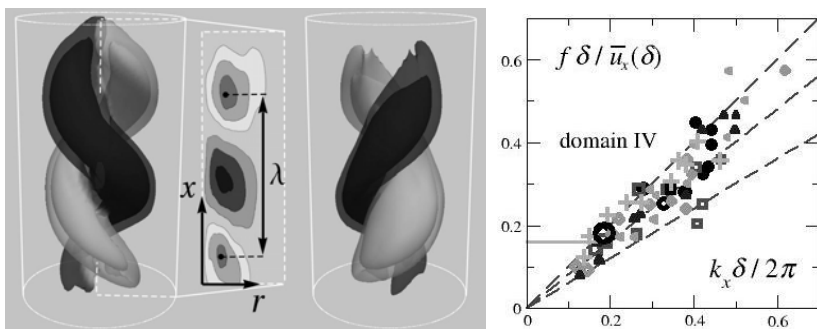
В данной работе используются результаты прямого численного моделирования уравнений Навье – Стокса турбулентной круглой струи [2], вытекающей из длинной трубы при числе Рейнольдса  $Re = 5940$ , построенного по среднерасходной скорости  $U_b$  течения в трубе и ее диаметру  $D$ . Турбулентное течение из трубы вытекает в ламинарный спутный поток скорости  $u_{co} = 0,27U_b$ . Помимо достаточного пространственного разрешения данный расчет произведен для существенного промежутка времени продолжительностью  $400D/U_b$ , что позволило исследовать статистические характеристики потока даже в дальней области. На рис. 1 показано мгновенное поле завихренности в рассматриваемой области, где продольная координата  $x$  ограничена расстоянием  $40D$ .



**Рис. 1.** Мгновенное поле завихренности в рассматриваемой области течения

Для пяти выделенных цилиндрических областей проведен статистический анализ методом Proper Orthogonal Decomposition (POD) [3], который позволяет разложить последовательные реализации мгновенного поля ско-

рости в суперпозицию слагаемых типа  $a_q^m \lambda_q^m \mathbf{v}_q^m$ , где  $a$  – коэффициенты, зависящие от времени,  $\lambda$  – собственные значения, которые указывают на величину кинетической энергии турбулентности, соответствующие собственным функциям с индексами  $m, q$ , а  $\mathbf{v}$  – пространственная собственная функция, при этом  $m$  – это азимутальное волновое число, а  $q$  – это индекс POD-мод, которые отсортированы по убыванию соответствующей турбулентной кинетической энергии. При помощи этого метода показано, что турбулентная динамика может быть представлена в виде суперпозиции бегущих вниз по течению спиральных волн (рис. 2). Получено линейное (эмпирическое) дисперсионное соотношение, которое указывает на то, что крупномасштабные структуры распространяются с фазовой скоростью в диапазоне  $0,6 < u_{ph}/u_x < 1,0$ .



**Рис. 2.** Слева: пространственная форма собственных POD-функций  $\mathbf{v}$  для области IV, соответствующих наиболее энергонесущим когерентным структурам с  $m = 1$  и  $q = 1, 2$ . Справа: диаграмма, демонстрирующая наиболее значимые POD-моды в пространстве  $k_x - f$  (продольное волновое число и частота, нормированные на локальную полуширину струи и продольную скорость в слое смешения). Три штриховые линии соответствуют значениям фазовой скорости 0,6; 0,8 и 1,0

Работа была поддержана РФФ грантом № 14-19-01685.

### Литература

1. Cantwell, B.J. Organized motion in turbulent flow // Annu. Rev. Fluid Mech. 1981. V. 13, №1. P. 457–515.
2. Sandberg, R.D. DNS of compressible pipe flow exiting into a coflow / R.D. Sandberg, N.D. Sandham, V. Sponitsky // Int. J. Heat Fluid Flow. 2012. V. 35, № 33. P. 33–44.
3. Sirovich, L. Turbulence and the dynamics of coherent structures. I. Coherent structures // Quart. Appl. Math. 1987. V. 45, № 3. P. 561–571.

# ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦ В ГИГАНТСКИХ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ВСТРЕЧНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ПУЧКАМИ СВЕРХВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

*А.А. Муравьев, А.М. Сергеев*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
sashamur@gmail.com

В ближайшем будущем ожидается достижение уровней интенсивности лазеров порядка  $10^{25}$ – $10^{26}$  Вт/см<sup>2</sup>, что служит причиной всплеска исследований взаимодействия сверхсильных лазерных полей с веществом. Ключевым моментом в таких исследованиях является необходимость учёта принципиально новых эффектов: дискретной радиационной отдачи от излучения жестких фотонов, а затем их распад на электрон-позитронные пары. Ввиду сложности теоретического анализа задач, в которых требуется самосогласованный учёт обратного влияния плазмы на поле, основным инструментом исследования таких задач является численное моделирование.

В недавней работе [1] в одномерной геометрии был предсказан эффект генерации гигантских квазистатических магнитных полей, разделённых тонкими токовыми слоями, во встречных линейно-поляризованных волнах сверхвысокой интенсивности. В текущей работе проводится исследование движения частиц в полученных токовых структурах. Сперва была построена простая базовая модель, подразумевающая безрадиационное движение частиц в монотонно меняющемся вдоль направления, перпендикулярного силовым линиям, магнитном поле, и подробно изучено движение частиц в ней. Далее задача поэтапно усложняется: в модель добавляется радиационное трение, электрическое поле и другие эффекты.

Также будет обсуждаться обобщение задачи на трёхмерный случай. Ключевым отличием от одномерного является возможное разделение заряда, переносимого токовым слоем. Такое разделение заряда должно препятствовать проявлению эффекта и значительно увеличивать скорость релаксации формирующейся структуры. Однако оно может отсутствовать, например в случае замыкания токовых слоев друг на друга, что, в свою очередь, значительно влияет на структуру полей.

## Литература

1. *Муравьев, А.А.* Генерация токовых слоев и гигантских квазистатических магнитных полей при ионизации вакуума в экстремально сильных световых полях / А.А. Муравьев, С.И. Бастраков, А.В. Башинов, А.А. Гonosков, Е.С. Ефименко, А.В. Ким, И.Б. Мееров, А.М. Сергеев / Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 102, вып. 3. С. 173–178.

## ПРЕЦИЗИОННАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ СУПЕРФИЛАМЕНТА

*А.А. Мурзанев<sup>1</sup>, С.Б. Бодров<sup>1</sup>, Д.В. Карташов<sup>2</sup>, Ж.А. Самсонова<sup>2</sup>,  
М. Петрарка<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

<sup>2</sup>Institut für Optik und Quantenelektronik Friedrich-Schiller-Universität Jena,  
Jena, Germany

<sup>3</sup>La Sapienza University, SBAI Department, Rome, Italy  
alex\_murz@mail.ru

Эксперименты по исследованию распространения мощного фемтосекундного лазерного излучения в воздухе в режиме суперфиламентации [1] были проведены на мультитераваттном лазерном комплексе JETI40 Института оптики и квантовой электроники Университета имени Фридриха Шиллера (город Йена, Германия). В данном цикле экспериментов использовалось излучение с энергией в импульсе 800 мДж, центральная длина волны излучения 800 нм.

Пучок лазерного излучения фокусировался в воздух, для чего использовались различные системы линз и зеркал, эффективное фокусное расстояние которых составляло 3 и 7,5 м соответственно. Методом прецизионной интерферометрии [2] при помощи поляризационного интерферометра Намарского с призмой Волластона исследовался профиль плазмы, создаваемой излучением в воздухе в процессе распространения. Измерения производились в одноимпульсном режиме, с использованием методики *rimpr-probe* (накачка – зондирование), в качестве зондирующей использовалась часть энергии импульса лазерного излучения, отведенная от основного пучка, которая просвечивала область плазмы в направлении перпендикулярном распространению основной части излучения. Задержка пробного импульса относительно импульса накачки не превышала 100 пс.

При более острой фокусировке ( $f$ -number  $\sim 50$ ) наблюдалось образование множества каналов, положение которых менялось от выстрела к выстрелу на расстоянии  $\sim 15$  см до точки фокуса. В окрестности фокуса измеряемое распределение фазы становилось сплошным, что может свидетельствовать о более близком расположении плазменных филаментов. Оценка плотности плазмы, проведенная по данному распределению фазы, показывает, что данное распределение соответствует довольно широкому плазменному каналу (диаметр  $\sim 1$  мм), плотность плазмы в котором сравнима с электронной плотностью отдельного филамента, составляющей  $\sim 5 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. При исследовании распределения фазы в положениях за фокусом обнаружилось уменьшение ширины наблюдаемого распределения и величины набега фазы. На расстоянии  $\sim 10$  см за линейным фокусом распределение фазы соответствует распределению, наблюдаемому от уединенного филамента,

однако его положение в пространстве оставалось неизменным от выстрела к выстрелу.

Иная картина наблюдалась при более слабой фокусировке ( $f$ -number  $\sim 125$ ). При таких параметрах излучение должно распространяться в режиме суперфиламентации [1]. Возникновение отдельных плазменных филаментов наблюдалось на расстоянии 25 см от положения фокуса. Их положение случайно, а расстояние между ними уменьшается при приближении к линейному фокусу. Наблюдаемое распределение фазы вполне может быть интерпретировано как совокупность близко расположенных плазменных каналов с электронной плотностью, отвечающей одиночному филamentу, которые от выстрела к выстрелу накладываются друг на друга при проецировании на камеру, фиксирующую интерферограмму, то есть «слияния» каналов в единый суперфилament не происходит. Распределения люминесценции воздуха в области филаментации, которые фиксировались параллельно с интерференционными изображениями, не обладают столь высоким пространственным разрешением, как результаты обработки интерферограмм. Причина состоит в том, что время люминесценции воздуха значительно по сравнению с временным разрешением интерферометрии, которое определяется длительностью зондирующего импульса, и за это время пространственное распределение возбужденных молекул воздуха успевает измениться.

#### Литература

1. *Point, G.* Superfilamentation in air / G. Point, Y. Brelet, A. Houard, V. Jukna, C. Milián, J. Carbonnel, A. Couairon, A. Mysyrowicz // *Physical Review Letters*. 2014. V. 112(22). Art. 223902.
2. *Bodrov, S.* Plasma filament investigation by transverse optical interferometry and terahertz scattering / Sergey Bodrov, Vladimir Bukin, Maxim Tsarev, Aleksey Murzanev, Sergey Garnov, Nikolay Aleksandrov, Andrey Stepanov // *Optics Express*. 2011. Vol. 19, № 7. P. 6829–6835.
3. *Benattar, R.* Polarized light interferometer for laser fusion studies / R. Benattar, C. Popovics, R. Sigel // *Rev. Sci. Instrum.* 1979. V. 50(12). P. 1583–1585.

## ВЫЯВЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ УРОВНЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ОТ МОТИВАЦИИ И БДИТЕЛЬНОСТИ

*В.О. Недайвзов*

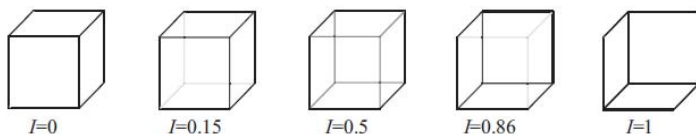
Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.  
fdf\_het@gmail.com

Головной мозг часто рассматривается как сложная сеть взаимодействующих единиц (нейронов) [1], кооперативная динамика которых порождает различные типы когнитивной активности, например формирование следов памяти [2], обработку информации [3], пространственную ориентацию [4], интеллект [5] и т. д. Обработка информации в мозге происходит в

несколько этапов: получение внешних данных (стимулов), их анализ и реакция мозга. Каждый из этих этапов характеризуется одновременной активацией определенных областей мозга, которые функционально взаимодействуют друг с другом.

Когнитивная активность мозга обычно зависит от индивидуальных физиологических особенностей, то есть она может быть связана с различными сценариями мозговых процессов в зависимости от мотивации, бдительности, состояния здоровья и усталости человека [6]. Поэтому наряду со знанием основных особенностей деятельности мозга в решении конкретных задач изучение влияния человеческих факторов, таких как ответственность, мотивация, внимание и стресс [7], имеет большое практическое значение. Нейрофизиологические исследования визуального восприятия, сфокусированные на выявлении активности мозга и взаимодействий между различными его областями, показали повышенную активность в затылочной коре [8].

В этой работе изучается влияние мотивации и бдительности на решение головным мозгом визуальных задач, требующих осуществить выбор в неоднозначных условиях, принятия решений. Эти задачи подходят для оценки степени концентрации, потому как человеку необходимо быстро обратить внимание на изображение и принять решение. В качестве подобной задачи использовался куб Неккера с контролируемым контрастом ребер. Испытуемому нужно было решить, направлен куб в левую ( $I = 0$ ) или в правую ( $I = 1$ ) сторону.



Во время обработки неоднозначного стимула вейвлетный анализ записи многоканальных ЭЭГ данных, снятых с затылочной части мозга, позволил различить два разных сценария. Первый характеризуется специфическим разрушением альфа-ритма (8–12 Гц) с одновременным увеличением бета-активности (20–30 Гц), тогда как во втором бета-ритм невыраженный, а энергия альфа-волн остается неизменной. Эксперименты были проведены с группой субъектов, имеющих финансовую мотивацию, и еще одной группой неоплаченных добровольцев. Было обнаружено, что первый сценарий происходил в основном в мотивированной группе. Это можно объяснить повышенной степенью концентрации этих субъектов. Распространенность первого сценария также наблюдалась в группе испытуемых, которым были представлены изображения с более высокой степенью неоднозначности ( $I \sim 0,5$ ).

Выявленные сценарии могут осуществляться не только при восприятии бистабильных изображений, но и в других задачах, требующих принятия решений. Полученные результаты могут быть использованы для монито-

ринга и контроля человеческой активности в ситуациях, требующих значительной концентрации внимания. На основе полученных результатов мы создали интерфейс «мозг – компьютер» для оценки и контроля степени концентрации в реальном времени.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (задания 3.861.2017/ПЧ).

### Литература

1. *Betzel R.F.* Optimally controlling the human connectome: the role of network topology / R.F. Betzel, S. Gu, J.D. Medaglia, F. Pasqualetti, D.S. Bassett // *Scientific Reports*. 2016. V. 6. P. 30770.

2. *Buzsáki G.* Two-stage model of memory trace formation: a role for “noisy” brain states // *Neuroscience*. 1989. V. 31, № 3. P. 551–570.

3. *Cichy R.M.* Comparison of deep neural networks to spatio-temporal cortical dynamics of human visual object recognition reveals hierarchical correspondence / R.M. Cichy, A. Khosla, D. Pantazis, A. Torralba, A. Oliva // *Scientific Reports*. 2016. V. 6. P. 27755.

4. *Sargolini F.* Conjunctive representation of position, direction, and velocity in entorhinal cortex / F. Sargolini, M. Fyhn, T. Hafting, B.L. McNaughton, M.P. Witter, M.B. Moser, E.I. Moser // *Science*. 2006. V. 312, № 5774. P. 758–762.

5. *Colom R.* Human intelligence and brain networks / R. Colom, S. Karama, R.E. Jung, R.J. Haier // *Dialogues in Clinical Neuroscience*. 2010. V. 12, № 4. P. 489.

6. *Calcott R.D.* Neural correlates of attentional flexibility during approach and avoidance motivation / R.D. Calcott, E.T. Berkman // *PloS One*. 2015. V. 10, № 5. P. e0127203.

7. *Greenlee M.W.* Visual perception and visual cognition in healthy and pathological ageing / M.W. Greenlee, A.B. Sekuler // *Frontiers in Psychology*. 2014. V. 5. P. 348.

8. *Tong F.* Neural bases of binocular rivalry / F. Tong, M. Meng, R. Blake // *Trends in Cognitive Sciences*. 2006. V. 10, № 11. P. 502–511.

## НЕЛИНЕЙНАЯ СТАДИЯ ВЕЙБЕЛЕВСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ И СОГЛАСОВАННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ И ИОНОВ В ПЛАЗМЕ С АНИЗОТРОПИЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

*А.А. Нечаев<sup>1</sup>, Л.В. Бородачёв<sup>2</sup>, М.А. Гарасёв<sup>1</sup>, А.А. Беляев<sup>2</sup>,  
В.В. Кочаровский<sup>1</sup>, В.Ю. Мартыанов<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

<sup>3</sup>Intel Corp., Chandler, USA

ant.a.nech@gmail.com

Проведено численное моделирование нелинейной стадии вейбелевской неустойчивости [1–5] в двухкомпонентной плазме с сильной анизотропией температуры и сравнимыми энергиями электронной и ионной фракций. Вы-

числения проводились с помощью кода DARWIN [6, 7], в котором реализован метод частиц в ячейках на основе модели Власова – Дарвина [9, 10].

Для выяснения роли ионов в долговременной эволюции квазистационарного магнитного поля, созданного электронами, выполнено два расчета в 5-мерном (2D3V) фазовом пространстве. Плоскостью моделирования служила  $xOy$ , ось  $z$  соответствовала большей температуре частиц, и развитие неустойчивости приводило к формированию филаментов тока вдоль этой оси. В первом расчете использована пространственная сетка  $100 \times 100 c/\omega_{pe}$  ( $\omega_{pe}$  — плазменная частота электронов,  $c$  — скорость света) с периодическими граничными условиями и отношением масс ионов (с зарядом 1) и электронов, равным 36; моделирование проводилось до момента времени  $T = 22000/\omega_{pe}$ . Второй расчет проведен на сетке  $125 \times 125 c/\omega_{pe}$  с периодическими граничными условиями и отношением масс ионов и электронов, равным 100. Моделирование проводилось до момента  $T = 8000/\omega_{pe}$ . Детали и анимация расчетов приведены на сайте [7].

Проанализирована пространственно-временная динамика филаментов тока и магнитного поля, создаваемых сначала электронной, а потом совместно электронной и ионной фракциями. Обнаружено, что магнитное поле, образованное в результате электронной неустойчивости, приводит к рассеянию ионов, уменьшая степень анизотропии их распределения по импульсам и подавляя развитие ионной неустойчивости. На нелинейной стадии насыщения и затухания это магнитное поле может индуцировать крупномасштабные ионные токи, которые со временем превышают электронные и определяют долговременную эволюцию крупномасштабного квазистационарного магнитного поля.

В результате реализуется длительная стадия нелинейного (близкого к степенному) затухания магнитного поля турбулентного ансамбля филаментов тока. Со временем филаменты постепенно эволюционируют от мелко-масштабных электронных к крупномасштабным ионным, оставаясь направленными преимущественно вдоль оси наибольших энергий анизотропного максвелловского распределения частиц, ориентированной поперек плоскости моделирования  $xOy$ . При этом значительная масса электронов (практически изотропизованных) замагничена в большинстве этих филаментов тока, в основном поддерживаемых ионными токами, что исключает либо существенно задерживает развитие ионной вейбелевской неустойчивости, которая в противном случае могла бы эффективно генерировать крупномасштабное магнитное поле в плоскости  $xOy$  за счет сохраняющейся долгое время значительной разницы температур ионов в этой плоскости и поперек нее.

Обсуждается возможность реализации рассмотренного сценария вейбелевской неустойчивости в неравновесной лазерной плазме.

Работа Л.В. Бородачёва и Д.О. Коломийца поддержана РФФИ (проект 16–01–00690).

## Литература

1. *Weibel E.S.* // Phys. Rev. Lett. 1959. V. 2. P. 83.
2. *Дэвидсон Р.* Основы физики плазмы / под ред. А.А. Галеева и Р. Судана. М. : Энергоатомиздат, 1983. Т. 1. С. 443.
3. *Бородачев Л.В., Гарасёв М.А., Коломиец Д.О., Кочаровский В.В., Мартыанов В.Ю., Нечаев А.А.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 12. С. 1107.
4. *Ruyster C., Gremillet L., Debayle A., Bonnaud G.* // Phys. Plasmas. 2015. V. 22. Art. 032102.
5. *Кочаровский В.В., Кочаровский Вл.В., Мартыанов В.Ю., Тарасов С.В.* // Успехи физ. наук. 2016. Т. 186. С. 1267.
6. *Borodachev L.V., Kolomiets D.O.* // J. Plasma Physics. 2011. V. 77, Iss. 2. P. 277.
7. Численные исследования. Вайбелевская неустойчивость // DarWinCode.org [сайт] / Л.В. Бородачев, Д.О. Коломиец, В.В. Литвинюк. Режим доступа : <http://www.darwincode.ru/results/>. Загл. с экрана. (Дата последнего обращения: 27.12.17).
8. *Darwin C.G.* // Phil. Mag. 1920. V. 39. P. 537.
9. *Бородачев Л.В., Мингалев И.В., Мингалев О.В.* Энциклопедия низкотемпературной плазмы Б. Т. 7. М. : Янус-К, 2008. С. 136.

## ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ АЛМАЗОВ ДЛЯ МАГНИТОМЕТРИИ НА ОСНОВЕ КРОСС-РЕЛАКСАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГРУПП NV-ЦЕНТРОВ

*В.А. Низов, Р.А. Ахмеджанов, Л.А. Гуцин, И.В. Зеленский, Н.А. Низов,  
Д.А. Собгайда*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
[nizovva.w@gmail.com](mailto:nizovva.w@gmail.com)

Методы магнитометрии, основанные на оптически детектируемом магнитном резонансе (ОДМР) азотно-вакансионных (NV) центров окраски в алмазе, отличаются сочетанием высокой чувствительности, пространственного разрешения и возможностью работы в нормальных условиях. Однако использование СВЧ-излучения, необходимое для наблюдения ОДМР, сужает спектр его возможных приложений.

В работе [1] была предложена и экспериментально продемонстрирована методика измерения магнитного поля без применения СВЧ-излучения, основанная на наблюдении кросс-релаксационных резонансов в NV-центрах в монокристаллах алмаза. Суть метода заключается в следующем. Оптически возбуждаемый образец алмаза помещается в постоянное (измеряемое) и сканируемое по величине магнитные поля. Если суммарное магнитное поле дает равные проекции на оси двух неэквивалентно ориентированных групп

NV-центров, то для этих групп выполняется условие кросс-релаксационного взаимодействия, что приводит к резонансному уменьшению сигнала флуоресценции. Положения наблюдаемых резонансов можно использовать для определения проекции измеряемого магнитного поля на направление сканируемого. В настоящей работе рассматривается возможность реализации схожего подхода с использованием поликристаллических алмазов для того, чтобы упростить процедуру измерений и удешевить конструкцию магнитометра.

При работе с поликристаллическим алмазом, состоящим из большого числа случайно ориентированных монокристаллов, картина резонансов усредняется. Показано и экспериментально подтверждено, что в этом случае наблюдается единственный резонанс, положение которого позволяет непосредственно определить проекцию магнитного поля на заданное направление. Компонента измеряемого магнитного поля, поперечная к направлению сканирования, приводит к снижению контраста и уширению резонанса, которое можно считать приемлемым для поперечных полей меньше или порядка полуширины резонанса при их отсутствии (которая в наших экспериментах составила  $\sim 5$  Гс).

Работа выполнена в рамках государственного задания на проведение научных исследований по теме № 0035-2014-0005.

### Литература

1. *Akhmedzhanov, R. Microwave-free magnetometry based on cross-relaxation resonances in diamond nitrogen-vacancy centers / R. Akhmedzhanov, L. Gushchin, N. Nizov, V. Nizov, D. Sobgayda, I. Zelensky, P. Hemmer // Physical Review A. 2017. V 96, № 1. P. 013806.*

## ЭФФЕКТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО ИНДУЦИРОВАННОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ В ИЗОТОПИЧЕСКИ ЧИСТОМ КРИСТАЛЛЕ Nd:YLF

*Н.А. Низов<sup>1</sup>, Р.А. Ахмеджанов<sup>1</sup>, Л.А. Гуцин<sup>1</sup>, И.В. Зеленский<sup>1</sup>,  
А.А. Калачев<sup>2</sup>, В.А. Низов<sup>1</sup>, Д.А. Собгайда<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

<sup>2</sup>Казанский физико-технический институт КазНЦ РАН

nizovn@gmail.com

Эффект электромагнитно индуцированной прозрачности (ЭИП) состоит в появлении узкого провала в профиле поглощения одного из оптических переходов  $\Lambda$ -схемы уровней при приложении сильного управляющего поля на частоте смежного перехода, что находит применение в спектроскопии, а также является основой одного из протоколов оптической квантовой

памяти. В магнитном поле, соответствующем занулению первого порядка эффекта Зеемана (ZEFOZ), ширина резонанса может быть существенно уменьшена за счет снижения влияния неоднородностей магнитного поля.

В работе проведено исследование эффекта электромагнитно индуцированной прозрачности в изотопически чистом кристалле  $^{143}\text{Nd}:\text{Y}^7\text{LiF}_4$  (0,005 % Nd) при температуре 2 К в магнитном поле, направленном вдоль с-оси кристалла вблизи точки ZEFOZ (63 мТл). Исследована зависимость формы ЭИП-резонансов от величины внешнего поля и интенсивности управляющего излучения. Обнаружено, что при установлении магнитного поля в точку ZEFOZ ширина пика ЭИП уменьшается с 12 до 1 МГц, а также проявляется тонкая структура перехода, состоящая из девяти равноудаленных пиков с интервалом 2,8 МГц.

Наблюдаемое расщепление ЭИП-резонанса может быть вызвано суперсверхтонким взаимодействием спинов 4f электронов неодима с ядерным спином близлежащих атомов фтора. Количество пиков и расстояние между ними согласуется с результатами ЭПР-исследования, полученного в работе [1].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 14-12-00806).

### Литература

1. *Аминов, Л.К.* Суперсверхтонкая структура спектров ЭПР примесных ионов в системе  $\text{LiYF}_4 : \text{Nd}^{3+}$ , обогащенной изотопами  $^{143}\text{Nd}$  / Л.К. Аминов, М.Р. Гафуров, С.Л. Кораблева, И.Н. Куркин, А.А. Родионов // Физика твердого тела. 2015. Т. 57, вып. 12. С. 2329–2332.

## ДИНАМИКА МАГНИТНОГО ПОЛЯ В КВАЗИДВУМЕРНОМ СЛУЧАЙНОМ ПОТОКЕ

*Л.Л. Огородников<sup>1,2</sup>, И.В. Колоколов<sup>1,3,4</sup>, В.В. Лебедев<sup>1,3,4</sup>*

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет),  
Московская обл., г. Долгопрудный

<sup>2</sup>Сколковский институт науки и технологий, Московская обл., д. Сколково

<sup>3</sup>Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, Московская обл.,  
г. Черноголовка

<sup>4</sup>НИУ Высшая школа экономики, Москва  
noel95@mail.ru

Турбулентное движение проводящей жидкости может приводить к самопроизвольной генерации достаточно больших магнитных полей, что составляет суть эффекта динамо [1]. Для трехмерного случайного потока было показано [2–4], что корреляционные моменты магнитного поля  $\langle \mathbf{B}^{2n} \rangle$ ,  $n = 1, 2, \dots$  растут экспоненциально со временем.

Эволюция магнитного поля определяется изменением во времени линий тока в движущейся проводящей жидкости и диффузией магнитного поля за счет конечной проводимости:

$$\partial_t \vec{B} = (\vec{B}, \nabla) \vec{v} - (\vec{v}, \nabla) \vec{B} + \kappa \Delta \vec{B}. \quad (1)$$

Эффект динамо в двумерных течениях (при этом поле считается имеющим все три компоненты) долгое время не изучался – с того момента, как было показано [5–7], что на очень больших временах рост поля прекращается и начинается экспоненциальное убывание. Это находится в согласии с так называемой теоремой анти-динамо [5, 6]. Утверждение подкрепляется точными математическими результатами [8, 9], показывающими отсутствие неограниченного роста магнитного поля в двумерных потоках на ряде многообразий. Однако эти результаты не дают никакой информации о факторах, ограничивающих рост поля.

Эволюция мелкомасштабных флуктуаций магнитного поля была определена на больших временах в чисто двумерном случайном потоке [10], когда поле скоростей имело только две ненулевые компоненты и зависело только от координат в горизонтальной плоскости. В [10] были найдены более точные асимптотики на больших временах по сравнению с известными ранее работами [1, 11, 12].

В данной работе изучается поведение магнитного поля на больших временах в квазидвумерном случайном потоке. Рассматривается случай бесконечного пространства, заполненного проводящей жидкостью. Поле скоростей здесь предполагается случайным и квазидвумерным, т.е. оно имеет нулевую вертикальную составляющую, но две остальные компоненты зависят от  $z$ .

В работе сначала рассматривается линейная модель, в рамках которой скорость предполагается случайной, но линейной по координате с конечной сдвиговой компонентой, не зависящей от  $z$ . Однако эта модель не учитывает конечный корреляционный радиус поля скорости в случайном потоке. Поэтому более точный результат дает модель Крэйчнана – Казанцева [3, 13], учитывающая конечный корреляционный радиус, но полагающая флуктуации короткоживущими:

$$\langle v_\alpha(\vec{r}, t) v_\beta(\vec{r}', t') \rangle = C_{\alpha\beta}(\vec{r} - \vec{r}') \delta(t - t'). \quad (2)$$

Даже в упрощенной линейной модели отличия квазидвумерного случая от двумерного становятся заметными.

### Литература

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика Т. 8: Электродинамика сплошных сред. М.: Физматлит, 2001. 656 с.
2. Schekochihin A.A., Cowley S.C., Taylor S.F., Maron L., McWilliams J.C. Simulations of the small-scale turbulent dynamo // *Astrophys. J.* 612 (2004) 276–307.
3. Kazantsev A.P. Enhancement of a magnetic field by a conducting fluid // *Sov. Phys. JETP* 26 (1968) 1031.

4. *Chertkov M., Falkovich G., Kolokolov I., Vergassola M.* Small-scale turbulent dynamo // *Phys. Rev. Lett.* 83 (1999) 4065–4068.
5. *Zeldovich Ya.B.* The magnetic field in the two-dimensional motion of a conducting turbulent fluid // *Zh. Èksp. Teor. Fiz.* 31 (1956) 154; *Sov. Phys. JETP* 4 (1957) 460.
6. *Zeldovich Ya.B., Ruzmaikin A.A.* Magnetic field of a conducting fluid in two-dimensional motion // *Zh. Èksp. Teor. Fiz.* 78 (1980) 980; *Sov. Phys. JETP* 51 (1980) 493.
7. *Zeldovich Ya.B., Ruzmaikin A.A., Molchanov S.A., Sokolov D.D.* Kinematic dynamo problem in a linear velocity field // *J. Fluid Mech.* 144(1) (1984).
8. *Oseledets V.* // *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.* 73 (1993) 133.
9. *Arnold V.I., Khesin B.A.* *Topological Methods in Hydrodynamics.* New York : Springer, 1998.
10. *Kolokolov I.V.* Evolution of magnetic field fluctuations in two-dimensional chaotic flow // *J. Phys. A.* 50 (2017) 155501.
11. *Zeldovich Y.B., Ruzmaikin A.A., Sokolov D.D.* *The Almighty Chance.* Singapore : World Scientific, 1990.
12. *Childress S., Gilbert A.* *Stretch, Twist, Fold: the Fast Dynamo.* Berlin : Springer, 1995.
13. *Kraichnan R., Nagarajan S.* // *Phys. Fluids.* V. 10 (1967) 859.

## СТАТИСТИКА ИНТЕНСИВНОСТИ ВЫХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СЛУЧАЙНОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА

*Л.Л. Огородников<sup>1,2</sup>, С.С. Вергелес<sup>1,3,4</sup>, В.В. Лебедев<sup>1,3,4</sup>*

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет),  
Московская обл., г. Долгопрудный

<sup>2</sup>Сколковский институт науки и технологий, Московская обл., д. Сколково

<sup>3</sup>Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, Московская обл.,  
г. Черноголовка

<sup>4</sup>НИУ Высшая школа экономики, Москва  
noel95@mail.ru

В последнее время большой интерес вызывают исследования в активно развивающейся области физики, связанной со случайными волоконными лазерами. Их создание и развитие имеет большое значение для различных телекоммуникационных средств связи и распределенных сенсорных систем [1–4].

В [5] построена волновая кинетическая теория для активных циклических слабонелинейных волновых систем, которая может быть использована для описания работы случайного волоконного лазера. В частности, были установлены спектры излучения при разных мощностях порога генерации, зависимость интенсивности излучения от частоты и зависимость ширины спектра от выходной мощности, которые хорошо описывают имеющиеся экспериментальные результаты.

Одним из неисследованных вопросов, связанных со случайным волоконным лазером, является статистика излучения данного лазера. Такие

процессы, как спонтанное излучение, а также взаимодействие различных гармоник приводят к формированию гауссовой статистики амплитуды, то есть релеевской статистике интенсивности. Однако экспериментально [6] в подобных системах наблюдаются сильные флуктуации выходного сигнала. Подобные флуктуации могут возникать за счет керровской нелинейности, поэтому функция распределения выходной интенсивности может иметь отличие от релеевского вида.

Целью данной работы является нахождение статистики излучения. Поставленная задача решается вычислением корреляционных моментов интенсивности высших порядков и построением по ним функции распределения.

В данной работе производится вычисление коррелятора четвертого порядка с использованием диаграммной техники Уайльда в первом и во втором порядке по теории возмущений по малому параметру нелинейности. В первом порядке по параметру нелинейности вычисляются моменты высших порядков и строится функция распределения интенсивности выходного излучения. Качественный вид полученной функции распределения хорошо согласуется с экспериментальными результатами [6].

#### Литература

1. *Turitsyn S.K. [et al.] Random distributed feedback lasers // Physics Reports. 2014.*
2. *Звелмо О. Принципы лазеров. 4-е изд. СПб. : Лань, 2008.*
3. *Turitsyn S.K. [et al.] Random distributed feedback fibre lasers // Nature Photonics. 4 (2010).*
4. *Wiersma D.S. The physics and applications of random lasers // Nature Physics. 4, 359–367 (2008).*
5. *Churkin D.V. [et al.] Wave kinetics of random fibre lasers // Nature Communications. 2 (2015).*
6. *Hammani K., Finot C., Dudley J.M., Millot G. Optical rogue-wave-like extreme value fluctuations in fiber Raman amplifiers // Optics express. 16, 16467 (2008).*

### МЕЖЗОННЫЕ ПЕРЕХОДЫ И СПОНТАННАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ГРАФЕНА В МОЩНОМ ТЕРАГЕРЦОВОМ ПОЛЕ

*И.В. Оладышкин, Ю.А. Сергеев, С.Б. Бодров, А.И. Корытин, М.Д. Токман, А.Н. Степанов*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
oladyshkin@gmail.com

В докладе представлены последние результаты теоретических и экспериментальных исследований по нелинейной электродинамике графена в поле субпикосекундных лазерных и терагерцовых (ТГц) импульсов [1]. Показано, что воздействие на графен мощного ТГц-излучения амплитудой

более 100 кВ/см существенно деформирует исходную функцию распределения носителей и приводит к интенсивным межзонным переходам (рождению электронно-дырочных пар). Развитая теоретическая модель нерезонансной ионизации графена ТГц-полем позволяет количественно интерпретировать данные экспериментов по спонтанной оптической эмиссии графена под действием интенсивного ТГц-импульса.

В эксперименте было обнаружено, что графен под действием мощного электромагнитного импульса пикосекундной длительности становится источником фотонов во всём видимом диапазоне. Спонтанное оптическое излучение графена имеет тепловой спектр, а температура излучения практически не зависит от амплитуды ТГц-импульса в доступном для исследования диапазоне (200–300 кВ/см). При этом общее число фотон экспоненциально растёт с ростом ТГц-поля, что говорит о невозможности описать данный эффект в рамках модели равновесного теплового излучения.

Для интерпретации наблюдаемого эффекта были теоретически исследованы нерезонансные межзонные переходы в графене под действием интенсивного внешнего поля, аналогичные швингеровскому рождению пар. Было также показано, что при амплитудах электрического поля порядка 100 кВ/см использование стандартной теории возмущений невозможно, поскольку функция распределения носителей в импульсном пространстве существенно деформируется. В частности, в случае сильно допированного графена исходное распределение электронов выносится из окрестности дираковской точки за несколько фемтосекунд, что создаёт вакансии в этой области и снимает запрет Паули на межзонные переходы.

Был теоретически описан процесс релаксации носителей после воздействия мощного ТГц-импульса, сопровождающийся спонтанной оптической эмиссией; получено количественное согласие с экспериментальными данными. Показано, что ТГц-поле амплитудой порядка 100–300 кВ/см создаёт в образце графена инверсию населённостей, причём число рождённых электронов проводимости может существенно превышать исходное число носителей заряда.

### Литература

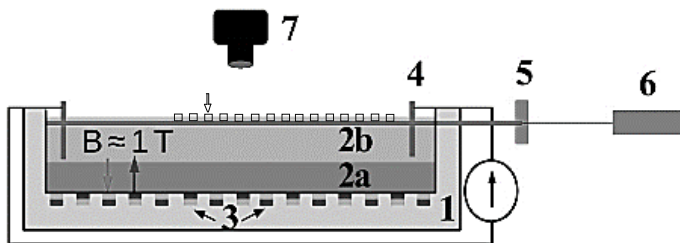
1. *Oladyshkin I.V., Bodrov S.B., Sergeev Yu.A., Korytin A.I., Tokman M.D., Stepanov A.N.* Optical emission of graphene and electron-hole pair production induced by a strong terahertz field // *Physical Review B*. 2017. Vol. 96. P. 155401.

## ФОРМИРОВАНИЕ КРУПНОМАСШТАБНОГО КОГЕРЕНТНОГО ВИХРЯ В ДВУМЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

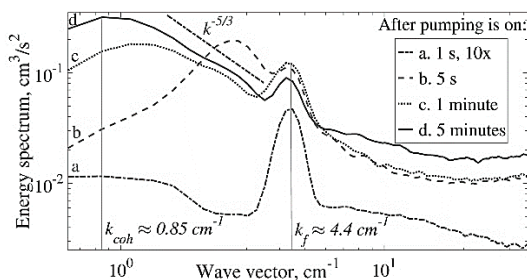
*А.В. Орлов, М.Ю. Бражников, А.А. Левченко*

Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка  
Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, Черноголовка  
arturor@issp.ac.ru

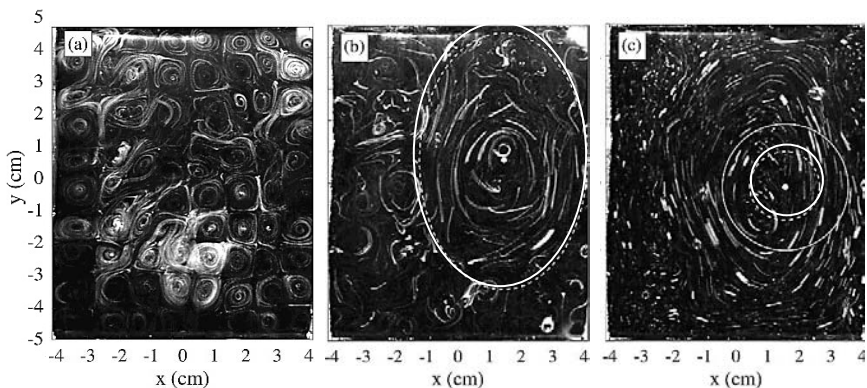
Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Подробное описание установки и методики измерений представлено в статье [1]. В работе [1] исследован процесс формирования обратного каскада энергии в двумерной системе (рис. 2). Обнаружено, что квазистационарный спектр близок к предсказываемому теорией  $E(k) \propto k^{-5/3}$  [2]. Показано, что вследствие нелинейного взаимодействия вихри, первоначально возбуждаемые на масштабе накачки в тонком слое электролита (рис. 3, *a*), сливаются и образуют крупномасштабные вихревые течения (рис. 3, *b*, 3, *c*). Трение о дно и мощность накачки были таковы, что максимальный масштаб вихря в системе ограничивался размерами ячейки. Энергия, поступающая в этот масштаб в обратном каскаде, накапливалась в вихре, и наблюдалось явление спектральной конденсации, формировался когерентный вихрь. Одновременно в системе присутствовали сильные флуктуации от мелкомасштабных вихрей (рис. 3, *b*). После выключения накачки они быстро затухали, и через 13 секунд можно было без существенных флуктуаций наблюдать когерентный вихрь, размеры которого близки к размеру системы (рис. 3, *c*), и исследовать его структуру. Впервые был установлен радиальный профиль азимутальной скорости когерентного вихря в системе его дрейфующего центра после выключения накачки (рис. 4). Оказалось, что в сердцевине вихря азимутальная скорость возрастает по линейному закону, а далее – близка к постоянной. Результаты данных исследований совпадают с теоретическими предсказаниями [3–4].



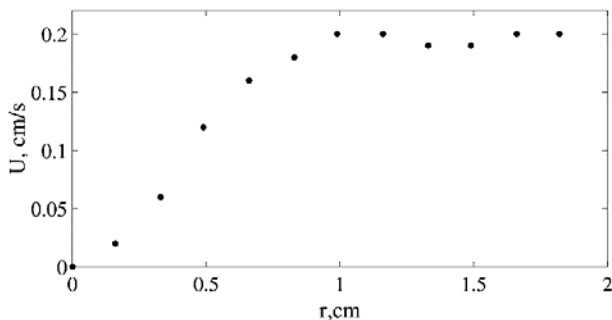
**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 – ячейка, 2a, 2b – жидкости, 3 – магниты, 4 – электроды, подключенные к источнику тока, 5 – линза, 6 – лазер, 7 – камера



**Рис. 2.** Спектр энергии в различные моменты времени после включения накачки



**Рис. 3.** Треки полиамидных трейсеров на поверхности электролита: (а) – через 3 с после включения накачки; (b) – через 5 мин; (с) – через 13 с. Эллипсом обозначены примерные границы крупномасштабного когерентного течения. Радиус внешней окружности  $\approx 2$  см, внутренней  $\approx 0,9$  см (граница сердцевин когерентного вихря). Моментальные положения центра когерентного вихря обозначены белыми кружками



**Рис. 4.** Радиальный профиль азимутальной скорости во внешнем круге на рис. 3, с через 13 с после выключения накачки

## Литература

1. Орлов А.В. Формирование крупномасштабного когерентного вихря в двумерной турбулентности / А.В. Орлов, М.Ю. Бражников, А.А. Левченко // Письма в ЖЭТФ. 2018. Т. 107, вып. 3. С. 166–171.
2. Kraichnan R.H. Inertial ranges in two-dimensional turbulence // Phys. Fluids. 1967. V. 10, № 7. P. 1417–1423.
3. Kolokolov I.V. Structure of coherent vortices generated by the inverse cascade of two-dimensional turbulence in a finite box / I.V. Kolokolov, V.V. Lebedev // Phys. Rev. E. 2016. V. 93. P. 033104-1–033104-7.
4. Kolokolov I.V. Velocity statistics inside coherent vortices generated by the inverse cascade of 2-D turbulence / I.V. Kolokolov, V.V. Lebedev // J. Fluid Mech. 2016. V. 809. P. R2-1 – R2-11.

## КВАНТОВАЯ ДИССИПАТИВНАЯ ДИНАМИКА ДЖОЗЕФСОНОВСКОГО ОСЦИЛЛЯТОРА В УСЛОВИЯХ РЕЗОНАНСНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Д.С. Пашин<sup>1</sup>, А.М. Сатанин<sup>1</sup>, Ч.С. Ким<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского

<sup>2</sup>Национальный университет Чоннам (Chonnam National University),

Республика Корея

pashindmi@gmail.com

В последнее время сверхпроводниковые джозефсоновские переходы рассматриваются как перспективные кандидаты для создания кубитов и устройств неразрушающих квантовых измерений [1]. Джозефсоновский переход, по которому течет переменный ток, подобен нелинейному маятнику, возбуждаемому моментом внешней силы. При высокой температуре, когда джозефсоновская частота  $\omega_J$  удовлетворяет неравенству  $kT \gg \hbar\omega_J$ , динамика перехода может быть описана в рамках классической механики, а при выполнении противоположного неравенства ( $kT \ll \hbar\omega_J$ ) осциллятор ведет себя как квантовый объект с дискретным спектром.

Как известно, в классическом режиме при определенных условиях нелинейный диссипативный осциллятор может находиться в двух устойчивых колебательных состояниях с разными амплитудами [2]. При этом фазовое пространство осциллятора состоит из двух устойчивых фокусов, связанных с установившимися состояниями, разделенными сепаратрисой. Поскольку процесс захвата в резонанс (в область вблизи фокусов) происходит почти случайным образом, то его можно рассматривать статистически. Как оказалось, при омической диссипации вероятность захвата в одно из положений равновесия определяется площадью области в фазовом пространстве, заметаемой сепаратрисой.

В данной работе представлен анализ квантовой диссипативной динамики джозефсоновского осциллятора. Рассмотрена ситуация, когда осциллятор связан с бозонным термостатом, а его динамика описывается матрицей плотности. При выполнении гипотезы случайных фаз задачу можно свести к основному кинетическому уравнению. В этом случае у осциллятора существует два хорошо локализованных состояния, которые соответствуют классическим положениям равновесия. Новая ситуация в процессе релаксации возникает при прохождении области классической сепаратрицы, которая исследована численно моделированием.

### Литература

1. *Boulant, N.* Quantum nondemolition readout using a Josephson bifurcation amplifier / N. Boulant, G. Ithier [et al.] // Phys. Rev. B. 2007. V. 76. P. 014525.
2. *Боголюбов, Н.Н.* Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний / Н.Н. Боголюбов, Ю.А. Митропольский. – М. : Наука, 1974. – 504 с.

## МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ СПЕКТРОМЕТР ТОМСОНОВСКАЯ ПАРАБОЛА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ TNSA-ИСТОЧНИКА ПРОТОНОВ И ИОНОВ

*С.Е. Перевалов, К.Ф. Бурдонов, М.В. Стародубцев, А.А. Соловьев*

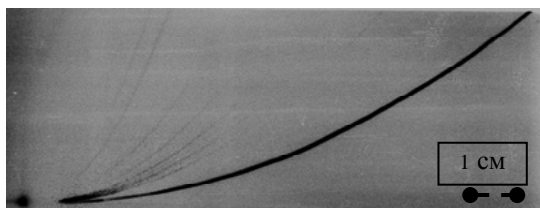
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
perevaloo@gmail.com

Со времен появления сверхмощных лазерных комплексов [3] возник огромный интерес к лазерному способу ускорения частиц. Способ привлекателен тем, что в ускоряющей области, которая имеет размеры от нескольких микрон, до нескольких сантиметров, создается сильное ускоряющее поле с амплитудой порядка  $10^{10}$  В/м. Такие компактные, по сравнению с традиционными ускорителями, источники могут найти широкое применение в различных областях физики, медицине, оборонной промышленности [1].

Для исследований в области лазерного ускорения частиц используются различные диагностические методы и приборы, которые позволяют регистрировать и измерять энергетические, угловые спектры, размеры источников, различать частицы с разными отношениями «заряд – масса». Одним из таких приборов является спектрометр томсоновская парабола (ТП), который позволяет одновременно с разделением частиц по энергиям разделять частицы в зависимости от их отношения «заряд – масса» (рис. 1).

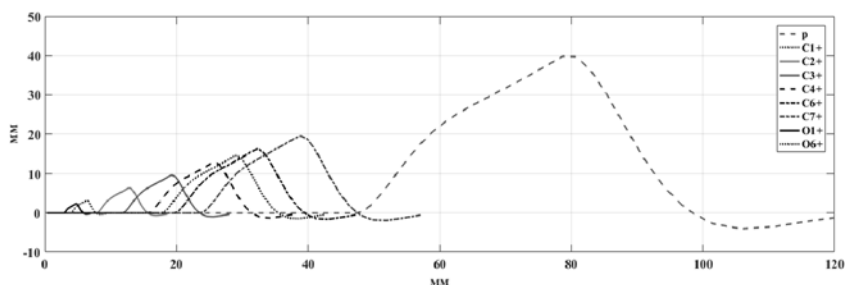
В классической схеме спектрометра используются статические сонаправленные поля. Однако в некоторых задачах требуется исследовать временную динамику источника частиц. Поэтому для решения такой задачи

предлагается применить времяпролетный подход, используя вместо статического электрического поля переменное путем подачи на отклоняющие пластины электрического импульса с известной модуляцией. Такой подход позволит получать дополнительную информацию из экспериментальных данных по ускорению протонов [2].



**Рис. 1.** Экспериментальное изображение со спектрометра [1]. Электрическое поле разворачивает по вертикали, магнитное – по горизонтали. Поля статические

Моделирование показывает, что при одновременном рождении всех частиц ускорение частиц с одинаковой скоростью, но разным отношением «заряд – масса» происходит одновременно и в одном и том же электрическом поле (рис. 2). Таким образом, зная время пролета частицы от источника до детектора, можно определять время рождения частиц, поскольку наибольшее отклонение частиц на детекторе происходит во время, равное сумме времени задержки импульса и времени рождения частицы.



**Рис. 2.** Модельное распределение на детекторе для частиц с энергией от 0,5 до 50 МэВ и различным отношением «заряд – масса». Параметры затухающего импульса: частота 63,3 МГц, длительность 3 нс, задержка 25 нс, амплитуда в пике 3,5 МВ/м

Модернизированный таким образом спектрометр предполагается использовать в экспериментах на лазерном комплексе PEARL [4] для исследования временной динамики источника ионов с лазерным драйвером. Также рассмотрена возможность использования описанного подхода для детектирования мощных терагерцовых импульсов, сфокусированных на TNSA протонный пучок.

## Литература

1. Soloviev A. [et al.] Experimental evidence for shortpulse laser heating of solid-density target to high bulk temperatures // Scientific Reports. 2017. V. 7. Art. 12144.
2. Ter-Avetisyan S. Time resolved corpuscular diagnostics of plasmas produced with high-intensity femtosecond laser pulses / S. Ter-Avetisyan, M. Schnürer, P.V. Nickles // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. V. 38. P. 863–867.
3. Jeong T.M. Femtosecond petawatt laser / T.M. Jeong, J. Lee // Ann. Phys. Berlin, 2014. V. 526, № 3/4. P. 157–172.
4. Lozhkarev V.V. [et al.] Compact 0.56 Petawatt laser system based on optical parametric chirped pulse amplification in KD\*P crystals // Laser Phys. Lett. 2007. V. 4, № 6. P. 421–427.

## ПРИЁМНИК РАДИОСВЕТА С ЦИФРОВЫМ НАКОПЛЕНИЕМ

*М.М. Петросян<sup>1,2</sup>, А.С. Дмитриев<sup>1,2</sup>, В.В. Ицков<sup>1,2</sup>, А.И. Рыжов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва  
<sup>2</sup>Московский физико-технический институт

В работе описан приёмник, который предназначен для отображения в режиме реального времени радиоосвещённости окружающей среды. Под радиоосвещением понимается локальное, искусственно созданное шумоподобное поле широкополосного некогерентного в пространстве и во времени излучения в радио- или микроволновом диапазоне длин волн. Распространяясь, такое излучение несёт в себе информацию о среде, с которой взаимодействует. Источник такого излучения был предложен в работе [1]. Для эффективного использования радиоосвещения помимо источников радиосвета нужны устройства, которые его воспринимают – приёмники. Приёмник радиосвета прежде всего должен оценивать мощностную характеристику радиосвета. Требование к приёмнику радиосвета – высокая чувствительность, определяющая минимальное значение мощности приходящего сигнала, которое можно регистрировать на выходе приёмника. Высокая чувствительность позволит работать на больших расстояниях. Приёмник также должен иметь большой динамический диапазон по мощности, чтобы работать с источниками радиосвета как на близких, так и на дальних расстояниях.

В результате требования выглядят так:

- полоса частот принимаемого сигнала не менее 500 МГц;
- высокая чувствительность;
- широкий динамический диапазон ~70–90 дБм.

Прототипом приёмника могут служить радиометры [2] и приёмники СШП-сигналов в прямохаотических системах связи [3–5]. Приёмник радиосвета совмещает полезные свойства прототипов: от радиометров – высокая

чувствительность, от энергетических приёмников – большой динамический диапазон. Структура элементарной ячейки включает в себя антенну, согласованную нагрузку, ключ НМС-536, полосовой фильтр HFCN-2700+(2,6–6,5 ГГц), малощумящий усилитель VMMK-3803 с усилением 20 дБ, второй полосовой фильтр HFCN-3100+(3,4 ± 9,9 ГГц), логарифмический детектор AD8317 с динамическим диапазоном 0–60 дБм, активный фильтр нижних частот AD8541 и микроконтроллер STM32 со встроенным аналого-цифровым преобразователем 12 бит 10 кГц. Устройство реализовано на печатной плате. Оно предназначено для работы в частотном диапазоне от 3 до 5 ГГц с динамическим диапазоном до –80 дБм и рассчитано на максимальную входную мощность –20 дБм. Цифровой сигнал с микроконтроллера поступает на вход USB (виртуальный COM port) компьютера. На компьютере, к которому подключено устройство, можно непосредственно наблюдать зависимость мощности сигнала от времени через специальное программное обеспечение, а также записывать реализацию и проводить дальнейшую её обработку.

Чтобы измерять добавку от полезного сигнала на выходе приёмника, применяется радиометрический способ компенсации шумовой компоненты. Калибровка устройства и расчёт шумовой составляющей производится в начале работы приёмника радиосвета на основании первых выходных точек. После калибровки постоянная составляющая на выходе приёмника будет зависеть от полезного сигнала на входе приёмника.

Чувствительность приёмника может быть повышена за счёт цифрового накопления сигнала с АЦП на встроенном микроконтроллере. При накоплении на  $N$  точек сигнал  $A$  увеличивается на  $N$ , флуктуационная компонента – на  $\sqrt{N}$ . Следовательно, при накоплении на  $N$  точек отношение постоянной компоненты и флуктуационной составляющей изменится на  $\sqrt{N}$ . То есть изменение длительности накопления на порядок приведёт к изменению чувствительности приёмника на 5 дБ и, соответственно, изменению максимального расстояния.

Были проведены измерения с применением цифрового накопления. В результате измерений с разными значениями накопления было получено увеличение чувствительности на 15 дБ при накоплении  $N = 10000$ . Увеличение чувствительности на 15 дБ вместо 20 дБ объясняется присутствием нестационарных шумов, чего можно будет избежать при использовании периодической компенсации.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00084).

### Литература

1. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Герасимов М.Ю., Ицков В.В. // РЭ. 2016. Т. 61, № 10.

2. Шутко А.М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М. : Наука, 1986.

3. Дмитриев А.С., Клецов А.В., Лактюшкин А.М., Панас А.И., Старков С.О. // РЭ. 2006. Т. 51, № 10. С. 1193.

4. Andreyev Yu.V., Dmitriev A.S., Efremova E.V., Khilinsky A.D., Kuzmin L.V. // Int. J. Bifurcation and Chaos. 2005. V. 15, № 11. P. 3639.

5. Ефремова Е.В., Лазарев В.А. // Успехи современной радиоэлектроники. 2013. № 3. С. 43.

## О синхронизации в сетях Фитц-Хью – Нагумо с малыми задержками

С.А. Плотников, А.Л. Фрадков

Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

waterwalf@gmail.com

Синхронизация – одна из важнейших проблем исследования динамики связанных осцилляторов, которая встречается в различных областях науки [1]. Одной из таких областей является исследование динамики нейронных сетей. На синхронизацию влияют различные параметры сети, в частности задержки при передаче сигнала между узлами. Даже небольшие задержки могут изменить поведение системы [2], поэтому изучение влияния задержек на синхронизацию в сети – важная проблема. В работе исследуется синхронизация в сети из одних из простейших моделей нейронов, а именно моделей Фитц-Хью – Нагумо [3, 4].

### 1. Уравнения модели

В работе исследуется синхронизация сети из линеаризованных систем Фитц-Хью – Нагумо (ФХН) с задержками в связях, которая описывается следующими уравнениями:

$$\varepsilon \dot{u}_i(t) = (1 - a^2)u_i(t) - v_i(t) + \sum_{j=1}^n c_{ij} \left[ u_j(t - \varepsilon h_{ji}) - u_i(t - \varepsilon h_{ij}) \right], \quad (1)$$

$$\dot{v}_i(t) = u_i(t) + a, \quad i = 1, \dots, n,$$

где  $u_i$  и  $v_i$  – быстрая переменная активации (потенциал мембраны) и медленная переменная восстановления  $i$ -го нейрона соответственно;  $\varepsilon$  – параметр временной шкалы, разделяющий динамику системы на медленную и быструю;  $a$  – пороговый параметр, влияющий на динамику отдельных нейронов: при  $|a| > 1$  траектории нелинейной системы ФХН стремятся к устойчивой предельной точке, тогда как при  $|a| < 1$  такая система описывает ко-

лебания. То есть имеет место суперкритическая бифуркация Андронова – Хопфа.

Связи между узлами определяются графом связей  $G = (V, E)$ , где  $V$  – множество вершин, а  $E$  – множество ребер. Предполагается, что граф  $G$  связный, взвешенный и неориентированный, т.е. его матрица смежности  $C = \{c_{ij}\}$  симметричная и задается следующим образом:

$$\begin{cases} c_{ij} > 0, \text{ если } (i, j) \in E, \\ c_{ij} = 0 \text{ в противном случае.} \end{cases}$$

$\varepsilon h_{ij}$  – постоянные задержки, где  $h_{ij} \in (0, h_0]$  и  $h_{ij} = h_{ji} \forall i, j = 1, \dots, n$ .

## 2. Основной результат

**Теорема.** Пусть параметры сети (1) удовлетворяют условию  $1 - a^2 - \lambda_2(G) < 0$ , где  $\lambda_2(G)$  – алгебраическая связность графа  $G$ , а также существуют матрицы  $P, R, P_2, P_3$ , такие, что следующая система линейных матричных неравенств разрешима:

$$\begin{cases} P > 0, \\ R > 0, \\ \begin{bmatrix} P_2^T K + K^T P_2 & P - P_2^T + K^T P_3 & h_0 P_2^T \Lambda \\ * & -P_3 - P_3^T + h_0 R & h_0 P_3^T \Lambda \\ * & * & -h_0 R \end{bmatrix} < 0, \end{cases}$$

где  $\Lambda$  – диагональная матрица размером  $(n - 1) \times (n - 1)$ , на диагонали которой находятся упорядоченные по возрастанию собственные числа матрицы Лапласа графа  $G$ , кроме нулевого, а  $K = (1 - a^2)I_{n-1} - \Lambda$ . Тогда сеть из линеаризованных систем ФХН (1) синхронизируется для любых задержек  $\varepsilon h_{ij} \in (0, h_0]$ .

Доказательство данной теоремы основывается на результатах статьи Э. Фридман [5].

## Литература

1. *Osipov, G.V.* Synchronization in oscillatory networks / G.V. Osipov, J. Kurths, C. Zhou. – Berlin : Springer Verlag, 2007. – 370 p.
2. *Hale, J.* Effects of small delays on stability and control / J. Hale, S. Lunel // Rapport № WS-528. – Amsterdam : Vrije University, 1999. – 27 p.
3. *FitzHugh, R.* Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane // Biophys. J. 1961. V. 6, № 1. P. 445–466.
4. *Nagumo, J.* An active pulse transmission line simulating nerve axon / J. Nagumo, S. Arimoto, S. Yoshizawa // Proc. IRE. 1962. V. 50. P. 2061–2070.
5. *Fridman, E.* Effects of small delays on stability of singularly perturbed systems // Automatica. 2002. V. 38, № 5. P. 897–902.

# ИНТЕГРАЦИЯ НЕЙРОННОЙ АКТИВНОСТИ И ПОВЕДЕНИЯ МЫШЕЙ: КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЙ МЕСТА

В.В. Плюсин<sup>1</sup>, В.П. Сотсков<sup>1,3</sup>, К.В. Анохин<sup>2,3,4</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)

<sup>2</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

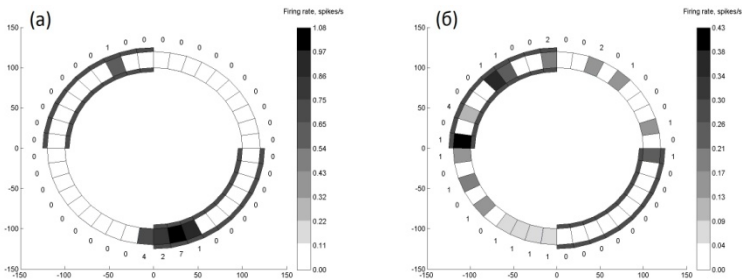
<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

<sup>4</sup>Институт нормальной физиологии им. П.К. Анохина, Москва

viktor.plusnin@phystech.edu

Взаимосвязь нейрональной активности и поведения животных традиционно находится в центре внимания нейронауки. С развитием технологии прижизненного оптического кальциевого имиджинга стало возможным непосредственно наблюдать активность большого числа нейронов свободно двигающейся мыши [1]. Помимо непосредственной обработки сигнала кальциевого имиджинга, стоит задача синхронизации нейронной активности с поведением мыши. По результатам синхронизации можно судить о специализации отдельно взятой клетки, например в области CA1 гиппокампа можно обнаружить специализированные на пространстве нейроны, клетки места [2].

Каждая клетка места активируется только тогда, когда мышь находится в определенном месте пространства, в так называемом поле места. В экспериментах, связанных с поиском поведенческих коррелятов специализации нейронов, возникает задача определения наличия такой дифференциации, является ли клетка уже клеткой места, и за какое поле она отвечает (рис. 1).



**Рис. 1.** Карта спайкования отдельно взятого нейрона бодрствующей мыши в *o*-maze лабиринте, разбитом на поля места: *а* – карта спайкования клетки места; *б* – карта спайкования неспециализированной клетки. Лабиринт разбит на 40 равных секторов, числа напротив сектора показывают, сколько раз активировался нейрон, когда мышь находилась в определенном секторе, firing gate – скорость спайкования нейрона в секторе

Для количественного определения полей места было предложено измерять специфичность поля с точки зрения информационного содержания

нейрональной активности нейрона [3]. Индекс специфичности показывает количество информации (в битах) о местоположении мыши (то есть насколько хорошо нейронная активность предсказывает положение мыши в пространстве). Количество информации  $I$  рассчитывается по формуле

$$I = \sum P_i(R_i/R) \log_2(R_i/R), \quad (1)$$

где  $i$  – номер ячейки,  $P_i$  – вероятность нахождения мыши в  $i$ -й ячейке,  $R_i$  – средняя скорость спайкования клетки в  $i$ -м секторе,  $R$  – средняя скорость спайкования клетки по всем секторам.

Разреженность  $s$  распределения спайкования клетки можно измерить по формуле (2), значение  $s = 0,1$  будет означать, что клетка активировалась только в 10 % секторов лабиринта.

$$s = \sum (P_i R_i^2) / R^2. \quad (2)$$

Данный метод является необходимым, но не достаточным критерием определения полей места. Нами были разработаны методы, позволяющие с достоверностью идентифицировать клетки места и определять их поля места.

### Литература

1. *Ghosh K.K., Schnitzer M.J.* Miniaturized integration of a fluorescence microscope // *Nature Methods*. 2011. V. 8. P. 871–878.
2. *Moser E.I., Moser M.B.* Place cells, grid cells, and the brain's spatial representation system // *Annual Rev. Neurosci.* 2008. V. 31. P. 69–89.
3. *Markus E.J., Skaggs W.E.* Spatial Information Content and Reliability of Hippocampal CA1 Neurons: Effects of Visual Input // *Hippocampus*. 1994. V. 4, № 4. P. 410–421.

## ПАССИВНАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ МОД В ВОЛНОВОДНОМ Nd:YAG-ЛАЗЕРЕ С ЧАСТОТОЙ ПОВТОРЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ 10 ГГц

*М.В. Понарина, А.Г. Охримчук, М.Г. Рыбин, А.А. Таракановский,  
Т.В. Долматов, В.В. Букин, П.А. Образцов*

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва  
ponarinamashka@gmail.com

В настоящее время особый интерес представляют лазерные источники, обеспечивающие генерацию пико- или субпикосекундных импульсов со стабильной частотой повторения более 1 ГГц. Лазеры такого типа используются в качестве высокостабильных генераторов частоты, которые находят применения в таких направлениях, как метрология частоты, телекоммуникации и системы связи, а также в фундаментальных исследованиях.

При разработке такого типа лазеров одной из ключевых проблем является повышение стабильности частоты следования ультракоротких импульсов.

Для стабилизации синхронизации продольных мод необходимо обеспечить генерацию на основной поперечной моде (ТЕМ<sub>00</sub>). В данной работе представлен твердотельный лазер, обеспечивающий генерацию пикосекундных импульсов (10–20 пс) с частотой повторения в гигагерцовом диапазоне (10 ГГц) [1]. В данном лазере в качестве активной среды используется трубчатый волновод с диаметром 20 мкм, созданный в объеме кристалла Nd:YAG. Контур волновода записан фемтосекундным лазером и представляет собой параллельные треки (линии) уменьшенного показателя преломления на величину порядка  $(1-5) \cdot 10^{-3}$ . Использование волноводной структуры в активной среде позволяет осуществлять эффективную накачку по всей длине кристалла, а малый диаметр волновода обеспечивает генерацию только основной поперечной моды. Резонатор лазера образован глухим зеркалом (100 % отражающее покрытие), нанесенным непосредственно на один из торцов Nd:YAG-кристалла и выходного зеркала с насыщающимся поглотителем. В качестве насыщающегося поглотителя используется одноатомный слой графена, осажденный на выходное зеркало. Благодаря использованию графена в качестве насыщающегося поглотителя полная длина резонатора составляет всего 10 мм, что обеспечивает частоту повторения импульсов 10 ГГц в режиме пассивной синхронизации мод.

Разработанный подход позволит получить стабильный режим пассивной синхронизации мод для создания высокостабильных генераторов оптических импульсов с частотой повторения в гигагерцовом диапазоне.

#### Литература

1. *Obraztsov P.A., Okhrimchuk A.G., Rybin M.G., Obraztsova E.D., Garnov S.V.* Multi-gigahertz repetition rate ultrafast waveguide lasers mode-locked with graphene saturable absorbers // *Laser Phys.* 2016. V. 26, № 8. Art. 084008.

## ПРОХОЖДЕНИЕ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ХАОТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ЧЕРЕЗ СРЕДУ, ИМИТИРУЮЩУЮ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИВОГО ОРГАНИЗМА

*М.Г. Попов<sup>1,2</sup>, А.И. Рыжов<sup>1</sup>, М.Ю. Герасимов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет),  
г. Долгопрудный  
freeze2@inbox.ru

В работе рассматривается распространение сверхширокополосных (СШП) хаотических сигналов через среду внутри живых организмов. Данный вопрос приобретает актуальность в связи с развитием различных бес-

проводных медицинских датчиков, собирающих информацию о физиологических параметрах, которые могут быть эффективно применены для решения задач, например, диагностики заболеваний. Однако предварительно необходимо исследовать возможность применимости таких систем с точки зрения распространения сигнала.

В работе изучается затухание СШП-сигналов в однородной среде – сахарном растворе, близком по своим диэлектрическим свойствам к мышечной ткани человека ( $C_{12}H_{22}O_{11}/1,0$  М (342 г на 1 л воды)) [1].

Для проведения экспериментов в качестве приёмника и передатчика СШП хаотических сигналов использовались СШП прямохаотические приемопередающие модули, разработанные на основе устройств, представленных в [2], и имеющие рабочий диапазон частот 3–5 ГГц. Мощность передатчика составляла 20 дБм, а чувствительность приемника –60 дБ.

К приемопередатчикам через коаксиальные кабели подключались антенны, которые помещались внутри пустой кюветы или наполненной сахарным раствором. При помощи осциллографа измерялась амплитуда сигнала на выходе логарифмического детектора приёмника в зависимости от расстояния между антеннами приёмника и передатчика.

Затухание в канале можно оценить по формуле

$$PL(d) = 20 \lg \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) + \frac{A_B - A_d}{S}, \quad (1)$$

где  $PL$  – затухание сигнала на расстоянии  $d$ ,  $A_d$  – амплитуда сигнала на выходе логарифмического детектора приёмника на расстоянии  $d$  в некоторой среде,  $A_B$  – амплитуда сигнала на выходе логарифмического детектора приёмника на расстоянии 1 м в свободном пространстве,  $S$  – чувствительность логарифмического детектора,  $\lambda$  – средняя длина волны излучения передатчика.

Таким образом, измеряя в эксперименте значения  $A_d$  и  $A_B$  и подставляя их в формулу (1), можно рассчитывать величину затухания сигнала. В нашем случае первое слагаемое в (1) составляет 42 дБ.

Затухание сигнала можно рассчитать по формуле

$$PL(d) = PL_0 + 10\gamma \lg \left( \frac{d}{d_0} \right). \quad (2)$$

Здесь  $PL_0$  – затухание сигнала на расстоянии 1 м в некоторой среде. Таким образом, при помощи графика зависимости  $PL(d)$  можно определить  $PL_0$  и показатель затухания  $\gamma$ , построив аппроксимирующую прямую методом наименьших квадратов.

Предварительно были проведены эксперименты по оценке затухания СШП хаотического сигнала для случая пустой кюветы. Далее были произведены измерения затухания СШП хаотических радиоимпульсов при их распространении в сахарном растворе для двух случаев – при расположе-

нии приемной антенны с внутренней и с внешней стороны кюветы. Данные случаи соответствуют передаче данных внутри организма, а также изнутри живого организма наружу.

Для расчета затухания сигнала  $PL_0$  и показателя затухания сигнала  $\gamma$  были построены графики затухания сигнала в зависимости от расстояния между приемными и передающими антеннами в логарифмическом масштабе (их линейные области) и аппроксимирующие прямые для каждой серии вышеупомянутых экспериментов.

Из графиков следует, что для СШП хаотических сигналов в диапазоне 3–5 ГГц в среднем для воздуха  $PL_0 = 46$  дБ и  $\gamma = 2$ , а для сахарного раствора  $PL_0 = 150$  дБ и  $\gamma = 8$ . При этом затухание сигнала на расстоянии 10 см в сахарном растворе составляет порядка 70–75 дБ.

Для использовавшихся в эксперименте приемопередатчиков максимальная дальности передачи в растворе составляет 13 см. Для случая с антенной, расположенной снаружи кюветы, максимальная дальность составляет 12 см.

Более полные результаты исследования могут быть найдены в статье [3].

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00084).

#### Литература

1. Yamamoto H., Zhou J., Kobayashi T. Ultra wideband electromagnetic phantoms for antennas and propagation studies // IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences. 2008. Vol. E91-A, № 11. P. 3173–3182.
2. Дмитриев А.С., Герасимов М.Ю., Ицков В.В., Лазарев В.А., Попов М.Г., Рыжов А.И. Активные беспроводные сверхширокополосные сети на основе хаотических радиоимпульсов // Радиотехника и электроника. 2017. Т. 62, № 4. С. 354–363.
3. Рыжов А.И., Попов М.Г. Прохождение микроволновых сверхширокополосных хаотических сигналов через раствор, имитирующий среду внутри тел млекопитающих // Прикладная нелинейная динамика. 2017. № 4 С. 23–32.

### ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ – СТОКСА И ОБЕРБЕКА – БУССИНЕСКА, ОПИСЫВАЮЩИХ УСИЛЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ В ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

*Е.Ю. Просвиряков*

Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург  
Уральский федеральный университет, Екатеринбург  
evgen\_pros@mail.ru

Уравнения Навье – Стокса, описывающие вязкую несжимаемую жидкость, для сдвиговых течений в стандартных обозначениях записываются следующим образом:

$$\frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right),$$

$$\frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} \right),$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0. \quad (2)$$

Здесь  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости,  $V_x$  и  $V_y$  ненулевые компоненты вектора скорости,  $t$  – время,  $x, y, z$ , – пространственные координаты.

**Изобарические колебания.** Система (1), (2) является переопределенной, поскольку из четырех нелинейных уравнений в частных производных нужно найти четыре неизвестные функции. В статьях [1–4] было показано, что множество решений системы для изобарических течений нетривиально, и построено следующее поле скоростей:

$$V_x = U(z, t) + u(z, t)y, \quad V_y = V(z, t), \quad P = \text{const}. \quad (3)$$

В [3–5] были рассмотрены частные случаи точного решения (3), обобщающие вторую задачу Стокса (колебания Стокса). Благодаря этим решениям, в которых пространственное ускорение  $u = \Omega z/h$ , совпадающее с вертикальной компонентой завихренности, было показано, что в жидкости возможно усиление колебаний относительно заданной вибрации на нижней границе. Усиление волн Стокса происходит из-за наличия в жидкости вертикальной закрутки, которая может разогнать жидкость, а затем под действием поверхностных, диссипативных сил уменьшать импульс.

В данной работе обсуждаются колебания жидкости, вызванные нестационарными решениями для вертикальной компоненты завихренности  $u$ , удовлетворяющей уравнению теплопроводности:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}.$$

Демонстрируется влияние нестационарного вихря на крупномасштабные течения вертикально завихренной жидкости.

**Колебания при учете давления и температуры.** По аналогии с точным решением (3) обсуждается точное решение Пуазейлевого типа:

$$V_x = U(z, t) + u(z, t)y, \quad V_y = V(z, t),$$

$$P = P_0(t) + P_1(t)x + P_2(t). \quad (4)$$

Решение (4) позволяет разрешить переопределенную систему (1), (2), а эффекты усиления волн Стокса становятся еще более наглядными. Заметим, что полученные точные решения хорошо согласуются с экспериментальными наблюдениями [6] и могут применяться для описания крупномасштабных течений океана и атмосферы в рамках квазидвумерных математических моделей [3–5].

### Литература

1. *Аристов, С.Н.* Неоднородные течения Куэтта / С.Н. Аристов, Е.Ю. Просвиряков // *Нелинейная динамика*. 2014. Т. 10, № 2. С. 177–182.
2. *Аристов, С.Н.* Крупномасштабные течения завихренной вязкой несжимаемой жидкости / С.Н. Аристов, Е.Ю. Просвиряков // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2015. № 4. С. 50–54.
3. *Аристов, С.Н.* Нестационарные слоистые течения завихренной жидкости / С.Н. Аристов, Е.Ю. Просвиряков // *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа*. 2016. № 2. С. 25–31.
4. *Просвиряков, Е.Ю.* Неоднородные крупномасштабные течения вертикально завихренной жидкости : дис. ... д.ф.-м.н. / Институт механики УрО РАН. – Ижевск, 2017.
5. *Аристов, С.Н.* Волны Стокса в завихренной жидкости / С.Н. Аристов, Е.Ю. Просвиряков // *Нелинейная динамика*. 2014. Т. 10, № 3. С. 309–318.
6. *Bukreev, V.I.* Experimental investigation of the range of applicability of the solution of Stokes's second problem // *Fluid Dynamics*. 1988. Vol. 23, № 4. P. 504–509.

## СОЛИТОНЫ В ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЕ ЛЕГКООСНОГО ФЕРРОМАГНЕТИКА

*А.А. Расковалов, В.В. Киселев*

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург  
raskovalov@imp.uran.ru

Основное состояние магнитных материалов обычно представляет собой пространственно-периодическую структуру. Простейшая из них – плоскопараллельная структура – квазиодномерная решетка из доменных стенок, разделяющих домены с противоположными направлениями намагниченности. Даже простейшая доменная структура сама по себе сильно нелинейна. Поэтому теоретическое описание коллективных возбуждений на ее фоне возможно только в рамках упрощенных моделей с привлечением специальных методов интегрирования. Одной из базовых моделей теории магнетизма служит уравнение Ландау – Лифшица для ферромагнетика с анизотропией типа «легкая ось». Для квазиодномерных возбуждений такая модель интегрируема. Благодаря этому подробно изучены нелинейные волны и

солитоны на фоне однородного основного состояния легкоосного ферромагнетика [1, 2]. В то же время анализ солитонов в полосовых доменных структурах сталкивается с большими трудностями из-за значительной нелинейности и неоднородности фонового состояния среды.

В данной работе для исследования солитонов в легкоосном ферромагнетике с полосовой доменной структурой в рамках модели Ландау – Лифшица используется модификация метода обратной задачи рассеяния. В его основе лежит задача Римана теории функций комплексной переменной [3]. Наличие полосовой структуры проявляется в том, что задача Римана формулируется не в комплексной плоскости спектрального параметра, как это было в случае однородного основного состояния среды, а на римановой поверхности, топологически эквивалентной тору. Эффективность подобной процедуры ранее была продемонстрирована на примере изучения нелинейной динамики спиральных магнитных структур в рамках модели синус-Гордона [4–6].

Образование солитонов в доменной структуре приводит к смещению доменных стенок структуры. Нами показано, как макроскопические сдвиги доменной структуры связаны с параметрами, определяющими строение и скорость солитонов. Интересно и важно, что найденные солитоны неотделимы от полосовой доменной структуры ферромагнетика. Движение и пульсации ядра каждого солитона вызывают деформации и колебания соседних доменных стенок структуры. Столкновения солитонов сопровождаются локальными сдвигами доменной структуры. Анализ строения солитонов и особенностей их взаимодействия друг с другом и с доменными границами позволяет указать пути возбуждения солитонов в доменной структуре.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Квант», № г. р. 01201463332).

### Литература

1. *Косевич, А.М.* Нелинейные волны намагниченности. Динамические и топологические солитоны / А.М. Косевич, Б.А. Иванов, А.С. Ковалев. – Киев : Наукова думка, 1983. – 192 с.
2. *Борисов, А.Б.* Квазиодномерные магнитные солитоны / А.Б. Борисов, В.В. Киселев. – М. : Физматлит, 2014. – 520 с.
3. *Киселев, В.В.* Солитоны в доменной структуре ферромагнетика / В.В. Киселев, А.А. Расковалов // ТМФ. 2018. [в печати]
4. *Киселев, В.В.* Нелинейная динамика квазиодномерной спиральной структуры / В.В. Киселев, А.А. Расковалов // ТМФ. 2012. Т. 173, № 2. С. 268–292.
5. *Киселев, В.В.* Нелинейные коллективные возбуждения в геликоидальных магнитных структурах / Киселев В.В., Расковалов А.А. // ФММ. 2012. Т. 113, № 12. С. 1180–1192.
6. *Kiselev, V.V.* Solitons and nonlinear waves in the spiral magnetic structures / Kiselev V.V., Raskovalov A.A. // Chaos, Solitons and Fractals. 2016. V. 84. P. 88–103.

# КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОНИЗАЦИИ МНОГОЭЛЕКТРОННЫХ АТОМОВ И ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ ТОКОВ ИНТЕНСИВНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

*А.А. Романов<sup>1,2</sup>, Н.В. Введенский<sup>1,2</sup>, А.А. Силаев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

<sup>2</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
romanov.alexander.al@gmail.com

Большой прогресс в компьютерной технике открывает возможность для численного исследования из первых принципов различных ионизационно-стимулированных явлений, возникающих при взаимодействии атомов и молекул с интенсивными лазерными импульсами. К их числу относится возбуждение высоких гармоник вынуждающего лазерного поля в генерируемом электронном токе, приводящее к генерации когерентного вакуумного ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения [1–3], а также возбуждение низкочастотного тока в создаваемой лазерным импульсом плазме, которое может приводить, в частности, к генерации когерентного терагерцового и среднего ИК-излучения [4, 5].

Несмотря на то что большинство атомов и молекул являются существенно многоэлектронными квантовыми системами, численные исследования ионизационно-стимулированных явлений традиционно основаны на одноэлектронном приближении. В рамках этого приближения электроны, за исключением одного, являются «замороженными» в их орбиталях, а поле родительского иона описывается статической потенциальной ямой. Такие модели могут иметь высокую точность при определенных условиях, но во многих задачах одноэлектронное приближение неприменимо, поскольку оно не описывает ряд существенно многоэлектронных эффектов. Учет этих эффектов может быть сделан на основе нестационарной теории функционала плотности, которая в последнее время все чаще используется в атомной физике и нелинейной оптике. Основой этого подхода являются нестационарные уравнения Кона – Шэма, учитывающие взаимодействие электронов с атомным ядром, внешним электрическим полем лазерного импульса, а также электрон-электронное взаимодействие [6].

Данная работа посвящена численным расчетам, основанным на методе функционала плотности, возбуждения электронных токов в разных частотных диапазонах при взаимодействии интенсивных лазерных импульсов с различными многоэлектронными атомами инертных газов и щелочных металлов. Для моделирования используется разработанная авторами вычислительная программа решения трехмерных нестационарных уравнений Кона – Шэма, алгоритм которой основан на разложении волновых функций орбиталей и потенциальной энергии по сферическим гармоникам. Для опи-

сания обменного и корреляционного взаимодействия рассматриваются потенциалы в обобщенном градиентном приближении [6]. Находятся отличия в закономерностях возбуждения низкочастотных и высокочастотных электронных токов для атомов различных сортов. Для атомов инертных газов проводится сравнение полученных результатов с численным расчетом на основе одноэлектронного приближения и определяются пределы его применимости при расчете атомного отклика. Проводится сопоставление с результатами экспериментов по генерации высоких гармоник и терагерцового излучения при пробое различных атомарных газов [7–9].

### Литература

1. Krausz F., Ivanov M. Attosecond physics // *Reviews of Modern Physics*. 2009. V. 81, № 1. P. 163.
2. Shafir D. [et al.] Role of the ionic potential in high harmonic generation // *Physical Review Letters*. 2012. V. 108, № 20. P. 203001.
3. Wu H.C., Meyer-ter-Vehn J. Giant half-cycle attosecond pulses // *Nature Photonics*. 2012. V. 6, № 5. P. 304–307.
4. Vvedenskii N.V. [et al.] Two-color laser-plasma generation of terahertz radiation using a frequency-tunable half harmonic of a femtosecond pulse // *Physical Review Letters*. 2014. V. 112, № 5. P. 055004.
5. Balčiūnas T. [et al.] CEP-stable tunable THz-emission originating from laser-waveform-controlled sub-cycle plasma-electron bursts // *Optics Express*. 2015. V. 23, № 12. P. 15278–15289.
6. Ullrich C.A. *Time-dependent density-functional theory: concepts and applications*. OUP Oxford, 2011.
7. Paul P.M. [et al.] Enhanced high harmonic generation from an optically prepared excited medium // *Physical Review Letters*. 2005. V. 94, № 11 P. 113906.
8. Sun X., Zhang X.C. Terahertz radiation in alkali vapor plasmas // *Applied Physics Letters*. 2014. V. 104, № 19. P. 191106.
9. Zhang S. [et al.] Excitation-wavelength scaling of terahertz radiation in alkali vapor plasmas // *Applied Physics Letters*. 2017. V. 111, № 11. P. 111104.

# ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСШИРЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ВО ВНЕШНЕМ ПОПЕРЕЧНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ: МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ АККРЕЦИИ

*Д. Романовский<sup>1</sup>, А. Соловьев<sup>1</sup>, К. Бурдонов<sup>1</sup>, С.Н. Чен<sup>1,2</sup>, А. Еремеев<sup>1</sup>,  
Г. Реве<sup>2</sup>, С. Пикуз<sup>3</sup>, С. Рязанцев<sup>3</sup>, А. Сладков<sup>1</sup>, А. Коржиманов<sup>1</sup>,  
В. Гинзбург<sup>1</sup>, Е. Хазанов<sup>1</sup>, А. Кочетков<sup>1</sup>, А. Кузьмин<sup>1</sup>, И. Шайкин<sup>1</sup>,  
А. Шайкин<sup>1</sup>, И. Яковлев<sup>1</sup>, М. Стародубцев<sup>1</sup>, Ж. Фукс<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

<sup>2</sup>LULI, CNRS UMLR7605, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France

<sup>3</sup>Объединенный институт высоких технологий РАН, Москва  
romanovskiy.iap@gmail.com

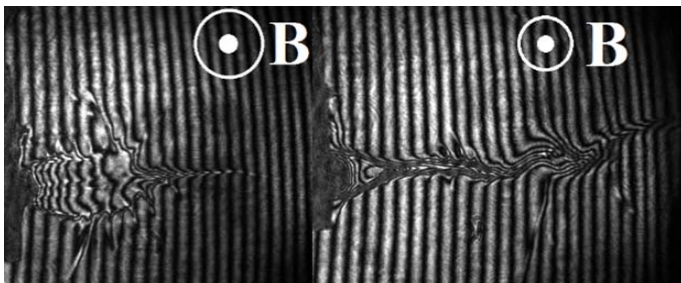
Процессы падения (аккреции) вещества на астрофизические объекты активно исследуются в течение последних десятилетий. Актуальность этих исследований связана с тем, что аккреция является одним из доминирующих механизмов энерговыделения в астрофизике, приводящим к формированию наиболее ярких источников космического излучения. Аккреционный поток, разогреваясь, превращается в высокопроводящую плазму, которая может взаимодействовать как с собственным магнитным полем объекта, так и с межгалактическим магнитным полем, существенно образом меняя конфигурацию и динамику аккреционных течений. Важнейшим результатом взаимодействия аккреционных потоков с собственным магнитным полем звезды-аккретора является формирование звездной магнитосферы, контактирующей с внутренним краем аккреционного диска [1].

В докладе представлены результаты лабораторного исследования плазменных процессов, развивающихся в течение проникновения потоков плазмы поперек внешнего магнитного поля; подобная постановка задачи аналогична вторжению аккреционных потоков вещества в собственное магнитное поле звезды в окрестности плоскости магнитного экватора.

В опубликованных экспериментальных работах по формированию диамагнитной плазменной полости практически не рассматривались процессы долговременной эволюции, что, по-видимому, было связано с трудностями при диагностике плазменного облака на больших временах после его создания. В настоящей работе предложен новый подход к лабораторному исследованию и представлена детальная динамика взаимодействия облака лазерной плазмы с магнитным полем, в особенности на больших временах развития процесса, не исследованных до настоящего времени.

Эксперименты были проведены на лабораторном стенде для исследований лазерно-плазменного взаимодействия, созданном на базе лазерного комплекса PEARL. Высокоскоростной поток плотной плазмы, моделирующий плазму аккреционного диска, формировался путем термической абляции вещества с поверхности твердотельной мишени при ее облучении

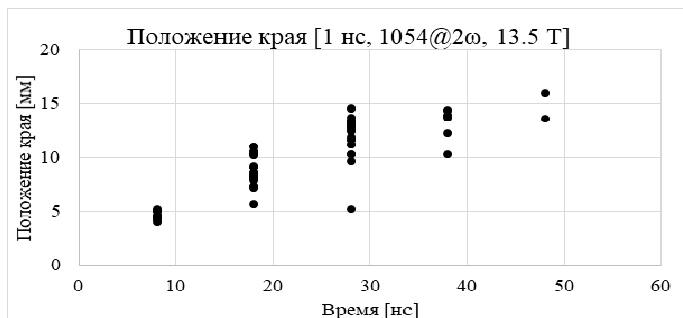
мощным лазерным излучением. Максимальная интенсивность излучения достигала  $2 \cdot 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>. Мишень из тефлона CF<sub>2</sub> располагались внутри соленоида, создававшего квазиоднородное внешнее магнитное поле напряженностью до 15 Тл. Вместе с этим, характерные концентрации лазерной плазмы в получающемся облаке оказываются больше или порядка  $10^{17}$  см<sup>-3</sup>, что позволяет использовать оптическую интерферометрию для диагностики плазмы. На рис. 1 изображены два эксперимента: слева показано расширение плазмы по истечению 18 нс после воздействия лазерного импульса, справа – после 48 нс.



**Рис. 1.** Формы диамагнитных полостей

В рамках доклада рассматривается вопрос зависимости скорости распространения плазменного потока поперек магнитного поля.

Исходя из интерферометрической диагностики была измерена зависимость положения края плазменного потока от времени расширения плазмы (рис. 2). Вопрос исследовался для различных интенсивностей лазерного импульса. На основании полученных данных была рассчитана интегральная скорость распространения края плазмы (рис. 3). На начальных этапах скорость расширения плазмы составляла около 600 км/с и со временем спадала.



**Рис. 2.** Зависимость положения края плазмы от времени расширения

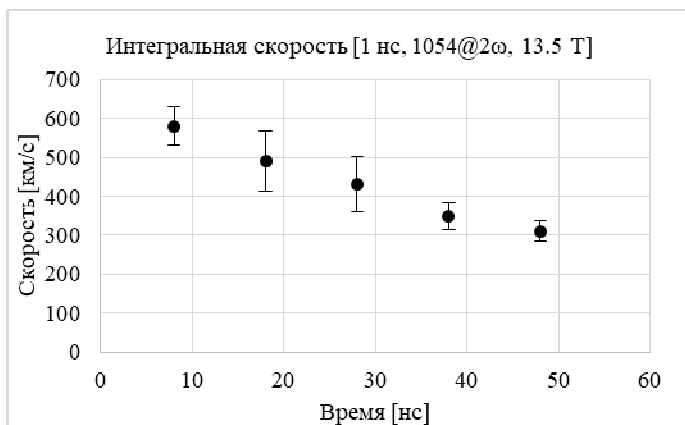


Рис. 3. Интегральная скорость

Проведенный анализ интегральной скорости как функции интенсивности и энергии лазерного импульса показал отсутствие явного влияния энергетика лазерного импульса на скорость расширения края плазменного потока в условиях поперечного магнитного поля.

Полученные результаты могут свидетельствовать о наличии двух режимов распространения плазменного потока в поперечном направлении к внешнему магнитному полю. В первом режиме образующаяся диамагнитная полость выталкивает силовые линии из плазменного облака, при этом кинетическое давление плазмы превосходит внешнее магнитное давление ( $\beta > 1$ ). В этом режиме расширяющаяся плазма совершает работу по компрессии силовых линий, что приводит к активному остыванию плазмы и заметному падению скорости в поперечном направлении магнитного поля (с 600 км/с до 300 км/с на рис. 3). В определенный момент кинетическое давление становится меньше магнитного давления ( $\beta < 1$ ), при этом плазма не останавливается полностью, а переходит к второму режиму, который, вероятно, связан с электрическим полем, индуцированным движением плазмы поперек магнитного поля. Под действием двух перпендикулярных, магнитного и электрического, полей плазма оказывается под воздействием  $E \times B$  дрейфа, в ходе которого скорость движения плазмы поперек магнитного поля падает существенно меньше. Данный механизм проникновения плазменных потоков поперек магнитного поля может иметь ключевое значение для понимания аккреционной динамики астрофизических объектов.

### Литература

1. *Revet G., Fuchs J. [et al.] Laboratory unraveling of matter accretion in young stars // Sci. Adv. 2017. V. 3, № 11. Art. e17000982.*

## ФЕМОСЕКУНДНАЯ СТРУКТУРНАЯ МОДИФИКАЦИЯ ТОНКОЙ ПЛЕНКИ ХАЛЬКОГЕНИДНОГО СТЕКЛА СОСТАВА $As_{50}S_{50}$

*А.В. Ромашкин<sup>1</sup>, А.А. Мурзанев<sup>1</sup>, А.М. Киселев<sup>1</sup>, А.И. Корытин<sup>1</sup>,  
М.А. Кудряшов<sup>2</sup>, А.В. Нежданов<sup>2</sup>, А.И. Машин<sup>2</sup>, А.Н. Степанов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

<sup>2</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
romashkin@ipmras.ru

Впервые возможность применения слоев халькогенидов и систем «халькогенид – металл» в качестве регистрирующих сред была показана в середине шестидесятых годов прошлого столетия [1]. Чрезвычайно высокая разрешающая способность таких слоев является характерной при записи информации с их использованием. Композиции на основе халькогенидных стекол и систем «халькогенид – металл» чувствительны в широком диапазоне частот (УФ, видимая область, ближняя инфракрасная, потоки электронов и ионов, синхротронное излучение). Важным свойством также является возможность получения поверхностных рельефов.

В работе исследовался образец халькогенидного стекла  $As_{50}S_{50}$ , полученный методом плазмохимического осаждения из газовой фазы (PECVD) на стеклянную подложку. Толщина пленки составляла 4 мкм. Была разработана и создана экспериментальная установка по фемтосекундной лазерной микромодификации халькогенидных стекол. В качестве источника излучения выступал генератор фемтосекундных лазерных импульсов (длительность импульсов 50 фс, длина волны излучения 800 нм, частота повторения импульсов 78 МГц, энергия в импульсе до 2 нДж). Лазерное излучение фокусировалось на образец асферической короткофокусной линзой с фокусными расстоянием 6,24 мм.

Модификация образца осуществлялась следующим образом. При заданной мощности лазерного излучения образец транслировался перпендикулярно лучу лазерного излучения с заданной скоростью на расстояние 440 мкм. Процедура повторялась при 31,2; 62,5; 125,0 и 250,0 мкм/с. Далее образец смещался по горизонтали на фиксированное расстояние, с помощью поляризационного аттенюатора выставлялось иное значение мощности лазерного излучения, и процедура повторялась. Энергия в импульсе варьировалась в диапазоне от 0,06 до 0,58 нДж.

Визуализация полученных таким способом каналов производилась в оптическом микроскопе Leica DMLS. Составлялась карта с указанием наличия или отсутствия модификации в зависимости от параметров эксперимента (средняя мощность лазерного излучения, скорость перемещения образца), при которых осуществлялось воздействие на образец, определялся порог модификации.

В экспериментах показано, что с помощью фемтосекундной лазерной модификации в пленке халькогенидного стекла системы As-S возможно формирование локализованных в пространстве структур с измененным показателем преломления с довольно малыми характерными размерами в несколько микрон.

С помощью интерферометра Майкельсона было исследовано распределение фазы поперек канала. Обработка интерферограмм осуществлялась в программном пакете IDEA. Полученная пространственная картина распределения фазы в области модификации позволяет судить о величине изменения показателя преломления. Показано, что в зависимости от воздействия каналы обладают как положительным, так и отрицательным изменением фазы.

Исследовался спектр комбинационного рассеяния света (КРС) модифицированных областей при возбуждении на длине волны He-Ne-лазера 632,8 нм. При сравнении этих спектров со спектром КРС исходного материала образца, не подвергавшегося модификации, обнаружено, что в области, подвергнутой воздействию фемтосекундного лазерного излучения, значительно возрастает амплитуда пика, отстроенного на  $\sim 275 \text{ см}^{-1}$ .

#### Литература

1. *Kolobov A. Chalcogenides Metastability and Phase Change Phenomena // Kolobov A., Tominaga J. Springer, 2012.*

### **ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕШЁТКИ ИНВЕРСИИ НАСЕЛЁННОСТЕЙ АКТИВНОЙ СРЕДЫ НА ГОРЯЧИЕ МОДЫ СВЕРХИЗЛУЧАЮЩЕГО ЛАЗЕРА С РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ВСТРЕЧНЫХ ВОЛН**

*И.С. Рябинин<sup>1</sup>, Е.Р. Кочаровская<sup>2</sup>, Вл.В. Кочаровский<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

<sup>2</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
ivanryabinin96@gmail.com

Одно- или многомодовая квазистационарная генерация сверхизлучающих лазеров, обладающих низкодобротными комбинированными резонаторами Фабри – Перо с распределенной обратной связью волн, при небольшом превышении непрерывной накачки над порогом лазерной генерации приводит к существенно нестационарному режиму (2-й лазерный порог) и формированию квазирегулярной или квазихаотической последовательности импульсов когерентного электромагнитного излучения, имеющих длитель-

ность меньше времён релаксации инверсии населённостей рабочих энергетических уровней активных центров и их поляризации [1–4]. Условия такого качественного изменения режима генерации и состав участвующих в нём мод лазера зависят от ряда нелинейных эффектов, в частности от пространственной решётки (модуляции) инверсии населённостей рабочих уровней активных центров, которая создаётся встречными волнами квазистационарных лазерных мод и может оказывать на них значительное влияние, перерасеивая встречные волны, меняя инкременты и частоты «горячих» мод, вводя в генерацию новые моды, изменяя их нелинейное взаимодействие и порождая дополнительные гармоники поля и поляризации активной среды.

Для изучения указанных явлений проведена линеаризация одномерных интегро-дифференциальных уравнения Максвелла – Блоха для сверхизлучающего лазера с небольшим неоднородным уширением спектральной линии 2-уровневой активной среды в предположении фиксированных (постоянных вдоль резонатора) уровня инверсии  $n$  и комплексной амплитуды динамической решётки инверсии  $n_z$  и проанализированы вносимые ими изменения в спектры и инкременты «горячих» мод, отличных от исходных «холодных» мод комбинированного резонатора Фабри – Перо с распределённой обратной связью волн, заданной комплексной амплитудой  $\beta$  гармонической модуляции диэлектрической проницаемости матрицы активной среды с волновым числом, равным волновому числу электромагнитной волны на частоте рабочего перехода лазера при нулевой инверсии.

Исследовались как характеристическое уравнения, следующее из граничных условий на торцах (полупрозрачных зеркалах) активного образца, так и дисперсионное уравнение непрерывного спектра волн в активной среде с учётом брэгговской решётки  $\beta$  и решётки инверсии  $n_z$ , обладающих различными фазами:

$$\gamma_+ \gamma_- + \kappa^2 - \left( \Omega + \frac{n_p}{\Omega + i\Gamma_2} \right)^2 = 0, \quad \gamma_{\pm} = \bar{\beta} e^{\pm i\phi_p} \pm \frac{\bar{n}_z e^{\pm i\phi_n}}{2i(\Omega + i\Gamma_2)}.$$

Здесь  $n_p$  – уровень инверсии, задаваемый некогерентной накачкой,  $\Gamma_2$  – величина однородного уширения спектральной линии, нормированная на так называемую кооперативную частоту активных центров [1, 2],  $\kappa$  и  $\Omega$  – так же нормированные отстройки волнового числа и частоты «горячей» моды от брэгговского волнового числа комбинированного резонатора и несущей частоты поля, равной рабочей частоте лазерного перехода.

В результате исследования решений указанных уравнений определены условия, при которых динамическая решётка инверсии активной среды существенно влияет на 2-й лазерный порог и спектральные характеристики неустойчивых «горячих» мод, а также найдены вызванные этой решёткой изменения частот и инкрементов таких мод и характерная пространственная структура их поля для ряда типичных параметров сверхизлучающего лазера. Показано, что «холодные» электромагнитные моды лазерного резо-

натора, существующие при нулевой инверсии активной среды, благодаря инверсии и динамической решётке превращаются в «горячие» поляритонные моды, которые по дисперсионным свойствам существенно отличаются от традиционных поляритонов в неинвертированной среде.

### Литература

1. *Kocharovskiy, V.I.* Superradiant Lasing and Collective Dynamics of Active Centers with Polarization Lifetime Exceeding Photon Lifetime / V.I. Kocharovskiy, A.A. Belyanin, E.R. Kocharovskaya V.V. Kocharovskiy // *Advanced Lasers: Laser Physics and Technology for Applied and Fundamental Science Series: Springer Series in Optical Sciences*. 2015. V. 193. P. 49–69.

2. *Кочаровский, Вл.В.* Сверхизлучение: принципы генерации и реализация в лазерах / Вл.В. Кочаровский, В.В. Железняков, Е.Р. Кочаровская, В.В. Кочаровский // *УФН*. 2017. Т. 187, вып. 4. С. 367–410.

3. *Vukovic, N.* Analytical expression for Risken-Nummedal-Graham-Haken instability threshold in quantum cascade lasers / N. Vukovic, J. Radovanovic, V. Milanovic, D.L. Boiko // *Opt. Express*. 2016. V. 24. P. 26911–26929.

4. *Kogelnik, H.* Coupled-Wave Theory of Distributed Feedback Lasers / H. Kogelnik, C.V. Shank // *J. Appl. Phys.* 1972. V. 43. P. 2327–2335.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ДОПЛЕРОВСКОГО СПЕКТРА ОТРАЖЕННОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА С УЧЕТОМ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ ЛОКАТОРА

*М.С. Рябкова, В.Ю. Караев, М.А. Панфилова, Ю.А. Титченко, Е.М. Мешков*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
m.rjabkova@gmail.com

В работе представлены результаты измерений доплеровского спектра под малыми углами падения локаторами с разными диаграммами направленности, а также алгоритм определения статистических параметров ветрового волнения по доплеровскому спектру отраженного радиолокационного сигнала с учетом диаграммы направленности антенны локатора.

В настоящее время существует много теоретических работ, посвященных моделированию доплеровского спектра [1, 2]. Однако экспериментальных измерений доплеровского спектра морского волнения почти нет [3, 4], а те эксперименты, что есть, производились при углах падения больше  $23^\circ$ . В октябре 2016 года на океанографической платформе вблизи поселка Кацвели были проведены эксперименты с двумя доплеровскими локаторами *Ка*-диапазона. У одного из локаторов симметричная диаграмма направленности ( $6^\circ \times 6^\circ$ ) и рабочая частота 36,1 ГГц (8,3 мм), у второго – ножевая диа-

грамма направленности ( $30^\circ \times 1^\circ$ ) и рабочая частота 33,8 ГГц (8,9 мм). Эксперименты проводились при различных скоростях ветра и разгонах волн, углы падения в экспериментах не превышали  $20^\circ$ . В работе представлены результаты обработки экспериментов. Показано, что при увеличении угла падения ширина и смещение доплеровского спектра уже не могут быть рассчитаны по формулам, полученным в приближении Кирхгофа, поскольку влияние брэгговского механизма рассеяния становится существенным.

При малых углах падения, когда рассеяние можно считать квазизеркальным, ширина и смещение доплеровского спектра зависят от дисперсии наклонов, дисперсии орбитальных скоростей, коэффициента корреляции между наклонами вдоль двух взаимно перпендикулярных направлений, а также коэффициента корреляции между наклонами и вертикальной составляющей орбитальной скорости [5, 6]. Все эти статистические характеристики выражаются как интегралы спектра поверхностного волнения, зависящего в случае чисто ветрового волнения от трех параметров: скорости ветра, длины ветрового разгона и направления ветра. В работе использовалась модель спектра [7], энергонесущая часть которого опирается на модель JONSWAP. Показано, что, имея два уравнения (для ширины и смещения доплеровского спектра) от двух неизвестных (скорости ветра и величины ветрового разгона), можно определить скорость ветра и разгон при условии, что направление ветра известно. Восстановив скорость ветра и длину ветрового разгона, можно вычислить статистические параметры морского волнения (высоту значительного волнения, дисперсию орбитальных скоростей, средний период волнения) по модельному спектру волнения. Те же параметры были вычислены по двумерному спектру волнения, измеренному струнным волнографом, установленным на платформе. Сравнение результатов работы алгоритма с данными струнного волнографа показало хорошее совпадение. Учет диаграммы направленности антенны повышает точность работы алгоритма.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Черноморского гидрофизического полигона, ЗАО НПФ «Микран», сотрудникам лаборатории прикладной физики моря Морского гидрофизического института РАН и сотрудникам лаборатории взаимодействия атмосферы и океана Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН за помощь в проведении экспериментов и предоставление данных.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 16-35-00548 мол\_а, 17-05-00-939 а.

### Литература

1. *Toporkov, J.V.* Numerical Study of the Extended Kirchhoff Approach and the Lowest Order Small Slope Approximation for Scattering from Ocean-Like Surfaces: Doppler Analysis / J.V. Toporkov, G.S. Brawn // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 2002. V. 50, № 4. P. 417–425.

2. *Fois, F.* An analytical model for the description of the full-polarimetric sea surface Doppler signature / F. Foiss, P. Hoogeboom, F.L. Chevalier, A. Stoffelen // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2015. V. 120, № 2. P. 988–1015.

3. *Plant, W.J.* The dependence of microwave backscatter from the sea on illuminated area: correlation times and lengths / W.J. Plant, E.A. Terray, R.A. Petitt, W.C. Keller // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 49, № C5. P. 9705–9723.

4. *Mouche, A.A.* Predicted Doppler shifts induced by ocean surface wave displacements using asymptotic electromagnetic wave scattering theories / A.A. Mouche, B. Chapron, N. Reul, F. Collard // *Waves Random Complex Media*. 2008. V. 18, № 1. P. 185–196.

5. *Басс, Ф.Г.* Рассеяние волн на статистически неровной поверхности / Ф.Г. Басс, И. М. Фукс. – М. : Наука, 1972. – 424 с.

6. *Караев, В.Ю.* Упрощенное описание морского волнения для задач радиолокационного дистанционного зондирования / В.Ю. Караев, М.Б. Каневский, Е.М. Мешков // *Исследование Земли из космоса*. 2011. Вып 2. С. 26–39.

7. *Караев, В.Ю.* Модифицированный спектр волнения и дистанционное зондирование океана / В.Ю. Караев, Г.Н. Баландина // *Исследование Земли из космоса*. 2000. Вып. 5. С. 45–56.

## **АНИЗОТРОПНЫЕ АВТОВОЛНОВЫЕ СТРУКТУРЫ В ТЕПЛОЫДЕЛЯЮЩЕЙ ПЛАЗМЕННОЙ СРЕДЕ**

*Д.С. Ряциков, Н.Е. Молевич, Д.И. Завершинский*

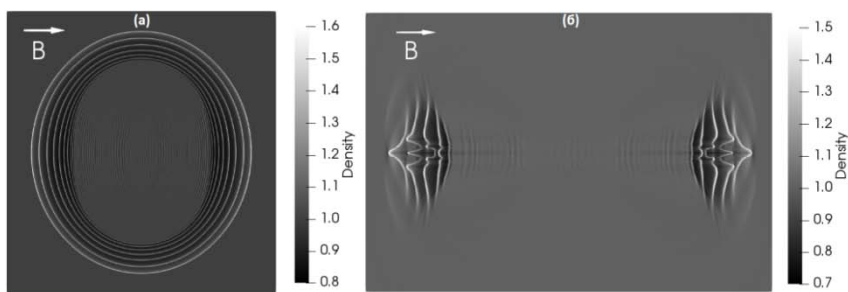
Самарский национальный исследовательский университет  
Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН  
ryashchikovd@gmail.com

Тепловая неустойчивость играет важную роль в формировании различных пространственно-временных структур в таких средах, как межзвёздный газ, солнечная атмосфера, планетарные туманности и др. Один из типов тепловой неустойчивости, изоэнтропическая (акустическая) неустойчивость, ведёт к усилению акустических мод. Согласно гипотезе, впервые высказанной Краснобаевым [1], она приводит к возникновению в среде серии ударных волн.

Данная гипотеза была впоследствии подтверждена как аналитически, так и численно. В приближении слабых ударных волн форма образующихся структур, их амплитуда и скорость в газовых и плазменных средах были найдены аналитически в работах [2–5]. Было показано, что параметры образующихся структур определяются только свойствами среды, что характерно для автоволн, а сами структуры сохраняют свою форму после взаимодействия друг с другом, что является отличительной особенностью солитонов. Также численные исследования демонстрируют распад начального возмущения на серию ударных волн с теоретически предсказанными параметрами.

Стоит отметить, что проведённые ранее исследования были выполнены в одномерной геометрии. Однако более полное рассмотрение свойств формирующихся структур в плазме во внешнем магнитном поле должно производиться в двумерной или трёхмерной геометрии, чтобы учесть сильную анизотропию волн в этой среде.

В рамках данной работы была проведена серия численных экспериментов по изучению свойств структур, формирующихся в результате эволюции локализованного возмущения давления в изоэнтропически неустойчивой плазме в двумерной геометрии. Рассматриваемая среда описывалась с помощью системы уравнений идеальной магнитной гидродинамики, дополненной функцией тепловыделения, зависящей от температуры и плотности. Численное решение проводилось с использованием программы Athena [6].



**Рис. 1.** Двумерные магнитоакустические автоволновые структуры в изоэнтропически неустойчивой плазменной среде в слабом (а) и сильном (б) магнитном поле

Было показано, что в двумерной геометрии начальное возмущение распадается на серию ударных волн, свойства которых не зависят от начальных параметров, а зависят только от параметров среды. В частности, в численном эксперименте наблюдалась сильная зависимость формы и амплитуды ударных волн от величины внешнего магнитного поля (рис. 1). В слабых магнитных полях (параметр бета плазмы  $\beta > 2/\gamma$ , где  $\gamma$  – показатель адиабаты) амплитуда структур, соответствующих быстрым магнитоакустическим (МА) волнам, больше амплитуды структур, соответствующих медленным МА-волнам. В сильных магнитных полях ( $\beta < 2/\gamma$ ) ситуация меняется на противоположную. Также отличается и форма наблюдаемых структур. При  $\beta > 2/\gamma$  формирующиеся автоволны в сечении по форме и амплитуде совпадают с полученными ранее результатами в одномерной геометрии. Однако при  $\beta < 2/\gamma$  форма образующихся структур значительно усложняется, а картина становится сильно анизотропной.

Работа частично поддержана Минобрнауки РФ, проект 3.1158.2017, и грантами РФФИ 16-41-630591 p\_a, 17-42-630224 p\_a.

## Литература

1. *Краснобаев, К.В.* Особенности распространения нелинейных и ударных волн в окрестности горячих звезд / К.В. Краснобаев, Н.Е. Сысоев, В.Ю. Тарев // Ядерная физика, физика космических излучений, астрономия. – М. : Изд-во МГУ, 1993. – С. 222–230.
2. *Molevich, N.E.* Traveling self-sustained structures in interstellar clouds with the isentropic instability / N.E. Molevich, D.I. Zavershinsky, R.N. Galimov, V.G. Makaryan // *Astrophys. Space Sci.* 2011. V. 334. P. 35–44.
3. *Завершинский, Д.И.* Магнитоакустический автоволновой импульс в теплоделяющей ионизованной газовой среде / Д.И. Завершинский, Н.Е. Молевич // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39, вып. 15. С. 18–25.
4. *Zavershinskiy, D.I.* Structure of Acoustic Perturbations in Heat-Releasing Medium / D.I. Zavershinskiy, N.E. Molevich, D.S. Ryashchikov // *Procedia Engineering.* 2015. V. 106. P. 363–367.
5. *Molevich, N.E.* Investigation of the MHD-wave dynamics in thermally unstable plasma / N.E. Molevich, D.I. Zavershinskiy, D.S. Ryashchikov // *Magnetohydrodynamics.* 2016. V. 52. P. 191–198.
6. *Stone, J.M.* Athena: a new code for astrophysical MHD / J.M. Stone, T.A. Gardiner, P. Teuben, J.F. Hawley, J.B. Simon // *The Astrophysical Journal Supplement Series.* 2008. V. 178, № 1. P. 137–177.

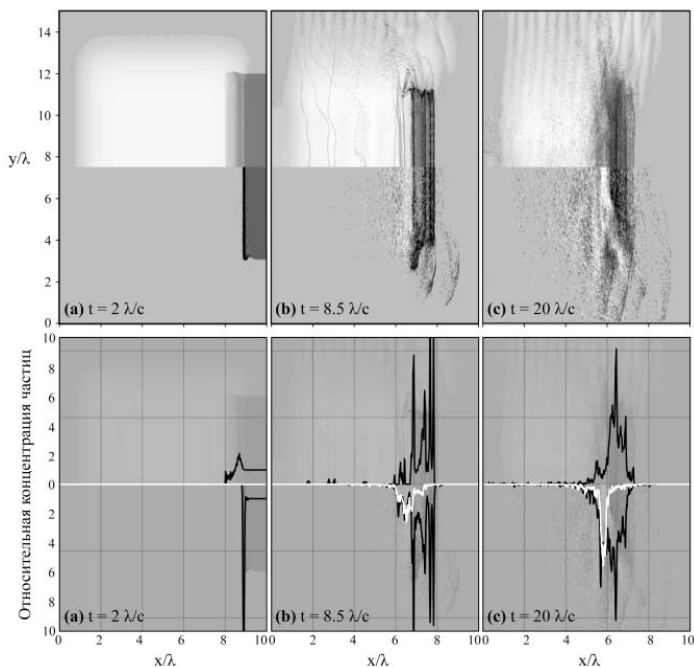
## УСКОРЕНИЕ ИОНОВ В РЕЖИМЕ СВЕТОВОГО ПАРУСА С УЧЁТОМ КВАНТОВО-ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

*А.С. Самсонов, Е.Н. Неруш, И.Ю. Костюков*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
blendersamsonov@yandex.ru

В последние годы ускорение частиц является одним из наиболее обсуждаемых приложений мощных лазеров. Ускорение тяжёлых частиц (например, ионов) силой радиационного давления в режиме «светового паруса» достаточно подробно анализировалось во многих публикациях (см., например, обзор [1]).

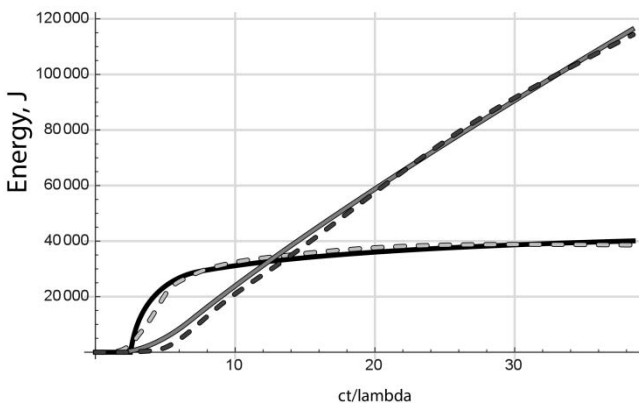
Сущность механизма ускорения радиационным давлением заключается в следующем: на слой закритической плазмы падает интенсивный лазерный импульс; лёгкие электроны быстро ускоряются до ультрарелятивистских энергий электрическим полем и за счёт магнитной части силы Лоренца начинают двигаться вдоль направления распространения лазерного импульса. Внутри мишени формируется продольное поле разделения зарядов с амплитудой порядка амплитуды лазерного поля. Такое квазипостоянное поле ускоряет ионы мишени.



**Рис. 1.** Плотность частиц в разные моменты времени при ускорении ионов в режиме «светового паруса» при сильном влиянии КЭД-эффектов. *Вверху* – плотность энергии электромагнитного поля (белый), плотность ионов (чёрный); *внизу* – плотность позитронов (белый), плотность электронов (чёрный). Нижняя часть рисунков: распределение концентрации частиц на оси  $X$  (нормированная на начальное значение). Чёрная кривая снизу соответствует электронам, белая – позитронам, чёрная сверху – ионам

Наиболее очевидным способом увеличения максимальной энергии ионов при одинаковом времени взаимодействия является увеличение интенсивности лазерного излучения. Однако при больших интенсивностях необходимо учитывать квантово-электродинамические (КЭД) эффекты, которые могут значительно менять динамику ускорения ионов. Основной целью работы является изучение процесса ускорения ионов в таком режиме.

Процесс ускорения ионов в режиме «светового паруса» с различными параметрами лазерного импульса и мишени был исследован с помощью численного моделирования (см. рис. 1). В моделировании наблюдалось ослабление ускорения ионов в результате действия КЭД-процессов. На основе баланса потоков энергии – импульса лазерного поля, частиц плазмы, гамма-излучения построена аналитическая модель, качественно описывающая наблюдаемые в моделировании эффекты (см. рис. 2).



**Рис. 2.** Зависимость полной энергии ионов (светлая пунктирная линия – результат моделирования, чёрная сплошная линия – предсказание модели) и фотонов (тёмная пунктирная линия – результат моделирования, серая сплошная линия – предсказание модели) от времени

### Литература

1. *Macchi A., Borghesi M., Passoni M.* // Rev. Mod. Phys. 85, 751 (2013).

## НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА АНТИФЕРРОМАГНИТНОГО СПИТРОННОГО ОСЦИЛЛЯТОРА

*А.Р. Сафин*

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва  
arsafin@gmail.com

В последнее время возрос активный интерес к генерации и детектированию электромагнитных волн терагерцового диапазона частот [1]. Перспективным является использование спинового транспорта в ферро- (ФМ) и антиферромагнитных (АФМ) нанопереходах для генерации терагерцовых волн [2]. В его основе лежит s-d-обменное взаимодействие s-электронов проводимости, переносящих спин из одного магнитного слоя в другой, с d-электронами решетки рабочего слоя. Для детектирования терагерцовых волн может использоваться эффект спинового s-d-обменного резонанса в ФМ- и АФМ-переходах, а для генерации – индуцированный ток терагерцовый резонанс в АФМ [3]. На данный момент важным является подробное исследование процессов генерации терагерцовых волн и магнонов в АФМ при спиновом токопереносе.

В данной работе исследовалась нелинейная динамика спинтронного терагерцового осциллятора, выполненного на основе ФМ/АФМ-переходов. Задача решается как с помощью интегрирования связанных уравнений для намагниченностей подрешеток АФМ, так и с помощью приближенного описания на основе спин-волновых комплексных амплитуд магнонов. Показано, что критические токи возбуждения терагерцовых магнонов по порядку равны  $10^8$ – $10^9$  А/см<sup>2</sup>, это соответствует пусковым токам при микро-волновой генерации магнонов в ФМ. Вместе с тем картина бифуркаций для АФМ-переходов гораздо богаче, чем для ФМ. В частности, могут быть реализованы условия для возникновения детерминированного хаоса и солитонов. Для повышения мощности терагерцового генератора на основе АФМ-структур могут использоваться сети осцилляторов. При этом сложение мощности будет осуществляться в пространстве излучения, а синхронизация достигается связью через спиновые волны.

Работа выполнена при финансовой поддержке базовой части госзадания РФ № 8.8109.2017/БЧ.

#### Литература

1. Гуляев, Ю.В. Генерация терагерцовых волн током в магнитных переходах / Ю.В. Гуляев, П.Е. Зильберман, Г.М. Михайлов, С.Г. Чигарев // Письма в ЖЭТФ. 2013. Т. 98, № 11. С. 837–847.
2. Гомонай, Е.В. Спинтроника антиферромагнитных систем. Обзор / Е.В. Гомонай, В.М. Локтев // Физика низких температур. 2014. Т. 40, № 1. С. 22–47.
3. Khyryn, R. Antiferromagnetic THz-frequency Josephson-like oscillator driven by spin current / R. Khyryn, I. Lisenkov, V. Tiberkevich, B. Ivanov, A. Slavin // Scientific Reports. 2017. Vol. 7. Art. 43705.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРЯДА С РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ГРОЗОВОГО ОБЛАКА

*Е.К. Свечникова, Е.А. Мареев*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
kttts@mail.ru

Актуальность проблемы оценки параметров структуры облака обусловлена сложностью и низкой информативностью прямых измерений. В рамках применения модели разряда с релятивистской обратной связью дополнительные сведения для восстановления электрической структуры облака могут быть получены из данных наземных измерений потоков частиц [1].

Требования к любой модели разряда – объяснение величины максимального значения напряжённости электрического поля, измеренной в облаке; и описание механизмов генерации энергичных частиц, соответствующее результатам измерений. Все рассматриваемые сейчас модели возникли под влиянием концепции убегающих электронов (механизм Вильсона, 1925). Явление убегающего состоит в следующем: электрон с достаточно большой энергией будет сильнее ускоряться электрическим полем, чем замедляться при взаимодействии с воздухом (основные потери энергии – ионизация и тормозное излучение). Таким образом, электрон, называемый убегающим, ускорится при движении в воздухе.

Однако модель убегающих электронов не объясняет происхождение наблюдаемых потоков энергичных частиц от грозных облаков.

Единственный механизм, с помощью которого представляется возможным объяснить генерацию энергичных частиц в облаках, – тормозное излучение. На этом соображении основана модель лавин релятивистских убегающих электронов (Гуревич, 1992), учитывающая возможность производства новых энергичных электронов каждым из исходных убегающих электронов в результате взаимодействия с воздухом, ведущего к ионизации его молекул. Таким образом, каждый убегающий электрон способен создать много вторичных убегающих электронов, совокупность которых называется лавиной убегающих электронов.

Модель разряда с релятивистской обратной связью, наилучшим образом объясняющая экспериментальные данные о гамма-вспышках земного происхождения, содержит в качестве составной части модель лавин убегающих электронов и состоит в следующем. Образующиеся при распространении исходной лавины позитроны и рассеянные в обратном направлении гамма-кванты способны перемещаться в начало области сильного поля и создавать новые лавины. В зависимости от типа частицы, выбивающей исходный электрон для новой лавины, различают два типа обратной связи: позитронную и рентгеновскую (на высокоэнергичных квантах).

В рамках модели разряда с релятивистской обратной связью получена система уравнений, позволяющая описать роль обратной связи в развитии лавин, обуславливающих долговременные малоинтенсивные потоки энергичных частиц (*thunderstorm ground enhancements*). Учтено влияние всех процессов, существенных для разряда с релятивистской обратной связью, включая тормозное излучение, образование электрон-позитронных пар, комптоновское рассеяние, электрон-позитронное рассеяние. Анализ предложенной системы уравнений позволяет исследовать влияние процессов с участием позитронов и энергичных квантов на результирующую структуру электрического поля и на величину напряжённости электрического поля, необходимую для инициации разряда. Следствия анализа системы находятся в согласии с результатами моделирования [4] и приводят к простой оценке частоты электрон-позитронного рассеяния.

Одно из возможных приложений модели разряда с релятивистской обратной связью – восстановление распределения электрического поля и заряда в облаке, в частности оценка характеристик нижнего положительно заряженного слоя.

Профиль электрического поля, создаваемого облаком, очень чувствителен к наличию и параметрам нижнего положительно заряженного слоя. Поэтому процессы инициации и развития разрядов с релятивистской обратной связью также сильно зависят от характеристик электрической структуры облака, включая параметры нижнего слоя. В рамках модели разряда с релятивистской обратной связью удастся оценить высоты и заряды трёх основных слоёв облака на основе анализа данных наземных измерений напряжённости электрического поля и потока энергичных частиц [5].

### Литература

1. *Dwyer J.R.* // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30(20). P. 2055.
2. *Dwyer J.R.* // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. Art. A02308.
3. *Chilingarian A.* // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 2014. V. 107. P. 68–76.
4. *Dwyer J.R., Babich L.* // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. Art. A09301.
5. *Chilingarian A., Mailyan B., Vanyan L.* // *Atmospheric Research.* 2012. V. 114/115. P. 1–16.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ ПО НАБЛЮДАЕМЫМ ДАННЫМ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

*А.Ф. Селезнев, А.С. Гаврилов, Д.Н. Мухин, Е.М. Лоскутов, А.М. Фейгин*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
aselenev@ipfran.ru

Реконструкция динамических систем по наблюдаемым данным (эмпирическая реконструкция) является одним из важнейших направлений современной нелинейной динамики. Данный подход актуален в ситуации, когда система не допускает исчерпывающего исследования своей структуры для построения достаточно адекватных уравнений из первых принципов, но исследователю доступен производимый этой системой сигнал [1]. В медицинских исследованиях это могут быть энцефалограммы головного мозга, в геофизических приложениях – временные ряды различных климатических характеристик, в астрофизике – записи оптической яркости или интенсивности радиоизлучения от далекого объекта.

Как правило, эмпирическая реконструкция подразумевает два основных шага: построение оптимального набора фазовых переменных системы (вложения) по наблюдаемым временным рядам и построение оператора эволюции, действующего в этом фазовом пространстве. Первая задача особенно нетривиальна в случае наблюдаемых данных высокой размерности. Так, например, в случае климатических данных эта размерность равна произведению числа узлов пространственной сетки на земном шаре, в которых производится измерение, и числа измеряемых характеристик. Ясно, что построение эмпирической модели в пространстве такой огромной размерности невозможно, и необходимо ее эффективное уменьшение с целью выделения небольшого числа главных компонент, содержащих информацию о ключевых свойствах наблюдаемой динамики. Основные сложности при решении второй задачи связаны с тем, что в общем случае конкретный вид оператора эволюции исследуемой системы неизвестен, и его приходится искать в некотором широком классе функций, обладающих свойствами универсального аппроксиматора.

В предыдущих работах авторов [2, 3] были предложены эффективные методы определения главных нелинейных многообразий в пространстве наблюдаемых данных, дающих основной вклад в наблюдаемую изменчивость. А в работах [4, 5] на основе байесова подхода авторами были разработаны методы построения низкоразмерных нелинейных операторов эволюции, способных делать адекватный прогноз критических переходов в высокоразмерных и стохастических системах. Стоит, однако, отметить, что в том случае, когда уменьшение размерности данных (редукция) происходит *независимо*, результат такой редукции может не быть оптимальным для построения оператора эволюции. Иными словами, для того, чтобы найти наиболее оптимальные для прогноза фазовые переменные, необходимо объединение двух важнейших шагов эмпирической реконструкции (нелинейной редукции данных и построения оператора эволюции) в рамках единого алгоритма.

В настоящей работе мы предлагаем новый подход, позволяющий объединить эти два шага посредством построения искусственной нейронной сети (ИНС) со специальной топологией. Данная модель, во-первых, проектирует исходные высокоразмерные данные на многообразия меньшей размерности и, во-вторых, определяет оператор эволюции на этом многообразии. Важным моментом предлагаемой методологии является оптимизация структуры ИНС, позволяющая избежать ее переобучения. Для этого используется байесов критерий оптимизации, с помощью которого можно оценить как оптимальную степень нелинейности оператора эволюции, так и оптимальную сложность нелинейного многообразия, на которое проектируются данные. Демонстрируются первые результаты применения новой методологии. В качестве данных используются временные ряды, сгенерированные распределенными системами, демонстрирующими сложную ди-

намику, – система глобально связанных осцилляторов Стюарта – Ландау и система Лоренца-96.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 16-12-10198.

### Литература

1. *Анищенко, В.С.* Нелинейная динамика хаотических и стохастических систем. Фундаментальные основы и избранные проблемы / С.В. Анищенко, Т.Е. Вадивасова, В.В. Астахов. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1999. – 368 с.

2. *Mukhin, D., Gavrilo, A., Feigin, A., Loskutov, E., Kurths, J.* Principal nonlinear dynamical modes of climate variability // *Nature Scientific Reports*. Oct. 2015. Vol. 5. P. 15510. URL: <http://doi.org/10.1038/srep15510>.

3. *Gavrilo, A., Mukhin, D., Loskutov, E., Volodin, E., Feigin, A., Kurths, J.* Method for reconstructing nonlinear modes with adaptive structure from multidimensional data. *Chaos: An Interdisciplinary // Journal of Nonlinear Science*. 2016. Vol. 26 (12). P. 123101. URL: <http://doi.org/10.1063/1.4968852>.

4. *Mukhin, D., Kondrashov, D., Loskutov, E., Gavrilo, A., Feigin, A., Ghil, M.* Predicting Critical Transitions in ENSO models. Part II: Spatially Dependent Models // *Journal of Climate*. 2015. Vol. 28 (5). P. 1962–1976. URL: <http://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00240.1>.

5. *Gavrilo, A., Loskutov, E., Mukhin, D.* Bayesian optimization of empirical model with state-dependent stochastic forcing // *Chaos, Solitons & Fractals*. 2017. Vol. 104. P. 327–337. URL: <http://doi.org/10.1016/j.chaos.2017.08.032>.

## УПРАВЛЯЕМАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ ДВУХ СВЯЗАННЫХ НЕЙРОННЫХ МОДЕЛЕЙ ХИНДМАРШ – РОУЗ ПРИ НАЛИЧИИ ВОЗМУЩЕНИЙ

*Д.М. Семенов*

Санкт-Петербургский государственный университет  
Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург  
[semenovdm90@gmail.com](mailto:semenovdm90@gmail.com)

За последние десятилетия было обнаружено и исследовано большое количество биологических систем, ключевую роль в поведении которых играет явление синхронизации. В частности, к таким системам можно отнести рой светлячков, синхронно вспыхивающих в небе, или клетки сердца, демонстрирующие синхронную активность, которая, в свою очередь, позволяет сердцу сокращаться. Также к таким системам относится мозг человека или животного. Было установлено, что появление аномальной синхронизации в отдельных нейронных популяциях мозга может привести к таким заболеваниям, как эпилепсия, эссенциальный тремор, болезни Паркинсона

и Альцгеймера. На сегодняшний день активно ведётся разработка методов лечения данных заболеваний. Причём особый интерес представляют неинвазивные методы, основанные на нейронной обратной связи. Разработка таких методов требует качественного математического описания как моделей нейронов, так и условий их синхронизации между собой, что и является целью данной работы.

Исследования синхронизации математических моделей нейронов ведутся уже довольно давно. Большая часть таких исследований посвящена синхронизации однородных моделей при условии, что математическая модель нейрона лишена неточностей. Однако такие требования на практике почти недостижимы, поскольку популяции биологических нейронов представляют собой неоднородные структуры, а каждый отдельный нейрон может отличаться от других в силу его физиологических особенностей. Одни из первых попыток преодолеть обозначенные выше трудности были представлены в работах, посвященных синхронизации неоднородной нейронной сети, описываемой моделью Фитц-Хью – Нагумо. Настоящая работа является продолжением данных исследований и рассматривает синхронизацию двух связанных неоднородных моделей Хиндмарш – Роуз при наличии модельных возмущений, которые описываются непрерывными, равномерно ограниченными функциями.

Рассматривается нелинейная система дифференциальных уравнений, которая представляет собой две неоднородные, связанные между собой динамические системы Хиндмарш – Роуз:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = F_1(x_1(t)) + \xi_1(t) + B[\sigma(x_2(t) - x_1(t)) + u(t)], \\ \dot{x}_2(t) = F_2(x_2(t)) + \xi_2(t) + B\sigma(x_1(t) - x_2(t)), \end{cases} \quad (1)$$

где

$$F_i(x(t)) = \begin{pmatrix} y(t) - ax^3(t) + bx^2(t) - z(t) \\ c - dx^2(t) - y(t) \\ \varepsilon[s(x(t) - r_i) - z(t)] \end{pmatrix} \quad (i = 1, 2).$$

Здесь  $x_i(t) = \text{col}(x_i(t), y_i(t), z_i(t))$ ,  $i = 1, 2$  – векторы состояний систем;  $a, b, c, d, \varepsilon, s, r_1$  и  $r_2$  – известные параметры систем;  $B = \text{col}(1, 0, 0)$ ;  $u(t)$  – управляющее воздействие;  $\sigma$  – сила связи между нейронами;  $\xi_i(t) = \text{col}(\xi_{x,i}(t), \xi_{y,i}(t), \xi_{z,i}(t))$ ,  $i = 1, 2$  – функции возмущений систем (1), причём

$$|\xi_{x,i}(t)| \leq \frac{\Delta_x}{2}, \quad |\xi_{y,i}(t)| \leq \frac{\Delta_y}{2}, \quad |\xi_{z,i}(t)| \leq \frac{\Delta_z}{2} \quad (i = 1, 2 \quad \forall t \geq 0).$$

В ходе работы было доказано, что, задав закон управления в форме

$$u(t) = -(\gamma + b\varphi(t))(x_1(t) - x_2(t)) + d\varphi(t)(y_1(t) - y_2(t)) - sr \quad (2)$$

и выбрав  $\gamma$  таким, что

$$\gamma + 2\sigma - 1 > 0, \quad (3)$$

мы гарантируем достижение приближённой синхронизации между нейронами. Причём скорость синхронизации подчиняется экспоненциальному закону. Доказательство данного факта основывается на использовании функции Ляпунова в квадратичной форме.

### Литература

1. Фрадков А.Л. Кибернетическая физика: принципы и примеры / А.Л. Фрадков. – СПб. : Наука, 2003. – 352 с.
2. Milton J. Epilepsy as a dynamic disease / J. Milton, P. Jung (eds). – Berlin : Springer, 2003. – 417 p.
3. Plotnikov S. Controlled synchronization in two Fitzhugh-Nagumo systems with slowly-varying delays // Cybernetics and Physics. 2015. Vol. 4, Iss. 1. P. 21–25.
4. Plotnikov S.A. Adaptive control of synchronization in delay-coupled heterogeneous networks of Fitzhugh-Nagumo nodes / S.A. Plotnikov, J. Lehnert, A.L. Fradkov, E. Schöll // International Journal Bifurcation and Chaos. 2016. Vol. 26, Iss. 4. Art. 1650058.

## ПЛОСКИЕ СОЛИТОНЫ В ДВУМЕРНОЙ РЕШЕТКЕ АКТИВНЫХ ЧАСТИЦ

*К.С. Сергеев, А.П. Четвериков*

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского  
kssergeev@mail.ru

Методами численного моделирования исследуется динамика двумерной решетки активных частиц с нелинейным трением Рэлея, связанных силами потенциала Морзе. Начальное распределение частиц и размеры ячейки моделирования выбираются таким образом, что формируется плотноупакованная решетка с треугольной симметрией.

Как известно, в решетках консервативных частиц, связанных потенциальными силами, обнаружено большое количество различных стационарных мод, таких как плоские солитонные волны, квазиодномерные солитоны, мобильные и немобильные бризеры разных конфигураций. Однако стационарные моды и метастабильные режимы решеток именно активных частиц изучены в меньшей степени.

Стационарные состояния исследуемой решетки активных частиц представляют собой набор сложных аттракторов, и, таким образом, сама система является мультистабильной. Получить аналитические решения для сис-

темы уравнений, описывающих динамику решетки активных частиц, не представляется возможным, но можно провести поиск стационарных мод и локализованных метастабильных возмущений треугольной решетки, взяв за основу проведенные ранее исследования одномерных цепочек активных частиц Морзе – Рэля [1] и известные моды решеток консервативных частиц (см., например, [2, 3]).

Проведенные эксперименты показали, что основное стационарное состояние ансамбля активных частиц – режим трансляции, то есть движения всего ансамбля как целого. Это состояние является аттрактором системы; оно сохраняет кинетическую и потенциальную энергию при внешнем воздействии, и большинство метастабильных режимов в конечном итоге трансформируются именно в трансляционную моду.

Кроме того, в треугольной решетке существуют стационарные моды в виде одной или нескольких плоских солитоноподобных волн, распространяющихся вдоль любой из трех кристаллографических осей. Однако стационарным является лишь состояние с равномерным распределением плоских солитонов по решетке. Переходу от неравномерного начального распределения солитонов к равномерному соответствует переходный процесс, длительность которого зависит от управляющих параметров.

Локализованные метастабильные режимы решетки представлены солитонами с плоским фронтом конечной ширины. В процессе распространения их фронт сужается и деформируется, принимая подковообразную форму, пока полностью не исчезнет; решетка при этом переходит в режим трансляции. Предельный случай с фронтом в одну частицу – квазиодномерный солитон тоже является метастабильным состоянием, по завершении которого устанавливается режим трансляции. Времена жизни метастабильных состояний зависят от начальных условий и параметров потенциала.

В работе проанализированы различные характеристики перечисленных режимов. Для стационарных мод исследована устойчивость к внешнему стохастическому воздействию. Для метастабильных состояний оценены времена жизни и длины треков в широком диапазоне параметров.

Работа поддержана грантом РФФИ 16-12-10175.

### Литература

1. *Сергеев К.С., Четвериков А.П.* Метастабильные возбуждения в цепочке Морзе – Рэля // Нелинейная динамика. Ижевск, 2016. Т. 12, № 3. С. 341–353.
2. *Chetverikov A.P., Ebeling W., Velarde M.G.* Nonlinear soliton-like excitations in two-dimensional lattices and charge transport // The European Physical Journal Special Topics. 2013. Vol. 222, Iss. 10. P. 2531–2546.
3. *Кистанов А.А.* Дискретный бризер в двумерном моноатомном кристалле с частотой выше фононного спектра // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2011. Т. 11, № 1. С. 9–12.

# ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ КРЕМНИЯ ПРИ СОВМЕСТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ОПТИЧЕСКОГО И ТЕРАГЕРЦОВОГО ПОЛЕЙ

Ю.А. Сергеев, С.Б. Бодров, А.И. Корытин, А.А. Мурзанев, А.Н. Степанов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
yas@ufp.appl.sci-nnov.ru

С развитием техники генерации терагерцового (ТГц) излучения расширяется область научного применения данного диапазона частот. Одним из направлений является нелинейное воздействие интенсивного ТГц-излучения на вещество, в частности с целью диагностики поверхностных свойств образцов. В настоящей работе представлены экспериментальные результаты по генерации второй гармоники (ВГ) оптического излучения с поверхности кремния (111) при одновременном воздействии на образец интенсивного короткоимпульсного ТГц-поля.

Для исследования была использована титан-сапфировая лазерная система, генерирующая фемтосекундные импульсы с энергией 0,7 мДж, центральной длиной волны 795 нм и длительностью 70 фс, с частотой повторения 700 Гц. Для генерации ТГц-импульсов использовалась техника наклонного фронта интенсивности в нелинейном кристалле  $\text{LiNbO}_3$  [1]. Генерируемое излучение собиралось и переносилось при помощи телескопа, затем фокусировалось на образец по нормали при помощи параболического зеркала. Для ослабления ТГц-поля использовались два ТГц-поляризатора.

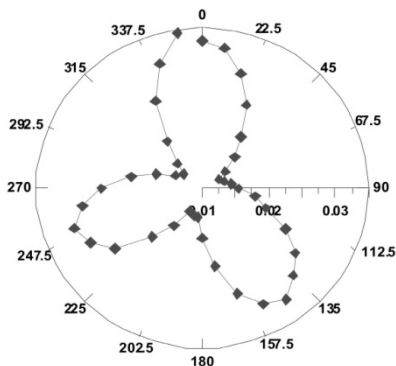


Рис. 1. Угловая зависимость интенсивности ВГ (Р-поляризация): оптика, ТГц-поле, ВГ

В ходе эксперимента была исследована генерация ВГ при различных сочетаниях поляризаций оптического и ТГц-излучений. При воздействии ТГц-излучения сигнал ВГ тех поляризаций, вектор электрического поля которых был параллелен вектору ТГц-поля, значительно усиливались. Так,

для случая, когда векторы электрического поля ВГ, оптической накачки и ТГц-импульса были перпендикулярны плоскости падения электромагнитного излучения, сигнал ВГ возрастал в 30 раз. Были исследованы зависимости сигнала ВГ от энергии оптического и ТГц-импульсов, от времени задержки между ними, зависимость от азимутального угла. На рис. 1 представлен пример угловой зависимости. Для описания экспериментальных результатов развита феноменологическая теория генерации второй гармоники от кристаллического образца кремния с учетом воздействия ТГц-поля.

### Литература

1. *Fulop, J.A.* Design of high-energy terahertz sources based on optical rectification / J.A. Fulop, L. Palfalvi, G. Almasi, J. Hebling // Opt. Express. 2010. V. 18, № 12. P. 12311–12327.

## ПРИПОВЕРХНОСТНОЕ УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ СКОЛЬЗЯЩЕМ ПАДЕНИИ РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА НА ТВЕРДОТЕЛЬНУЮ МИШЕНЬ

*Д.А. Серебряков, Е.Н. Неруш, И.Ю. Костюков*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
dms@appl.sci-nnov.ru

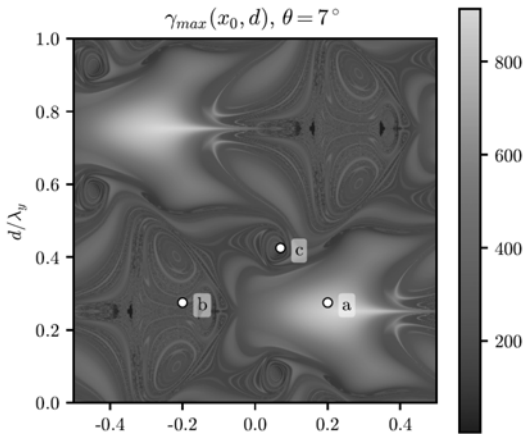
В настоящей работе аналитически и численно изучается конфигурация, в которой релятивистский  $p$ -поляризованный лазерный импульс падает на плоскую твердотельную мишень под небольшим углом к поверхности. Из-за суперпозиции падающей и отраженной волн у поверхности мишени образуется структура поля, распространяющаяся вдоль поверхности с фазовой скоростью больше скорости света. Релятивистское электрическое поле в данной структуре может извлекать электроны из мишени, а также ускорять их вдоль поверхности. Если угол  $\theta$  между направлением распространения импульса и поверхностью мал (режим «скользящего падения»), то фазовая скорость волны незначительно отличается от скорости света и ультрарелятивистский электрон может находиться в ускоряющей фазе поля в течение времени, во много раз превышающего период лазерной волны. В результате электроны могут достигать максимальных значений лоренц-фактора [1]:

$$\gamma_{\max}(\theta) \approx 1 + \frac{4a_0 \sin \theta}{1 - \cos \theta}.$$

Теоретически показано, что данный процесс возможен для широкого диапазона начальных положений электронов, в результате чего захват происходит для значительной части электронов, извлеченных из поверхности.

Построена численная модель движения частиц под действием рассматриваемой структуры поля. Результаты, полученные из модели (рис. 1), подтверждают возможность достижения энергии электронов, близкой к  $mc^2\gamma_{\max}$ , для широкого диапазона начальных условий. Это позволяет ожидать образование электронных сгустков, имеющих большой заряд и энергию до ГэВ для существующих лазерных интенсивностей (для безразмерной амплитуды лазерного поля  $a_0 = eE / (mc\omega)$  порядка десятков).

С помощью трехмерного моделирования методом частиц в ячейках подтверждается возможность реализации рассматриваемого процесса ускорения в условиях, близких к условиям эксперимента [1]. Максимальная энергия электронов линейно зависит от напряженности поля лазера даже при ультррелятивистских интенсивностях ( $a_0$  порядка 30–50), хотя взаимодействие становится сильно нелинейным, форма поверхности искажается и приповерхностная структура поля сильно отличается от модельной. Наличие данного нелинейного эффекта также отличает рассматриваемую задачу от близкой задачи вакуумного ускорения электронов в скрещенных лазерных импульсах [2]. Несмотря на то что абсолютное значение  $\gamma_{\max}$  в численных экспериментах отличается от модельного примерно в 2 раза (в основном из-за дефокусировки лазерного импульса и искажения структуры поля при неидеальном отражении от поверхности), в численных экспериментах получены похожие на модельные зависимости  $\gamma_{\max}$  от угла падения лазерного импульса. В моделировании наблюдается генерация электронных сгустков с энергией до 1 ГэВ и большим полным зарядом (до 17,5 нКл при  $a_0 = 55$ , что приблизительно на 2 порядка выше, чем характерный заряд ускоренного сгустка в лазерно-плазменных ускорителях на основе кильватерной волны).



**Рис. 1.** Максимальный лоренц-фактор электронов в модели в зависимости от их начального положения в периодической структуре ускоряющего поля при  $\theta = 7^\circ$  и  $a_0 = 16$

Ранее с помощью численного моделирования было показано, что нагрев электронов при наклонном падении лазерного импульса под углами порядка 30° происходит более эффективно, если вблизи поверхности присутствует слой предплазмы [3]. В данной работе подтверждено положительное влияние предплазмы на максимальную энергию электронов и заряд генерируемых электронных сгустков в режиме «скользящего падения» (при углах падения порядка 80°) и показывается существование оптимальной плотности предплазмы, что может быть важно для экспериментов в этой области.

### Литература

1. *Serebryakov, D.A.* Near-surface electron acceleration during intense laser-solid interaction in the grazing incidence regime / D.A. Serebryakov, E.N. Nerush, I.Yu. Kostyukov // *Phys. Plasmas*. 2017. V. 24. [принято к публикации в № 12].

2. *Naaland, C.M.* Laser electron acceleration in vacuum // *Opt. Commun*. 1995. V. 114. P. 280.

3. *Серебряков, Д.А.* Влияние предимпульса на эффективность генерации гамма-излучения при наклонном падении релятивистского импульса на плоскую мишень / Д.А. Серебряков, Е.Н. Неруш // *Квант. электроника*. 2017. Т. 47, вып. 3. С. 206–211.

## АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РИТМОВ ВЕГЕТАТИВНОЙ РЕГУЛЯЦИИ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ У ПАЦИЕНТОВ ВО ВРЕМЯ КОМЫ ПРИ ОСТРОМ НАРУШЕНИИ МОЗГОВОГО КРОВООБРАЩЕНИЯ

*Е.В. Сидак<sup>1</sup>, Д.А. Садчиков<sup>2</sup>, Р.С. Хамбеков<sup>2</sup>, Е.Е. Зеулина<sup>2</sup>, Б.П. Безручко<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН

<sup>2</sup>Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского  
sidakev@gmail.com

Ранее в работах [1, 2] на основе анализа сигналов электрокардиограммы (ЭКГ) и фотоплетизмограммы (ФПГ) с помощью методов оценки фазовой синхронизации колебательных процессов показано, что медленные ритмы вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы (ССС) человека в норме у людей длительное время синхронизованы между собой. В случае таких патологий, как сердечная недостаточность и инфаркт миокарда, степень синхронности этих процессов снижается, а при успешной реабилитации вновь возрастает [3, 4]. Авторами этих работ был предложен способ оценки степени синхронизованности медленных ритмов ССС, который может служить простым и доступным методом диагностики ряда развивающихся патологий ССС на ранних стадиях.

Однако наиболее сложные патологии часто могут сопровождаться той или иной степенью нарушения сознания (например, комой, вызванной черепно-мозговой травмой или острым нарушением мозгового кровообращения). Во время коматозного состояния характер взаимодействия ритмов регуляции сердечно-сосудистой системы изменяется, и на сегодняшний день малоизучен, что затрудняет прогноз и превентивное лечение возможных гемодинамических осложнений.

Данная работа посвящена изучению взаимодействия подсистем вегетативной регуляции частоты сердечных сокращений и тонуса сосудов у пациентов во время комы, вызванной острым нарушением мозгового кровообращения.

Исследование проводилось путем анализа одновременных записей сигналов ЭКГ во II стандартном отведении и двух каналов ФПГ – с мочки правого уха и безымянного пальца правой руки, полученных от пациентов во время комы. Сигналы были получены на базе Первой городской больницы г. Саратова и Второй городской больницы г. Энгельса.

Для оценки связанности исследуемых процессов регуляции ССС по сигналам ЭКГ и ФПГ использовались методы, основанные на анализе фаз колебаний. Для этого сигнал ЭКГ предварительно пересчитывался в ряд RR-интервалов – кардиоинтервалограмму (КИГ), затем ряды КИГ и ФПГ фильтровались в полосе частот, соответствующей ритмам вегетативной регуляции ССС (0,05–0,15 Гц). По фильтрованным сигналам вводилась фаза с помощью преобразования Гильберта. Для оценки направленности воздействия использовался метод, основанный на экспериментальном моделировании фазовой динамики [5]. Для оценки синхронности фаз использовался коэффициент фазовой когерентности.

В результате анализа сигналов RR-интервалов и ФПГ с мочки уха было показано, что во время коматозного состояния может сохраняться взаимодействие между исследуемыми подсистемами регуляции кровообращения, однако направление связи с течением времени может изменяться. При анализе сигналов RR-интервалов и ФПГ с безымянного пальца руки связи между исследуемыми системами не обнаружено. Аналогичные результаты были получены для пяти других пациентов, находящихся в коме, вызванной острым нарушением мозгового кровообращения (ишемический инсульт).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 14-12-00291).

### Литература

1. Karavaev A.S. Synchronization of low-frequency oscillations in the human cardiovascular system / A.S. Karavaev, M.D. Prokhorov, V.I. Ponomarenko, A.R. Kiselev, V.I. Gridnev, E.I. Ruban, and B.P. Bezruchko // *Chaos*. 2009. V. 19. P. 033112.
2. Ponomarenko V.I. Synchronization of low-frequency oscillations in the cardiovascular system: Application to medical diagnostics and treatment / Ponomarenko V.I., Pro-

khorov M.D., Karavaev A.S., Kiselev A.R., Gridnev V.I., Bezruchko B.P. // Eur. Phys. J. Special Topics. 2013. V. 222, № 10. P. 2687–2696.

3. *Киселев А.Р.* Персонализация подхода к назначению гипотензивной терапии у больных артериальной гипертензией на основе индивидуальных особенностей вегетативной дисфункции сердечно-сосудистой системы / Киселев А.Р., Гриднев В.И., Караваяев А.С., Посненкова О.М., Прохоров М.Д., Пономаренко В.И., Безручко Б.П. // Артериальная гипертензия. 2011. Т. 17, № 4. С.354–360.

4. *Киселев А.Р.* Оценка на основе определения синхронизации низкочастотных ритмов динамики вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы при применении метопролола у больных ИБС, перенесших инфаркт миокарда / Киселев А.Р., Гриднев В.И., Посненкова О.М., Беспятов А.Б., Довгалецкий П.Я., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Котельникова Е.В. // Терапевтический архив. 2007. Т. 79, № 4. С. 23–31.

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

## ПРИЛОЖЕНИЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАУЗАЛЬНЫХ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ ВРЕМЕННЫМИ РЯДАМИ К ТЕОРИИ КЛИМАТА: МОДЕЛЬ И ПРИРОДА

*А.А. Скакун<sup>1,2</sup>, М.Я. Вербицкий<sup>1</sup>, Д.М. Волобуев<sup>1</sup>*

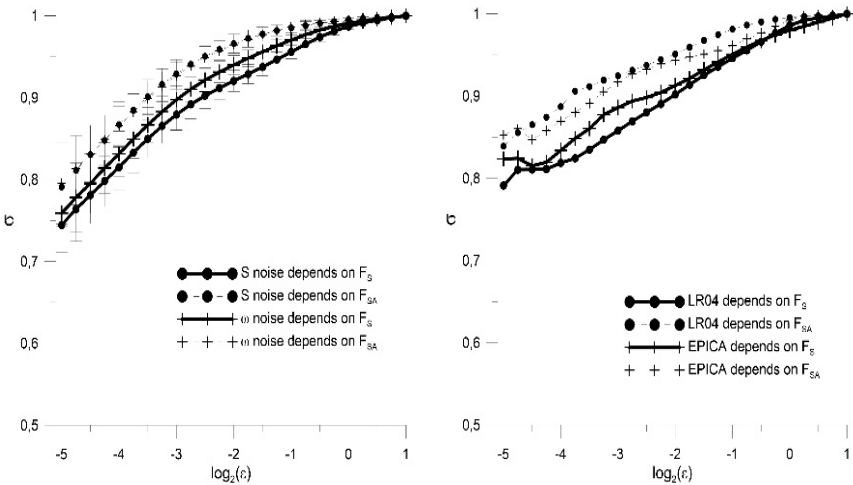
<sup>1</sup> Главная (Пулковская) обсерватория РАН, Санкт-Петербург

<sup>2</sup> Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт,  
Санкт-Петербург  
a\_skakun@mail.ru

В течение долгого времени мировой парадигмой является предположение, что глобальные изменения климата (оледенения и межледниковья) – результат воздействия астрономического форсинга в комплексе с земными обратными связями. Так как механизмы климатической системы Земли не очевидны, на данный момент не представляется возможным однозначно ответить на вопрос, в какой мере астрономический форсинг является «пусковым механизмом» для земных глобальных процессов. Различные климатические модели в той или иной мере успешно восстанавливают палеоклиматическую картину (см., например, обзоры Saltzman, 2002; Crucifix, 2012), но общепринятого критерия качества модели до сих пор не существует. В данной работе мы предлагаем ввести в качестве одного из критериев силу причинно-следственной связи между модельными климатическими временными рядами и инсоляционной кривой. Сила такой связи может быть измерена с помощью так называемого метода условных дисперсий (Cenys et al., 1991), который предполагает, что каждый временной ряд является одной

из координат динамической системы, описываемой системой нелинейных уравнений, и содержит составляющую детерминированного хаоса. Есть основания предполагать, что данное условие выполняется для палеоклиматических эмпирических рядов, это позволяет использовать величину связи между ними и инсоляцией как ориентир для расчета связей между соответствующими модельными рядами и инсоляцией. В данной работе мы использовали климатическую модель ледниковых периодов плейстоцена (Verbitsky, Volobuev, 2018) вместе с данными о содержании изотопа кислорода 18 в фораминиферах (Lisiecki, Raymo, 2005) и содержании дейтерия в антарктическом ледяном керне станции Эпика (Jouzel et al., 2007). Метод условных дисперсий показал, что модельные кривые обладают более выраженной зависимостью от инсоляционных кривых, чем природные ряды. В то же время искусственное добавление шума в модельные ряды привело к уменьшению связи между этими рядами и инсоляцией (рис. 1).

Этот факт говорит о том, что связь между эмпирическими данными и инсоляцией может ослабляться за счет наличия климатического шума. Кроме того, даже в Южном полушарии каузальная связь климатических переменных с инсоляцией Северного полушария более сильная, чем с инсоляцией Южного, как в модельных, так и в природных климатических рядах. Этот факт можно объяснить более активными колебаниями оледенения Северного полушария за счет географической асимметрии материков в приполярных широтах.



**Рис. 1.** Условная дисперсия, показывающая каузальную связь между природными (справа) и зашумленными модельными (слева) климатическими переменными с северной (FS) и южной (FSA) инсоляциями

## Литература

1. *Saltzman B.* Dynamical paleoclimatology: generalized theory of global climate change. – Academic Press, 2002. – V. 80.
2. *Crucifix M.* Oscillators and relaxation phenomena in Pleistocene climate theory // *Phil. Trans. R. Soc. A.* 2012. V. 370, № 1962. P. 1140–1165.
3. *Čenys A., Lasiene G., Pyragas K.* Estimation of interrelation between chaotic observables // *Physica D: Nonlinear Phenomena.* 1991. V. 52, № 2/3. P. 332–337.
4. *Verbitsky M., Volobuev D.* A Simple Model of Pleistocene Glacial Rhythmicity // *Climate Dynamics.* 2018. [in print].
5. *Lisiecki L.E., Raymo M.E.* A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}\text{O}$  records // *Paleoceanography.* 2005. V. 20, № 1.
6. *Jouzel, J. [et al.]* Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800,000 years // *Science.* 2007. V. 317, № 5839. P. 793–796.

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭФФЕКТОВ НЕГИРОТРОПНОГО ТЕНЗОРА ЭЛЕКТРОННОГО ДАВЛЕНИЯ НА МАГНИТНОЕ ПЕРЕСОЕДИНЕНИЕ В ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

*А. Сладков<sup>1,2</sup>, Р. Смет<sup>2</sup>, А. Коржуманов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

<sup>2</sup>Лаборатория физики плазмы, Политехническая школа, Палезо, Франция  
andrey.sladkov1992@gmail.com

Явление магнитного пересоединения представляет фундаментальный интерес для исследования в лаборатории, поскольку физические механизмы, лежащие в его основе, до сих пор остаются не до конца ясны. В недавних лазерно-плазменных экспериментах наблюдение магнитного пересоединения в пространстве между двумя плазменными пузырьками, созданными лазерными импульсами, показало, что скорость пересоединения намного выше, чем дает оценка из классической теории [1].

Данная работа является теоретической частью экспериментального исследования магнитного пересоединения в лазерной плазме. Как было показано во многих предыдущих публикациях, негиротропные эффекты давления электронов играют доминирующую роль в поддержании электрического поля пересоединения в непосредственной близости от нейтральной  $X$ -точки [2]. В этой работе представлено детальное сравнение результатов численного моделирования бесстолкновительного магнитного пересоединения с различными моделями замыкания для давления электронов, в частности изотермической, политропной и негиротропной, основанной на расчете эволюции тензора электронного давления без учета тепловых эффектов (тепловой поток считается равным нулю). Моделирование выполнено с

использованием гибридного кода, верифицированного также полностью кинетическим расчетом.

Изотермическая модель устанавливает прямую зависимость между скалярным давлением и концентрацией электронов в заданной точке  $P_e = nT_0$ . В политропной модели решается уравнение переноса  $\partial_t s + V_e \partial_x s = 0$  для энтропии плазмы, определенной как  $s = \ln(P_e n^{-\gamma})$  с  $\gamma = 5/3$ . В негиротропной модели решается уравнение вида  $\partial_t \underline{P}_e = -\underline{D} - \underline{C}$  для шести независимых компонент тензора электронного давления без учета теплового потока, где тензор  $\underline{D}$  (driver) описывает эффекты сжимаемости, конвекции и градиента скорости электронной жидкости, тензор  $\underline{C}$  (cyclotron) описывает динамику циклотронного движения электронов. Наличие внедиагональных компонент  $\underline{P}_e$  обеспечивает поддержку поля пересоединения вблизи X-точки ( $\mathbf{B} \approx 0$ ), где  $\mathbf{E} \sim \nabla \underline{P}_e / n_e$ , и инерцией электронов  $\sim m_e$ , резистивностью  $\sim \mathbf{J}$  и вязкостью  $\sim \Delta \mathbf{J}$  можно пренебречь. То есть учет негиротропности является одним из ключевых моментов для описания бесстолкновительного пересоединения.

Магнитное пересоединение изучается в конфигурации с нейтральной X-точкой с наложенным малым возмущением магнитного поля. В используемом гибридном коде ионы рассматриваются как набор дискретных частиц, а электроны – в виде безмассовой жидкости с различными моделями для давления. При этом плазма считается квазинейтральной ( $n_e = n_i$ ) и в уравнениях Максвелла пренебрегается током смещения.

### Литература

1. Fox W., Bhattacharjee A., Germaschewski K. Fast Magnetic Reconnection in Laser-Produced Plasma Bubbles // Physical Review Letters. 2011. Vol. 106, № 21. Art. 215003.
2. Hesse M., Neukirch T., Schindler K., Kuznetsova M., Zenitani S. The diffusion region in collisionless magnetic reconnection // Space Science Reviews. 2011. Vol. 160, № 1–4. P. 3–23.

## ВЛИЯНИЕ ШУМА НА ХИМЕРНЫЕ СОСТОЯНИЯ В АНСАМБЛЕ НЕЛОКАЛЬНО СВЯЗАННЫХ ХАОТИЧЕСКИХ ДИСКРЕТНЫХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ

*А.В. Слепнев, А.В. Бух, В.С. Анищенко, Т.Е. Вадивасова*

Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
имени Н.Г. Чернышевского  
a.v.slepnev@gmail.com

На сегодняшний день о химерных состояниях известно достаточно много, однако остается один мало изученный вопрос. Он касается влияния шума на возникновение и устойчивость химерных структур. Можно указать

лишь небольшое количество работ, в которых затрагивается эта проблема. Так, в [1, 2] показано, что шум уменьшает время жизни метастабильной амплитудной химеры в ансамбле гармонических автогенераторов. Напротив, кратковременное шумовое воздействие определенной интенсивности позволяет увеличить время жизни амплитудной химеры, которая наблюдается в ансамбле логистических отображений и также является метастабильной [3]. В [4] показано, что шум стабилизирует виртуальную химеру в системе с запаздывающей обратной связью. В [5] описан особый тип химеры, которая возникает в ансамбле возбуждимых осцилляторов именно благодаря воздействию шума определенной интенсивности. Таким образом, результат влияния шума на химерное состояние может быть существенно различен в зависимости от особенностей ансамбля и типа химерной структуры.

Целью данной работы является исследование влияния шумового воздействия на химерные состояния, возникающие в ансамбле хаотических осцилляторов с нелокальным взаимодействием. Как известно, в таких ансамблях с ростом силы связи наблюдается переход от состояния некогерентного хаоса к полной хаотической синхронизации, сопровождающийся формированием химерных структур двух типов, названных в [6] фазовыми и амплитудными химерами. В рамках данной работы проведено исследование влияния шумового воздействия на оба указанных типа химер в однородном ансамбле нелокально связанных дискретных осцилляторов Рикера.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-12-10175.

### Литература

1. *Loos, S.A.M.* Chimera patterns under the impact of noise / S.A.M. Loos, J.C. Claussen, E. Schöll, A. Zakharova // *Phys. Rev. E*. 2016. V. 93. P. 012209.
2. *Zakharova, A.* Chimera patterns: influence of time delay and noise / A. Zakharova, S. Loos, J. Siebert, A. Gjurchinovski, E. Schöll // *IFAC-PapersOnLine*. 2015. V. 48, Iss. 18. P. 7–12.
3. *Semenova, N.I.* Temporal intermittency and the lifetime of chimera states in ensembles of nonlocally coupled chaotic oscillators / N.I. Semenova, G.I. Strelkova, V.S. Anishchenko, A. Zakharova // *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. 2017. V. 27, № 6. P. 061102.
4. *Semenov, V.* Delayed-feedback chimera states: Forced multiclusters and stochastic resonance / V. Semenov, A. Zakharova, Y. Maistrenko, E. Schöll // *EPL (Europhysics Letters)*. 2016. V. 115, № 1. P. 10005.
5. *Semenova, N.* Coherence-Resonance Chimeras in a Network of Excitable Elements / N. Semenova, A. Zakharova, V.S. Anishchenko, E. Schöll // *Phys. Rev. Lett.* 2016. V. 117. P. 014102.
6. *Bogomolov, S.A.* Mechanisms of appearance of amplitude and phase chimera states in ensembles of nonlocally coupled chaotic systems / S.A. Bogomolov, A.V. Slepnev, G.I. Strelkova, E. Schöll, V.S. Anishchenko // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2017. V. 43. P. 25–36.

# ЗАХВАТ И ПЕРЕМЕЩЕНИЕ МИКРОЧАСТИЦ В ЖИДКОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗАКРУЧЕННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПУЧКА

*С.И. Соловьев, В.Г. Андреев*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
adress\_2009@mail.ru

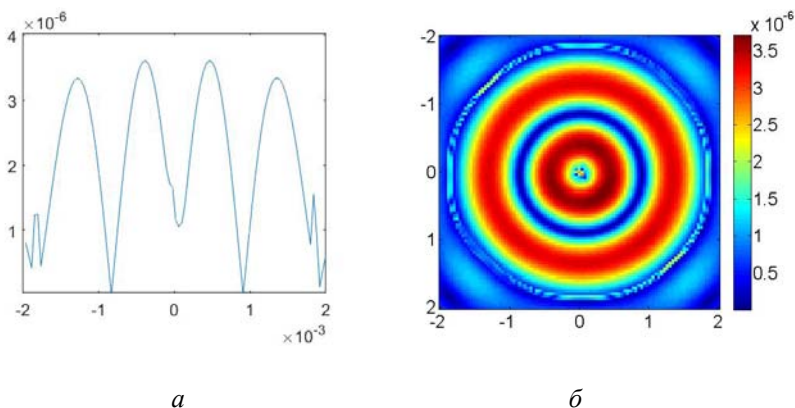
Развитие биотехнологий и медицины стимулирует исследования по разработке и созданию новых методов манипулирования биологическими микрообъектами (клетками) без механического контакта с ними. Перспективными направлениями в этой области являются оптические и акустические пинцеты, которые позволяют захватывать и удерживать микрообъекты без прямого механического воздействия. Оптические пинцеты способны развивать силы порядка долей наноньютона и захватывать прозрачные объекты размером порядка микрона. Акустические пинцеты по принципу работы сходны с оптическими, но имеют ряд особенностей. Акустические пинцеты могут быть использованы для манипулирования непрозрачными объектами в оптически непрозрачных средах. Поскольку радиационная сила со стороны волны прямо пропорциональна интенсивности волны и обратно пропорциональна скорости ее распространения в среде, то при одинаковой интенсивности сила, развиваемая акустическим пинцетом на 5 порядков превосходит силу, создаваемую оптическим пинцетом.

Для захвата и перемещения микрочастиц в пространстве создается закрученный акустический пучок, на оси которого образуется минимум акустического давления. Для создания такого пучка излучающие элементы располагаются на конической поверхности по кругу симметрично относительно центра, и акустические волны, излучаемые соседними элементами, сдвинуты по фазе на фиксированный угол. Радиус основания конуса, на котором расположены преобразователи 40 мм, высота конуса 23 мм, диаметр каждого преобразователя 14 мм, толщина 2 мм. Частота излучения 1,07 МГц выбиралась вблизи резонансов отдельных пьезопреобразователей.

Ультразвуковой закрученный пучок с топологическим зарядом  $m = 1$  создавался при сдвиге фаз волн, излучаемых от соседних пар преобразователей, равном  $90^\circ$ . При сдвиге фаз, равном  $45^\circ$ , полное изменение фазы при обходе всех преобразователей составляет  $720^\circ$ , что соответствует топологическому заряду  $m = 2$ . Знак топологического заряда меняется на противоположный при изменении направления обхода в левую сторону.

Методом интеграла Рэлея было рассчитано распределение акустического давления данного излучателя в предложенной конфигурации. Распределение колебательной скорости на поверхности каждого из излучателей считалось равномерным. В область на оси излучателя помещались сферические частицы с плотностью  $1080 \text{ кг/м}^3$  и размерами 170 мкм и 90 мкм. Наиболее

глубокая потенциальная яма формируется вблизи оси пучка. Для оценки возможности удержания частиц в потенциальной яме была рассчитана максимальная сила, не дающая частице покинуть зону локального минимума потенциальной энергии. На рис. 1 показано распределения модуля радиационной силы, действующей на частицу радиусом 170 мкм в плоскости, перпендикулярной оси пучка и расположенной на расстоянии 50 мм от вершины конуса. Эту плоскость будем называть центральной, так как на указанном расстоянии оси всех излучателей пересекаются. Радиационная сила на порядок превосходит силу тяжести данной частицы, таким образом, частица радиусом 170 мкм и плотностью  $1,08 \text{ г/см}^3$ , находящаяся в воде, может быть удержана в поле излучателя.



**Рис. 1.** Одномерное (а) и двумерное (б) распределение модуля радиационной силы (в ньютонах), действующей на частицу радиусом 170 мкм в центральной плоскости. Расстояние на графиках приведено в миллиметрах

Величина радиационной силы зависит от амплитуды давления на отдельных преобразователях. В случае, когда все преобразователи излучают волны одинаковой амплитуды, в области на оси пучка с поперечным и продольным размерами порядка 1 и 10 мм соответственно, возможен захват и удержание полистироновых частиц с размерами в доли мм. Для этого амплитуда колебательной скорости на поверхности преобразователей должна быть порядка 0,1 м/с. Показано, что такие условия излучения могут быть созданы в рассмотренной конструкции излучателя путем подбора амплитуды возбуждающего напряжения.

### Литература

1. Kang S.T. Potential-well model in acoustic tweezers / Kang S.T., Yeh C.K. // IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2010. V. 57, № 6.

# АВТОМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ КАЛЬЦИЕВОГО ИМИДЖИНГА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ПОИСКА НЕЙРОННЫХ СПЕЦИАЛИЗАЦИЙ

*В.П. Сотсков<sup>1,2</sup>, Д.В. Константинов<sup>1</sup>, В.В. Плюснин<sup>1</sup>, О.А. Ивлева<sup>2</sup>,  
К.В. Анохин<sup>2,3,4</sup>*

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

<sup>3</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

<sup>4</sup>Институт нормальной физиологии им. П.К. Анохина, Москва

vsotskov@list.ru

Одной из самых важных задач науки о мозге является поиск взаимосвязей между нейронной активностью и поведением животных. Оптический кальциевый имиджинг позволяет одновременно регистрировать в подвижном животном активность больших популяций нейронов. Для этого используется принципиально новый подход – миниатюрный микроскоп NVista HD массой 2 г, монтируемый непосредственно на голову мыши [1]. Однако регистрируемый таким образом сигнал содержит множество шумов, и выделение отдельных нейронов и их динамики является достаточно трудоёмкой задачей. В настоящей работе авторами предлагается комплекс программных решений, позволяющих анализировать подобный сигнал в автоматическом режиме, а также синхронизировать его с данными видеотрекинга. В частности, разработанные решения позволяют:

- корректировать артефакты движения и выравнивать различные сессии съёмки по референтному кадру;
- в полностью автоматическом режиме извлекать геометрические местоположения активных нейронов, а также зависимости их активностей от времени («следы»);
- автоматически производить сортировку извлечённых следов, отфильтровывать артефакты;
- детектировать значимые события нейрональной активности (кальциевые спайки);
- синхронизировать данные нейронной активности с данными видеотрекинга;
- сегментировать поведение животного на отдельные поведенческие акты;
- соотносить нейрональные спайки и поведенческие акты, подсчитывать статистику нейрональной активности;
- визуализировать полученные данные на графиках и диаграммах.

Вышеперечисленные подходы будут использованы для выявления коррелятивных связей между поведением мыши и активностью клеток места в ходе обследования мышью новой для неё обстановки. Это позволит выяс-

нить, как именно отдельные акты исследовательского поведения обуславливают пространственную специализацию клеток места, что является важным фундаментальным вопросом, решение которого способно пролить свет и на универсальные механизмы когнитивной специализации нейронов.

### Литература

1. *Ghosh K.K., Schnitzer M. J.* Miniaturized integration of a fluorescence microscope // *Nature Methods*. 2011. V. 8. P. 871–878.

## КОЛЛЕКТИВНАЯ ДИНАМИКА СЕТИ НЕОДНОРОДНЫХ НЕИЗОХРОННЫХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ

*С.А. Субботин*

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
Sergey\_subbotin95@mail.ru

Представлены результаты исследования коллективной динамики сети неоднородных неизохронных осцилляторов. Взаимодействие между осцилляторами происходит посредством локальных связей, зависящих от разности одной из переменных осцилляторов. При отсутствии связей каждый осциллятор в зависимости от управляющего параметра либо находится в покое, которому на фазовой плоскости соответствует состояние равновесия, либо совершает неизохронные периодические колебания, соответствующие устойчивому предельному циклу, возникающему в результате бифуркации петли сепаратрисы седло-узла. Неоднородность ансамбля формируется благодаря случайному выбору контрольного параметра, управляющего динамикой индивидуального осциллятора.

Для гауссова распределения контрольных параметров осцилляторов в зависимости от коэффициента связи между ними возможна принципиально различная коллективная динамика. Наибольший интерес представляет режим пространственно-временного беспорядка. В этом режиме динамика как отдельного осциллятора, так и динамика средних по ансамблю переменных является нерегулярной. Этот режим существует в достаточно большом диапазоне параметров связи, и ему соответствует коллективная спайковая активность сети.

### Литература

1. *Nekorkin, V.I., Velarde, M.G.* Synergetic phenomena in active lattice : Springer-Verlag, 2002. 357 p.

2. *Schöll, E.* Synchronization patterns and chimera states in complex networks: Interplay of topology and dynamics // *Europ. Phys. J. Special Topics*. 2016. V. 225. P. 891–919.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО СТУПЕНЧАТОГО ЛИДЕРА МОЛНИИ

А.А. Сысоев<sup>1</sup>, Д.И. Иудин<sup>1,2</sup>, С.С. Давыденко<sup>1,2</sup>, В.А. Раков<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

<sup>2</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

<sup>3</sup>Университет Флориды, Гейнсвилл, США

zaratustrann@yandex.ru

Уже около сотни лет известно, что отрицательный лидер, в отличие от положительного, растет не непрерывно, а ступенчатым образом, удлиняясь посредством объемных лидеров [1]. Причины данной асимметрии, как и физика процесса возникновения пространственных стемов, потенциальных зачатков пространственных лидеров, до сих пор неясны. Недостаточно изучены также процессы, происходящие во время формирования ступени отрицательного лидера.

В данной работе впервые, насколько известно авторам, было проведено моделирование развития ступенчатого отрицательного лидера молнии с учетом возникновения растущих с пространственных стемов стримеров обеих полярностей и их последующего превращения в пространственные лидеры. В основу модели положены вероятностный подход и учет асимметрии развития положительных и отрицательных стримерных разрядов. Модель впервые учитывает временную эволюцию проводимости и электрического поля разрядных каналов. Показано, что ступенчатый характер распространения отрицательных лидеров связан с асимметрией характерных полей развития положительных и отрицательных стримеров и обеспечивается полем заряда, выносимого вглубь промежутка стримерной короной отрицательного лидера и формирующего чехол его заряда. Проанализирована временная эволюция электрического поля и проводимости разрядных каналов, отвечающая формированию ступени отрицательного лидера.

Наиболее содержательные на настоящий момент данные высокоскоростной съемки отрицательного лидера молнии [2, 3], демонстрирующие каналы не только основного, но и пространственных лидеров, позволяют говорить о высокой степени морфологического сходства между модельными и натурными молниевыми разрядами.

### Литература

1. *Schonland, B.F. J.* The Lightning discharge // *Handbuch der Physik.* 1956. V. 22. P. 576–628.

2. *Petersen, D.A.* High-speed video observations of a natural negative stepped leader and subsequent dart-stepped leader / D.A. Petersen, W.H. Beasley // *JGR: Atmospheres.* 2013. V. 118. P. 12,110–12,119.

3. *Qi, Q.* High-speed video observations of fine structure of a natural negative stepped leader at close distance / Q. Qi, W. Lu, Y. Ma, L. Chen, Y. Zhang, V.A. Rakov // *Atmos. Res.* 2016. V. 178/179. P. 260–267.

# КВАЗИСТАТИЧЕСКИЕ ПРЕДВЕСТНИКИ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ: МОДЕЛЬ-ИГРУШКА

*С.А. Сычугин, М.И. Бакунов*

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
ssychugin@gmail.com

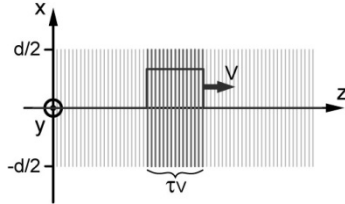
К одним из наиболее «горячих» прикладных исследований в области терагерцовой фотоники в последние годы можно отнести «настольное» ускорение частиц, сверхбыстрое управление магнитным порядком в веществе и нелинейную терагерцовую спектроскопию. Для таких приложений необходимы экстремально сильные терагерцовые поля с напряженностью больше 1 МВ/см. Наиболее эффективные «настольные» источники терагерцового излучения основаны на явлении оптического выпрямления мощных фемтосекундных лазерных импульсов в электрооптических кристаллах, таких как ZnTe, GaP или LiNbO<sub>3</sub>. При необходимой в таких процессах высокой интенсивности оптической накачки, однако, начинает играть негативную роль многофотонное поглощение, которое приводит не только к истощению накачки, но и к генерации свободных носителей, поглощающих терагерцовые волны. Поэтому фотогенерация носителей рассматривается обычно как негативный эффект для терагерцовой генерации.

В недавно опубликованной работе [1], однако, было показано, что генерация свободных носителей в условиях многофотонного поглощения накачки может приводить к позитивному эффекту – генерации квазистатических электрического и магнитного полей, распространяющихся впереди лазерного импульса. Источником квазистатического предвестника является всплеск тока рожденных на фронте фотоионизации носителей при их ускорении электрическим полем, сопровождающим нелинейную поляризацию в кристалле.

Исследование эффекта генерации предвестников в работе [1] было проведено методом FDTD в рамках (одномерной) модели неограниченно широкого лазерного пучка. Данное приближение не позволяет исследовать влияние поперечного размера пучка на формирование предвестника, а разработка 2D-FDTD-кода является сложной, ресурсоемкой задачей.

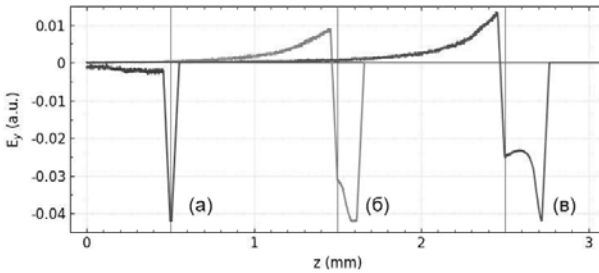
Мы предлагаем здесь простую двумерную модель-игрушку, в которой движение фронта рождения и ускорения носителей заменяется дискретным пространственно-временным распределением заданных токов.

Суть модели поясняет рис. 1. Вдоль оси  $z$  с шагом  $\Delta z$  расположены полосы шириной  $d$ , на которых последовательно, через время  $\Delta t = \Delta z/V$  ( $V$  – групповая скорость лазерного импульса) включаются токи, направленные вдоль оси  $y$ . Создаваемые токами поля распространяются с фазовой скоростью низкочастотных волн в кристалле. Ток на каждой полосе выключается через время  $\tau$ , равное длительности лазерного импульса.



**Рис. 1.** Геометрия модели

На рис. 2 представлены моментальные снимки электрического поля на оси  $z$  для трех моментов времени. Видно, что амплитуда предвестника существенно не изменяется, а длина растет по мере распространения импульса накачки. Расчеты показывают, что рост предвестника сохраняется до расстояний  $z$ , на порядок превосходящих размер  $d$ .



**Рис. 2.** Моментальные снимки электрического поля в моменты времени 6 пс (а), 18 пс (б), 30 пс (в) при  $d = 1$  мм и  $\tau = 500$  фс

### Литература

1. *Bakunov, M.I.* Optically generated terahertz pulses with strong quasistatic precursors / M.I. Bakunov, A.V. Maslov, M.V. Tsarev // *Phys. Rev. A.* 2017. V. 95. P. 063817.

## НЕГАУССОВА СТАТИСТИКА ЧИСЛА ЧАСТИЦ В БЛИЗКОМ К ОДНОРОДНОМУ КОНДЕНСАТЕ БОЗЕ-ГАЗА

*С.В. Тарасов*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
serge.tar@gmail.com

Доклад посвящен исследованию статистического распределения числа частиц в бозе-конденсате в термодинамическом равновесии. Показано, что для ловушек с быстро растущими значениями одночастичных энергий эта статистика может характеризоваться аномально большой дисперсией и яв-

ляется существенно негауссовой как для мезоскопических систем, так и при переходе к термодинамическому пределу. При этом изучаемое распределение вероятности оказывается чувствительным к тонким изменениям спектра, которые не меняют высокоэнергетическую асимптотику плотности состояний, например, к изменениям граничных условий. Обсуждаются геометрические свойства и возможности создания ловушек, требуемых для проведения экспериментов по изучению влияния граничных условий на статистику частиц в бозе-конденсате.

**Идеальный газ.** Для идеального газа, удерживающегося в мезоскопической ловушке, функция распределение числа частиц в конденсате и вне его вычислена строго во всей области параметров (включая и критическую область фазового перехода) в рамках канонического ансамбля (полное число частиц задано) с применением метода «обрезающей» связи и преобразования Фурье – Меллина [1]. Показано, что при температурах заметно ниже критической характеристическая функция и все кумулянты представимы как суммы вкладов от отдельных одночастичных энергетических уровней. Если с ростом квантового числа энергии растут медленно (например, линейно), то много уровней оказываются заселенными и потому вносят существенный вклад в статистику – в результате выполняются условия центральной предельной теоремы и полное число частиц над конденсатом описывается гауссовым распределением. В противоположном случае быстрорастущего спектра, например для квадратично растущего спектра в трехмерной задаче, условия применимости центральной предельной теоремы не выполнены, так что статистика существенно негауссова и определяется в первую очередь низкоэнергетическими уровнями.

**Слабо взаимодействующий газ.** Исследование статистики в конденсате слабо взаимодействующих частиц проведено для случая развитого конденсата (то есть для температур порядка половины критической и более низких) в рамках известного подхода Боголюбова. При этом в гамильтониане системы, квадратичном по операторам рождения и уничтожения, оператор числа частиц в конденсате заменяется на его среднее значение. Поскольку полное число частиц в системе фиксировано и задано, это среднее в дальнейшем необходимо согласовать со спектром квазичастиц, который описывается уравнениями Боголюбова – де Жена (а потому зависит от средней плотности конденсата) и в то же время задает распределение числа частиц как вне, так и в самом конденсате. Существенным отличием от случая идеального газа, обуславливающим сложность задачи, здесь является то обстоятельство, что матрица плотности системы явно записывается в терминах операторов квазичастиц, а не исходных частиц, статистика которых исследуется.

Указанную проблему удастся разрешить в приближении Томаса – Ферми для случая практически однородного конденсата, заключенного в объе-

ме произвольной формы (ловушки самой разной формы становятся все более популярны при проведении экспериментов [2]). В таком случае связь операторов числа частиц и квазичастиц становится вполне обозримой (преобразование Боголюбова затрагивает совместно лишь одну или две одночастичные неodeтые моды), что позволяет получить характеристическую функцию для полного числа частиц вне и в конденсате [3] и вычислить сами распределения и все их моментные характеристики.

При этом в режиме умеренных температур (при которых фракция несконденсированных частиц определяется в основном температурными эффектами, а не квантовым истощением конденсата) удается явно показать, что искомая статистика частиц определяется квадратично растущими энергетическими уровнями одночастичных состояний ловушки, а не линейно растущими (в низкоэнергетическом пределе) энергиями квазичастиц. В итоге распределение полного числа частиц в конденсате в присутствии слабого взаимодействия между атомами оказывается негауссовым (подобно случаю идеального газа и по тем же причинам) и чувствительным к возмущениям спектра и изменениям граничных условий.

### Литература

1. *Tarasov, S.V.* Universal scaling in the statistics and thermodynamics of a Bose-Einstein condensation of an ideal gas in an arbitrary trap / S.V. Tarasov, V.V. Kocharovsky, V.I.V. Kocharovsky // *Physical Review A*. 2014. V. 90, № 3. P. 033605.
2. *Gaunt, A.L.* Bose-Einstein Condensation of Atoms in a Uniform Potential / A.L. Gaunt, F.T. Schmidutz, I. Gotlibovych, R.P. Smith, Z. Hadzibabic // *Physical Review A*. 2013. V. 110, № 20. P. 200406.
3. *Kocharovsky, V.V.* Condensation of N bosons. III / V.V. Kocharovsky, V.I.V. Kocharovsky, M.O. Scully // *Physical Review A*. 2000. V. 61, № 5. P. 053606.

## ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННЕГО ШУМА НА СОСТОЯНИЯ «ХИМЕРЫ» В СВЯЗАННЫХ АНСАМБЛЯХ КУРАМОТО

*И.В. Тюлькина<sup>1</sup>, Д.С. Голдобин<sup>1,2</sup>, А. Пиковский<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

<sup>2</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет

<sup>3</sup>Universität Potsdam, Germany  
irinatiulkina95@gmail.com

Для ансамблей фазовых осцилляторов, подчиняющихся уравнениям вида

$$\dot{\varphi}_k = \Omega_k + \text{Im}(2h(t)e^{-i\varphi_k}), \quad (1)$$

где  $\varphi_k$  и  $\Omega_k$  – фаза и собственная частота  $k$ -го осциллятора соответственно,  $h(t)$  – произвольная функция времени, развита теория Отта – Антонсена [1]. Оказывается, динамика плотности распределения состояний  $w(\varphi_k, t)$  облада-

ет бесконечным числом интегралов движения и определяется единственным дифференциальным уравнением первого порядка для комплексной переменной.

Построение теории возмущений для теории Отта – Антонсена (и ее обобщение, теория Ватанабе – Стругатца) для слабого нарушения свойств симметрии представляет огромный интерес, но оказывается проблематичным в общем случае [2].

**Теория возмущений для случая внутреннего шума.** Вместе с тем представляют интерес частные случаи нарушения вида (1). Таковым является случай ансамбля осцилляторов с внутренним шумом. Внутренний шум приводит к медленному слиянию кластеров – однокластерные режимы динамики, близкие к таковым в теории Отта – Антонсена, оказываются притягивающими, и вместе с тем для них может строиться теория возмущений. В работе удастся развить теорию возмущений для ансамбля осцилляторов

$$\dot{\varphi}_k = \Omega_k + \text{Im}(2h(t) e^{-i\varphi_k}) + \varepsilon \zeta_k(t), \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – амплитуда внутреннего шума,  $\zeta_k(t)$  – нормированный индивидуальный внутренний шум с малым времен автокорреляции:

$$\langle \zeta_k(t) \zeta_l(t+t') \rangle = \delta_{kl} \langle \zeta_k(t) \zeta_k(t+t') \rangle, \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \langle \zeta_k(t) \zeta_k(t+t') \rangle dt' = 2. \quad (3)$$

Описание динамики параметра порядка  $Z = \langle \exp(i\varphi_k) \rangle$  требует для замыкания учета динамики параметра  $Q = \langle \exp(i2\varphi_k) \rangle - Z^2$ , который обращается в ноль для однокластерных состояний в теории Отта – Антонсена и описывает степень ее нарушения. В итоге можно получить редуцированные уравнения динамики системы

$$\dot{Z} = (i\Omega - \gamma + \varepsilon^2)Z + h - h^*(Z^2 + Q), \quad \dot{Q} = (i2\Omega - 2\gamma - 4h^*Z - 4\varepsilon^2)Q - 2\varepsilon^2 Z^2, \quad (4)$$

где  $\Omega$  – средняя частота и  $\gamma$  – ширина распределение частот (для частот предполагается распределение Лоренца). Существенно, что динамика становится диссипативной.

**Состояния «химеры» в ансамблях Курамото.** Воспользуемся уравнениями (4) для исследования влияния внутреннего шума на возникновение состояний «химеры» в двух связанных ансамблях осцилляторов

$$\dot{\varphi}_{s,k} = \omega + \sum_{r=1}^2 K_{sr} N_r^{-1} \sum_{j=1}^{N_r} \sin(\varphi_{r,j} - \varphi_{s,k} - \alpha) \quad (5)$$

(здесь  $s = 1, 2$  и  $N_s$  – число осцилляторов в ансамбле  $s$ ). Для системы (5) ранее была показана возможность состояний, когда один ансамбль полностью синхронизован, а аттракторами для динамики параметра порядка второго ансамбля являются (в зависимости от параметров связей) либо колебания, синхронизованные с первым ансамблем, либо квазипериодические колебания [3]. Позже для этой же системы было показано, что если начальное состояния второго ансамбля не является однокластерным, то в системе реализуются другие режимы типа «химера» [4].

В настоящей работе в систему (5) вводится внутренний шум. Как показал анализ, введение шума приводит к тому, что однокластерные состояния второго ансамбля оказываются притягивающими: система приходит к ним даже при многокластерных начальных состояниях. На основе редукции (4) динамика системы с однокластерными состояниями может быть описана системой уравнений

$$\begin{aligned}\dot{Z}_1 &= (i\omega - \varepsilon^2)Z_1 + h_1 - h_1^*(Z_1^2 + Q_1), \quad \dot{Q}_1 = (i2\omega - 4\varepsilon^2 - 4h_1^*Z_1)Q_1 - 2\varepsilon^2Z_1^2Q_1, \\ \dot{Z}_2 &= (i\omega - \varepsilon^2)Z_2 + h_2 - h_2^*(Z_2^2 + Q_2), \quad \dot{Q}_2 = (i2\omega - 4\varepsilon^2 - 4h_2^*Z_2)Q_2 - 2\varepsilon^2Z_2^2Q_2,\end{aligned}\quad (6)$$

где  $h_s = 0,5(K_{s1}Z_1 + K_{s2}Z_2)e^{-i\alpha}$ ,  $K_{11} = K_{22} > 0$ ,  $K_{12} = K_{21} > 0$ . Численный счет для полной системы уравнений и системы (6) показывает хорошую точность этого приближения.

Хотя введение слабого шума  $\varepsilon < 0,01$  существенно изменяет динамику системы, поскольку приводит к «вымиранию» многокластерных состояний, однокластерные состояния остаются практически неизменными. Увеличение шума ведет к уменьшению предельных циклов и последующему превращению их в стационарные точки.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации № МК-1447.2017.5.

### Литература

1. Ott, E., Antonsen, T.M. Low dimensional behavior of large systems of globally coupled oscillators // Chaos. 2008. Vol. 18. Art. 037113.
2. Vlasov, V., Rosenblum, M., Pikovsky, A. Dynamics of weakly inhomogeneous oscillator populations: perturbation theory on top of Watanabe–Strogatz integrability // J. Phys. A: Math. Theor. 2016. Vol. 49. Art. 31LT02.
3. Abrams, D.M., Mirollo, R., Strogatz, S.H., Wiley, D.A. Solvable Model for Chimera States of Coupled Oscillators // Phys. Rev. Lett. 2008. Vol. 101. Art. 084103.
4. Pikovsky, A., Rosenblum, M. Partially Integrable Dynamics of Hierarchical Populations of Coupled Oscillators // Phys. Rev. Lett. 2008. Vol. 101. Art. 264103.

## ОБРАТНОЕ ТЕРАГЕРЦОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ИЗ ДВУХЧАСТОТНОГО ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО ФИЛАМЕНТА

*А.А. Ушаков<sup>1,2,3,4</sup>, М. Матоба<sup>4</sup>, Н. Немото<sup>4</sup>, Н. Канда<sup>5,6</sup>, К. Конииши<sup>7</sup>,  
П.А. Чижев<sup>1</sup>, Н.А. Панов<sup>2,3</sup>, Д.Е. Шитило<sup>2,3</sup>, В.В. Букин<sup>1</sup>,  
М. Кувата-Гоноками<sup>4</sup>, Дж. Юмото<sup>4,7</sup>, О.Г. Косарева<sup>2,3</sup>, С.В. Гарнов<sup>1,8</sup>,  
А.Б. Савельев<sup>2,3</sup>*

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М Прохорова РАН, Москва

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

<sup>3</sup>Международный лазерный центр МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

<sup>4</sup>Токийский университет, Япония

<sup>5</sup>РИКЕН Центр современной фотоники, Токио, Япония

<sup>6</sup>Фотонный научный центр Токийского университета, Япония

<sup>7</sup>Институт фотонной науки и техники Токийского университета, Япония

<sup>8</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва  
ushakov.aleksandr@physics.msu.ru

Одним из ключевых направлений исследований лазерно-плазменных источников терагерцового (ТГц) излучения является изучение выходного пространственного распределения ТГц-излучения [1]. Особый интерес представляет исследование ТГц-излучения, распространяющегося под углом близким к 90° и более относительно оптической оси [2]. В данной работе мы сообщаем о первом экспериментальном наблюдении терагерцового излучения, распространяющегося из двухчастотной лазерно-индуцированной плазмы в направлении обратном распространению двухчастотного излучения накачки.

Для генерации оптического излучения использовалась лазерная система Astrella (Coherent Inc., USA) с частотой следования импульсов 1 кГц, центральной длиной волны 800 нм, энергия импульса 2,7 мДж, длительность импульса 35 фс, диаметр пучка 10 мм по уровню  $e^{-2}$ . Для наибольшей эффективности генерации ТГц-излучения выходное лазерное излучение пропускать через кристалл ВВО (7×5×0,4 мм, I тип синхронизма, 10 % эффективность преобразования), пластинку-компенсатор и фазовую пластинку (являющуюся полуволновой для первой гармоники и волновой для второй) с последующей фокусировкой параболическим зеркалом с фокусным расстоянием 2 дюйма и диаметром 2 дюйма. При такой фокусировке импульсы первой и второй гармоник были совмещены по времени и пространству, а поляризации гармоник линейными и коллинеарными.

Генерируемое в прямом направлении ТГц-излучение коллимировалось и фокусировалось с помощью двух линз Tsugurica с диаметрами 5 см и фокусными расстояниями 10 см в апертуру детектора Голея (Tydex GC-1P). Механический модулятор с частотой модуляции 15 Гц совместно с синхронным детектором использовался для синхронного детектирования. Пла-

стинка ИТО (оксид олова допированный индием) вставлялась в пучок под углом  $45^\circ$  к падающему пучку до параболического зеркала для регистрации ТГц-излучения, распространяющегося в обратном падающему оптическому излучению направлении. Данная пластинка отражала ТГц-излучение и пропускала оптическое излучение. Вносимая задержка между гармониками и чирп в пропускаемое излучение компенсировались с помощью пластинки-компенсатора и компрессора лазера. После отражения от пластинки ИТО ТГц-излучение фокусировалось с помощью линзы Tsugurica с фокусным расстоянием 5 см в детектор Голея. Для пропускания в детектор Голея только ТГц-излучения, распространяющегося в прямом и обратном направлениях, перед линзами ставилась тефлоновая пластинка, отсеивающая оптическое и пропускающая ТГц-излучение. С целью предотвращения возможного отражения ТГц-излучения от оптических элементов измерения ТГц-излучения, распространяющегося в прямом и обратном направлениях, проводились независимо друг от друга с извлечением оптических элементов.

В ходе экспериментов были получены значения средней мощности ТГц-излучения, распространяющегося в прямом и обратном направлениях. Эти величины составили 1,2 и 0,04 нВт соответственно. С учетом вклада от поглощения на различных оптических элементах при распространении ТГц-излучения соотношение по мощности ТГц-излучения, распространяющегося в прямом и обратном направлениях, составило  $\sim 25/1$ .

Для описания угловой диаграммы направленности ТГц-излучения из двухчастотной лазерной плазмы мы использовали простую интерференционную модель [3]. В нашем случае можно представить двухчастотную плазму как линейный набор монохроматических дипольных источников. Результат интерференции излучения от таких источников и формирует диаграмму направленности ТГц-излучения. В предположении о том, что центральная длина волны излучения составляет 300 мкм (частота 1 ТГц) и длина плазменного канала 200–260 мкм, что согласуется с наблюдаемыми в эксперименте величинами, соотношение по мощности ТГц-излучения, распространяющегося в прямом и обратном направлениях, также оказалось схожим с получаемым в эксперименте.

### Литература

1. Amico C.D., Houard A., Franco M., Prade B., Mysyrowicz A., Couairon A., Tikhonchuk V. Conical forward THz emission from Femtosecond-laser-beam filamentation in air // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 98, № 23. P. 235002.

2. Buccheri F., Zhang X.-C. Terahertz emission from laser-induced microplasma in ambient air // Optica. 2015. V. 2, № 4. P. 366–369.

3. Panov N.A., Kosareva O.G., Andreeva V.A., Savel'ev A.B., Uryupina D.S., Volkov R.V., Makarov V.A., Shkurinov A.P. Angular distribution of the terahertz radiation intensity from the plasma channel of a femtosecond filament // JETP Lett. 2011. V. 93, № 11. P. 638–641.

## ГЕНЕРАЦИЯ ВИХРЕВОГО ДВИЖЕНИЯ ВОЛНАМИ НА ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ

*С.В. Филатов, Д.А. Храмов, М.Ю. Бражников, А.А. Левченко*

Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка  
fillsv@issp.ac.ru

Давно известно, что при интенсивном волновом возбуждении на поверхности жидкости также образуются вихревые течения. Вихревые течения пытались описать как среднюю величину дрейфа Стокса, возникающего при волновом движении [1]. Однако измерения показывали, что вихри имеют скорости в несколько раз больше, чем возможно из-за дрейфа Стокса.

В работе [2] было показано, что вихревое движение возникает при взаимодействии двух волн, распространяющихся под углом друг к другу. В работе [3] была построена теоретическая модель, объясняющая возникновение этой завихренности. Согласно этой модели, при относительно малых амплитудах волн есть два механизма, ответственных за генерацию вихревой структуры: первый – дрейф Стокса и второй – нелинейное взаимодействие волн в вязком подслое. Для двух перпендикулярных стоячих волн модель дает следующее распределение завихренности на поверхности воды:

$$\Omega = (2 + \sqrt{2}) \Lambda, \quad (1)$$

$$\Lambda = H_x H_y \omega k^2 \sin(\varphi) \sin(kx) \sin(ky), \quad (2)$$

где  $H_x$  и  $H_y$  – амплитуды волн в перпендикулярных направлениях,  $\omega$  – угловая частота волны,  $k$  – волновой вектор волны на поверхности, а  $\varphi$  – разность фаз между колебаниями стоячих волн в разных направлениях.

Экспериментальные наблюдения этой вихревой структуры на гравитационно-капиллярных поверхностных волнах производилось в ванне 70 на 70 см с частотой возбужденных волн с диапазоне 2–10 Гц.

Таким образом, имеются два слагаемых, генерирующих решетку вихрей. Причем если завихренность из-за дрейфа Стокса возникает мгновенно при возбуждении волн, то генерация вихревого движения в вязком подслое требует времени. Однако даже нахождение этого механизма не дало количественного соответствия между теорией и экспериментом. Для более точного соответствия необходимо еще учитывать пленку, которая может образовываться на поверхности воды. Так как вода довольно интенсивно поглощает вещества, находящиеся в воздухе, то через некоторое время после того, как вода была налита в экспериментальную ванну или ячейку, на ее поверхности образуется тонкая пленка, которая обладает упругостью и меняет распределение скоростей в волне.

Отдельный интерес представляет вопрос распределения по глубине завихренности вихревой структуры, сгенерированной взаимодействием волн.

Согласно теоретической модели в устоявшемся состоянии зависимость завихренности решетки вихрей, возбужденной перпендикулярными волнами, описывается суммой двух экспонент  $\Omega = \Lambda(\exp(-2kh) + \sqrt{2} * \exp(-\sqrt{2}kh))$ . Первая экспонента соответствует вкладу из-за дрейфа Стокса, вторая же – завихренности, проникшей в глубину из вязкого подслоя. Для экспериментального измерения завихренности в глубине жидкости используется методика лазерного листа: лазерный луч разворачивается в плоскость, которой подсвечиваются декорирующие частички нейтральной плавучести, помещенные в объем жидкости. Меняя высоту лазерного листа, можно измерять завихренность на разной глубине. Таким образом измерено изменение завихренности решетки вихрей по глубине.

### Литература

1. *Mesquita, O.N.* Transport by capillary waves: Fluctuating Stokes drift / O.N. Mesquita, S. Kane, J.P. Gollub // *Phys. Rev. A.* 1992. 45, 3700.
2. Филатов, С.В. Формирование вихревого течения волнами на поверхности жидкости / С.В. Филатов, М.Ю. Бражников, А.А. Левченко // *Письма в ЖЭТФ.* 2015. 102, 7, 486–490.
3. *Filatov, S.V.* Nonlinear Generation of Vorticity by Surface Waves / S.V. Filatov, V.M. Parfenyev, S.S. Vergeles, M.Yu. Brazhnikov, A.A. Levchenko, V.V. Lebedev // *Phys. Rev. Lett.* 2016. 116, 054501.

## ФОРМИРОВАНИЕ АТТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ В АКТИВНОЙ СРЕДЕ ПЛАЗМЕННОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ЛАЗЕРА, МОДУЛИРОВАННОЙ ЛАЗЕРНЫМ ПОЛЕМ ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА

*И.Р. Хайрулин<sup>1,2</sup>, В.А. Антонов<sup>2,3</sup>, О.А. Кочаровская<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского

<sup>2</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

<sup>3</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

<sup>4</sup>Техасский А&М университет, Колледж Стейшн, США

lias\_1\_5@mail.ru

Когерентные интенсивные аттосекундные импульсы рентгеновского излучения открывают широкие возможности для изучения сверхбыстрой временной динамики и пространственной структуры микро- и нанообъектов в химии, биологии, медицине и материаловедении благодаря уникальной комбинации высокого пространственного и временного разрешения [1].

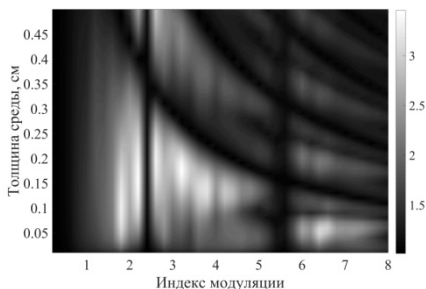
В данной области спектра можно выделить три основных класса источников когерентного излучения. Первый класс образуют источники, осно-

ванные на ГГВП в процессе ионизации атомов газа и последующей рекомбинации оторванного и ускоренного лазерным полем электрона с родительским ионом. Данный подход является основным методом генерации электромагнитных импульсов аттосекундной длительности и позволяет получить излучение с наибольшей пространственной и временной когерентностью. В то же время указанный метод характеризуется невысокой эффективностью преобразования энергии излучения в высокочастотную область. Следующий класс источников представляют собой лазеры на свободных электронах. На сегодняшний день это наиболее мощные источники высокочастотного излучения с энергией фотонов более 10 кэВ. Однако, за редким исключением, их излучение отличается низкой временной когерентностью. Кроме того, это очень большие и дорогие установки, что ограничивает их распространение и возможности практического применения. Ещё одним классом источников ВУФ и мягкого рентгеновского диапазона являются плазменные рентгеновские лазеры, представляющие собой компактные установки, генерирующие излучение с высокой степенью когерентности и мощностью, превышающей мощность излучения высоких гармоник. Однако генерируемые импульсы имеют длительность порядка пикосекунды.

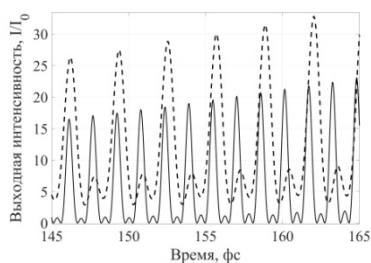
В последние годы [2, 3] был предложен метод управления спектрально-временными характеристиками резонансного высокочастотного излучения при его распространении в среде, дополнительно облучаемой сильным лазерным полем оптического диапазона. В частности, теоретически была впервые показана возможность формирования последовательности аттосекундных импульсов плазменным рентгеновским лазером, в котором в качестве активной среды выступает плазма из водородоподобных ионов  $Li^{2+}$ .

В настоящей работе рассматривается возможность дальнейшего улучшения характеристик формируемых аттосекундных импульсов, а именно их контраста, путём подбора оптимальных значений индекса модуляции (нормированной амплитуды лазерного поля) и толщины среды. Индекс модуляции отвечает за амплитуду комбинационных частот, формирующихся при взаимодействии резонансного поля с поляризацией среды, наводимой сильным (интенсивностью  $\sim 10^{14} - 10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup>) электромагнитным полем видимого или ИК-диапазона. Толщина среды отвечает за усиление генерируемых комбинационных частот. Нами было получено аналитическое решение в линейном приближении, описывающее отклик активной среды плазменного рентгеновского лазера на резонансное поле (соответствующее одной из высоких гармоник лазерного излучения) в трёхуровневом приближении. Зависимость контраста от индекса модуляции и толщины среды, следующая из аналитического решения, приведена на рис. 1. На рис. 2 изображена временная зависимость нормированной интенсивности усиленного резонансного поля, полученная в результате численного решения строгой системы уравнений, при оптимальных значениях из рис. 1 (длина волны лазерного поля 935 нм, интенсивность  $4 \cdot 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>), а также при параметрах из [3].

Видно, что благодаря проведённой оптимизации удалось повысить контраст и улучшить форму импульсов, а также уменьшить их пьедестал.



**Рис. 1.** Зависимость величины контраста от толщины среды и индекса модуляции. Активная среда облучается лазерным полем с интенсивностью  $4 \cdot 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>, а также затравочным резонансным полем. Концентрация инвертированных ионов  $\text{Li}^{2+}$  составляет  $1,5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>



**Рис. 2.** Временная зависимость отношения интенсивности электрического поля на выходе из плазменной среды к интенсивности поля на входе. Сплошная кривая соответствует параметрам, найденным по рис. 1, пунктирная кривая – параметрам из статьи [3]

### Литература

1. Suckewer S., Jaegle P. // *Laser Phys. Lett.* 2009. V. 6, № 6. P. 411–436.
2. Radeonychev Y.V., Polovinkin V.A., Kocharovskaya O. // *Phys. Rev. Lett.* 2010. V. 105, № 18. P. 183902.
3. Akhmedzhanov T.R., Antonov V.A., Morozov A., Goltsov A., Scully M., Suckewer S., Kocharovskaya O. // *Phys. Rev. A.* 2017. V. 96, № 3. P. 033825.

## ОБОБЩЕННАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ В ХАОТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХСЯ ДВУМЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ЛЯПУНОВА

*В.А. Ханадеев, А.А. Короновский, О.И. Москаленко*

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского  
v.a.hanadeev@gmail.com

Исследование обобщенной хаотической синхронизации в нелинейных системах в настоящее время является актуальным направлением радиофизики [1]. В данный момент уже разработаны методы диагностики и детально изучен вопрос о механизмах возникновения обобщенной синхронизации в однонаправленно связанных системах [2, 3]. Позднее появились работы, направленные на диагностику этого режима в системах с взаимным типом

связи [4, 5]. В то же самое время большая часть работ, известных в этом направлении, была направлена на констатацию факта возможности существования этого режима, в то время как само понятие обобщенной синхронизации было введено в рассмотрение значительно позднее [5]. Для такого типа связи также было проведено всестороннее исследование и установлено возможность применения тех же методов диагностики синхронного режима, что и в случае однонаправленной связи, за исключением метода вспомогательной системы [6].

Работы, посвященные исследованию обобщенной синхронизации, относятся, как правило, к изучению этого режима в ограниченных классах динамических систем. Это потоковые системы и дискретные отображения, демонстрирующие сложнопериодическую или хаотическую динамику, или модели пространственно-распределенных сред, характеризующихся в автономном режиме одним положительным показателем Ляпунова. Представляется интересным вопрос о возможности наблюдения этого режима в системах, обладающих несколькими положительными показателями Ляпунова.

В настоящей работе исследуется возможность возникновения обобщенной синхронизации в хаотической системе, характеризующейся двумя положительными показателями Ляпунова. Для этого была построена система двух взаимно связанных модифицированных систем Лоренца [7]

$$\begin{cases} \dot{x}_{1,2} = a(y_{1,2} - x_{1,2}) + ey_{1,2}z_{1,2}, \\ \dot{y}_{1,2} = cx_{1,2} - dx_{1,2}z_{1,2} + y_{1,2} + u_{1,2}, \\ \dot{z}_{1,2} = x_{1,2}y_{1,2} - bz_{1,2}, \\ \dot{u}_{1,2} = -k_{1,2}y_{1,2} + \varepsilon(x_{2,1} - x_{1,2}) \end{cases} \quad (1)$$

со значениями управляющих параметров  $a = 35$ ,  $b = 4,9$ ,  $c = 25$ ,  $d = 5$ ,  $e = 35$ ,  $k_1 = 140$ ,  $k_2 = 200$  и исследовано ее поведение при изменении силы связи  $\varepsilon$ . Исследование проводилось при помощи расчета спектра показателей Ляпунова для системы (1) и при помощи метода ближайших соседей [1]. Установлено, что при выбранных значениях управляющих параметров и увеличении силы связи между системами происходит последовательный переход двух положительных показателей Ляпунова в область отрицательных значений. Когда оба показателя Ляпунова становятся отрицательными, в системе диагностируется режим обобщенной синхронизации, что подтверждается при помощи метода ближайших соседей. Детально рассмотрен вопрос о поведении взаимодействующих систем в том случае, когда только один изначально положительный показатель Ляпунова стал отрицательным. Установлено, что в данном случае имеет место перемежающееся поведение.

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (проект № МК-531.2018.2).

## Литература

1. *Rulkov, N.F.* Generalized synchronization of chaos in directionally coupled chaotic systems / N.F. Rulkov, M.M. Sushchik, L.S. Tsimring, H.D.I. Abarbanel // *Phys. Rev. E.* 1995. V. 51, № 2. P. 980–994.
2. *Pyragas, K.* Weak and strong synchronization of chaos // *Phys. Rev. E.* 1996. V. 54, № 5. P. R4508–R4511.
3. *Короновский, А.А.* О механизмах, приводящих к установлению режима обобщенной синхронизации / А.А. Короновский, О.И. Москаленко, А.Е. Храмов // *ЖТФ.* 2006. Т. 76, вып. 2. С. 1–9.
4. *Zheng, Z.* Transitions from partial to complete generalized synchronizations in bidirectionally coupled chaotic oscillators / Z. Zheng, X. Wang, M.C. Cross // *Phys. Rev. E.* 2002. V. 65. P. 056211.
5. *Moskalenko, O.I.* Generalized synchronization in mutually coupled oscillators and complex networks / O.I. Moskalenko, A.A. Koronovskii, A.E. Hramov, S. Boccaletti // *Phys. Rev. E.* 2012. V. 86. P. 036216.
6. *Moskalenko, O.I.* Inapplicability of an auxiliary-system approach to chaotic oscillators with mutual-type coupling and complex networks / O.I. Moskalenko, A.A. Koronovskii, A.E. Hramov // *Phys. Rev. E.* 2013. V. 87. P. 064901.
7. *Zengqiang, C.A.* Novel hyperchaos system only with one equilibrium / C.A. Zengqiang, Y. Yong, Q. Guoyuan, Y. Zhuzhi // *Phys. Lett. A.* 2007. V. 360, № 6. P. 696–701.

## СИНХРОННЫЕ И АСИНХРОННЫЕ РЕЖИМЫ В ЭНЕРГОСЕТИ С ХАБ-ТОПОЛОГИЕЙ

*В.А. Храменков*

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
vlad.hramenkov@mail.ru

Работа посвящена исследованию динамики энергосети, имеющей форму хаб-кластера (см., например, [1, 2]). Хаб-кластером принято называть элементы больших энергосетей, число связей которых значительно превышает среднее число связей других элементов сети. Например, крупные электростанции и их объединения относятся к кластерам с хаб-топологией. Динамика хаб-кластеров оказывает важное влияние на контроль и управление всей энергосетью.

Приводятся результаты исследования динамики энергосети с хаб-топологией, состоящей из одного потребителя и нескольких генераторов. Модель сети построена на базе так называемой неравномерной модели Курамото (non-uniform Kuramoto model [1, 3]). Установлены параметры сети, при которых при любых начальных условиях во всей сети устанавливается синхронный (рабочий) режим и параметры, при которых все элементы сети

переходят в асинхронный (нерабочий) режим. Кроме того, выделены параметры, соответствующие разделению всей сети на элементы с асинхронным и квазисинхронным режимами. В этом случае часть генераторов переходит в нерабочий режим, а остальные генераторы демонстрируют режим, параметры которого близки к параметрам рабочего.

Результаты получены численными и аналитическими (метод функций Ляпунова, систем сравнения, линеаризации и др.) методами.

### Литература

1. *Edelman, M., Macau, E.E.N., Sanjuan, M.A.F. (eds.) Chaotic, Fractional, and Complex Dynamics: New Insights and Perspectives.* Springer International Publishing, 2018. P. 287–315.
2. *Дмитричев, А.С., Захаров, Д.Г., Некоркин, В.И.* О глобальной устойчивости синхронного режима в хаб-кластерах энергосетей // Изв. вузов. Радиофизика. 2017. Т. 60, № 6. С. 564.
3. *Dorfler, F., Bullo, F.* Synchronization and transient stability in power network and non-uniform Kuramoto oscillators // SIAM J. Control Optim., 2010.

## СПИНОВЫЕ ВОЛНЫ В ПАРАМАГНИТНОМ КРИСТАЛЛЕ С ДИПОЛЬНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ

*К.Б. Циберкин, В.К. Хеннер*

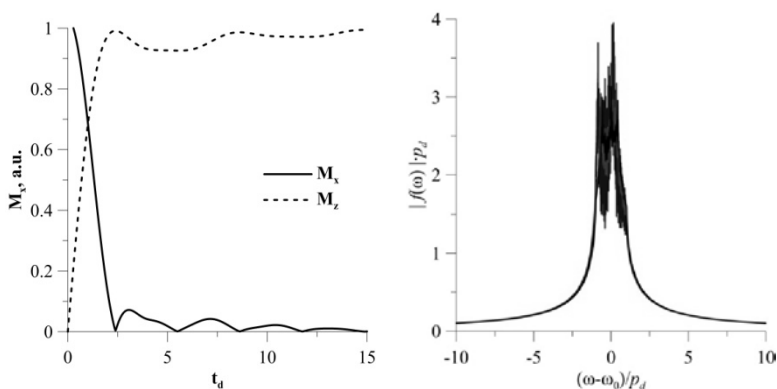
Пермский государственный национальный исследовательский университет  
kbtsiberkin@psu.ru

На базе формализма Холстейна – Примакова [1] развито спин-волновое описание динамики парамагнитного кристалла с дипольным парным взаимодействием магнитных моментов [2]. Подход разработан авторами независимо от предшествующих работ, где была развита теория ядерного магнитного резонанса для дипольно-связанного парамагнетика [3].

Рассматривается парамагнитный кристалл, помещённый в сильное постоянное и однородное магнитное поле, ориентированное вдоль одной из кристаллографических осей; кристалл пребывает вблизи насыщения намагниченности. Спиновые волны вводятся как коллективные отклонения магнитных моментов в кристалле от направления внешнего поля. На примере простой кубической решётки с одинаковыми спинами проведено описание равновесных и динамических свойств системы при ориентации поля вдоль оси [100] в рамках дискретной модели и в пределе сплошной среды.

Для дискретного кристалла рассчитан линейный отклик на скачок продольного магнитного поля. С учётом и без учёта несекулярных слагаемых в гамильтониане найдены плотность состояний, сигнал поперечной намагни-

ченности и его спектр, а также кривая установления продольной намагниченности (рис. 1). Ширина и структура спектральной линии согласуются с данными эксперимента и общей теории магнитного резонанса [4–6].



**Рис. 1.** Отклик парамагнитной решетки на скачок продольного поля: *слева* – огибающая сигнала поперечной намагниченности (сплошная линия) и продольная намагниченность (пунктир), по горизонтальной оси – характерные времена, отвечающие дипольному взаимодействию; *справа* – нормированный спектр сигнала

Кривая спада свободной индукции в пренебрежении взаимодействием спиновых волн может быть найдена аналитически. В длинноволновом пределе амплитуда колебаний поперечной намагниченности убывает по кубическому закону.

Выполнен переход от описания динамики магнитных моментов на узлах кристаллической решётки к пределу сплошной среды. Получены уравнения динамики компонент намагниченности, допускающие решения в виде бегущих волн в линейном приближении. Дисперсионное соотношение волн намагниченности соответствует длинноволновому пределу для спиновых волн на решётке. С применением аналога метода Линштедта – Пуанкаре [7] получена поправка первого порядка к динамике системы невзаимодействующих магнитных моментов. Рассчитан спад поперечной намагниченности и его спектр, уширение и тонкая структура которого также отвечают свойствам дипольного взаимодействия.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 17-42-590271.

### Литература

1. Holstein T. Field dependence of the intrinsic domain magnetization of a ferromagnet / T. Holstein, H. Primakoff // Phys. Rev. 1940. V. 58. P. 1098–1113.
2. Циберкин К.Б. Спин-волновое описание двумерного парамагнетика в магнитном поле / К.Б. Циберкин, Т.С. Белозерова, В.К. Хеннер // Вестник Пермского университета. Физика. 2016. № 2 (33). С. 35–48.

3. *Фельдман Э. Б.* Спин-волновая теория ЯМР в твердых телах при низких температурах / Э.Б. Фельдман, А.К. Хитрин // ЖЭТФ. 1990. Т. 98, вып. 3. С. 967–977.

4. *Pake G.* Nuclear resonance absorption in hydrated crystals: fine structure of the proton line // J. Chem. Phys. 1948. V. 16. P. 327–336.

5. *Abragam A.* Nuclear magnetism: order and disorder / A. Abragam, M. Goldman. – Oxford : Clarendon Press, 1982. – 626 p.

6. *Ghoshray K.* Observation of a Pake doublet in the  $^1\text{H}$  nuclear-magnetic-resonance spectrum of  $\text{CeNiInH}_x$  / K. Ghoshray, B. Bandyopadhyay, M. Sen, A. Ghoshray, N. Chatterjee // Phys. Rev. B. 1993. V. 47. P. 8277.

7. *Найфэ А.* Методы возмущений / А.Х. Найфэ. – М. : Мир, 1976. – 456 с.

## ДЕТЕКТОР ТЕРАГЕРЦОВОГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА

*П.А. Чижев*<sup>1</sup>, *В.В. Букин*<sup>1</sup>, *Т. Каплас*<sup>2</sup>, *Н. Немото*<sup>3</sup>, *К. Конииши*<sup>3</sup>,  
*М. Кувата-Гоноками*<sup>3</sup>, *П.А. Образцов*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт общей физики РАН, Москва

<sup>2</sup>Университет восточной Финляндии, Йоэнсуу

<sup>3</sup>Токийский университет, Япония

pvch@inbox.ru

В последнее время графен привлекает внимание как перспективный материал для применений в терагерцовом диапазоне. Продемонстрирована возможность возбуждения фемтосекундными лазерными импульсами сверхбыстрых фототоков в графене, приводящих к эмиссии терагерцового излучения [1, 2]. Существует возможность регистрации мощности терагерцового излучения по возбужденному им фототоку в графене [3].

В данной работе представлены экспериментальные результаты по регистрации электрического поля терагерцовых импульсов по отклику фотопроводящего детектора на основе графена.

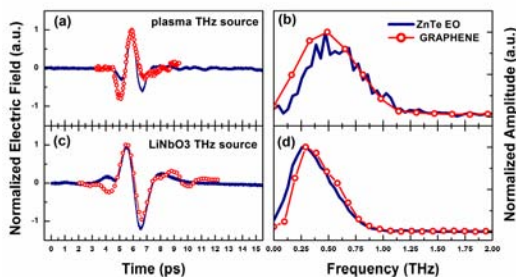
Детекторы были выполнены на диэлектрических подложках из плавленого кварца путем химического осаждения из паровой фазы графитного материала с последующим нанесением золотых контактов.

В исследовании использовалось три источника терагерцового излучения при использовании фемтосекундных лазерных импульсов. Использовались две фемтосекундных лазерных системы: на основе титан-сапфира (775 нм, 2,5 мДж, 150 фс, 12 мм, 1 кГц) и на основе кристалла Yb:KGW (1030 нм, 1 мДж, 200 фс, 10 мм, 5 кГц). Для получения наиболее мощных ТГц-импульсов использовалась схема с оптическим выпрямлением лазерного излучения с наклонным фронтом интенсивности в кристаллах ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) [4] для обеих лазерных систем. В качестве дополнительного, менее мощного, источника применялась фемтосекундная лазерная плазма, создаваемая при фокусировке двухчастотных лазерных импульсов (первая и вторая гармоники титан-сапфирового лазера) [5].

Эксперименты выполнялись по схеме накачка – зондирование. Мощный пучок накачки использовался для генерации терагерцового излучения, а слабый зондирующий пучок – для регистрации поля на детекторе. Время прихода зондирующего импульса относительно терагерцового изменялось при прохождении управляемой линии оптической задержки. Детектор на основе графена устанавливался таким образом, что падающие на поверхность детектора терагерцовый и оптический пучки пространственно пересекались. Для регистрации фототока детектор коаксиальным кабелем подключался к быстрому цифровому осциллографу (полоса  $> 300$  МГц). Амплитуда сигнала с детектора измерялась для набора задержек с шагом по времени прихода зондирующего лазерного импульса 100 фс.

Для получения опорных данных о поле терагерцовых импульсов применялись схемы электрооптического детектирования на основе кристаллов теллурида цинка (ZnTe, для титан-сапфировой системы) и фосфата галлия (GaP, для Yb:KGW-системы).

Зарегистрированные графеновым детектором временные формы поля терагерцовых импульсов хорошо согласуются с данными, полученными электрооптическим стробированием (рис. 1). Таким образом, пленки на основе графена подходят для создания детекторов поля терагерцовых импульсов, что открывает перспективы для создания простых, дешевых и масштабируемых широкополосных детекторов.



**Рис. 1.** Временные формы поля терагерцовых импульсов и соответствующие им спектры, полученные с детектора на основе графена и при электрооптическом детектировании

### Литература

1. *Obraztsov, P.A.* All-optical control of ultrafast photocurrents in unbiased graphene / P.A. Obraztsov, T. Kaplas, S.V. Garnov, M. Kuwata-Gonokami, A.N. Obraztsov, Y.P. Svirko // *Scientific Reports*. 2014. V. 4. Art. 4007.
2. *Pretchel, L.* Time-resolved ultrafast photocurrents and terahertz generation in freely suspended graphene / L. Pretchel, L. Song, D. Schuh, P. Ajayan, W. Wegscheider, A. W. Holleitner // *Nature Communications*. 2012. V. 3. Art. 646.

3. *Karch, J.* Terahertz Radiation Driven Chiral Edge Currents in Graphene / J. Karch, C. Drexler, P. Olbrich, M. Fehrenbacher, M. Hirmer, M.M. Glazov, S.A. Tarasenko, E.L. Ivchenko, B. Birkner, J. Eroms, D. Weiss, R. Yakimova, S. Lara-Avila, S. Kubatkin, M. Ostler, T. Seyller, S.D. Ganichev // *Phys. Rev. Lett.* 2011. V. 107. P. 276601.

4. *Hebling, J.* Generation of high-power terahertz pulses by tilted-pulse-front excitation and their application possibilities / J. Hebling, K.-L. Yeh, M.C. Hoffmann, B. Bartal, K.A. Nelson // *J. Opt. Soc. Am. B.* 2008. V. 25, № 7. P. B6–B19.

5. *Cook, D.J.* Intense terahertz pulses by four-wave rectification in air / D.J. Cook, R.M. Hochstrasser // *Opt. Lett.* 2000. V. 25, № 16. P. 1210–1212.

## ХИМЕРЫ И ПЕРЕМЕЖАЕМОСТЬ В АНСАМБЛЕ СВЯЗАННЫХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ ЛОРЕНЦА

*И.А. Шепелев, В.С. Анищенко*

Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
igor\_sar@li.ru

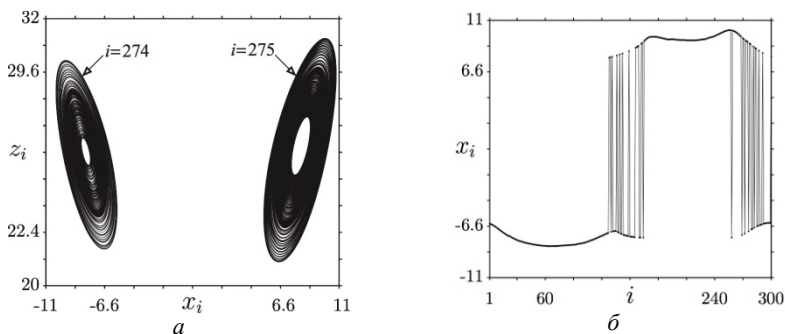
Мы показываем, что сдвиг эффективных параметров парциального осциллятора Лоренца при определенных значениях параметров связи приводит к режимам негиперболического аттрактора. Действительно, динамика элемента может даже становиться бистабильной. В таких режимах наблюдаются режимы химерных состояний, по своим свойствам близким к двухъямным химерам, найденным в ансамбле связанных бистабильных элементов [1].

Исследуется ансамбль нелокально-связанных осцилляторов Лоренца, описываемый уравнениями

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= \xi(y_i - x_i) + \frac{\sigma}{2P} \sum_{k=i-P}^{i+P} (x_k - x_i), \\ \dot{y}_i &= x_i(\rho - z_i) - y_i + \frac{\sigma}{2P} \sum_{k=i-P}^{i+P} (y_k - y_i), \\ \dot{z}_i &= x_i y_i - \beta z_i, \\ x_{i+N}(t) &= x_i(t), \quad y_{i+N}(t) = y_i(t), \\ z_{i+N}(t) &= z_i(t), \quad i = 1, \dots, N, \end{aligned} \tag{1}$$

где  $\xi$ ,  $\rho$ ,  $\beta$  – управляющие параметры индивидуальной системы Лоренца,  $P$  – число соседей, связанных с  $i$ -м элементом с каждой стороны (мы рассматриваем ансамбль, состоящий из  $N = 300$  элементов),  $\sigma$  – сила связи по соответствующим координатам. Мы предполагаем, что осцилляторы связаны только по первым двум. Управляющие параметры парциальной системы выбраны как  $\xi = 8/3$ ,  $\rho = 28$  и  $\beta = 10$ , что соответствует хаотическому гиперболическому аттрактору Лоренца.

Интересным представляется тот факт, что сила связи вызывает сдвиг эффективных значений управляющих параметров парциального элемента ансамбля [2]. При увеличении силы связи происходит перестройка фазового пространства ансамбля (1). Эти изменения выглядят следующим образом. Аттрактор индивидуальной системы Лоренца перестает быть гиперболическим и приобретает характерные черты бистабильных систем, а именно: реализуются два сосуществующих хаотических аттрактора, соответствующие областям положительных и отрицательных значений переменных  $x$  и  $y$ . Характерные проекции фазового портрета для этого случая представлены на рис. 1, *а*. Пространственная структура в данном режиме характеризуется сосуществованием кластеров когерентности и некогерентности. Пример такой пространственной структуры показан на рис. 1, *б*.



**Рис. 1.** Двухъямная химера в системе (1) при  $R = 63$  и  $\sigma = 0,72$ : *а* – проекции фазового портрета для двух соседних осцилляторов; *б* – мгновенный пространственный профиль

По своим свойствам двухъямные химеры в ансамбле (1) близки к режиму solitary states [3]. Однако в случае двухъямных химер осцилляторы с нерегулярным пространственным распределением (solitary states) образуют кластеры некогерентности.

## Литература

1. *Shepelev, I.A.* Chimera states in ensembles of bistable elements with regular and chaotic dynamics / I.A. Shepelev, A.V. Bukh, G.I. Strelkova, T.E. Vadivasova, V.S. Anishchenko // *Nonlinear Dyn.* 2017. V. 90. P. 2317–2330.
2. *Omelchenko, I.* Loss of coherence in dynamical networks: Spatial chaos and chimera states / I. Omelchenko, Y. Maistrenko, P. Hövel, E. Schöll // *Phys. Rev. Lett.* 2011. V. 106. P. 234102.
3. *Semenova, N.I.* Coherence incoherence transition in ensembles of nonlocally coupled chaotic oscillators with nonhyperbolic and hyperbolic attractors / N.I. Semenova, E.V. Rybalova, G.I. Strelkova, V.S. Anishchenko // *Regular and Chaotic Dynamics.* 2017. V. 22, № 2. P. 148–162.

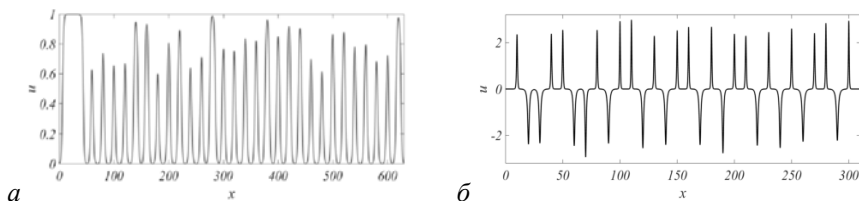
# СОЛИТОННЫЙ ГАЗ В РАМКАХ УРАВНЕНИЯ ГАРДНЕРА, ОПИСЫВАЮЩЕГО СЛАБОНЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ В ДИСПЕРГИРУЮЩИХ СРЕДАХ

*Е.Г. Шургалкина*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
eshurgalina@mail.ru

Данная работа представляет собой исследование солитонной турбулентности в длинноволновых системах, описываемых уравнением Гарднера, представляющим собой обобщенное уравнение Кортевега – де Вриза с двумя нелинейностями: квадратичной и кубической. Уравнение относится к классу интегрируемых уравнений нелинейной математической физики с существенно разной динамикой, зависящей от знака кубической нелинейности. Оно выводится с помощью асимптотических методов в случае, когда квадратичная нелинейность имеет тот же порядок, что и кубическая. Оно описывает ионно-звуковые волны в плазме, внутренние волны в стратифицированном океане, волны в размерно-квантованных пленках. Солитонные решения уравнения Гарднера хорошо известны, в частности при отрицательном знаке кубической нелинейности возможны так называемые толстые солитоны [1]. В случае положительного знака кубической нелинейности возможна модуляционная неустойчивость в рамках этого уравнения [2–4].

Рассматривается динамика двух типов солитонного газа в зависимости от знака кубической нелинейности (рис. 1).



**Рис. 1.** Начальные солитонные поля: *а* – в рамках уравнения Гарднера с отрицательной кубической нелинейностью, *б* – с положительной кубической нелинейностью

В первом случае (рис. 1, *а*) солитон предельной амплитуды может значительно влиять на статистические характеристики волновых полей. Получен критерий определения вклада толстого солитона в высшие статистические моменты солитонного газа, зависящий от отношения «массы» (первого интеграла) толстого солитона и «массы» остальных солитонов в поле. Так, если толстый солитон составляет менее 25 % массы всего солитонного газа, то его вклад в статистические моменты незначительный, и основную роль будут играть солитоны умеренной амплитуды.

В случае уравнения Гарднера с положительной кубической нелинейностью возможно существование как положительных, так и отрицательных солитонов (рис. 1, б), причем отрицательные солитоны ограничены по амплитуде так называемым алгебраическим солитоном. В работах [5, 6] было показано, что в рамках модифицированного уравнения Кортевега – де Вриза в результате взаимодействия разнополярных солитонов возможно возникновение аномально большой волны (волны-убийцы), а ее амплитуда зависит от количества взаимодействующих солитонов и их амплитуд. В данной работе демонстрируется, что это также справедливо и для уравнения Гарднера с положительной кубической нелинейностью. Показано, что нелинейное взаимодействие ведет к увеличению статистических моментов солитонного газа (а именно асимметрии и эксцесса), а также к увеличению «хвостов» функций распределения амплитуд волн.

Исследования выполнены при финансовой поддержке грантов РФФИ (16-32-60012 мол\_а\_дк, 17-05-00067, 16-02-00167, 18-02-00042).

### Литература

1. *Пелиновский, Е.Н.* Генерация и взаимодействие солитонов большой амплитуды / Е.Н. Пелиновский, А.В. Слюняев // Письма в ЖЭТФ. 1999. Т. 67, № 9. С. 628–633.
2. *Талипова, Т.Г.* Механизмы образования внутренних «волн-убийц» // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2011. Т. 4, № 4. С. 58–70.
3. *Grimshaw, R.* Rogue internal waves in the ocean: long wave model / R. Grimshaw, E. Pelinovsky, T. Talipova, A. Sergeeva // European Physical Journal Special Topics. 2010. V. 185. P. 195–208.
4. *Grimshaw, R.* Short-lived large-amplitude pulses in the nonlinear long-wave model described by the modified Korteweg–de Vries equation / R. Grimshaw, E. Pelinovsky, T. Talipova, M. Ruderman, R. Erdelyi // Studied Applied Mathematics. 2005. V. 114, № 2. P. 189–210.
5. *Shurgalina, E.* Nonlinear dynamics of a soliton gas: Modified Korteweg–de Vries equation framework / E. Shurgalina, E. Pelinovsky // Physics Letters A. 2017. V. 380, № 24. P. 2049–2053.
6. *Slunyaev, A.V.* Role of Multiple Soliton Interactions in the Generation of Rogue Waves: The Modified Korteweg–de Vries Framework / A.V. Slunyaev, E.N. Pelinovsky // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 117. Art. 214501.

# ДИНАМИКА РЕЗОНАТОРА С НЕЛИНЕЙНЫМ МЕТАМАТЕРИАЛОМ И ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ С ЗАДЕРЖКОЙ

Е.А. Ярунова, А.А. Кренц, Н.Е. Молевич

Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН  
Самарский национальный исследовательский университет  
им. академика С.П. Королева  
liza.yarunova@mail.ru

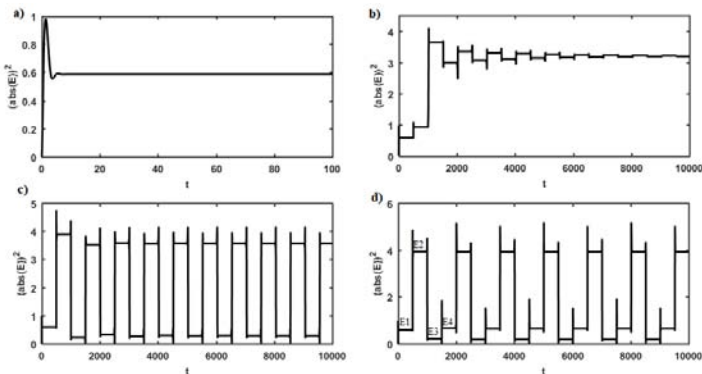
Изучение левых метаматериалов является предметом интенсивных исследований за последние десять лет [1]. Пространственно-временная динамика кольцевой полости, содержащей нелинейный метаматериал, описывается уравнением Луджиато – Лефевра с дифракцией [2]. Целью данной работы было исследовать влияние дополнительной обратной связи с задержкой на динамику оптического поля.

Мы рассматриваем обратную связь с задержкой по времени в стандартной модели кольцевого резонатора с дополнительным зеркалом. Динамика описывается уравнением

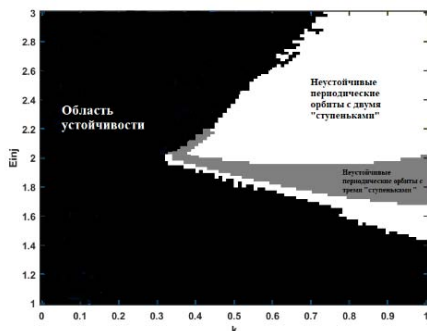
$$\frac{dE}{dt} = -(1 + i\theta)E + E_{inj} + i|E|^2 E + ke^{i\varphi} E(t - \tau), \quad (1)$$

где  $k$  – доля излучения, отразившегося от зеркала;  $\varphi$  – набег фазы;  $\tau$  – задержка обратной связи;  $E_{inj}$  – амплитуда входного луча;  $\theta$  – параметр отстройки.

В ходе работы мы провели численное исследование системы, описываемой уравнением (1). В результате была получена нетривиальная динамика, определяемая как неустойчивые периодические орбиты. Была поставлена цель найти зависимость полученной динамики от силы обратной связи и времени задержки при фиксировании остальных параметров.



**Рис. 1.** Временная эволюция оптического поля:  $\varphi = \pi/2$ ,  $\tau = 500$ ,  $E_{inj} = 2$ ;  
 $\theta = 3$  (a),  $k = 0,1$  (b),  $k = 0,3$  (c),  $k = 0,9$  (d)



**Рис. 2.** Бифуркационная диаграмма, представляющая зависимость динамики от  $k$  и  $E_{inj}$

В результате исследования было получено, что с увеличением параметров  $k$  и  $\tau$  динамика усложняется, постепенно переходя к неустойчивым периодическим орбитам. Представленные здесь результаты могут быть полезны при оптическом переключении или хранении информации.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-32-60151 мол\_а\_дк, государственного задания вузам и научным организациям в сфере научной деятельности (3.1158.2017).

### Литература

1. *Augustine, M.U.* Roadmap on optical metamaterials / M.U. Augustine, J. Zubin, D.N. Luca // *Journal of Optics*. 2016. Vol. 18, № 9. P. 093005.
2. *Lugiato, L.A.* Spatial Dissipative Structures in Passive Optical Systems / L.A. Lugiato, R. Lefever // *Physical Review Letters*. 1987. Vol. 58, № 21. P. 2209–2211.

## СИНХРОНИЗАЦИЯ В МОДЕЛЯХ НЕЙРОН-ГЛИАЛЬНЫХ СЕТЕЙ

*С.Ю. Маковкин, М.В. Иванченко, А.А. Заикин*

Институт информационных технологий, математики и механики, ННГУ,  
Нижний Новгород  
makovkin@neuro.nnov.ru

В работе рассматривается модель двух связанных сетей активных элементов с разной топологией и исследуются эффекты синхронизации.

Возьмем сеть из осцилляторов, состоящую из двух слоев. Один слой представляется собой ансамбль глиальных клеток – астроцитов, другой слой состоит из нейрональных клеток. Пусть эти сети будут одного размера  $N \times N$  и располагаются один над другим.

Глиальный слой состоит из упорядоченных элементов (нодов), связанных между собой решеткой, т.е. каждый элемент имеет связь с четырьмя соседями (внизу, справа, вверх, слева). Кроме того, каждый из элементов глиального слоя вместе с каждым из своих четырех соседей связан с соответствующим элементом из нейрональной сети.

Нейронный слой имеет такую же структуру и размеры, как глиальный слой, но нейроны в нем связаны друг с другом случайно. Случайная связь имеет распределение случайного графа по методу Эрдёше – Реньи.

Динамика эволюции такой системы описывается классической системой фазового представления Курамото:

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i + \sum_{j=1}^N \sigma_{ij} A_{ij} \sin(\theta_j - \theta_i).$$

$\sigma_G$  – параметр межэлементной связи внутри глиальной сети,  $\sigma_N$  – параметр межэлементной связи внутри нейрональной сети,  $\sigma_{GN}$  – сила связи между слоями.

$\theta_i$  и  $\omega_i$  являются фазой и натуральной частотой  $i$ -го осциллятора. Взаимодействия внутри нейрональной сети являются более быстрыми, чем внутри глиальной сети, поэтому пусть начальные распределения частот будут следующими:  $0,5 \leq \omega_i \leq 1,5$  для глиальной сети и  $9,5 \leq \omega_i \leq 10,5$  для нейрональной сети.  $A$  представляет собой матрицу связей.

Глобальный уровень связи в сети будем считать как параметр порядок связи Курамото, записанный в таком виде:

$$r = \left| \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e^{i\theta_j} \right|.$$

Рассмотрим первый случай, когда нейронный и глиальный слой не связаны. Основные результаты сформулированы следующим образом:

– глобальный уровень связи в сети нейронов не зависит от размера системы и имеет поведение явно схожее с классической системой Курамото (связь «все со всеми»);

– динамика в периодической решетчатой структуре глиальной сети и уровень синхронизации сильно зависят от размеров системы: параметр  $r_{glial}$  падает при увеличении размеров системы;

– в пределе при  $N \rightarrow \infty$  параметр  $r_{glial} \rightarrow 0$ , что согласуется с поведением одномерных цепочек (у них среднее поле отсутствует).

Рассмотрим второй случай с включенной связью между слоями и обсудим полученные результаты и эффекты в системе. Теперь будем учитывать влияние параметра  $\sigma_{GN}$ . Учитываем условие  $\sigma_G = \sigma_{GN}$ .

При любых значениях нейрональной силы связи явно виден эффект гашения синхронизации в районе значения  $\sigma_G = \sigma_{GN} = 0,35$  для обоих слоев, глиального и нейронального. После этого значения происходит возобновление эффекта полной синхронизации.

Можно сформулировать следующие важные выводы:

- среднее поле в ансамбле глии возникает из-за ансамбля нейронов;
- наблюдается частичная десинхронизация в ансамбле нейронов и в ансамбле глии;
- происходит резкий переход к синхронизации.

Результаты работы опубликованы в статье *Makovkin S. et al. Multiplexing topologies and time scales: The gains and losses of synchrony* (Physical Review E. 2017. Vol. 96, № 5. Art. 052214).

Работа выполнена при поддержке РФФ (соглашение № 16-12-00077).

### Литература

1. *Kuramoto, Y., Araki, H.* (ed.). Lecture Notes in Physics // International Symposium on Mathematical Problems in Theoretical Physics. New York : Springer-Verlag, 1975. Vol. 39. P. 420.

2. *Kuramoto, Y.* Chemical Oscillations, Waves, and Turbulence. New York : Springer-Verlag, 1984.

3. *Strogatz, S.* From Kuramoto to Crawford: Exploring the onset of synchronization in populations of coupled oscillators // Physica D. 2000. Vol. 143 (1–4).

4. *Acebrón, J.A., Bonilla, L.L., Vicente, P., Conrad, J., Ritort, F., Spigler, R.* The Kuramoto model: A simple paradigm for synchronization phenomena // Reviews of Modern Physics. 2005. Vol. 77. P. 137–185.

5. *Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю.* Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. М. : Техносфера, 2003.

6. *Komarov M., Pikovsky A.* Intercommunity resonances in multifrequency ensembles of coupled oscillators // Physical Review E. 2015. Vol. 92. Art. 012906.

## ABSTRACTS

### MUTUAL PHASE LOCKING OF TWO GYROTRONS COUPLED WITH DELAY

*A.B. Adilova<sup>1</sup>, S.A. Gerasimova<sup>1</sup>, and N.M. Ryskin<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Saratov State University, Saratov

<sup>2</sup>Saratov Branch, Institute of Radio Engineering and Electronics, RAS

Coherent operation of several gyrotrons is important for power combining applications, especially for electron-cyclotron resonance plasma heating. In this paper, a model of two coupled gyrotron oscillators is developed and basic regimes of the mutual interaction are studied. Time delay of the coupling signal traveling between two gyrotrons strongly affects the pattern of phase-locking regimes.

### LABORATORY MODELING OF THE DYNAMICS OF DENSITY IRREGULARITIES AND DISTURBANCES OF THE MAGNETIC FIELD IN A MAGNETOACTIVE PLASMA AT A LARGE-SCALE PLASMA DEVICE "KROT"

*N.A. Aidakina*

Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

The results were obtained on the studying the dynamics of density and magnetic field disturbances in a magnetized plasma initiated by powerful radio pulse. The experiments were performed on a large-scale plasma device "KROT" (IAP RAS, Nizhny Novgorod). The spatial structures and dynamics of plasma irregularities generated under the action of electromagnetic pulses were studied in detail. The pulse duration and the pump power were varied in a wide range. Experimental results show that at a high pump power level the lifetime of the plasma irregularity can exceed substantially the duration of the pump pulse. The relaxation processes of such density irregularities were studied. Density irregularities transfer processes are rather complicated. Analysis of the maps of the magnetic field and density disturbances indicates the presence of several characteristic velocities of the transfer along the magnetic field. Several mechanisms responsible to such dynamics of the irregularities are discussed.

### THE INFLUENCE OF POCKELS ELECTRO-OPTIC EFFECT ON THE SPECTRUM PARAMETRIC DOWN-CONVERSION

*D.O. Akatiev, A.A. Kalachev*

Kazan E.K. Zavoisky Physical-Technical Institute, Kazan

In this paper we discuss a method controlling the spectrum of spontaneous parametric down-conversion under the influence external electric field due to the Pockels effect. In addition, we consider the possibility of stabilizing the carrier frequency of single photon source based on spontaneous parametric down-conversion. A scheme for generating entangled states was proposed based on the electro optic Pockels effect in a potassium dihydro orthophosphate crystal.

## CONTROL OF LOCALIZED NON-LINEAR WAVES IN MECHANICAL SYSTEMS

*I.D. Antonov, A.V. Porubov*

Institute of Problems of Mechanical Engineering, Russian Academy of Sciences, St.Petersburg

The distributed feedback control is developed to support stable propagation of localized non-linear waves for the sine-Gordon equation, the double sine-Gordon equation and the dispersive sine-Gordon equation. The control allows generation and propagation of desired bell-shaped, kink-shaped and breather waves with permanent velocity, with a functional form that does not correspond to the known analytical solutions of the equations. The control algorithm is justified by the presented model of highly nonlinear shear waves propagation in an elastic layer laying on the visco-elastic foundation subjected to the upper surface external loading. The last term implements distributive control.

The work was performed in IPME RAS, supported by the Russian Science Foundation (grant 14-29-00142).

## CURRENT INSTABILITY OF ELECTRON-POSITRON PLASMA IN RELATIVISTICALLY INTENSE LASER FIELDS: DYNAMICS OF THE ANGULAR DISTRIBUTION OF RADIATION

*A.V. Bashinov, E.S. Efimenko, A.V. Kim*

Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

At future high-intensity laser facilities the electron-positron ( $e^-e^+$ ) plasma can become regularly accessible for experimental studies. In case of the avalanche type of  $e^-e^+$  pair production, the rapid growth of the particle number can lead to quick formation of plasma. The created  $e^-e^+$  plasma can determine specific features of interaction with laser radiation. Such plasma exhibits unusual properties, for example, absence of Faraday rotation, enhancement of stimulated Brillouin and suppression of Raman scattering. In our work we analyze a new type of current instability that emerges for  $e^-e^+$  plasma in laser fields of relativistic intensity. Electrons and positrons, being accelerated in opposite directions by the electric field, generate a current whose perturbations develop into the plasma stratification along the magnetic field. Due to mass equality of oppositely charged particles, this instability can quickly appear on the femtosecond timescale. Initially, the stratified plasma represents a number of current sheets. However, the created sheets attract to each other and merge, and as a result, a quasiplanar structure of two sheets can be formed. Such plasma dynamics imposes an imprint on the angular distribution of generated photons.

## CONTROL OF CONNECTIONS FORMING IN THE NEURAL NETWORK WITH STDP PLASTICITY

*M.V. Bazhanova<sup>1</sup>, S.A. Lobov<sup>1</sup>, K.I. Balashova<sup>1</sup>, V.A. Makarov<sup>1,2</sup>, V.B. Kazantsev<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>National Research Nizhny Novgorod State University named by N.I. Lobachevsky

<sup>2</sup>Universidad Complutense de Madrid

In our time neural networks represent a special interest for researchers. Based on the principle and organization of real neural networks, model networks are widely used, for example, in the processing of various signals, for data classification, in the management

of mechanized devices and robots, for building control systems. At the same time, the problem associated with control of network activity that occurs under the effect of electrical stimulation from a different number of electrodes is still unresolved. In this paper, we investigate changes in the nature of connections in neural networks that arise under the external stimulation, and the possibility of directional connections forming.

According to the rule of STDP-plasticity, stimulation of postsynaptic neuron after presynaptic causes the connection reinforcement. Thus, by stimulating individual neurons in the desired sequence, it is possible to achieve the propagation of impulses in a given direction. However, on the full-scale neural networks, the STDP protocol works ambiguously and requires additional consideration. To overcome this limitation, we propose to use a structured neural network and show that it is easily learned and allows to reach circulating activity in the network after disabling stimulation.

The work was supported by the Russian Science Foundation (proj. № 15-12-10018)

## **THE USE OF BASE DYNAMIC MODELS IN SATELLITE DATA EVALUATION**

*M.V. Belikovich, M.Yu. Kulikov, A.A. Nechaev, T.S. Ermakova, A.M. Feigin*

Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

We present the method for statistical evaluation of simultaneous measurements of several atmospheric components. We consider the application of the method to simultaneous measurements of daytime mesospheric OH, HO<sub>2</sub>, and O<sub>3</sub> by MLSAura satellite.

In the core of the method is that the local evolution of the components (OH, HO<sub>2</sub>, and O<sub>3</sub>) could be described by one algebraic equation. The equation is derived using the approach of base (or essential) dynamic models. The only parameters of the equation are temperature, neutral density, local zenith angle, and the rates of 9 reactions. The simulation by 3D chemical-transport model shows that the discrepancy between the calculated evolution of the components and the equilibrium one (given by the equation) does not exceed 3–4% in full range of altitudes independently of a season or latitude. The method utilizes Bayesian approach in treatment of the simultaneous measurements of OH, HO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub>. It uses the derived equation and takes into account the measurement error. We present the results of the technique's application to MLS/Aura data. Also we describe some mathematical peculiarities that arise in application of the method as the conditions of Borel-Kolmogorov paradox arise.

## **AMPLIFICATION OF ALFVEN WAVES DUE TO NONLINEAR ORTOGONAL INTERACTION WITH FAST MAGNETOACOUSTIC WAVE IN HEAT-RELEASING ELECTRICALLY CONDUCTIVE MEDIUM**

*S.A. Belov<sup>1,2</sup>, N.E. Molevich<sup>1,2</sup>, D.I. Zavershinskii<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Samara National Research University, Samara

<sup>2</sup>Lebedev Physical Institute, Samara

Orthogonal (swing wave-wave) interaction between Alfvén and fast magnetoacoustic wave in heat-releasing conductive medium is considered. It is shown that there is exponential growth of Alfvén wave amplitude with a linear growth rate when the medium is not heat-releasing and conductive. Finite conductivity accounting leads to appearance of the parametric amplification threshold and bounds the parametric amplification time.

Heat-releasing can lead to additional damping of fast magnetoacoustic waves and decreasing of parametric amplification time or, in the case of isentropic instability, to amplification of fast magnetoacoustic waves. The amplification is accompanying by the bi-exponential growth of Alfvén waves amplitude due to parametric energy transfer from fast magnetoacoustic waves.

## BREATHING CHIMERA IN A SYSTEM OF PHASE OSCILLATORS

*M.I. Bolotov<sup>1</sup>, L.A. Smirnov<sup>2,1</sup>, G.V. Osipov<sup>1</sup>, A. Pikovsky<sup>3,1</sup>*

<sup>1</sup> Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

<sup>2</sup> Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

<sup>3</sup> Institute for Physics and Astronomy, University of Potsdam, Germany

We study formation of chimeras in a one-dimensional medium of identical oscillators with nonlinear coupling. This coupling crucially depends on the local order parameter measuring the level of synchrony: the coupling promotes synchrony for asynchronous states and breaks synchrony if it is strong. As a result, spatially homogenous state in this medium is that of partial synchrony. To study the evolution of this state we formulate the problem in terms of the local complex order parameter, which describes local level of synchrony, and formulate the system of partial differential equations for this quantity. This allows us to formulate the problem of inhomogeneous states as the pattern formation one. First, we construct stationary chimeras and explore their linear stability properties. Next, based on numerical modeling, we show that within a certain range of parameters, such structures can evolve into periodically varying long-lived chimera states (breather-chimeras), or, for other values of the parameters, turn into more complex regimes with irregular behaviour of the local order parameter (turbulent chimeras).

## NEURON-LIKE GENERATOR WITH SPIKING AND BURSTING DYNAMICS

*D.I. Bolshakov, M.A. Mishchenko, V.V. Matrosov*

National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

The hardware implementation of the neuron-like model based on the phase-locked loop has been developed. Mathematical modelling carried out earlier has shown the presence of different self-oscillating modes. Oscillations in these modes are qualitatively similar to some dynamic modes of neurons. The number of spikes in burst could be controlled by model parameters. Parameter space of the model has been separated into areas of different modes presence by bifurcation analysis of model dynamics.

We developed a hardware electronic prototype of the model. Oscillations in the prototype have been observed. Similar self-oscillating modes have been found in hardware as in mathematical model. Areas of different dynamic modes have been investigated experimentally.

Moreover, excitability of the model has been observed under external periodic pulse stimulation both theoretically and experimentally. Synchronization between evoked pulses of the prototype and stimulation pulses has been discovered.

This work was supported by RFBR Grant No. 16-31-60080 mol\_a\_dk and by President Grant No. MK-2726.2017.2.

## **SELF-ORGANIZING TRANSPORT LIGHTNING INITIATION MODEL**

*A.A. Bulatov, D.I. Iudin*

Institute of Applied Physics of Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

An advanced 3D numerical model of lightning initiation and development is presented. The key features of the model include probabilistic branching, streamer-to-leader transition, bidirectional propagation, non-zero internal electric field, simultaneous growth of multiple branches, physical timing, and, for the first time, probabilistic propagation field threshold and channel decay. Also the proposed model takes into account the differences between initiation and propagation fields of positive and negative streamer discharges.

## **TERAHERTZ FIELD GRAPHENE BASED DETECTOR**

*P.A. Chizhov*

A.M. Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow

We report time-domain terahertz pulse electric field registration by use of graphene based photoconductive detector. The device is simple with the sensitivity achieved comparable to traditional electro-optical sampling technique.

## **ON THE ROLE OF TURBULENCE IN ELECTRIFICATION OF DISPERSED MULTI-PHASE MEDIA**

*S.O. Demytyeva, E.A. Mareev*

Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod

Numerous natural phenomena are accompanied with the electric field growth and electric discharges. The large-scale electric field growth in thunderclouds and dust storms is usually provoked by the electric charge transfer during particles collisions. It was showed in field measurements that the turbulent energy dissipation rate in thunderclouds is quite high. However, modern theoretical studies and models of thunderstorms considering the turbulent diffusion often shows that turbulence leads to weakening of the electric field. This work is based on the suggestion that the relative velocity fluctuations caused by turbulence may produce the electric field growth. In this work, peculiarities of inductive and non-inductive mechanisms of charge generation in thunderclouds were studied. It was shown, that in some cases the turbulent charging current is of the same order with the charging current, which is present in thunderclouds in the absence of turbulence.

Thunderstorms are dangerous natural phenomena, which we should try to predict carefully. We have used the present study for improvement of the electric parameters parameterization, which was developed before, and have simulated some thunderstorms in Nizhny Novgorod. Consideration of the turbulent effects during modeling of electric parameters has identified some differences in electric parameters distributions.

## **RESONANCE STRUCTURES AND THEIR BIFURCATION IN THE ABC-FLOW**

*A.A. Didov<sup>1,2</sup>, M.Yu. Uleysky<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Far-Eastern Federal University, School of Natural Sciences, Vladivostok

<sup>2</sup>Pacific Oceanological Institute of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of Nonlinear Dynamical Systems, Vladivostok

The ABC-flow is a 3D simple model for studying different nonlinear dynamical processes, e.g., in astrophysics of magnetic fields in stars and in hydrodynamical flows.

We study resonances of the ABC-flow in the near integrable case. This is an interesting example of a nondegenerate Hamiltonian system with 3/2 degrees of freedom in which simultaneous existence of two resonances of the same order is possible. Analytical conditions of the resonance existence are received. It is shown numerically that the largest  $n:1$  ( $n = 1, 2, 3$ ) resonances exist, and their energies are equal to theoretical energies in the near integrable case. We provide analytical and numerical evidences for existence of two branches of the largest  $n:1$  ( $n = 1, 2$ ) resonances in the region of finite motion.

## **HORIZONTAL VIBRATIONS AND EFFECTIVE GRAVITY INVERSION IN A TWO-LAYER SUSTEM OF INVISCID LIQUIDS**

*A.V. Dolmatova<sup>1</sup>, D.S. Goldobin<sup>1,2</sup>, T.P. Lyubimova<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm

<sup>2</sup>Perm State University, Perm

We study the waves at the interface between two thin horizontal layers of immiscible liquids subject to high frequency tangential vibrations. Nonlinear governing equations are derived for the cases of two- and three-dimensional flows and arbitrary ratio of layer thicknesses. The derivation is performed within the framework of the long-wavelength approximation, which is relevant as the linear instability of a thin-layers system is long-wavelength. The dynamics of equations is integrable and the equations themselves can be compared to the Boussinesq equation for the gravity waves in shallow water, which allows one to compare the action of the vibrational field to the action of the gravity and its possible effective inversion.

## **HIGH-HARMONIC GENERATION FROM LASER SOURCES OF MID-IR RANGE: SCALING LAW OF THE TRANSFORMATION EFFICIENCY WITH LASER WAVELENGTH**

*A.S. Emelina, M.Yu. Emelin, M.Yu. Ryabikin*

Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

Recently, significant progress has been achieved in the development of high-power femtosecond parametric laser sources whose central wavelengths range from 1.5 to 4  $\mu\text{m}$  and beyond. These advances have opened up new perspectives in the research of strong-field laser-matter interactions. In particular, due to the proportionality of the electron ponderomotive energy to the square of the laser wavelength, a dramatic extension of the plateau in the high-harmonic spectrum to higher photon energies is possible when using mid-IR sources. The other side of the coin is that the efficiency of high-order harmonic

generation (HHG) by individual atoms turned out to scale unfavorably with the laser wavelength (typically, as  $\lambda^{-\mu}$  with  $\mu = 5-6$  for  $0,8 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 4 \mu\text{m}$ ). This decrease in the efficiency of single-atom nonlinear response can be, however, substantially compensated for by implementing phase-matched HHG at high gas pressures and large interaction lengths using gas-filled waveguides. It is therefore important to explore the scaling laws for high-harmonic yield for laser wavelengths far exceeding  $4 \mu\text{m}$ . In this contribution, we present the results of our study for wavelengths  $2 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 4 \mu\text{m}$ .

## METHOD FOR DETECTION OF SPECIFIC BEHAVIOUR PHASES IN COUPLED SYSTEMS BEING IN THE INTERMITTENT GENERALIZED SYNCHRONIZATION

*E.V. Evstifeev, O.I. Moskalenko*

Saratov State University

Nowadays synchronization of chaos in coupled oscillators is a fundamental phenomenon in nonlinear physics [1]. At that, the generalized chaotic synchronization attracts the most interest of scientists [2].

Onset of generalized synchronization is preceded by intermittent behavior. A method for detection of the phases of synchronous and asynchronous behavior is required to define characteristics of intermittency. An amplitude method is based on the auxiliary system approach and is applicable only for unidirectionally coupled oscillators [3, 4].

In this work, we proposed modified method of nearest neighbors [2] to detect those characteristics in coupled chaotic oscillators with the intermittent generalized synchronization. Two coupled Rössler's oscillators have been considered. We have chosen fixed points and related nearest neighbors in the phase space of drive system. It was supposed that phase trajectories of states (nearest to the fixed one) would still be close in the phase space of another system during the synchronous (laminar) phases, and would deviate a lot during asynchronous (turbulent) phases. Due to this condition, we have determined these phases and found statistical characteristics of intermittent behavior. Obtained with our method results are in a good agreement with the results received with the help of auxiliary system approach.

This work has been supported by Russian Science Foundation (project 14-12-00224).

1. *Boccaletti, S.* The synchronization of chaotic systems / S. Boccaletti, J. Kurths, G.V. Osipov, D.L. Valladares, C.S. Zhou // *Physics Reports*. 2002. V. 366. P. 1-101.

2. *Rulkov, N. F.* Generalized synchronization of chaos in directionally coupled chaotic systems / N. F. Rulkov, M. M. Sushchik, L. S. Tsimring, H. D. I. Abarbanel // *Phys. Rev. E*. 1995. V. 51, № 2. P. 980-994.

3. *Hramov, A. E.* Intermittent generalized synchronization in unidirectionally coupled chaotic oscillators / A. E. Hramov, A. A. Koronovskii // *Europhysics Letters*. 2005. V. 70, N. 2. P. 169-175.

4. *Abarbanel, H. D. I.* Generalized synchronization of chaos: The auxiliary system approach / H. D. I. Abarbanel, N. F. Rulkov, M. M. Sushchik // *Phys. Rev. E*. 1996. V. 53, № 5. P. 4528-4535.

## **MAGNETIZATION SWITCHING OF MAGNETIC PARTICLES IN THE CARBON NANOTUBE UNDER THE ACTION OF POLARIZED LIGHT**

*R.S. Evstigneev<sup>1</sup>, D.V. Churikov<sup>2</sup>, A.R. Safin<sup>3</sup>, O.V. Kravchenko<sup>1,2</sup>, S.S. Kharlamova<sup>1</sup>,  
M.F. Bulatov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>MGTU nam. N.E. Bauman, Moscow

<sup>2</sup>Scientific and technological center of unique instrumentation, Moscow

<sup>3</sup>National research university "MPEI", Moscow

The paper investigates the mathematical model of the processes of magnetization switching of ferromagnetic particles in the carbon nanotube under the action of polarized light. The effective magnetic field acting on a single particle is the sum of the external magnetic field, anisotropy and demagnetizing fields. The coupling between a ferromagnetic particle is described by magnetodipolar field. The distribution of ferromagnetic particles for nanotube is assumed to be random with uniform distribution. The developed model allows one to calculate the magnetization switching time from one state to another, and the magnitude of the field which is necessary for the magnetization switching of particles from one state to another. This technique can be effectively used to create a new type of memory based on carbon nanotubes and spintronics.

## **ABOUT NUMERICAL MODELING OF DAY AND NIGHT SPRITES**

*A.A. Evtushenko, F.A. Kuterin, N.N. Slyunyaev*

Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

We develop plasma-chemical self-consistent model for numerical modeling of high-altitude discharges and apply it to day and night sprites.

## **GENERATION VORTEX MOTION BY WAVES ON THE WATER SURFACE**

*S.V. Filatov, D.A. Khramov, A.A. Levchenko*

Institute of Solid State Physics RAS, Chernogolovka

Experimentally studied vortex lattice generated by surface gravity waves. To find confirmed with theoretical model, consider thin film on the surface water. Measure increase rate of vortex lattice on the water surface. Measure amplitude of vortex lattice under water surface and it decrease with depth according exponential law. Measure penetration rate of vortex lattice in depth.

## **NONLINEAR LONGITUDINAL STRAIN WAVES IN THIN LAYERED WAVEGUIDES**

*F.E. Garbuzov, Y.M. Beltukov, A.M. Samsonov*

Ioffe Institute, Moscow

The mathematical model for the longitudinal bulk strain waves in thin layered plates and rods was developed. The equation for the linear component of the longitudinal strain was derived, which, in case of homogeneous layers, has a solitary wave solution. The conservative finite difference scheme was used to simulate propagation of solitary waves in the waveguide with variation of elastic moduli along the direction of propagation. The

dependence of soliton parameters (amplitude and length) on the variation of elastic moduli was studied.

## **NEW VARIABLES FOR EMPIRICAL PROGNOSTIC ENSO MODEL**

*A.S. Gavrilov, A.F. Seleznev, D.N. Mukhin, E.M. Loskutov, A.M. Feigin*

Institute of Applied Physics of RAS, Nizhny Novgorod

We propose a new method of empirical prognostic model construction by spatially distributed observed data. The method involves two steps: construction of principal manifold and construction of evolution operator on the manifold. To construct principal manifold we propose linear dynamical mode (LDM) decomposition as an alternative to widely used empirical orthogonal function (EOF) decomposition. The evolution operator is represented as nonlinear stochastic mapping parameterized with artificial neural network including slow non-stationarity and prescribed external forcing.

We apply this method to the analysis of sea surface temperature in the tropical belt on 1960-2007 time interval and demonstrate that the LDM-based model has better prediction skill than the EOF-based model. Also we show that the resulting model allows making the forecast of El Nino Southern Oscillation (ENSO) whose quality is comparable to the leading world models for ENSO prediction.

This work is supported by the Government of the Russian Federation (Agreement No. 14.Z50.31.0033 with Institute of Applied Physics RAS) and by the Russian Science Foundation (grant № 16-12-10198).

## **SOLITON AND BREATHER TURBULENCE IN THE NLSE**

*A.A. Gelash<sup>1,2</sup> and D.S. Agafontsev<sup>1,3</sup>*

<sup>1</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk

<sup>2</sup>Institute of Thermophysics, SB RAS, Novosibirsk

<sup>3</sup>P.P. Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow

We suggest recursive numerical scheme for the Zakharov-Mikhailov variant of the dressing method, that allows us to generate multi-soliton solutions of the focusing nonlinear Schrodinger equation (NLSE) with number of solitons up to 128. Then we study numerically the statistical properties of high-density soliton gas (soliton turbulence) with respect to soliton density and velocity distribution. Special attention is paid to examination of rogue waves that appear as a result of multi-soliton collisions. Then we extend the scheme of the dressing method to the case of NLSE breathers. We study all known by now scenarios of the presence of breathers in small localized perturbations of the plane wave background. We show how the development of such perturbations leads to breather turbulence and formation of rogue waves.

## THE FORECASTING OF VERTICAL TEMPERATURE DISTRIBUTION AND EUTHROPHICATION OF INLAND WATER OBJECTS WITH FIELD MEASUREMENT DATA

*D.S. Gladskikh<sup>1,2</sup>, D.A. Sergeev<sup>1</sup>, G.A. Baydakov<sup>1</sup>, I.A. Soustova<sup>1</sup>,  
Yu.I. Troitskaya<sup>1</sup>, A.V. Ivanov<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod

<sup>2</sup>Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev

<sup>3</sup>Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering

The problem of computation of vertical temperature distribution and eutrophication of inland water objects is raised in the research. The modified version of the program complex LAKE is proposed for the forecasting of thermal regime. The modification caused changing the procedure of input data assignment, ensured the possibility of using the results from field measurements as starting profiles and led to the greater consideration of wind influence on mixing. The experimental data in combination with the data of global reanalysis and the hydrometeorological station were used for validation. Temperature values in control points, comparison of the forms of the profiles and standard deviation were analyzed to assess the numerical results. Simulation with the modified model gave results which are in good agreement with the real seasonal variations of thermal regime in lake part of Gorky water reservoir. The forecasting of eutrophication was based on these results and field measurement data. The modified Bradford-Maiero model was choosed for the purpose: average temperature of mixed layer, its thickness, and contribution of abiotic particulate matters in Secchi depth were accounted. Result of the simulation is the concentration of microalgae cells per unit of volume.

## ANALYTIC MODEL FOR ELECTROMAGNETIC FIELDS IN STRONGLY NONLINEAR WAKEFIELD

*A.A. Golovanov<sup>1</sup>, I.Yu. Kostyukov<sup>1</sup>, J. Thomas<sup>2</sup>, A.M. Pukhov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod

<sup>2</sup>Institut für Theoretische Physik I, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Düsseldorf

Plasma acceleration methods are one of the prospective areas of research in modern science. These methods use an intense ultrashort laser pulse or a relativistic bunch of charged particles to drive a wakefield in plasma, which allows obtaining acceleration gradients orders of magnitude higher than in conventional radio-frequency accelerators. Of particular interest is the strongly nonlinear (bubble) regime of plasma wakefield in which self-injection and consecutive acceleration of plasma electrons is possible. Based on the theory of the strongly nonlinear (bubble) regime of plasma wakefield in non-uniform plasma, we develop a model describing electromagnetic field components in this regime. Using the assumption of small thickness of the electron sheath on the boundary of a bubble, we develop a lowest-order perturbation theory allowing us to find simple explicit expression for all components of the electromagnetic field both inside and outside the bubble. The obtained results are verified with 3D particle-in-cell simulations which show good correspondence to the developed model.

## **THE TWO-MODE VAN DER POL GENERATOR AS A BASE ELEMENT IN A MODEL OF CENTRAL PATTERN GENERATOR**

*A.P. Gulai, S.V. Astakhov*

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Central pattern generator is a system generating coordinated patterns of motor activity without any feedback. CPG are designed as vector maps, connectionist models, neural networks and systems of coupled nonlinear oscillators. Most of CPG models used today consist of a big number of partial elements or have a complex system as a partial element. Moreover, one system generates only one regime.

We consider a simple model of a multi-mode system as a base element in a model of central pattern generator. It is the van der Pol oscillator with an additional oscillatory circuit. This system is a bi-stable system, and so several coupled systems can demonstrate a big number of various oscillatory regimes characterized by various phase shifts between oscillators. This is important for providing a robot various gaits.

The purpose of this work is to carry out the bifurcation analysis of the system of two coupled two-mode van der Pol generators and to find out how the type of coupling influences a formation of multi-stability in a phase space of the system. The result of research is bifurcation scenarios of formation of co-existing limit cycles characterized by different mutual phase shifts. These cycles correspond to different patterns of locomotor activity.

## **SYNCHRONOUS AND ASYNCHRONOUS REGIMES IN THE POWER NETWORK WITH HUB-TOPOLOGY**

*V.A. Hramenkov*

N.I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod  
Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod

We study synchronous, quasynchronous and asynchronous regimes in hub clusters of the power networks, which are simulated by ensembles of phase oscillators. Approaches allowing one to estimate the regions in the parameter space, which correspond to the global asymptotic stability of synchronous regime and also existence of quasynchronous and asynchronous regimes, are presented. These methods are illustrated by an example of a hub cluster consisting of one consumer and two generators.

## **FREQUENCY SYNCHRONIZATION BETWEEN REGULATORY LOOPS OF CIRCULATION IN MATHEMATICAL MODEL OF CARDIO-VASCULAR SYSTEM**

*Yu.M. Ishbulatov<sup>1</sup>, A.S. Karavaev<sup>1</sup>*

Saratov Branch of the Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences

We propose an original mathematical model for autonomous regulation of human cardiovascular system. The model approximates the heart with integrate-and-fire model, simulates the autonomous control of heart rate and arterial pressure. Model also simulates cardiorespiratory interaction. Two nonlinear self-exciting oscillators with delay represent autonomous regulation of arterial pressure and heart rate. This approach allowed to reproduce the experimentally observed effect of frequency synchronization between regulatory systems.

Consistency of the proposed model is validated by quantitative and qualitative reproduction of spontaneous interchange between intervals of synchronized and non-synchronized behavior, typical for autonomous regulation of real cardiovascular system. Simulation was performed within physiological values of parameters.

## **SIMULATION OF WAVES MOVING IN OPPOSITE DIRECTIONS ON THE SURFACE OF DEEP WATER**

*D.I. Kachulin<sup>1</sup>, A.I. Dyachenko<sup>1,2</sup>, V.E. Zakharov<sup>1,2,3,4</sup>*

<sup>1</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk

<sup>2</sup>Landau Institute for Theoretical Physics RAS, Chernogolovka

<sup>3</sup>Lebedev Physical Institute RAS, Moscow

<sup>4</sup>University of Arizona, Tucson, USA

We apply a canonical transformation to a water wave equation to remove cubic non-linear terms and to drastically simplify fourth-order terms in the Hamiltonian. This transformation explicitly uses the vanishing exact four-wave interaction for water gravity waves for a 2D potential fluid. We obtained system of two coupled differential equations which is very suitable for analytical studies and numerical simulations. We performed numerical simulation of water waves moving in opposite directions.

## **TWO-POINT CORRELATORS OF CHARGED FERMIONS IN CONSTANT HOMOGENEOUS MAGNETIC FIELD**

*I.V. Karabanov, A.Ya. Parkhomenko*

P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl

We study the two-point correlation functions under an influence of the constant homogeneous magnetic field. In addition to the correlators of scalar, pseudoscalar, vector and axial-vector fermionic currents, we calculate the non-diagonal ones including the tensor and (pseudo)scalar currents. The tensor current is a fermionic part of the Pauli Lagrangian relevant for the electromagnetic interaction of fermions through the anomalous magnetic moment. Its contribution to the photon polarization operator is briefly discussed.

## **THE CORRELATION BETWEEN ACCELERATIONS OF OCEAN-BOTTOM SEISMIC MOTIONS AND PRESSURE VARIATIONS REGISTERED BY DEEPWATER DONET OBSERVATORIES DURING THE TOHOKU 2011 EARTHQUAKE**

*V.A. Karpov<sup>1</sup>, M.A. Nosov<sup>1</sup>, H. Matsumoto<sup>2</sup>, Y. Kaneda<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Chair of Physics of Sea and Inland Water, Faculty of Physics,  
M.V. Lomonosov Moscow State University

<sup>2</sup>Japan Agency for Marine–Earth Science and Technology (JAMSTEC)

<sup>3</sup>Institute of Education, Research and Regional Cooperation for Crisis Management, Shikoku,  
Kagawa University

According to the data of deepwater DONET observatories, the relationship between ocean–bottom pressure variations and acceleration of ocean–bottom motions during the 2011 Tohoku earthquake was investigated. The method of cross-spectral analysis con-

firmed the existence of a linear relationship between the pressure variations and the vertical acceleration component in the “forced oscillation” frequency range. The connection is manifested as a close to unity value of magnitude–squared coherence at practically zero phase lags. It is shown that the slight deviations from this rule observed for some stations are related to the contribution to pressure variations of horizontal seismic motions of nearby underwater slopes.

## **INFLUENCE OF HETEROGENEITY OF SUBSTRATE SURFACE ON DROP OSCILLATIONS UNDER NON-UNIFORM ELECTRIC FIELD**

*M.A. Kashina<sup>1</sup>, A.A. Alabuzhev<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Perm State University, Perm

<sup>2</sup>Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm

The forced oscillations of the incompressible fluid drop under the action of the alternating electric field are considered. In equilibrium, the drop has the form of a circular cylinder bounded axially by the parallel solid planes; the contact angle is right. An incompressible fluid of different density surrounds the drop. The external electric field acts as an external force that causes motion of the contact line. In order to describe this contact line motion, the modified Hocking boundary condition is applied: the velocity of the contact line is proportional to the deviation of the contact angle and the speed of the fast relaxation processes, whose frequency is proportional to twice the frequency of the electric field. The case of heterogeneous plates is investigated. We assume that the Hocking parameter depends on the polar angle in this case. The function describing the change in the coefficient of the interaction between the plate and the fluid (the contact line) is expanded in a series of the Laplace operator eigenfunctions. The data about deviation of frequency and surface characteristics depending on Hocking parameter, frequency and amplitude of an external alternating electric field and the geometric parameters of the system are obtained.

## **CROSS-FREQUENCY SYNCHRONIZATION IN THE NEUROMORPHIC NETWORKS OF VORTEX SPINTRONIC OSCILLATORS**

*O.S. Katkova, A.R. Safin*

National Research University “MPEI”, Moscow

In this work the method of cross-frequency synchronization in neuromorphic networks of vortex-based spintronic oscillators (VSO) is developed. We analyze the linear normal modes of complex networks of nonlinear self-oscillatory VSO with nonidentity and nonisochrony. We construct adjacency matrices of different type of networks and calculate the normal modes. After normal mode calculation we shift to the truncated equations for slowly varying amplitudes and phases in the normal coordinates using generalized quasi-Hamiltonian approach. Finally, we present the phase dynamics and cross-frequency locking ranges based on the Kuramoto-approach and compare different networks to the ability of synchronization.

## MIXED DYNAMICS IN TIME REVERSIBLE SYSTEMS

*A.O. Kazakov*

National Research University High School of Economics, Nizhny Novgorod  
Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

Nowadays it is considered that along with the conservative (Hamiltonian) chaos, characteristic conservative non-integrable systems and strange attractors which are typical for dissipative systems, there exists a third type of chaos – mixed dynamics. For conservative chaos, the attractor coincides with the repeller ( $\mathcal{A} = \mathcal{B}$ ), for the dissipative chaos the attractor does not intersect the repeller ( $\mathcal{A} \cap \mathcal{B} = \emptyset$ ), while for the mixed dynamics the attractor intersects with the repeller, but does not coincide with it ( $\mathcal{A} \cap \mathcal{R} \neq \emptyset, \mathcal{A} \neq \mathcal{R}$ ).

In this talk we will explain how attractors can intersect with repellers, and describe possible scenarios for the occurrence of such a phenomenon in few reversible systems.

## ATTOSECOND PULSE FORMATION IN ACTIVE MEDIUM OF A PLASMA-BASED SOFT-X-RAY LASER DRESSED BY AN OPTICAL LASER FIELD

*I.R. Khairulin*<sup>1,2</sup>, *V.A. Antonov*<sup>2,3</sup>, *O. Kocharovskaya*<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

<sup>2</sup>Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

<sup>3</sup>Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow

<sup>4</sup>Department of Physics and Astronomy, Texas A&M University, College Station, USA

In this work we study the possibility for transformation of a quasimonochromatic x-ray field into a train of attosecond pulses in active medium of a plasma-based soft x-ray laser dressed by an moderately strong optical laser field, which was recently shown in [Phys. Rev. A **96**, 033825 (2017)]. We derive an analytical solution for the x-ray field, amplified in a laser-field-dressed active medium of a plasma-based x-ray laser with population inversion at the transition  $n = 1 \leftrightarrow n = 2$  of hydrogen-like ions. Using the derived analytical solution, we show the possibility to considerably increase the contrast of the produced pulses. We suggest an experimental implementation in active medium of  $\text{Li}^{2+}$  ions dressed by the laser field with intensity  $4 \cdot 10^{14} \text{ W/cm}^2$  and wavelength 935 nm.

## GENERALIZED SYNCHRONIZATION IN CHAOTIC SYSTEMS WITH TWO POSITIVE LYAPUNOV EXPONENTS

*V.A. Khanadeev, A.A. Koronovskii, O.I. Moskalenko*

Saratov State University

In this paper we investigate the possibility of the generalized synchronization onset in chaotic system characterized by two positive Lyapunov exponents. For this purpose a system of two mutually coupled modified Lorenz systems was constructed and its behavior was studied with the growth of the coupling strengths. The study was carried out by calculating the spectrum of Lyapunov exponents for the system and using the nearest-neighbor method. It was found that for the chosen values of the control parameters with the increase of the coupling strength between the systems a transition of two positive Lyapunov exponents in the field of the negative values is observed. When both Lyapunov exponents become negative, the regime of generalized synchronization is detected in the

system that is confirmed by the method of the nearest neighbors. The problem of the behavior of interacting systems in the case when the only one initially positive Lyapunov exponent became negative was considered in detail. It is found that in this case the intermittent behavior is observed.

## **CLASSIFICATION OF IMAGINARY MOVEMENT PATTERNS ON THE EEG BASED ON MACHINE LEARNING METHODS**

*D.V. Kirsanov, E.N. Pitsik*

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Electroencephalography is the most common method of studying the electrical activity of the brain, capable of giving enough information about the psychological person's state. Classification of specific patterns on the EEG record is an important task of neurodynamics and neurophysiology, which is also fundamentally important for studying both everyday processes such as sleeping and studies of the various diseases, for example, epilepsy. In this paper, we propose methods for classifying EEG patterns corresponding to different types of imaginary motions, based on machine learning technologies, and also discusses the prospects of using these methods in the development of a control system for the exoskeleton.

## **SOLUTE IMMOBILIZATION EFFECT ON SEEPAGE OF MIXTURE THROUGH POROUS MEDIA WITHIN FRACTAL MIM MODEL**

*L.S. Klimenko<sup>1</sup>, B.S. Maryshev<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm

<sup>2</sup>Perm State University, Perm

The linear stability analysis within the infinite horizontal porous layer saturated with a mixture has been made. Solute immobilization is taken into account within the fractal model of MIM approach. The solute concentration difference between the layer boundaries is constant. We consider two cases of horizontal external filtration flux: constant and time-modulated. For the constant flux the system of equations for the frequency of neutral oscillations and the critical value of the Rayleigh-Darcy number is derived. It was found that taking immobilization into account leads to an increase in the critical value of the Rayleigh-Darcy number with an increase in the intensity of the external filtration flux. For time-dependent filtration flux the differential equation with fractional derivatives has been obtained for description of the behavior near the convection instability threshold. This equation is analyzed numerically; the parametric excitation of convection is observed, which means the principal possibility to control the system behavior.

## **SELF-FILTRATION OF HIGH-POWER LASER BEAMS DURING PROPAGATION IN FREE SPACE**

*A.A. Kochetkov, V.N. Ginzburg, E.A. Khazanov*

Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

It has been experimentally confirmed that self-cleaning of a laser beam from spatial noises during propagation in free space can effectively suppress self-focusing instability without the use of spatial filters. Measurements of the instability increment by two independent methods have demonstrated a quantitative agreement with theory and a high effi-

ciency of suppression of small-scale self-focusing. This opens up new possibilities for using in optical beams with an intensity of the order of  $\text{TW}/\text{cm}^2$  of transparent optical elements: frequency doublers, phase plates, beam splitters, polarizers, etc.

### **DEVELOPMENT AND APPROVAL OF THE METHOD FOR CALCULATION OF LYAPUNOV EXPONENT SPECTRUM FOR TIME-DELAYED SYSTEMS**

*A.D. Koloskova, O.I. Moskalenko, A.A. Koronovskii*

Saratov State University

A method for calculation of the spectrum of Lyapunov exponents for time-delayed systems has been proposed and tested. With the help of the proposed method, the behavior of the spectrum of Lyapunov exponents depending on the control parameter has been studied for the time-delayed generator and the Mackey-Glass equation. The high method accuracy has been shown. It is assumed that the method will be used for other systems with time delay.

### **RECONSTRUCTION OF COUPLING ARCHITECTURE IN THE CHAINS OF THE UNIDIRECTIONALLY COUPLED SYSTEMS USING GRANGER CAUSALITY**

*M.V. Kornilov, I.V. Sysoev*

Saratov Branch of Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics  
of Russian Academy of Sciences  
Saratov State University

In this work we investigated the possibilities of reconstruction of coupling architecture in the chains of unidirectionally coupled oscillators using Granger causality method with forecasting models in form of nonlinear maps with polynomial nonlinearity in presence of both direct and indirect interactions.

To find a coupling architecture, a method based on three simple and conditional Granger causality was proposed. 3D radioengineering generator models and Ikeda time delayed laser equations, coupled unidirectionally were studied in different regimes with coupling level from very small to high, when individual systems were close to synchronization. The developed approach was shown to allow to determine the architecture of the links in ensemble totally correctly in more than 80 % cases.

### **MODELING OF THE PULSE GENERATION PROCESS IN A MULTIMODE Q-SWITCHED GENERATOR CONSIDERING TRAVELLING WAVE COMPONENT AT THE REAL PARAMETERS OF THE RESONATOR**

*A.P. Korobeynikova, I.A. Shaikin, I.V. Koryukin, E.A. Khazanov*

Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

In this paper, the process of pulse generation in a multimode Q-switched generator is investigated. The results of the simulation explain the generation of the second giant pulse, which was previously observed experimentally. The cause of the generation of the second giant pulse, the so-called post-pulse, is the fact that for different longitudinal modes of the resonator the maxima of their wave functions are spaced along the length of

the active element (AE). Thus, there are regions in AE, where one longitudinal mode is not amplified, and a population inversion remains sufficient for the development of another mode.

New calculations were made considering travelling wave component, since in reality it is necessary to represent the waves in the resonator as a superposition of standing and traveling waves, because the emission of radiation from the resonator causes the waves traveling in opposite directions to be different. Also, all the coefficients into equations were calculated in accordance with the actual values of the resonator parameters.

## **DETRIMENTAL EFFECTS OF SELF-GENERATED QUASI-STATIONARY MAGNETIC FIELDS ON ION ACCELERATION BY SUPER-INTENSE LASER PULSES**

*A.V. Korzhimanov*

Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod

Recently, an experiment on laser proton acceleration at intensity exceeding  $10^{21}$  W/cm<sup>2</sup> showed deviation from a widely accepted scaling law  $\varepsilon_p \sim I^{1/2}$  ( $\varepsilon_p$  being cutoff proton energy and  $I$  being laser intensity). Here a theoretical explanation of this observation is given. It is shown that a gigauss-level magnetic fields are self-generated in the target leading to non-uniform electron temperature distribution and as a consequence to lower proton energy compared to what predicted by common theories.

## **LASER ACCELERATION OF ELECTRONS FROM A GAS CELL ON PETA-WATT COMPLEX PEARL**

*A.V. Kotov*

Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

The article is devoted to an experiment on laser-plasma acceleration of electrons in a wakefield. The experiments were carried out on the basis of the laser complex PEARL (910 nm, 50–70 fs, 30 J). The radiation is focused into a gaseous cell of an original design with an adjustable length, the volume of which is divided into two parts, injection and acceleration. This design allows to adjust parameters such as the concentration and composition of the gases used, as well as the length of the acceleration path. Pilot experiments showed the superiority of this scheme over the one used in the previous series of experiments. To measure the energies of accelerated electron bunches, a magnetic electron spectrometer consisting of two scintillator screens and two magnets is used. To diagnose the state of the plasma in a gas cell, the Mach-Zandra interferometer.

## **NONLINEAR BOUND STATES IN THE CONTINUUM AND MULTISTABILITY IN ONE-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTAL WAVEGUIDES**

*S.D. Krasikov, A.A. Bogdanov, I.V. Iorsh*

ITMO University, St. Petersburg

We study the nonlinear optical response of one-dimensional photonic crystal waveguide in which bound states in the continuum can exist. We show how the multistability occurs in the system and discuss different classes of solutions arising due to linear bound

states. We also analyze the stability of obtained solutions as well as the influence of the system size on stability.

## **CONSTANCY OF THE CORONAL MAGNETIC LOOP CROSS SECTION**

*P.V. Kronshtadov, V.V. Zaitsev*

Institute of Applied Physics of RAS, Nizhny Novgorod

Coronal magnetic loop observations give evidence that the solar magnetic loop cross section is constant along all length. This is interesting, because coronal magnetic loop length can reach several height scales of the inhomogeneous atmosphere and therefore pressure may vary over the order of magnitude at different heights in a magnetic loop. A force balance in the stationary current-carrying magnetic loop is considered. The hydrostatic equation of the force balance is solved under the conditions of constant longitudinal electric current and the conservation of the longitudinal magnetic field flux. As a result, dependence of the magnetic loop radius on height in case of different plasma beta values in the magnetic loop footpoint is obtained. It is shown, that when gas-kinetic pressure inside the loop is small in comparison with the longitudinal magnetic field pressure, then the thickness of the loop is constant in the corona that is typical for the majority of the observed coronal magnetic loops.

## **ABOUT TOPOLOGICAL CLASSIFICATION OF $\Omega$ -STABLE FLOWS ON SURFACES**

*V.E. Kruglov*

National Research University Higher School of Economics, Nizhniy Novgorod  
National Research University Lobachevsky State University of Nizhniy Novgorod

In this paper we describe the combinatorial topological invariant for  $\Omega$ -stable flows on surfaces. Structurally stable (rough) flows on surfaces have only finitely many singularities and finitely many closed orbits (limit cycles), all of which are hyperbolic, and they have no trajectories joining saddle points. In the set of  $\Omega$ -stable flows on surfaces the last property violates, this is the reason they are not structurally stable. However, in this work we prove that a topological classification of such flows is also reduced to a combinatorial problem. Our complete topological invariant is a bipartite directed graph, equipped with four-colour multigraphs and other additional information. We also build a standart flow for an abstract graph and present a graph criterion for orientability of the ambient manifold and a graph-associated formula for its Euler characteristic.

## **HYPERBOLIC CHAOS IN COUPLED BONHOEFFER – VAN DER POL OSCILLATORS OPERATING WITH RELAXATION SELF-OSCILLATIONS**

*V.P. Kruglov, V.M. Doroshenko, S.P. Kuznetsov*

Saratov State University  
Saratov Branch Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS

We introduce new model with Smale-Williams attractor. The system consists of identical weakly coupled Bonhoeffer – van der Pol oscillators with control parameter slowly changing in time. The system operates due to excitation and decay of relaxation self-oscillations with frequencies that are  $M$  times less than frequency of low amplitude oscil-

lations. The phases of oscillators increase in  $M$  times on half period of modulation. It corresponds to arise of Smale-Williams solenoid with expansion factor  $M^2$ .

## **QUANTITATIVE ANALYSIS OF THE EFFECTS OF FALSE COUPLINGS DUE TO MEASUREMENT NOISE AND SHORT TIME SERIES**

*S.N. Krylov<sup>1</sup>, D.A. Smirnov<sup>2</sup>, B.P. Bezruchko<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Saratov State University

<sup>2</sup>Saratov Branch of V.A. Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS

The problem is to study the influence of the observational noise and short time series on the direction and numerical evaluation of the coupling value using linear oscillators as examples. The influence of these phenomena is typical for certain values of the individual parameters of the oscillators. The problem arises in different areas of research for detection and quantification of directional coupling, e.g. in biomedicine in the analysis of EEG.

The influence of observational noise and the length of the time series on the estimates of directional couplings between stochastically perturbed linear dissipative oscillators is investigated. The conditions under which these factors lead to false detection of coupling are determined. These conditions should be taken into consideration on practice while evaluating relationships from observational data, for example, in the tasks of neurophysiology and climatology.

## **NUMERICAL SIMULATION OF SURFACE WAVES AT SHORT FETCHES OF INLAND WATERS**

*A.M. Kuznetsova, G.A. Baydakov, A.S. Dosaev, A.A. Kandaurov, M.I. Vdovin,  
V.V. Papko, D.A. Sergeev, Yu.I. Troitskaya*

Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod  
Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

The report is devoted to the simulation of waves in the inland waters using modern global model WAVEWATCH III (WW3). In modeling, the features of the internal reservoirs are taken into account, therefore the open program codes are changed. The adaptation of the nonlinear model in WW3 is considered. The validation of the results with the results of field experiments is performed.

## **DYNAMICS OF DISCRETE BREATHERS IN INTEGRABLE MODELS OF CRYSTAL AND ELECTRIC SYSTEMS**

*D.V. Laptev*

B.I. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering, NAS of Ukraine, Kharkov

The work is devoted to theoretical research of the dynamics of the discrete breathers in the integrable model of the Hirota lattice and equivalent system of self-dual network equations. It is shown that these high-frequency localized nonlinear excitations elastically interact with each other and with shock and linear waves. Nonlinear superposition formula for discrete breather and soliton solutions is found. Pair collision processes of the excitations are analytically described and explicit expressions for center-mass shifts of shock waves (kinks) and breathers, and phase shifts of oscillations of breathers and linear waves

are obtained. The Hamiltonian equations and quasiclassical spectra for the discrete breathers and kinks as the particle-like excitations of the Hirota lattice are found. For the first time exact nonlinear periodic solutions describing the breathers and solitons superlattices in electric transmission line and the Hirota lattice are found. The analogue of the discrete breather for the finite-size system is presented in terms of the elliptic Jacobi functions and it is shown that the excitation is detached from the branch of nonlinear homogeneous antiphase oscillations in the bifurcation manner. Implementation of discrete breather in microelectronic devices for the energy and information compaction and storage are proposed.

## **RADIATION FORCE ACTING ON SOLID MICROPARTICLES IN FOCUSED ULTRASONIC BEAM**

*M.V. Lesik, V.G. Andreev*

M.V. Lomonosov Moscow State University

The problem of trapping and moving microparticles in liquids with a single focused transducer is solved. The spatial distribution of the radiation force acting on solid spherical particles in the field of a focused transducer is calculated. It is shown that there is small region at distance of 64 mm from the transducer surface, where the particles with diameter of 150  $\mu\text{m}$  can be trapped. In this case the amplitude of vibrational velocity on the transducer surface should exceed 6 cm/s. Measurements of displacement of the sand particles in horizontal planes, located at distances of 60–70 mm from the transducer, are performed. It is shown that the radiation force results in formation of the regions of clean surface, the dimensions and position of which depend on the distance to the transducer and the ultrasound intensity.

## **THE INFLUENCE OF ELECTRICAL COUPLINGS ON DYNAMICS OF NEURONAL ENSEMBLE**

*T.A. Levanova<sup>1</sup>, A.O. Kazakov<sup>1,2</sup>, A.G. Korotov<sup>1</sup>, G.V. Osipov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>National research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

<sup>2</sup>National Research University Higher School of Economics, Nizhny Novgorod

In this study we investigate phenomenological model of 3 neurons coupled with chemical (synaptical) inhibitory couplings and electrical couplings. One neuron are modelled using one Van der Pol oscillator. We study the impact of the strength of electrical couplings and frequency mismatch between elements on the dynamics of the ensemble of neuron-like elements coupled with synaptic couplings.

## **OPTIMIZATION OF RAMAN COMPRESSION PARAMETERS FOR EXPERIMENT AT PEARL LASER SETUP**

*D.S. Levin, A.A. Balakin, S.A. Skobelev*

Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

The Raman compression of laser pulses is considered under the conditions of the experiment planned at the Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences on the laser setup PEARL. The analysis was carried out in the framework of hydrodynamic approach, describing, among other things, the influences of plasma dispersion, relativistic nonlinearity, and field dynamics near the plasma wave-breaking threshold. It is

shown that the main limiting factors will be the excessively high chirp of the pump pulse and the excessively rare plasma in which the plasma wave-breaking can occur. To mitigate the negative influence of these effects, it is proposed to use the intense and short (about the plasma period) seed pulse, and shift the interaction origin to the edge of the plasma so that the density gradient of the plasma will compensate the excessive frequency modulation of the pump at the linear stage.

## **GENERATION OF SPIKE OSCILLATIONS IN THE SYSTEM OF FITZHUGH-NAGUMO NEURONS WITH DIFFERENT LEVELS OF DEPOLARIZATION**

*A.A. Makeeva*

N.I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod  
Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod

We consider a chain of three FitzHugh-Nagumo neurons connected sequentially through a chemical synapse. The first neuron of the chain is at rest. However, under the influence of the latter, the second neuron can be excited. The behavior of the third neuron depends on the type of spike oscillations of the second neuron. An invariant torus or torus canards exist in the phase space of the third neuron, depending on the parameters of the system.

## **ENTANGLED STATES FORMATION IN AN ARRAY OF WAVEGUIDES WITH QUADRATIC NONLINEARITY**

*V.O. Martynov*

Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

In this paper, the features of the formation of entangled states in a system of coupled single-mode waveguides as a result of the parametric down-conversion of the pump, given at the input, is considered. The efficiency of this process depending on the parameters of the system, as well as the effect of phase pump noise is investigated. It is demonstrated that there is a critical length of the lattice, exceeding which leads to disappear of any quantum correlations at the output. This length depends both on the spectral width of the pump and on its amplitude.

## **MODELING SPIKE-WAVE DISCHARGES BY A COMPLEX NETWORK OF NEURONAL OSCILLATORS**

*T.M. Medvedeva<sup>1,2</sup>, M.V. Sysoeva<sup>3</sup>, I.V. Sysoev<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Saratov State University

<sup>2</sup>Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology RAS, Moscow

<sup>3</sup>Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

The organization of neural networks and the mechanisms, which generate the highly stereotypical for absence epilepsy spike-wave discharges (SWDs) is heavily debated. Here we describe such a model which can both reproduce the characteristics of SWDs and dynamics of coupling between brain regions, relying mainly on properties of hierarchically organized networks of a large number of neuronal oscillators.

The model reproduces the main features of the transition from normal to epileptiform activity and its spontaneous abortion: an increase in the oscillation amplitude, the emergence of the main frequency and its higher harmonics, and the ability to generate trains of seizures. The model was stable with respect to variations in the structure of couplings and to scaling. The analyzes of the interactions between model structures from their time series using Granger causality method showed that the model reproduced the preictal coupling increase detected previously from experimental data.

## **THE ROLE OF ION MOTION IN RELATIVISTIC SELF-INDUCED TRANSPARENCY EFFECT OBSERVED IN NON-UNIFORM PLASMAS**

*N.A. Mikheysev*

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

An earlier proposed method to obtain steady-state solutions in relativistic laser-plasma interaction has been extended on the case of non-uniform plasma distribution. It has been used to analyze the potential role of ion motion in the effect of relativistic self-induced plasma transparency. It has been shown that for longer pulses the influence of ion redistribution during the interaction is stronger and leads to a decrease of a threshold electron temperature for the transparency effect.

## **POLARIZATION CONTROL OF HIGH HARMONIC GENERATION IN A PULSED BICIRCULAR LASER FIELD**

*A.A. Minina<sup>1,2</sup>, M.V. Frolov<sup>1,2</sup>, N.L. Manakov<sup>1</sup>, A.A. Silaev<sup>2</sup>, N.V. Vvedenskiy<sup>2</sup>, and A.F. Starace<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Voronezh State University

<sup>2</sup>Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

<sup>3</sup>Department of Physics and Astronomy, The University of Nebraska, Lincoln, Nebraska, USA

Polarizations of harmonics produced by two time-delayed circularly polarized short laser pulses (with carrier frequencies  $\omega$  and  $2\omega$  and equal intensities) are shown to change monotonically from linear to circular as their time delay increases.

## **DIFFERENCE-FREQUENCY PARAMETRIC RESONANCE IN THE SYSTEM OF TWO COUPLED OSCILLATORS**

*A.V. Mishin<sup>1</sup>, Vl.V. Kocharovsky<sup>1</sup>, V.V. Kocharovsky<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

<sup>2</sup>Texas A&M University, Texas, USA

The phenomenon of a difference-frequency parametric resonance is studied numerically for the system of two coupled oscillators. It occurs when the partial frequencies of the oscillators are multiples of their difference frequency. The stability diagrams for such a double resonance system are evaluated for typical parameters of the system. The dependence of the threshold of parametric excitation on the relaxation rates of oscillators is studied. It is shown that the presence of the double resonance favors the parametrical instability.

## **DYNAMICS OF THE LASER WITH COHERENT INJECTION AND PUMP MODULATION**

*V.S. Mitina<sup>1</sup>, A.A. Krents<sup>1,2</sup>, N.E. Molevich<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Samara National Research University

<sup>2</sup>P.N. Lebedev Physical Institute, Samara Branch, Samara

This paper investigates nonlinear dynamics of the class-B laser with pump modulation and coherent injection numerically. Simulation was performed for parameters corresponding to solid-state lasers. It was shown that coherent optical injection stabilizes laser output. Chaos suppression is possible for large enough intensity of injected light.

## **SCHEME OF RELATIVE DATA TRANSMISSION BASED ON CHAOTIC RADIO PULSES**

*T.I. Mokhseni<sup>1</sup>, A.S. Dmitriev<sup>1</sup>, K. Sierra<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Moscow

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny

The report proposes and investigates a new scheme of data transmission using dynamic chaos as a carrier signal. The proposed scheme refers to a class of schemes with a relative transmission method.

The idea of using relative transmission methods with chaotic signals arose in the mid 1990s, when it became clear that the use of chaotic synchronization in data transmission systems posed very rigid requirements for the quality of channels and for the accuracy of transmitters' and receivers' execution. At least two such schemes have been proposed (DCSK, CDSK). The first of those became quite popular and was studied detailed by the authors and their successors. However, it has not received practical development and application due to the presence of elements with large time delays in it. These elements are still not engineerable in a cheap and compact version.

Theoretical analysis of the proposed scheme shows that for large signal bases it has high resistance to noise and other perturbations in the channel. Its technical implementation is achievable and shouldn't cause big technical problems. Since the delays required for it at a signal band of 1 GHz or more do not exceed 1–2 ns it can be easily implemented for example on segments of modern cables up to 50 cm long.

## **DESIGNING OF DIGITAL FILTERS WITH AN ARBITRARY CHARACTERISTICS**

*N.S. Morozov*

Lobachevsky State University of Nizhniy Novgorod

Examples of digital recursive filters designs with arbitrary form of required characteristics are given. The possibility of designing by numerical methods of discrete nonlinear programming is demonstrated. Examples of solutions for the set of required characteristics are given, as well as experimentally obtained characteristics are presented.

## TRAVELING HELICAL WAVES IN A TURBULENT JET

*R.I. Mullyadzhanov<sup>1,2</sup>, R.D. Sandberg<sup>3</sup>, S.S. Abdurakipov<sup>1,2</sup>, W.K. George<sup>4</sup>, K. Hanjalic<sup>5</sup>*

<sup>1</sup>Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk

<sup>2</sup>Novosibirsk State University

<sup>3</sup>University of Melbourne, Australia

<sup>4</sup>Imperial College of Science, Technology and Medicine, United Kingdom

<sup>5</sup>Delft University of Technology, The Netherlands

Turbulent jets are known to support large-scale vortical wavepackets traveling downstream. We show that a propagating helical wave represents a common form of the ‘optimal’ eigenfunction tracking these structures from the near to the far field of a round jet issuing from a pipe. Two first mirror-symmetric modes containing around 5% of the total turbulent kinetic energy capture all significant large-scale events and accurately replicate the full shear-layer dynamics of the azimuthal wavenumber  $m = 1$ . A family of the most energy-containing traveling waves represent low wavenumbers and are described in terms of ‘empirical’ dispersion laws.

## MOVEMENT OF PARTICLES IN GIANT QUASISTATIC MAGNETIC FIELDS GENERATED IN COLLIDING ULTRAINTENSE LASER PULSES

*A.A. Muraviev, A.M. Sergeev*

Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

Recent progress in ultraintense laser technologies stimulated research of high intensity laser-plasma interaction, for which cascade generation of electron-positron pairs becomes crucial. Such research is conducted mostly by numerical modeling.

In a recent work [1] the effect of generation of current sheets and giant quasistatic magnetic fields was predicted in colliding linearly-polarized laser pulses in 1D geometry.

In this work movement of particles and generalization onto the 3D case is discussed.

1. *Муравьев, А.А.* Генерация токовых слоев и гигантских квазистатических магнитных полей при ионизации вакуума в экстремально сильных световых полях / А.А. Муравьев, С.И. Бахраков, А.В. Башинов, А.А. Гоносков, Е.С. Ефименко, А.В. Ким, И.Б. Мееров, А.М. Сергеев // Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 102, вып. 3. С. 173–178.

## PRECISION INTERFEROMETRY OF SUPERFILAMENT LASER PLASMA

*A. Murzanev<sup>1</sup>, S. Bodrov<sup>1</sup>, D. Kartashov<sup>2</sup>, Zh. Samsonova<sup>2</sup>, M. Petrarca<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

<sup>2</sup>Institut für Optik und Quantenelektronik Friedrich-Schiller-Universität Jena, Jena, Germany

<sup>3</sup>La Sapienza University, SBAI Department, Rome, Italy

The propagation of multi-Terawatt femtosecond laser pulses at 800 nm wavelength in air under different external focusing the laser plasma was measured by the method of precision transvers interferometry using Nomarski polarizing interferometer in so-called superfilamentation regime was observed. The luminescence of air was controlled synchronously to interferometry also in single shot regime.

At rather tight external focusing (f-number  $\sim 50$ ) the generation of multiple separated plasma channels with random positions is observed at distance at least  $\sim 15$  cm before focus. Near the focus the joint phase without spaces is observed. The estimations show

that such phase corresponding to the rather homogeneous thick ( $\sim 1$  mm) plasma channel with electron density comparable to the value of the single plasma filament ( $\sim 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ). At positions after the focus phase distribution become thinner till the distribution become similar to single filament at distance  $\sim 10$  cm after the focus position. The position of this single thin plasma channel is stable from shot to shot.

Loosing of the external focusing to f-number  $\sim 125$  leads to transition to the regime that is referred to superfilamentation. Individual filaments are formed before the linear focus and their presence is evident at distance  $\sim 25$  cm before the focal spot. The distance between individual filaments decrease during the forthcoming to the position of focus without arranging uniform plasma channel.

### **NONLINEAR STAGE OF THE WEIBEL INSTABILITY AND CONSISTENT EVOLUTION OF ELECTRON AND ION CURRENTS IN A PLASMA WITH TEMPERATURE ANISOTROPY**

*A.A. Nechaev<sup>1</sup>, L.V. Borodachev<sup>2</sup>, M.A. Garasev<sup>1</sup>, A.A. Belyaev<sup>2</sup>, V.V. Kocharovskiy<sup>1</sup>,  
V.Yu. Martyanov<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Institute of Applied Physics of the RAS, Nizhny Novgorod

<sup>2</sup>M. V. Lomonosov State University, Moscow

<sup>3</sup>Intel Corp., Chandler, USA

We numerically simulate the nonlinear stage of the Weibel instability of a two-component plasma with strong temperature anisotropy and comparable energies of the electron and ion fractions. Calculations were carried out with the PIC-code DARWIN. Spatio-temporal dynamics of the current filaments and the magnetic field created first by the electrons, and then by the electron and ion fractions together is analyzed. It is found that the magnetic field resulting from the electron instability leads to the scattering of ions, decreasing the degree of their momentum distribution anisotropy and suppressing the development of the ion instability. It is shown that the long-term maintenance and evolution of a large-scale quasi-stationary magnetic field are due to the ion currents which are induced by the decaying magnetic field and start to dominate the electrons with time. The possibility of the considered scenario of the Weibel instability in a nonequilibrium laser-produced plasma is discussed.

### **THE DEPENDENCE OF THE LEVEL OF CONCENTRATION ON MOTIVATION AND ALERTNESS**

*V.O. Nedayvozov*

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

The influence of motivation and alertness on brain activity associated with visual perception was studied experimentally using the Necker cube, which ambiguity was controlled by the contrast of its ribs. The wavelet analysis of recorded multichannel electroencephalograms (EEG) allowed us to distinguish two different scenarios while the brain processed the ambiguous stimulus. The first scenario is characterized by a particular destruction of alpha rhythm (8–12 Hz) with a simultaneous increase in beta-wave activity (20–30 Hz), whereas in the second scenario, the beta rhythm is not well pronounced while the alpha-wave energy remains unchanged. The experiments were carried out with a group of financially motivated subjects and another group of unpaid volunteers. It was

found that the first scenario occurred mainly in the motivated group. This can be explained by the increased alertness of the motivated subjects. The prevalence of the first scenario was also observed in a group of subjects to whom images with higher ambiguity were presented. We believe that the revealed scenarios can occur not only during the perception of bistable images, but also in other perceptual tasks requiring decision making. The obtained results may have important applications for monitoring and controlling human alertness in situations which need substantial attention. On the base of the obtained results we built a brain-computer interface to estimate and control the degree of alertness in real time.

### **ELECTROMAGNETICALLY INDUCED TRANSPARENCY IN AN ISOTOPICALLY PURE Nd:YLF CRYSTAL**

*N.A. Nizov<sup>1</sup>, R.A. Akhmedzhanov<sup>1</sup>, L.A. Gushchin<sup>1</sup>, A.A. Kalachev<sup>2</sup>, V.A. Nizov<sup>1</sup>,  
D.A. Sobgayda<sup>1</sup>, I.V. Zelensky<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod

<sup>2</sup>Kazan Physical-Technical Institute of the Kazan Scientific Center RAS

We research an electromagnetically induced transparency (EIT) feature in an isotopically pure  $^{143}\text{Nd}:\text{Y}^7\text{LiF}_4$  crystal under cryogenic temperature in an external magnetic field near the zero first order Zeeman (ZEFOZ) point. We study the dependence of the EIT structure on the value of the external magnetic field and the intensity of the control optical field. We find that in the magnetic field corresponding to the ZEFOZ point, the width of the EIT profile significantly decreases, so an internal comb-like structure of the EIT feature can be resolved. This structure can be caused by the superhyperfine interaction between the Nd electronic spins and nuclear spins of the neighbouring fluorine atoms.

This work was supported by the Russian Science Foundation (grant № 14-12-00806).

### **THE USE OF POLYCRYSTALLINE DIAMONDS FOR MAGNETOMETRY BASED ON THE CROSS-RELAXATION INTERACTION BETWEEN GROUPS OF NV CENTERS**

*V.A. Nizov, N.A. Nizov, R.A. Akhmedzhanov, L.A. Gushchin, D.A. Sobgayda, I.V. Zelensky*

Institute of Applied Physics of RAS, Nizhny Novgorod

In this work we demonstrate the possibility of using polycrystalline diamonds for measuring magnetic fields based on the cross-relaxation interaction of nonequivalently oriented groups of NV centers. The use of polycrystalline samples instead of diamond single crystals simplifies the measurement procedure. In particular, the precise orientation of the sample is not required and only a single cross-relaxation resonance is observed. The projection of an unknown magnetic field on a given axis is directly determined by the position of the resonance. The proposed technique can be applied to measure magnetic fields up to several gauss.

The research was carried out within the state assignment of scientific investigations (theme № 0035-2014-0005).

## **DYNAMICS OF THE MAGNETIC FIELD IN QUASI-TWO-DIMENSIONAL CHAOTIC FLOW**

*L.L. Ogorodnikov, I.V. Kolokolov, V.V. Lebedev*

Landau Institute for Theoretical Physics, RAS, Moscow region, Chernogolovka

The evolution of magnetic field in quasi-two-dimensional chaotic flow is studied here. We consider regime when the influence of magnetic field on the flow is negligible. Temporal behavior of magnetic field's correlators is obtained here. The difference between correlators' evolution in case of two-dimensional and quasi-two-dimensional flow is analyzed and discussed here.

## **INTENSITY STATISTICS IN RANDOM FIBER LASER OUTPUT EMISSION**

*L.L. Ogorodnikov, S.S. Vergeles, V.V. Lebedev*

Landau Institute for Theoretical Physics, RAS, Moscow region, Chernogolovka

Analytic expressions for the correlation moment of the fourth order of the intensity of the output field of a random fiber laser in the first and the second orders in terms of the nonlinearity parameter are obtained, and their numerical values are calculated in the limit of zero amplification. In the first order in the nonlinearity parameter, higher order moments are calculated and the distribution function of the intensity of the output radiation of a random fiber laser is constructed.

## **INTERBAND TRANSITIONS AND SPONTANEOUS OPTICAL EMISSION OF GRAPHENE IN STRONG TERAHERTZ FIELD**

*I.V. Oladyshkin, Yu.A. Sergeev, S.B. Bodrov, A.I. Korytin, M.D. Tokman, A.N. Stepanov*

Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

The theoretical and experimental results on the nonlinear electrodynamics of graphene under the action of both intense optical and terahertz (THz) fields are presented. It was demonstrated that a subpicosecond THz pulse of more than 100 kV/cm magnitude strongly modifies the initial distribution function of charge carriers and leads to the intense interband transitions (i.e. to the electron-hole pair generation). The theoretical model of the nonresonant graphene ionization by the THz field allowed to interpret quantitatively experimental data on the graphene spontaneous emission under the action of intense THz pulse.

## **LARGE-SCALE COHERENT VORTEX FORMATION IN TWO-DIMENSIONAL TURBULENCE**

*A.V. Orlov, M.Yu. Brazhnikov, A.A. Levchenko*

Institute of Solid State Physics Russian Academy of Sciences, Chernogolovka  
L.D. Landau Institute for Theoretical Physics Russian Academy of Sciences, Chernogolovka

An evolution of a vortex flow excited by an electromagnetic technique in a thin layer of a conducting liquid is experimentally studied. Small-scale vortices initially excited at the pumping scale merge with time due to the nonlinear interaction, and form large-scale structures. In such a way the inverse cascade of energy is formed. The dependence of the energy spectrum in the developed inverse cascade is well described by the Kraichnan law

$k^{-5/3}$ . At large scales the inverse cascade is limited by the cell sizes, so a large-scale coherent vortex flow is formed due to the spectral condensation. The flow occupies almost the entire area of the experimental cell. The radial profile of the azimuthal velocity of the coherent vortex was first established immediately after the pumping was switched off. At the vortex core, the azimuthal velocity grows linearly along the radius and reaches a constant value outside the core. It well agrees with the theoretical prediction.

## **QUANTUM DISSIPATIVE DYNAMICS OF A RESONANT DRIVEN JOSEPHSON OSCILLATOR**

*D.S. Pashin<sup>1</sup>, A.M. Satanin<sup>1</sup>, C.S. Kim<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Lobachevsky Nizhny Novgorod State University

<sup>2</sup>Chonnam National University, Republic of Korea

The dissipative dynamics of a driven Josephson oscillator both in classical and quantum regimes is considered. It is shown that in the classical regime the process of evolution depends on the initial conditions and there are trajectories that can pass the separatrix and may be attracted by two foci separated by a potential barrier. The motion near the separatrix is very unstable and may be treated as a stochastic process. In the present work we study the quantum regime of capture to the resonance a driven dissipative Josephson oscillator. It is considered a situation when the oscillator is coupled with a bosonic bath, and its dynamics is described by a density matrix. When the hypothesis of random phases is valid, the problem can be reduced to the master equation (Pauli equation). In this case, the oscillator has two well-localized states that correspond to the classical equilibrium positions. An interesting situation arises during the process of relaxation when the system passages through the energy region near the classical separatrix. This novel regime of the relaxation has been investigated here by numerical simulation.

## **MODERNIZED SPECTROMETER THOMSON PARABOL FOR INVESTIGATION OF TIME DYNAMICS OF TNSA SOURCE OF PROTONS AND IONS**

*S.E. Perevalov*

Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

The Thomson's parabola (TP) spectrometer is a well-known device used for the diagnostics of beams of charged particles, namely, ions, protons and electrons, which makes it possible to determine their energy spectrum, at the same time, separating particles depending on their charge to mass ratios. TP is usually used as complementary diagnostics of beams in various experiments on particle acceleration, including laser acceleration, for example [1].

It is proposed to use the time-varying voltage on the deflecting plates of the TP, which allows using time-of-flight approaches to study the time dynamics of sources of charged particles and additionally measure the time of production of different particles within the resolution range.

This approach made it possible to obtain additional information from the experimental data on the acceleration of protons published in [2].

In addition, we are considering the possibility of using a modernized TP spectrometer to study the acceleration of protons in the TNSA regime. The possibility of using the described approach for detecting powerful terahertz pulses focused on the TNSA proton beam is also considered.

1. Soloviev A. [et al.] Experimental evidence for shortpulse laser heating of solid-density target to high bulk temperatures // Scientific Reports. 2017. V. 7. Art. 12144.

2. Ter-Avetisyan S. Time resolved corpuscular diagnostics of plasmas produced with high-intensity femtosecond laser pulses / S. Ter-Avetisyan, M. Schnürer, P.V. Nickles // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. V. 38. P. 863–867.

## ON SYNCHRONIZATION IN FITZHUGH-NAGUMO NETWORKS WITH SMALL DELAYS

S.A. Plotnikov, A.L. Fradkov

Institute for Problems of Mechanical Engineering RAS, Saint Petersburg  
ITMO University, Saint Petersburg

This article studies the influence of the small delays on the FitzHugh-Nagumo network synchronization. It is well known that high delays in propagation between the nodes hinder synchronization. The sufficient conditions of the linearized network synchronization for the case of the small delay are obtained. This problem is successfully reduced to the feasibility of the LMIs. The simulation results confirm the efficiency of obtained conditions, i.e. they can be applicable even to the nonlinear FitzHugh-Nagumo network.

## INTEGRATION OF MOUSE NEURONAL ACTIVITY AND BEHAVIOUR: QUANTITATIVE DEFINITION OF PLACE FIELDS

V.V. Plusnin<sup>1</sup>, V.P. Sotskov<sup>1,3</sup>, K.V. Anokhin<sup>2,3,4</sup>

<sup>1</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (State University)

<sup>2</sup>National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow

<sup>3</sup>Lomonosov Moscow State University

<sup>4</sup>P.K. Anokhin Institute of Normal Physiology of RAMS, Moscow

Interconnection between neuronal activity and behavior of living animals is the thing which neuroscientists traditionally are focused at. Recently, with the appearance of *in vivo* calcium imaging technique, it has become possible to observe the activity of big number of neurons of a freely moving mouse. In addition to the direct processing of the signal of calcium imaging, the task is synchronizing neural activity and behavior. According to the results of synchronization, we can define the specialization of a single cell, for example in the subfields CA1 of hippocampus we can detect space-specific neurons, place cells.

Each place cell is activated only when the mouse located in a definite place of space, in the place field. The problem is determining a differentiation exists, whether the cell is already a place cell and what field it responds.

To quantifying place fields was to measure the specificity of the field in terms of the information content of cell discharge, such method is necessary but not sufficient criterion for determining place fields. We have developed methods that allow us to identify with confidence the place cells and determine their place fields.

## WAVEGUIDE ND:YAG LASER PASSIVE MODE-LOCKED WITH 10 GHZ REPETITION RATE

*M.V. Ponarina*

A.M. Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow

We report generation of  $<20$  ps pulses with 10 GHz repetition rate in passive mode-locked short cavity (10 mm) Nd:YAG waveguide laser. Mode-locking is realized with graphene saturable absorber mirror. We make use of tubular waveguide structure inscribed in the active Nd:YAG crystal by femtosecond laser to provide efficient pumping of the active media and stabilize the generation of TEM 00 mode (main transverse mode). The obtained results open a way towards compact, highly stable gigahertz frequency-comb generators.

## PROPAGATION OF ULTRAWIDEBAND CHAOTIC SIGNALS THROUGH THE MEDIUM EMULATING CHARACTERISTICS OF LIVING ORGANISMS

*M.G. Popov<sup>1,2</sup>, A.I. Ryzhov<sup>1</sup>, M.Yu. Gerasimov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Moscow

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudnyi

The problem of propagation of ultrawideband (UWB) chaotic radio pulses in medium within living organisms is considered in the report. This area gains relevance due to the increase of wireless communications applications in medicine, especially in diagnostics. But it is important to research in advance the circumstances of radio signal propagation in medium with characteristics of living organism. In this work cuvette filled with an aqueous solution of sucrose that emulates electromagnetic characteristics of a living organism was used during the experimental research of a pulse attenuation rate. The first experiments using chaotic UWB radio pulses occupying 3-5 GHz frequency domain were conducted in this area. Signal amplitude on the output of logarithmic detector was measured in order to estimate path loss of the signal. Dependencies between path loss and the distance between transceiver antennas were obtained. These results were further used to calculate signal attenuation rate within the medium. Based on the values of transmitter radiated power and receiver sensitivity the maximum transmission distance within the living organism was estimated.

## EXACT SOLUTIONS OF THE NAVIER-STOKES AND OBERBECK-BOUSSINESQ EQUATIONS FOR DESCRIBING AMPLIFICATION OF THE OSCILLATIONS IN A VISCOUS INCOMPRESSIBLE FLUID

*E.Yu. Prosviryakov*

Institute of Engineering Science, UB RAS, Ekaterinburg

B.N. Yeltsin Ural Federal University, Ekaterinburg

In this paper we consider new exact solutions of the Navier-Stokes equations. One of the exact solutions describes the amplification of oscillations for isobaric flows of a viscous incompressible fluid. It is shown that the amplification of waves in a liquid is caused by a vertical vortex. In this paper, unsteady flows of Poiseuille type for oscillations of a

vertically swirling fluid are studied. Thus, in this paper we obtain a generalization of the exact solution for the second Stokes problem. The exact solution of the Navier-Stokes equations is generalized for convective flows of a viscous incompressible fluid.

### **SOLITONS IN THE DOMAIN STRUCTURE OF AN EASY-AXIS FERROMANGET**

*A.A. Raskovalov, V.V. Kiselev*

M.N. Mikheev Institute of Metal Physics UB RUS, Ekaterinburg

We propose the modification of the inverse scattering problem to study the solitons in stripe domain structure of ferromagnet with an “easy-axis” type in the framework of the Landau–Lifshitz model. We find new solitons, which are inseparable from the domain structure and cannot be studied by the perturbation theory or any other methods. We present the detailed analysis of the physical properties of these solitons. The solitons lead to the deformations and internal oscillations of the neighboring domains and domain walls of the structure. We propose the possibilities of observing and exciting the solitons in the stripe domain structure.

### **ANISOTROPIC AUTOWAVE STRUCTURES IN HEAT-RELEASING PLASMA**

*D.S. Riashchikov, N.E. Molevich, D.I. Zavershinskii*

Samara National Research University

Lebedev Physical Institute, Samara

Thermal instabilities play an important role in spatio-temporal structures formation in such media as interstellar gas, solar atmosphere, planetary nebulae, etc. Isentropic instability, which is the one type of thermal instabilities, causes acoustic modes amplification. Krasnobaev first suggested that it leads to the appearance of shock waves series in the medium. This hypothesis was subsequently confirmed and the properties of emerging structures in gas and plasma were studied both analytically and numerically. Using the approximation of plane waves, the shape, amplitude, and speed of the structures were found analytically. Moreover, conducted research revealed the independence of structure properties from the initial conditions which is characteristic of autowaves.

In the current work, we expand the study to two dimensions to take into account the strong anisotropy of structures in plasma in an external magnetic field. The medium under consideration was described by the set of ideal MHD equations supplemented by the heat-source dependent on temperature and density. Numerical simulations of initial pressure perturbation evolution revealed the strong dependence of properties of emerging structures on the magnetic field magnitude. They are well predicted by one-dimensional model in weak magnetic fields. However, in strong magnetic fields highly anisotropic patterns with new properties are formed.

## QUANTUM-MECHANICAL SIMULATION OF IONIZATION OF MULTI-ELECTRON ATOMS AND GENERATION OF ELECTRON CURRENTS BY INTENSE LASER PULSES

*A.A. Romanov<sup>1,2</sup>, N.V. Vvedenskiĭ<sup>1,2</sup>, A.A. Silaev<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

<sup>2</sup>Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod

The work is devoted to numerical simulation of ionization of various multi-electron atoms by intense laser pulses based on the time-dependent density functional theory. Low-frequency and high-frequency spectra of electron currents excited during atoms ionization by linearly polarized laser pulses of different time forms are calculated and the ranges of applicability of the single active electron approximation for describing of the phenomena under consideration are determined.

## LABORATORY INVESTIGATION OF LASER PLASMA EXPANSION ACROSS THE AMBIENT MAGNETIC FIELD: MODELING OF PLASMA ACCRETION PHENOMENA

*D. Romanovsky<sup>1</sup>, A. Soloviev<sup>1</sup>, K. Burdonov<sup>1</sup>, S. N. Chen<sup>1,2</sup>, A. Ereemeev<sup>1</sup>, G. Revet<sup>2</sup>, S. Pikuz<sup>3</sup>, S. Ryazantsev<sup>3</sup>, A. Sladkov<sup>1</sup>, A. Korzhimanov<sup>1</sup>, V. Ginzburg<sup>1</sup>, E. Khazanov<sup>1</sup>, A. Kochetkov<sup>1</sup>, A. Kuzmin<sup>1</sup>, I. Shaykin<sup>1</sup>, A. Shaykin<sup>1</sup>, I. Yakovlev<sup>1</sup>, M. Starodubtsev<sup>1</sup>, and J. Fuchs<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Institute of Applied Physics, Russian Academy of Science, Nizhny Novgorod

<sup>2</sup>LULI, CNRS UMLR7605, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France

<sup>3</sup>Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Science, Moscow

In this paper, we present the results of a laboratory study of plasma processes that occur during the penetration of plasma flows across an external magnetic field; a similar formulation of the problem is analogous to the penetration of accretion flows of matter into the star's own magnetic field in the vicinity of the plane of the magnetic equator. The experiments were carried out on a laboratory stand for laser-plasma interaction studies, based on the laser complex PEARL. A high-velocity flow of a dense plasma simulating the plasma of the accretion disk was formed by thermal ablation of the substance with the surface of a solid target when it was irradiated with powerful laser radiation. The experiments were carried out in a strong transverse homogeneous magnetic field of the order of 10–20 T. Measured main characteristic of the interaction of a laser plasma with an external transverse magnetic field, such as geometry, speed of expansion and characteristic dimensions of the appearance plasma structures. The main physical mechanisms determining the propagation pattern of the investigated plasma flow perpendicular to the external magnetic field are revealed.

## FEMTOSECOND STRUCTURAL LASER MODIFICATION OF THIN FILM $As_{50}S_{50}$ CHALCOGENIDE GLASS

*A.V. Romashkin<sup>1</sup>, A.A. Murzanev<sup>1</sup>, A.M. Kiselev<sup>1</sup>, A.I. Korytin<sup>1</sup>, M.A. Kudryashov<sup>2</sup>,  
A.V. Nezhdanov<sup>2</sup>, A.I. Mashin<sup>2</sup>, A.N. Stepanov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod

<sup>2</sup>Lobachevsky State University, Nizhny Novgorod

In this research the sample of 4  $\mu\text{m}$   $As_{50}S_{50}$  chalcogenide film, prepared using plasma-enhanced chemical vapor deposition-based (PECVD) approach, was modified by femtosecond laser radiation. The laser oscillator used for micromodification delivers femtosecond pulses with repetition rate of 78 MHz, about 50 fs pulse duration and 800 nm wavelength. The pulse energy was up to 0.58 nJ. During laser irradiation the sample was moved along vertical axis. Each irradiated area represents 4 lines with 440  $\mu\text{m}$  length each with 62.5  $\mu\text{m}$  space between them. These lines were written at 4 different sample translation speed. Then the sample was shifted along horizontal axis. Such modification was repeated at different pulse energies. The modified areas were studied via optical microscopy. Modification threshold was found. Raman spectra were obtained for modified and nonmodified regions. Phase distributions across the modified lines were obtained using Michelson interferometer. The refractive index values for each line were estimated.

## THE INFLUENCE OF A DYNAMICAL GRATING OF INVERSION OF AN ACTIVE MEDIUM ON THE HOT MODES OF A SUPERRADIANT LASER WITH DISTRIBUTED FEEDBACK OF COUNTER-PROPAGATING WAVES

*I.S. Ryabinin, E.R. Kocharovskaya, V.V. Kocharovskiy*

Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

The paper is devoted to analysis of the linearized integro-differential Maxwell-Bloch equations for the superradiant lasers with weak inhomogeneous broadening of an active two-level medium. It is shown that, in the low-Q combined Fabry-Pérot cavities with distributed feedback of counter-propagating waves and continuous pumping of an active medium, the superradiant generation is affected essentially by the appearance of population inversion modulation along a cavity, i.e. inversion grating. For typical parameters of the superradiant lasers, the so-called “hot” lasing modes are found, and their spectra and growth rates are shown to be quite different from the spectra and growth rates of both the electromagnetic modes in the case of zero inversion and the standard polariton modes in the case of negative inversion.

## SEA SURFACE WAVE PARAMETERS RETRIEVAL ALGORITHM BASED ON THE MICROWAVE RADAR DOPPLER SPECTRUM AND RADAR ANTENNA PATTERN

*M.S. Ryabkova, V.Yu. Karaev, M.A. Panfilova, Yu.A. Titchenko, E.M. Meshkov*

Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod

Measurements of the sea surface backscatter at low incidence angles were performed using two Ka-band Doppler radars with different antenna patterns from the offshore plat-

form in the Black Sea in October of 2016. Experiments were performed for different wind speeds and wind directions, and the dependency of Doppler frequency shift and Doppler spectrum width on incidence angles were studied. We introduce the algorithm that allows estimating wind speed and wave fetch using experimental Doppler frequency shift and Doppler spectrum width. Wind direction is known, sea surface waves are considered to be wind generated, antenna pattern is included in equations. Using the estimated wind speed and wave fetch and sea surface spectrum model we calculate significant wave height, dispersion of vertical velocities and average period. The same parameters are calculated using directional spectrum measured by string wave gauge. The results are in good agreement.

This work is supported by the Russian Foundation of Basic Research (grant 17-05-00-939 a, 16-35-00548 mol\_a).

## **NONLINEAR DYNAMICS OF ANTIFERROMAGNETIC THZ-FREQUENCY SPINTRONIC OSCILLATOR**

*A.R. Safin*

National research university "MPEI", Moscow

In this work, the nonlinear dynamics of a ferro- (FM) and antiferromagnetic (AFM)-based terahertz oscillator is developed. The problem is solved both by integrating the coupled equations for the magnetizations of the AFM lattices and by using an approximate description based on the spin-wave complex amplitudes of the magnons. We show that the critical excitation currents of terahertz magnons are approximately  $10^8$ - $10^9$  A/cm<sup>2</sup>, which correspond to the starting currents in the microwave generation of magnons in FM. At the same time, the bifurcation pattern for AFM transitions is much richer than for FM. In particular, the conditions for the emergence of deterministic chaos and solitons can be realized. To increase the power of a terahertz generator based on AFM structures, oscillator networks can be used. In this case, the addition of power will be carried out in the radiation space, and synchronization is achieved by coupling through spin waves.

## **QUANTUM-ELECTRODYNAMICAL EFFECTS IN ION ACCELERATION IN THE LIGHT-SAIL REGIME**

*A.S. Samsonov, E.N. Nerush, I.Yu. Kostyukov*

Institute of Applied Physics, Russian Academy of Science, Nizhny Novgorod

Based on energy and momentum balance a simple 1D analytical model of ion acceleration in the light-sail regime with account for quantum-electrodynamical (QED) effects is developed. Accounting for abundant gamma-photon emission by electrons and positrons is done using explicit quantum expressions. Some phenomenological quantity is introduced to the model which characteristic time dependence is extracted from results of number of 3D particle-in-cell (PIC) simulations of the ion acceleration with different parameters of laser pulse and plasma target. Suggested piecewise-linear approximation of this dependence with qualitatively clear meaning of its segments is shown to be enough for model to be in good correspondence with simulations in terms of energetic quantities of the process.

## **DYNAMICAL ANN AS AN INSTRUMENT FOR DATA-DRIVEN MODELING OF COMPLEX SYSTEMS**

*A.F. Seleznev, A.S. Gavrilov, D.N. Mukhin, E.M. Loskutov, A.M. Feigin*

Institute of Applied Physics of RAS, Nizhny Novgorod

We introduce the new methodology for data-driven modeling and prognosis of complex dynamical systems combining two basic steps: (i) determining the set of phase variables, or embedding, from available time series and (ii) constructing an evolution operator acting in this space. The method is based on construction of an artificial neural network (ANN) with special topology. This ANN-based model, on the one hand, projects the data onto a low-dimensional manifold, and, on the other hand, models a dynamical system on this manifold. To avoid overfitting we use the Bayesian criterion which gives an opportunity to optimize the ANN structure and estimate both the degree of evolution operator nonlinearity and the complexity of nonlinear manifold which the data are projected on. The suggested technique is applied to the high-dimensional dynamical systems: the system of globally coupled Stuart-Landau oscillators and the Lorenz'96 model of atmospheric turbulence, producing high-dimensional space-time chaos.

The study was supported by the Russian Science Foundation (grant № 16-12-10198).

## **CONTROLLED SYNCHRONIZATION OF TWO COUPLED HINDMARSH-ROSE NEURONAL MODELS WITH DISTURBANCES**

*D. Semenov*

Saint Petersburg State University

Institute for Problems of Mechanical Engineering of RAS, Saint Petersburg

The problem of controlled synchronization between two coupled non-identical Hindmarsh-Rose neuronal models was considered in conditions of presence of disturbances. It was shown that using the control law which was suggested in this paper and satisfying the condition that are imposed on the gain  $\gamma$ , we can achieve synchronized behavior of the coupled neurons. This results were mathematically proved and confirmed by the numerical experiment.

## **NEAR-SURFACE ELECTRON ACCELERATION DURING GRAZING INCIDENCE OF A RELATIVISTIC LASER PULSE ONTO A PLANAR TARGET**

*D.A. Serebryakov, E.N. Nerush, I.Yu. Kostyukov*

Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod

A laser-plasma interaction configuration is analyzed analytically and numerically, in which a relativistically intense p-polarized laser pulse is incident onto a planar solid target at a small angle to the surface. Because of the superposition of the incident and reflected waves, a field structure is formed near the surface of the target, propagating along the surface with a phase velocity slightly greater than the speed of light. Using theoretical analysis and numerical simulations, we demonstrate the possibility to accelerate a high number of electrons (tens of nC) to hundreds of MeVs or even GeVs. It becomes possible in this regime because of combining the accelerating field structure and the presence of the dense plasma surface, which effectively works as the electron injector. A model of

electron acceleration in the described configuration is developed which explains key features observed in the numerical simulations. It is also shown that the presence of a preplasma near the target can increase the maximum electron energy and the electron bunch charge, and the optimal preplasma density is found.

## **PLANE SOLITONS IN TWO-DIMENSIONAL LATTICE OF ACTIVE PARTICLES**

*K.S. Sergeev, A.P. Chetverikov*

Saratov State University

Main modes and metastable regimes of two-dimensional active particles lattices with triangular symmetry were found out.

In a lattice with triangular symmetry can exist stationary modes in the form of one or more soliton-like plane waves with uniform distances between their fronts. Directions of their distributions correspond to one of three crystallographic axes.

Metastable states in this kind of lattices are presented by plane soliton-like waves with arbitrary width of front. Their lifetimes depend on initial conditions and parameters. After transient processes end the main stationary state – translational mode established.

## **GENERATION OF SECOND HARMONIC OPTICAL RADIATION FROM SILICON UNDER THE COMBINED ACTION OF OPTICAL AND THZ FIELDS**

*Yu.A. Sergeev*

Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

The use of terahertz (THz) radiation extends the capabilities of nonlinear optical spectroscopy. In this work, we experimentally investigated second harmonic generation (SH) of the optical radiation from the surface of silicon when exposed to a sample of powerful THz field. We studied the dependence of SH signal on the energy of the optical and THz pulses and the time delay between them, the dependence on the azimuthal angle.

## **CHIMERA STATES IN AN ENSEMBLE OF THE COUPLED LORENZ OSCILLATORS**

*I.A. Shepelev, V.S. Anishchenko*

Saratov State University

In this work we have studied transition from the regime of spatial stationary structures and the regime of solitary states to the complete desynchronization. This work is clarification of the study for the case of small values of the coupling strength. One of the found phenomenon is a shift of the effective parameters of individual oscillators under the influence of the coupling strength. It leads to transition from the hyperbolic attractor (Lorenz-type attractor) to the nonhyperbolic attractor of the individual oscillators. This phenomenon is observed in the certain range of values of the coupling parameters. Moreover, the Lorenz oscillator becomes bistable with two chaotic attractors in the regime of the nonhyperbolic attractor. As a result, different stable chimera structures are realized for this regime. Their features are identical to the double-well chimeras, which has been found in the ensembles of nonlocally coupled Chua's circuits or cubic maps.

## **SOLITON GAS WITHIN THE FRAMEWORK OF THE GARDNER EQUATION DESCRIBING WEAKLY NONLINEAR WAVES IN DISPERSIVE MEDIA**

*E.G. Shurgalina*

Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

This paper is devoted to the study of soliton turbulence in long-wave systems described by the fully integrable Gardner equation, which is a generalized Korteweg-de Vries equation with two nonlinearities: quadratic and cubic. It is demonstrated that soliton gas dynamics strongly depends on the sign of cubic nonlinearity. Thus, in the case of negative cubic nonlinearity so-called “thick” or “table-top” solitons may play the essential role. Analytical estimations of thick soliton contribution in statistical moments (mean, variance, skewness and kurtosis) are given and confirmed by numerical modeling. The comparison of the dynamics of soliton gas with the Korteweg-de Vries model (when there is no cubic nonlinearity) is presented. In the case of the Gardner equation with positive cubic nonlinearity, the existence of both positive and negative solitons is possible. It is demonstrated that interaction of bipolar solitons may lead to freak wave (abnormally large wave) formation.

## **ANALYSIS OF THE INTERACTIONS BETWEEN THE RHYTHMS OF THE AUTONOMIC REGULATION OF THE CARDIOVASCULAR SYSTEM DURING COMA IN ACUTE INFRINGEMENT OF CEREBRAL CIRCULATION**

*E.V. Sidak<sup>1</sup>, D.A. Sadchikov<sup>2</sup>, R.S. Khambekov<sup>2</sup>, E.E. Zeulina<sup>2</sup>, B.P. Bezruchko<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Saratov Branch of V. A. Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS

<sup>2</sup>Saratov State Medical University named after V. I. Razumovsky

The work is devoted to the study of the interaction between subsystems of the heart rate regulation and regulation of the vascular tone during coma. Using the method of coupling detection, based on the experimental modeling of phase dynamics, an analysis of the electrocardiogram and photoplethysmogram signals taken from patients during coma was performed. It is shown that during the coma the interaction between the studied subsystems of regulation remains, but the direction of the coupling can vary in time.

## **DETERMINATION OF CAUSAL LINKS BETWEEN TIME SERIES IN THE THEORY OF CLIMATE: MODEL AND NATURE**

*A.A. Skakun<sup>1,2</sup>, M.Ya. Verbitsky<sup>1</sup>, D.M. Volobuev<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>The Central Astronomical Observatory of the Russian Academy of Sciences at Pulkovo,  
Saint Petersburg

<sup>2</sup>Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg

It is widely accepted that global climate system evolution is affected by astronomical forcing. Different climatic models are able to reproduce paleoclimate variations using insolation as a factor, though the role of astronomical forcing (or its causality impact) varies significantly. We suggest to measure directly the causal link between model time series and insolation as a possible criteria of model's plausibility. The causal link between two time series can be measured by the method of conditional dispersion under the assumption of the deterministic chaos being present in each time series. It is reasonable to

assume that causal link between empirical time series and insolation curves can serve as a guide for a climatic model validation: corresponding time series should demonstrate comparable results. Here, we used climatic time series produced by the dynamical climate model (Verbitsky, Volobuev, 2018) together with 18-oxygen benthic foraminifera and the EPICA ice core records. The analysis has shown that the model series are more dependent on the insolation than the natural time series (climatic noise can be a reason for it). We also observe that all time series depend more on the northern hemisphere insolation because of the continental asymmetry between hemispheres.

## **NUMERICAL STUDY OF NON-GYROTROPIC ELECTRON PRESSURE EFFECTS IN LASER-DRIVEN MAGNETIC RECONNECTION**

*A. Sladkov<sup>1,2</sup>, R. Smets<sup>2</sup>, A. Korzhimanov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

<sup>2</sup>Laboratoire de Physique des Plasmas, Ecole Polytechnique, Université Pierre et Marie Curie, France

Magnetic reconnection is an interesting phenomenon to investigate in the laboratory as the underlying mechanisms and timescales are still not well understood. Last experiments observed magnetic reconnection in high-energy-density laser-produced plasma bubbles showed reconnection rates being much higher than estimated from classical theory [1]. This work is a theoretical part of the experimental investigation of magnetic reconnection in laser-produced plasma. As was demonstrated in many previous publications, the electron non-gyrotropic pressure effects play the dominant role in supporting the reconnection electric field in the immediate vicinity of the neutral X point [2]. This work presents a detailed comparison of the simulations of collisionless magnetic reconnection with different electron closure models (isothermal, polytropic, full electron pressure tensor evolution with heat flux equals zero) done with hybrid and fully kinetic codes. Magnetic reconnection is studied in configuration with a neutral X point with a superposed small perturbation of the magnetic field.

1. *Fox W., Bhattacharjee A., Germaschewski K.* Fast Magnetic Reconnection in Laser-Produced Plasma Bubbles // *Physical Review Letters*. 2011. Vol. 106, № 21. Art. 215003.

2. *Hesse M., Neukirch T., Schindler K., Kuznetsova M., Zenitani S.* The diffusion region in collisionless magnetic reconnection // *Space Science Reviews*. 2011. Vol. 160, № 1–4. P. 3–23.

## **NOISE INFLUENCE ON CHIMERA STATES IN AN ENSEMBLE OF NONLOCALLY COUPLED CHAOTIC DISCRETE OSCILLATORS**

*A.V. Slepnev, A.V. Bukh, V.S. Anishchenko, T.E. Vadivasova*

National Research Saratov State University

Chimera states are now studied well enough, but a few questions still remain. One of these questions concerns with a noise influence on arising and stability of chimera structures. The main goal of this work is to study the impact of noise on chimera states existing in an ensemble of chaotic oscillators with nonlocal interaction. As is known, a transition from incoherent chaos to full chaotic synchronization is observed in such ensembles with increasing the coupling strength. This transition is accompanied by a formation of two types of chimera states, so called phase and amplitude chimeras. In the context of this work, the study of a noise influence on both types of chimeras mentioned above is carried out for one-dimensional ensemble of nonlocally coupled Ricker maps.

## **TRAPPING AND MOVING OF MICROPARTICLES IN LIQUID WITH USE OF VORTEX ULTRASONIC BEAM**

*S.I. Solovyov, V.G. Andreev*

M.V. Lomonosov Moscow State University

The acoustic tweezers consisting of eight flat 14-mm piezoelectric transducers located on a conical surface is studied. The radiation from the adjacent transducers is phase-shifted by 45 or 90 degrees so the total phase shift of 360 or 720 degrees is obtained. In this case, a vortex ultrasonic beam is formed in space. The structure of ultrasonic field in the intersection region of the beams has potential energy minima where a solid particle can be trapped. The deepest potential well is formed near the beam axis in a central plane above 50 mm over the cone top. The magnitude of the radiation force depends on the pressure amplitude of the individual transducers. Submillimeter in size polystyrene microparticles should be trapped in the vicinity of the central plane if all transducers have the same vibrational velocity about 0.1 m/s.

## **AUTOMATIC ANALYSIS OF CALCIUM IMAGING DATA AND ITS APPLICATION FOR THE SEARCH OF NEURONAL SPECIALIZATIONS**

*V.P. Sotskov<sup>1</sup>, D.V. Konstantinov<sup>1</sup>, V.V. Plusnin<sup>1</sup>, O.A. Ivleva<sup>2</sup>, K.V. Anokhin<sup>2,3,4</sup>*

<sup>1</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (State University)

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University

<sup>3</sup>National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow

<sup>4</sup>P.K. Anokhin Normal Physiology Institute, Moscow

Searching for the connections between neuronal activity and behavior of animals is one of the most important problems in neuroscience. Optical *in vivo* calcium imaging allows simultaneous registration of large neuronal populations in awake moving animals. A novel approach is used for this – miniature microscope NVista HD which weights 2 g only can be mounted directly onto mouse's head. However, a signal which can be registered in such manner usually contains a variety of noise and the isolation of locations and dynamics of single neurons appears to be a pretty difficult problem. In this study a set of programming solutions is presented, which makes possible the analysis of such signal in automatic mode, and also its synchronization with videotracking data. The approaches listed above are used for detection of correlative connections between mouse behavior and place cells activity during the exploration of a novel environment. This should clarify, how in details separate behavior acts of exploration drive the spatial specialization of place cells, what appears to be an important fundamental result.

## **COLLECTIVE DYNAMICS OF THE NETWORK OF INHOMOGENEOUS NON-ISOCRONOUS OSCILLATORS**

*S. Subbotin*

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

We review the dynamics of a network of inhomogeneous non-isochronous oscillators. For the Gaussian distribution of the control parameters of the oscillators, fundamen-

tally different collective dynamics are possible, depending on the coupling coefficient between them. The most interesting one is the regime of spatio-temporal disorder. In this mode, the dynamics of an individual oscillator as well as those of the ensemble-averaged variables are irregular. This mode exists in a relatively large range of coupling coefficients, and it corresponds to the collective spiking activity of the network.

## **SIMULATION OF THE RELATIVISTIC FEEDBACK DISCHARGE AND ITS APPLICATION TO RECOVERY OF THE CLOUD ELECTRICAL STRUCTURE**

*E.K. Svechnikova, E.A. Mareev*

Institute of Applied Physics, Russian Academy of Science, Nizhny Novgorod

The problem of electric field structure in thundercloud estimation is still unsolved due to difficulties of direct measurements. New information on this subject could be derived from the data on particle fluxes from thundercloud analysis, based on the relativistic feedback discharge model.

Positrons play a major role in creating the feedback effect in a wide range of field strength values. A system of equations is developed, which allows describing the role of positrons quantitatively in the avalanche development. The analysis of the system enables to determine the influence of the processes involving positrons on the resulting structure of the electric field and on the value of the field strength required to discharge initiation.

Simulation of particle fluxes, being compares with measurement results, provides an opportunity to estimate an impact of the feedback process in a certain event, and to recover the cloud electric structure, including the charge and height of the lower positive charge region.

## **QUASI-STATIC PRECURSORS OF LASER PULSES IN ELECTRO-OPTIC CRYSTALS: A TOY MODEL**

*S.A. Sychugin, M.I. Bakunov*

N.I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

A toy model for studying of the effect of the finite transverse laser beam size on the generation of quasi-static electromagnetic precursor by an intense ultrashort laser pulse in an electro-optic crystal has been proposed. It is shown that a precursor is formed even for a narrow laser beam.

## **MODELING OF DEVELOPMENT DYNAMICS OF NEGATIVE STEPPED LIGHTNING LEADER**

*A.A. Syssoev*

Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

For almost a century it is known that negative leaders, in contrast to positive ones, develop in a stepwise manner resorting to the help of space leaders. However, a comprehensive understanding of reasons responsible for this asymmetry is still not achieved. The physics of the negative leader steps formation causes lots of questions too.

In this study probabilistic approach was used to build the phenomenological model, which for the first time allowed numerical simulation of the negative stepped leader de-

velopment. The calculations took into account the asymmetry of positive and negative streamer discharges as well as temporal evolution of discharge channels conductivity and electric field strength. This allowed reproducing the entire cycle of the stepped formation process including genesis of positive and negative stem-originating streamers and their subsequent transformation into space leaders. It was shown that stepped nature of the negative leader advancement is connected with difference in characteristic fields of positive and negative streamers development and provided by the influence of the space charge injected into the discharge gap by the negative streamer corona and forming leader channel sheath. Morphology of model discharges is in good agreement with the modern data of high-speed recordings of natural negative lightning leaders.

## **NONGAUSSIAN STATISTICS OF THE NUMBER OF CONDENSED PARTICLES FOR AN ALMOST HOMOGENEOUS BOSE-CONDENSATE**

*S.V. Tarasov*

Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

A talk is devoted to analytical calculations of the statistical distribution of the total number of condensed particles for a mesoscopic finite-temperature weakly interacting Bose-system with an almost homogeneous wave function of a condensate. The calculations are carried out within the mean-field Bogoliubov and Thomas-Fermi approximations via the methods of characteristic functions and Wigner integral transformation.

In the considered cases of flat traps and moderate temperatures, the statistics of the number of condensed particles shows the anomalously large fluctuations and is strongly non-Gaussian both for the mesoscopic systems and in the thermodynamic limit. The shape of the statistical distribution is sensitive to the change of boundary conditions (e.g., from periodic to Dirichlet) and the shape of the trap (e.g., from rectangular to cylindrical).

The ways of straightforward experimental registration of the anomalously large standard deviation and of a non-Gaussian statistical distribution behavior by means of the developed experimental methods and already existing traps are also discussed.

## **SPIN WAVES IN PARAMAGNETIC CRYSTAL WITH DIPOLAR INTERACTION**

*K.B. Tsiberkin, V.K. Henner*

Perm State University

Dipolar paramagnetic crystal is described in spin-waves framework basing Holstein-Primakoff transformation. The crystal is under uniform constant magnetic field near saturation state. The spin waves are introduced as the collective spin deviations from field direction. Linear response theory is applied to calculate the effect of longitudinal magnetic field jump on the crystal. Free induction decay signal and its' spectrum, longitudinal magnetization and density of states are calculated. The spin-wave model permits a full analytical calculation of the transversal magnetization signal. Also, the magnetization dynamics is considered in continuous medium limits. It is similar to the long-wave limit of spin-wave formalism. The properties of magnetization signal and spectrum obtained in the spin-wave model correspond with the general theoretical and experimental data on dipolar interaction effects in nuclear magnetic resonance.

## **EFFECT OF THE INTRINSIC NOISE ON THE CHIMERA STATES IN COUPLED KURAMOTO ENSEMBLES**

*I.V. Tyulkina<sup>1</sup>, D.S. Goldobin<sup>1,2</sup>, A. Pikovsky<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Perm State University

<sup>2</sup>Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm

<sup>3</sup>Universität Potsdam, Germany

We develop perturbation theory on top of the Ott–Antonsen theory for the case of ensemble of oscillators with intrinsic noise. In this case, identical oscillators form attracting one-cluster states, which allows one deriving the reduction equations for order parameters within the vicinity of these states. The intrinsic noise is found to bring an effective dissipativeness in the dynamics of order parameters. The developed perturbation theory is employed for studying the effect of intrinsic noise on the Chimera states in connected Kuramoto ensembles. We reveal significant reduction of the diversity of possible types of Chimera states; multi-cluster states of subensembles disappear – one-cluster states become attracting. The results of the perturbation theory and numerical simulation of the original equations are in close agreement with each other.

## **BACKWARD TERAHERTZ RADIATION FROM THE TWO-COLOR LASER-INDUCED FILAMENT**

*A.A. Ushakov*

A.M. Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow

M.V. Lomonosov Moscow State University

We report the first experimental observation of backward terahertz emission from the two-color laser induced plasma filament in air. The ratio of measured forward-to-backward THz radiation is 25/1. This result agrees with numerical simulations based on interferometric model assuming 0.3-mm-long plasma source.

## **SELF-ORGANIZING MAPS FOR SIMULATION RESULTS ANALYSIS OF LASER-PLASMA ACCELERATORS**

*T.M. Volkova<sup>1</sup>, E.N. Nerush<sup>1,2</sup>, I.Yu. Kostyukov<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Lobachevsky State University, Nizhny Novgorod

<sup>2</sup>Institute of Applied Physics of Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

The possibility of using neural networks on the basis of Kohonen self-organizing maps for analyzing the results of modeling of laser-plasma interaction is analyzed. Various methods for preparing data before processing in a neural network are proposed. The code developed on the basis of this method was used to analyze the results of laser-plasma interaction simulations and to identify various modes of interaction. Such an analysis is important for the choice of optimal parameters for design of laser-plasma accelerators.

It is demonstrated that the developed algorithm strongly simplifies the analysis of the results for numerical modeling of various processes. There is no need to manually review the simulation results and to analyze the huge multiparameter arrays of data. The proposed automatization presents the results of the simulation in a visual and convenient way: the correspondence between the parameters of the laser-plasma interaction and the interaction regimes are visually displayed.

**THE DYNAMICS OF THE RESONATOR  
WITH A NONLINEAR METAMATERIAL AND FEEDBACK WITH DELAY**

*E.A. Yarunova, A.A. Krents, N.E. Molevich*

Lebedev National Research University, Samara  
Samara National Research University

This paper is about investigation of dynamics of an optical field in a ring resonator containing an optical metamaterial with a cubical nonlinearity of the Kerr type. The analysis of the effect of additional radiation on time dynamics, which described by Lugiato-Lephever equation is carried out. The presence of an additional term complicates the temporal dynamics, which is the interest of this work. Nontrivial dynamics – unstable periodic orbits were obtained.

**PARAMETRICAL QUASI-RESONANT AMPLIFICATION OF ALFVEN WAVES  
IN HEAT-RELEASING ISENTROPICALLY UNSTABLE PLASMA**

*D.I. Zavershinskii, N.E. Molevich, S.A. Belov*

Samara National Research University  
Lebedev Physical Institute, Samara

Three-wave interactions of the powerful magnetoacoustic wave with the Alfvén waves in heat-releasing ionized media are considered. The system describing the parametrical decay of the acoustic wave is obtained. The solution of the obtained system is found analytically for long wave and weak nonlinearity approximations. The obtained solutions for the Alfvén waves strongly depend on the frequency detuning  $\Delta\omega$ . When  $\Delta\omega$  equals zero, the amplification of Alfvén waves is resonant, non-threshold and bi-exponential. With frequency detuning increase, the parametrical amplification of Alfvén waves becomes slower, further on, modulation is observed before bi-exponential amplification, and, finally, there is only Alfvén wave modulation. The cause of the modulation, which is observed before the amplification, is the existence of a threshold for amplitude. Conditions of the Alfvén wave amplification caused by the quasi-resonant parametrical energy transfer from unstable magnetoacoustic waves are obtained.

**EXCITABILITY OF NEURAL GENERATOR BASED  
ON THE PHASE-LOCKED LOOP IN RESPONSE TO PERIODIC  
PULSE STIMULATION**

*N.S. Zhukova, M.A. Mishchenko*

National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

The dynamics of the neural generator based on the phase-locked loop in response to periodic pulse stimulation was investigated. Also, the stimulation by unidirectionally connected similar neural generator has been observed. This work explored the influence of stimulus parameters (amplitude, period) on frequency ratio between neural generator and stimulation. It was noted that stimulation amplitude changing leads to amplitude ranges with limited response frequency ratio. Small periods of the stimulation results in a smoother transition to the synchronization with other frequency ratio, in the opposite case – to a sharper transition.

The stimulation of neural generator via synaptic pulses of another generator shows similar results on frequency ratio distribution.

This work was supported by RFBR Grant No. 16-31-60080 mol\_a\_dk and by President Grant No. MK-2726.2017.2.

## **NUMERICAL SIMULATION OF WHISTLER-MODE WAVES' WAVES PROPAGATION THROUGH THE MAGNETIZED PLASMA WITH SMALL-SCALE FIELD-ALIGNED DENSITY IRREGULARITIES**

*I.Y. Zudin, N.A. Aidakina, M.E. Gushchin, T.M. Zaboronkova, S.V. Korobkov*

Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

Previous active experiments show that high frequency ionosphere heating led to the excitation of plasma irregularities in a column rest upon heating area. It was founded out that the system of plasma density irregularities acts as a specific waveguide for whistler-mode waves passing through the ionosphere [1]. We performed a numerical simulation of whistler-mode waves' propagation through the magnetized plasma with small-scale field-aligned density irregularities for checking this idea. We used FDTD method and analytic approach for two-dimensional model. This report presents the results of numerical simulations with the plasma parameters in upper ionosphere.

1. *Rapoport, V.O.* VLF electromagnetic field structures in ionosphere disturbed by Sura RF heating facility / V.O. Rapoport, V.L. Frolov, S.V. Polyakov, G.P. Komrakov, N.A. Ryzhov, G.A. Markov, A.S. Belov, M. Parrot, and J.-L. Rauch // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. A10322.

## **COMPRESSOR OF SUBPETAWATT LASER PULSES IN COMPLEX PEARL**

*A.S. Zuev<sup>1</sup>, A.A. Shaykin<sup>1</sup>, I.V. Yakovlev<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

<sup>2</sup>National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

The front-end of laser system PEARL was upgraded. The Cr:Forsterite oscillator was replaced by a Ti:Sapphire oscillator radiating a broadband pulse with central wavelength of 910 nm. For completing the condition of phase matching at compression a unique prism-grating stretcher was replaced by single-grating Offner stretcher, a Treacy four-grating compressor was aligned for pulse duration minimization. We obtained output pulses after compressor with duration 43 fs, the beam diameter was 18 cm. Considering that the grating resistance is  $0.2 \text{ J/cm}^2$ , the system after upgrading of the front-end and aligning of the compressor is able to compress pulses with power exceeding 1 PW.

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Адилова А.Б., Герасимова С.А., Рыскин Н.М.</i> Исследование взаимной синхронизации связанных гиротронов в режиме жесткого возбуждения .....	5
<i>Айдакина Н.А., Гуцин М.Е., Зудин И.Ю., Коробков С.В., Стриковский А.В.</i> Исследование динамики возмущений замагниченной плазмы в поле мощного радиоимпульса на крупномасштабном стенде «Крот».....	7
<i>Акатьев Д.О., Калачев А.А.</i> Влияние электрооптического эффекта Поккельса на спектр спонтанного параметрического рассеяния света.....	8
<i>Антонов И.Д., Порубов А.В.</i> Управление нелинейными локализованными волнами в механических системах .....	10
<i>Артемenco И.И., Неруш Е.Н., Костюков И.Ю.</i> Синхротрон-черенковское излучение в вакууме .....	12
<i>Бажанова М.В., Лобов С.А., Балашова К.И., Макаров В.А., Казанцев В.Б.</i> Управление формированием связей в нейронной сети с STDP-пластичностью .....	13
<i>Башинов А.В., Ефименко Е.С., Ким А.В.</i> Токовая неустойчивость электрон-позитронной плазмы в сверхсильных лазерных полях: динамика углового распределения излучения.....	15
<i>Беликович М.В., Куликов М.Ю., Нечаев А.А., Ермакова Т.С., Фейгин А.М.</i> Применение базовых динамических моделей для валидации спутниковых измерений .....	17
<i>Белов С.А., Молевич Н.Е., Завершинский Д.И.</i> Усиление альфвеновских волн в результате нелинейного ортогонального взаимодействия с быстрой магнитоакустической волной в тепловыделяющей электрически проводящей среде .....	19
<i>Болотов М.И., Смирнов Л.А., Осипов Г.В., Пиковский А.С.</i> Бризерные химеры в системе фазовых осцилляторов .....	20
<i>Большаков Д.И., Мищенко М.А., Матросов В.В.</i> Нейроноподобный генератор с импульсной и пачечной динамикой.....	23
<i>Булатов А.А., Иудин Д.И.</i> Транспортная самоорганизующаяся модель инициации молнии.....	24
<i>Волкова Т.М., Неруш Е.Н., Костюков И.Ю.</i> Использование самоорганизующихся карт Кохонена для анализа результатов моделирования лазерно-плазменного ускорения электронов.....	25
<i>Волковская И.И., Смирнова Д.А.</i> Генерация второй гармоники ми-резонансными наночастицами с объемной квадратичной нелинейностью .....	26
<i>Гаврилов А.С., Селезнев А.Ф., Мухин Д.Н., Лоскутов Е.М., Фейгин А.М.</i> Новые переменные для эмпирической прогностической модели Эль-Ниньо .....	27

<i>Гарбузов Ф.Е., Бельтюков Я.М., Самсонов А.М.</i> Нелинейные продольные волны деформации в тонких слоистых волноводах .....	29
<i>Гелаиш А.А., Агафонцев Д.С.</i> Солитонная и бризерная турбулентность в НУШ .....	31
<i>Гладских Д.С., Сергеев Д.А., Байдаков Г.А., Соустова И.А., Троицкая Ю.И., Иванов А.В.</i> Прогнозирование вертикального температурного распределения и эвтрофикации внутренних водоемов с использованием данных натурных измерений .....	32
<i>Голованов А.А., Костоюков И.Ю., Томас Й., Пухов А.М.</i> Аналитическая модель для электромагнитного поля в сильно нелинейной кильватерной волне ...	34
<i>Гулай А.П., Астахов С.В.</i> Двумодовый генератор Ван-дер-Поля как базовый элемент модели центрального генератора ритма .....	36
<i>Демакова А.А., Баханов В.В., Титов В.И.</i> Исследование нелинейных процессов в ветровом волнении дистанционными оптическими методами .....	38
<i>Дементьева С.О., Мареев Е.А.</i> О роли турбулентности при электризации в дисперсных многофазных средах .....	39
<i>Дидов А.А., Улейский М.Ю.</i> Резонансные структуры и их бифуркации в ABC-потоке .....	41
<i>Долматова А.В., Голдобин Д.С., Любимова Т.П.</i> Горизонтальные вибрации и эффективная инверсия силы тяжести в двухслойной системе невязких жидкостей .....	43
<i>Евстигнеев Р.С., Чуриков Д.В., Сафин А.Р., Кравченко О.В., Харламова С.С., Булатов М.Ф.</i> Перемагничивание магнитных частиц в углеродной нанотрубке под действием поляризованного света .....	45
<i>Евстифеев Е.В., Москаленко О.И.</i> Метод выделения характерных фаз поведения в связанных системах, находящихся в режиме перемежающейся обобщенной синхронизации .....	46
<i>Евтушенко А.А., Кутерин Ф.А., Слюняев Н.Н.</i> О численном моделировании дневного и ночного спрайта .....	48
<i>Емелина А.С., Емелин М.Ю., Рябикин М.Ю.</i> Генерация высоких гармоник от лазерных источников среднего ИК-диапазона: закон спадания эффективности преобразования с длиной волны лазера .....	49
<i>Жукова Н.С., Мищенко М.А.</i> Возбудимость нейроноподобного генератора на базе системы фазовой автоподстройки частоты в ответ на периодическую импульсную стимуляцию .....	50
<i>Завершинский Д.И., Молевич Н.Е., Белов С.А.</i> Параметрическое квазирезонансное усиление альфвеновских волн в тепловыделяющей изоэнтропически неустойчивой плазме .....	51

<i>Зудин И.Ю., Айдакина Н.А., Гуцин М.Е., Заборонкова Т.М., Коробков С.В.</i> Моделирование распространения свистовых волн вдоль мелкомасштабных неоднородностей в условиях внешней ионосферы.....	53
<i>Зуев А.С., Шайкин А.А., Яковлев И.В.</i> Компрессор субпетаваттных лазерных импульсов в комплексе PEARL .....	54
<i>Иибулатов Ю.М., Караваев А.С.</i> Частотная синхронизация контуров регуляции кровообращения в математической модели сердечно-сосудистой системы.....	56
<i>Казачков А.О.</i> Смешанная динамика в обратимых системах.....	58
<i>Карабанов И.В., Пархоменко А.Я.</i> Двухточечные корреляторы заряженных фермионов в постоянном однородном магнитном поле.....	59
<i>Карпов В.А., Носов М.А., Матсумото Х., Канада Й.</i> Взаимосвязь ускорений сейсмических движений дна и вариаций придонного давления, зарегистрированных глубоководными станциями DONET во время землетрясения Тохоку 2011 года.....	60
<i>Каткова О.С., Сафин А.Р.</i> Кросс-частотная синхронизация в нейроморфных ансамблях вихревых спинтронных осцилляторов.....	61
<i>Качулин Д.И., Дьяченко А.И., Захаров В.Е.</i> Моделирование встречных волн на поверхности глубокой воды.....	62
<i>Кашина М.А., Алабужев А.А.</i> Влияние неоднородности поверхности подложки на колебания капли в неоднородном электрическом поле.....	64
<i>Кирсанов Д.В., Пицик Е.Н.</i> Выявление паттернов воображаемых движений на записи ЭЭГ методами машинного обучения.....	66
<i>Клименко Л.С., Марышев Б.С.</i> Влияние осаждения примеси в рамках фрактальной модели на прокачку смеси через пористую среду.....	68
<i>Колоскова А.Д., Москаленко О.И., Короновский А.А.</i> Разработка и апробация метода расчета спектра показателей Ляпунова для систем с запаздыванием .....	70
<i>Коржиманов А.В.</i> Негативное влияние самогенерируемых квазистационарных магнитных полей на процесс ускорения ионов лазерными импульсами сверхвысокой интенсивности .....	72
<i>Корнилов М.В., Сысоев И.В.</i> Реконструкция архитектуры связей в цепочке однонаправленно связанных систем методом причинности по Грейнджеру .....	74
<i>Коробейникова А.П., Шайкин И.А., Корюкин И.В., Хазанов Е.А.</i> Моделирование процесса генерации импульсов в многомодовом генераторе с модуляцией добротности с учетом бегучести при реальных параметрах резонатора .....	76
<i>Котов А.В., Бурдонов К.Ф., Костюков И.Ю., Первалов С.Е., Романовский Д.С., Соловьев А.А., Стародубцев М.В.</i> Лазерное ускорение электронов из газовой ячейки на петаваттном комплексе PEARL.....	78

<i>Кочетков А.А., Гинзбург В.Н., Хазанов Е.А.</i> Самофльтрация сверхмощных лазерных пучков при распространении в свободном пространстве .....	80
<i>Красиков С.Д., Богданов А.А., Иорш И.В.</i> Нелинейные связанные состояния в континууме и мультистабильный отклик в одномерном фотонно-кристаллическом волноводе .....	81
<i>Кронштадтов П.В., Зайцев В.В.</i> Постоянство поперечного сечения корональных магнитных петель .....	83
<i>Круглов В.Е.</i> О топологической классификации $\Omega$ -устойчивых потоков на поверхностях .....	84
<i>Круглов В.П., Дорошенко В.М., Кузнецов В.П.</i> Гиперболический хаос в связанных осцилляторах Бонхоффера – Ван-дер-Поля, функционирующих с возбуждением релаксационных автоколебаний .....	87
<i>Крылов С.Н., Смирнов Д.А., Безручко Б.П.</i> Количественный анализ эффекта ложных связей из-за измерительного шума и короткого временного ряда .....	89
<i>Кузнецова А.М., Байдаков Г.А., Досаев А.С., Кандауров А.А., Вдовин М.И., Папко В.В., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И.</i> Численное моделирование поверхностных волн на малых разгонах внутренних водоемов .....	91
<i>Кулямин Д.В.</i> Моделирование верхней атмосферы и ионосферы в рамках развития модели Земной системы ИВМ РАН .....	93
<i>Лантес Д.В.</i> Динамика дискретных бризеров в интегрируемых моделях кристаллических и электрических систем .....	94
<i>Леванова Т.А., Казаков А.О., Коротков А.Г., Осипов Г.В.</i> Влияние электрических связей на динамику ансамбля нейроноподобных элементов .....	95
<i>Левин Д.С., Балакин А.А., Скобелев С.А.</i> Оптимизация параметров рамановской компрессии лазерных импульсов в плазме для установки PEARL....	96
<i>Лесик М.В., Андреев В.Г.</i> Радиационная сила, действующая на твердые микрочастицы в сфокусированном ультразвуковом пучке .....	99
<i>Макеева А.А.</i> Генерация спайковых колебаний в системе нейронов Фитц-Хью – Нагумо с различным уровнем деполяризации .....	99
<i>Мартынов В.О.</i> Формирование запутанных состояний в решетке световодов с квадратичной нелинейностью .....	100
<i>Медведева Т.М., Сысоева М.В., Сысоев И.В.</i> Моделирование пик-волновых разрядов с помощью сложной сети нейронных осцилляторов .....	102
<i>Минина А.А., Фролов М.В., Манаков Н.Л., Силаев А.А., Введенский Н.В., Старас А.Ф.</i> Поляризационный контроль генерации высоких гармоник в импульсном бициркулярном лазерном поле .....	104
<i>Митина В.С., Кренц А.А., Молевич Н.Е.</i> Динамика лазера с когерентной инжекцией и модуляцией накачки .....	106

<i>Митрофанов А.А., Сафин А.Р., Удалов Н.Н.</i> Фазовые шумы синхронизированных неизохронных автогенераторов.....	108
<i>Михейцев Н.А.</i> Влияние конечной массы ионов на эффект релятивистской самоиндуцированной прозрачности в неоднородной плазме .....	110
<i>Мишин А.В., Кочаровский Вл.В., Кочаровский В.В.</i> Параметрический резонанс на разностной частоте в системе двух связанных осцилляторов.....	111
<i>Морозов Н.С., Бугров В.Н., Орлов И.Я.</i> Проектирование целочисленных цифровых фильтров с произвольной формой характеристик .....	113
<i>Мохсени Т.И., Дмитриев А.С., Сьерра К.</i> Схема относительной передачи информации на основе хаотических радиоимпульсов.....	115
<i>Мулладжанов Р.И., Сандберг Р.Д., Абдуракипов С.С., Джордж В.К., Ханьялич К.</i> Бегущие спиральные волны в турбулентной струе .....	117
<i>Муравьев А.А., Сергеев А.М.</i> Движение частиц в гигантских квазистатических магнитных полях, генерируемых встречными лазерными пучками сверхвысокой интенсивности .....	119
<i>Мурзанев А.А., Бодров С.Б., Карташов Д.В., Самсонова Ж.А., Петрарка М.</i> Прецизионная интерферометрия лазерной плазмы суперфиламента .....	120
<i>Недайвозов В.О.</i> Выявление зависимости уровня концентрации от мотивации и бдительности .....	121
<i>Нечаев А.А., Бородачёв Л.В., Гарасёв М.А., Беляев А.А., Кочаровский В.В., Мартыанов В.Ю.</i> Нелинейная стадия вейбелевской неустойчивости и согласованная эволюция токов электронов и ионов в плазме с анизотропией температуры.....	123
<i>Низов В.А., Ахмеджанов Р.А., Гуцин Л.А., Зеленский И.В., Низов Н.А., Собгайда Д.А.</i> Применение поликристаллических алмазов для магнитометрии на основе кросс-релаксационного взаимодействия групп NV-центров .....	125
<i>Низов Н.А., Ахмеджанов Р.А., Гуцин Л.А., Зеленский И.В., Калачев А.А., Низов В.А., Собгайда Д.А.</i> Эффект электромагнитно индуцированной прозрачности в изотопически чистом кристалле Nd:YLF.....	126
<i>Огородников Л.Л., Колоколов И.В., Лебедев В.В.</i> Динамика магнитного поля в квазидвумерном случайном потоке .....	127
<i>Огородников Л.Л., Вергелес С.С., Лебедев В.В.</i> Статистика интенсивности выходного излучения случайного волоконного лазера .....	129
<i>Оладышкин И.В., Сергеев Ю.А., Бодров С.Б., Корытин А.И., Токман М.Д., Степанов А.Н.</i> Межзонные переходы и спонтанная оптическая эмиссия графена в мощном терагерцовом поле.....	130
<i>Орлов А.В., Бражников М.Ю., Левченко А.А.</i> Формирование крупномасштабного когерентного вихря в двумерной турбулентности.....	132

<i>Пашин Д.С., Сатанин А.М., Ким Ч.С.</i> Квантовая диссипативная динамика джоозефсоновского осциллятора в условиях резонансного возбуждения.....	134
<i>Первалов С.Е., Бурдонов К.Ф., Стародубцев М.В., Соловьев А.А.</i> Модернизированный спектрометр томсоновская парабола для исследования временной динамики TNSA-источника протонов и ионов .....	135
<i>Петросян М.М., Дмитриев А.С., Ицков В.В., Рыжов А.И.</i> Приёмник радиосвета с цифровым накоплением.....	137
<i>Плотников С.А., Фрадков А.Л.</i> О синхронизации в сетях Фитц-Хью – Нагумо с малыми задержками.....	139
<i>Плюснин В.В., Сотсков В.П., Анохин К.В.</i> Интеграция нейронной активности и поведения мышей: количественное определение полей места.....	141
<i>Понарина М.В., Охримчук А.Г., Рыбин М.Г., Таракановский А.А., Долматов Т.В., Букин В.В., Образцов П.А.</i> Пассивная синхронизация мод в волноводном Nd:YAG-лазере с частотой повторения импульсов 10 ГГц.....	142
<i>Попов М.Г., Рыжов А.И., Герасимов М.Ю.</i> Прохождение сверхширокополосных хаотических сигналов через среду, имитирующую характеристики живого организма.....	143
<i>Просвиряков Е.Ю.</i> Точные решения уравнений Навье – Стокса и Обербека – Буссинеска, описывающих усиление колебаний в вязкой несжимаемой жидкости.....	145
<i>Расковалов А.А., Киселев В.В.</i> Солитоны в доменной структуре легкоосного ферромагнетика.....	147
<i>Романов А.А., Введенский Н.В., Силаев А.А.</i> Квантово-механическое моделирование ионизации многоэлектронных атомов и генерации электронных токов интенсивными лазерными импульсами.....	149
<i>Романовский Д., Соловьев А., Бурдонов К., Чен С.Н., Еремеев А., Реве Г., Пикуз С., Рязанцев С., Сладков А., Коржиманов А., Гинзбург В., Хазанов Е., Кочетков А., Кузьмин А., Шайкин И., Шайкин А., Яковлев И., Стародубцев М., Фукс Ж.</i> Лабораторное исследование расширения лазерной плазмы во внешнем поперечном магнитном поле: моделирование явления аккреции.....	151
<i>Ромашкин А.В., Мурзанев А.А., Киселев А.М., Корытин А.И., Кудряшов М.А., Нежданов А.В., Машин А.И., Степанов А.Н.</i> Фемтосекундная структурная модификация тонкой пленки халькогенидного стекла состава $As_{50}S_{50}$ .....	154
<i>Рябинин И.С., Кочаровская Е.Р., Кочаровский Вл.В.</i> Влияние динамической решётки инверсии населённостей активной среды на горячие моды сверхзлучающего лазера с распределённой обратной связью встречных волн ....	155
<i>Рябкова М.С., Караев В.Ю., Панфилова М.А., Титченко Ю.А., Мешков Е.М.</i> Определение статистических параметров ветрового волнения по измерениям доплеровского спектра отраженного радиолокационного сигнала с учетом диаграммы направленности антенны локатора.....	157

<i>Рящиков Д.С., Молевич Н.Е., Завершинский Д.И.</i> Анизотропные автоволновые структуры в тепловыделяющей плазменной среде.....	159
<i>Самсонов А.С., Неруш Е.Н., Костюков И.Ю.</i> Ускорение ионов в режиме светового паруса с учётом квантово-электродинамических эффектов.....	161
<i>Сафин А.Р.</i> Нелинейная динамика антиферромагнитного спинтронного осциллятора.....	163
<i>Свечникова Е.К., Мареев Е.А.</i> Моделирование разряда с релятивистской обратной связью и его применение для оценки электрической структуры грозового облака.....	164
<i>Селезнев А.Ф., Гаврилов А.С., Мухин Д.Н., Лоскутов Е.М., Фейгин А.М.</i> Моделирование сложных систем по наблюдаемым данным на основе динамических искусственных нейронных сетей.....	166
<i>Семенов Д.М.</i> Управляемая синхронизация двух связанных нейронных моделей Хиндмарш – Роуз при наличии возмущений.....	168
<i>Сергеев К.С., Четвериков А.П.</i> Плоские солитоны в двумерной решетке активных частиц.....	170
<i>Сергеев Ю.А., Бодров С.Б., Кoryтин А.И., Мурзанов А.А., Степанов А.Н.</i> Генерация второй гармоники оптического излучения из кремния при совместном воздействии оптического и терагерцового полей.....	172
<i>Серебряков Д.А., Неруш Е.Н., Костюков И.Ю.</i> Приповерхностное ускорение электронов при скользящем падении релятивистского лазерного импульса на твердотельную мишень.....	173
<i>Сидак Е.В., Садчиков Д.А., Хамбеков Р.С., Зеулина Е.Е., Безручко Б.П.</i> Анализ взаимодействия ритмов вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы у пациентов во время комы при остром нарушении мозгового кровообращения.....	175
<i>Скақун А.А., Вербицкий М.Я., Волобуев Д.М.</i> Приложение метода определения каузальных связей между временными рядами к теории климата: модель и природа.....	177
<i>Сладков А., Смет Р., Коржиманов А.</i> Численное исследование влияния эффектов негиротропного тензора электронного давления на магнитное пересоединение в лазерно-плазменном эксперименте.....	179
<i>Слепнев А.В., Бух А.В., Анищенко В.С., Вадивасова Т.Е.</i> Влияние шума на химерные состояния в ансамбле нелокально связанных хаотических дискретных осцилляторов.....	180
<i>Соловьев С.И., Андреев В.Г.</i> Захват и перемещение микрочастиц в жидкости с использованием закрученного ультразвукового пучка.....	182
<i>Сотсков В.П., Константинов Д.В., Плюснин В.В., Ивлева О.А., Анохин К.В.</i> Автоматический анализ данных кальциевого имиджинга и его применение для поиска нейронных специализаций.....	184

<i>Субботин С.А.</i> Коллективная динамика сети неоднородных неизохронных осцилляторов.....	185
<i>Сысоев А.А., Иудин Д.И., Давыденко С.С., Раков В.А.</i> Моделирование динамики развития отрицательного ступенчатого лидера молнии .....	186
<i>Сычугин С.А., Бакунов М.И.</i> Квазистатистические предвестники лазерных импульсов в электрооптических кристаллах: модель-игрушка .....	187
<i>Тарасов С.В.</i> Негауссова статистика числа частиц в близком к однородному конденсате бозе-газа.....	188
<i>Тюлькина И.В., Голдобин Д.С., Пиковский А.</i> Влияние внутреннего шума на состояния «химеры» в связанных ансамблях Курамото.....	190
<i>Ушаков А.А., Матоба М., Немто Н., Канда Н., Конishi К., Чижев П.А., Панов Н.А., Шитило Д.Е., Букин В.В., Кувата-Гоноками М., Юмото Дж., Косарева О.Г., Гарнов С.В., Савельев А.Б.</i> Обратное терагерцовое излучение из двухчастотного лазерно-индуцированного филамента.....	193
<i>Филатов С.В., Храмов Д.А., Бражников М.Ю., Левченко А.А.</i> Генерация вихревого движения волнами на поверхности воды.....	195
<i>Хайрулин И.Р., Антонов В.А., Кочаровская О.А.</i> Формирование аттосекундных импульсов в активной среде плазменного рентгеновского лазера, модулированной лазерным полем оптического диапазона .....	196
<i>Ханадеев В.А., Короновский А.А., Москаленко О.И.</i> Обобщенная синхронизация в хаотических системах, характеризующихся двумя положительными показателями Ляпунова.....	198
<i>Храменков В.А.</i> Синхронные и асинхронные режимы в энергосети с хаб-топологией.....	200
<i>Циберкин К.Б., Хеннер В.К.</i> Спиновые волны в парамагнитном кристалле с дипольным взаимодействием.....	201
<i>Чижев П.А., Букин В.В., Каплас Т., Немто Н., Конishi К., Кувата-Гоноками М., Образцов П.А.</i> Детектор терагерцового поля на основе графена .....	203
<i>Шепелев И.А., Анищенко В.С.</i> Химеры и перемежаемость в ансамбле связанных осцилляторов Лоренца.....	205
<i>Шургалова Е.Г.</i> Солитонный газ в рамках уравнения Гарднера, описывающего слабонелинейные волны в диспергирующих средах .....	207
<i>Ярунова Е.А., Кренц А.А., Молевич Н.Е.</i> Динамика резонатора с нелинейным метаматериалом и обратной связью с задержкой .....	209
<i>Маковкин С.Ю., Иванченко М.В., Заикина А.А.</i> Синхронизация в моделях нейрон-глиальных сетей.....	210
<b>Abstracts</b> .....	213