

**I. РЕЗУЛЬТАТЫ,  
ПРЕДСТАВЛЯЕМЫЕ  
В ДОКЛАД ПРЕЗИДЕНТА РАН**

Предложена и экспериментально реализована эффективная схема генерации терагерцового излучения фемтосекундными лазерными импульсами в сэндвич-структуре с тонкой нелинейной сердцевиной ( $\text{LiNbO}_3$ ) и обкладками из материала с малым поглощением на терагерцовых частотах (Si). Механизм генерации – черенковское излучение терагерцовых волн в обкладках движущейся в сердцевине нелинейной поляризации, наводимой при оптическом выпрямлении лазерных импульсов. В эксперименте достигнута рекордная эффективность оптико-терагерцовой конверсии  $\sim 0,12\%$ . Разработана теория эффекта, предсказывающая возможность дальнейшего повышения эффективности в несколько раз.

Для установок УТС реакторного масштаба предложен метод, позволяющий 1) суммировать мощности от набора гиротронов и 2) адаптивно – для подавления гидродинамических неустойчивостей – сканировать суммарный волновой поток. Продемонстрирован квази-оптический резонансный диплексер, суммирующий излучение от двух  $\sim 140$  ГГц/  $\sim 0.5$  МВт гиротронов и коммутирующий суммарный поток между выходными каналами с частотой до 20 кГц.

Разработано новое поколение излучающих и приемных технических гидроакустических средств, которые закладывают базу для решения фундаментальных и прикладных задач акустики океана, в том числе акустической томографии океана, освещения подводной обстановки, измерения и контроля скрытности малозумных объектов. Созданы конструкции, опытные образцы и технология изготовления широкополосных, не имеющих аналогов за рубежом излучателей в диапазоне частот от 100 до 3000 Гц с акустической мощностью до 100 кВт и КПД порядка 90%. Изготовлены отечественные образцы излучателей для гибких буксируемых антенн, превосходящие по своим параметрам иностранные аналоги. Прошел государственные испытания и передан в эксплуатацию комплекс измерения параметров дальнего гидроакустического поля малозумных объектов.

Предложен интерференционно-растровый метод измерения характеристик поверхностей с разрешениями, не ограниченными дифракционным пределом, обеспечивающий на несколько порядков более быстрый съем данных по сравнению с традиционной ближнепольной сканирующей оптической микроскопией. Метод основан на преобразовании ближнего светового поля, в котором содержится информация о субволновой структуре поверхности, в распространяющиеся волны при помощи маски с субволновой структурой с широким спектром пространственных частот. Предложенный метод опробован в численных экспериментах.

Предложена и реализована новая схема создания оптических импульсов предельно короткой длительности с плавно перестраиваемой центральной длиной волны на основе полностью волоконной эрбиевой системы. Экспериментально продемонстрирована генерация импульсов длительностью 24 фемтосекунды с центральной длиной волны перестраиваемой в диапазоне 1.8–1.9 мкм, включающих в себя лишь четыре периода оптических колебаний.

**II. РЕЗУЛЬТАТЫ,  
ПРЕДСТАВЛЯЕМЫЕ  
В ОТЧЕТ РАН ПО РАЗДЕЛУ  
«ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ  
В ОБЛАСТИ ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ,  
ГУМАНИТАРНЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ НАУК»**

# 1. Отделение физики плазмы и электроники больших мощностей

1.1. Экспериментально обнаружено, что сателлиты, сопровождающую линию поглощения между низшими штарковскими подуровнями основного  $^4I_{9/2}$  и возбужденного  $^4G_{5/2}$  состояний ионов  $Nd^{3+}$ , допированных в  $LaF_3$ , имеют тонкую структуру, отсутствующую у линии поглощения изолированного иона. Показано, что наблюдаемые спектры можно описать в рамках модели, учитывающей обменное и магнитодипольное взаимодействие ионов  $Nd^{3+}$ , образующих пары с межйонным расстоянием порядка нескольких ангстрем. Найдены значения g-факторов и константы обменного и магнитодипольного взаимодействий основного и возбужденного состояний. Полученные результаты могут быть важны для понимания процессов, оказывающих существенное влияние на характеристики лазерных кристаллов (переноса энергии, up-конверсии и т. д.).

*Авторы:* Р. А. Ахмеджанов, А. А. Бондарцев, Л. А. Гушин, Н. А. Жарова.

*Аннотация.* Спектроскопия ионных пар и комплексов в оптически прозрачных кристаллах является уникальным инструментом для изучения ион-ионного взаимодействия, процессов переноса энергии, up-конверсии и т.д. Результаты этих исследований чрезвычайно важны и в плане приложений, в связи с сильным влиянием взаимодействий между ионами на характеристики лазерных кристаллов. Представлены результаты измерений спектра поглощения ионов  $Nd^{3+}$ , допированных в  $LaF_3$ , в окрестности перехода между нижайшими штарковскими подуровнями основного  $^4I_{9/2}$  и возбужденного  $^4G_{5/2}$  состояний методами прецизионной резонансной лазерной спектроскопии. Обнаружены сателлиты, смещенные от линии изолированного иона на несколько обратных сантиметров, как в «красную», так и в «синюю» сторону спектра. Использование методов спектроскопии, основанных на эффектах интерференции каналов возбуждения при взаимодействии многочастотного резонансного лазерного излучения с многоуровневыми атомными системами, позволили выявить тонкую структуру (с масштабом порядка нескольких сотен МГц) внутри неоднородно уширенных сателлитных линий, отсутствующую у линий изолированного иона, а также измерить g-факторы для основного и возбужденного уровней. Показано, что для объяснения полученных результатов необходимо учитывать взаимодействие ионов  $Nd^{3+}$ , образующих пары с межйонным расстоянием порядка нескольких ангстрем. Анализ различных типов парного взаимодействия между ионами позволил выявить два механизма, определяющие наблюдаемую структуру спектра поглощения: обменный и магнитный диполь-дипольный. В рамках данной модели из экспериментальных данных были определены константы обменного и магнитодипольного взаимодействий основного и возбужденного состояний.

## Публикации

1. P. Anisimov, R. Akhmedzhanov, A. Bondartsev et al. Measurement of the ion pair interaction in  $Nd^{3+}:LaF_3$  using electromagnetically induced transparency. 17th International Laser Physics Workshop (LPHYS'08), June 30 – July 4, 2008, Trondheim, Norway, p. 92.
2. R.A.Akhmedzhanov, A.A.Bondartsev, L.A. Gushchin et al. Electromagnetically induced transparency based spectroscopy of ion-ion interaction in solids. Proceedings of International Symposium "Topical problems of nonlinear wave physics. 20–26 July, 2008, Nizhny Novgorod, Russia, pp.108-109.
3. Р.А. Ахмеджанов, А.А. Бондарцев, Л.А. Гушин. Использование электромагнитно индуцированной прозрачности для спектроскопии ионных пар  $Nd^{3+} - Nd^{3+}$  в кристалле  $LaF_3$ . Труды международного оптического конгресса «Оптика XXI век», Санкт-Петербург, 20–25 октября 2008 г.

1.2. Для установок УТС реакторного масштаба предложен метод, позволяющий 1) суммировать мощности от набора гиротронов и 2) адаптивно – для подавления гидродинамических неустойчивостей – сканировать суммарный волновой поток. Продемонстрирован квазиоптический резонансный диплексер, суммирующий излучение от двух  $\sim 140$  ГГц /  $\sim 0.5$  МВт гиротронов и коммутирующий суммарный поток между выходными каналами с частотой до 20 кГц.

**Авторы:** С. Н. Власов, Е. В. Копосова, Л. В. Лубяко, М. И. Петелин, Д. Ю. Щегольков (ИПФ РАН), Ю. И. Кошуринов, В. Г. Павельев (ННГУ), V. Erckmann (Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Greifswald, Germany), W. Kasperek (Institut für Plasmaforschung, Universität Stuttgart, Germany).

**Аннотация.** Работы по созданию электрически управляемых квазиоптических волноводных систем для УТС реакторов ведутся совместно ИПФ РАН, Нижегородским университетом, Stuttgart University, IPP-Greifswald и FTU-Frascati, начиная с 2006 года. Сначала простейший сумматор-коммутатор волновых пучков в виде диплексера на основе четырехзеркального кольцевого резонатора с гофрированными зеркалами был рассчитан в ИПФ РАН и испытан в холодном 34 ГГц эксперименте на кафедре электроники ННГУ. Вслед за этим 140 ГГц диплексер был спроектирован и отлажен совместно со Штуттгартским университетом, а затем перевезен в IPP-Greifswald. Здесь он был запитан двумя 140 ГГц гиротронами с мощностями порядка сотен киловатт, и изменением питающих напряжений гиротронов суммарный волновой поток переключался между двумя выходными каналами с частотой до 20 кГц.

Планом дальнейших совместных исследований предусматривается разработка сумматоров-коммутаторов мощных волновых пучков для токамаков ASDEX-Upgrade, Garching, и FTU, Frascati. В случае успешной демонстрации на этих токамаках метод будет предложен для использования в международном УТС реакторе ITER.

Некоторые из новых электродинамических элементов могут представить интерес для мощной радиолокации высокого разрешения и систем дальней космической связи.

### Публикации

1. V. Erckmann, W. Kasperek, Yu. Koshurinov, L. Lubyako, M.I. Petelin, D.Yu. Shchegolkov, F. Hollmann, G. Michel, F. Noke, F. Purps, "Power combination of two 140 GHz gyrotrons and fast switching of the combined beam", Fusion science and technology 2008, (In publish).
2. W. Kasperek, M.I. Petelin, V. Erckmann, A. Bruschi, F. Noke, F. Purps, F. Hollmann, Y. Koshurinov, L. Lubyako, B. Plaum, W. Wubie, "High-power microwave diplexers for advanced ECRH systems", Proc. Of the Symposium on fusion technology 2008.
3. W. Kasperek, M. Petelin, D. Shchegolkov, V. Erckmann, A. Bruschi, H. Braune, F. Hollmann, L. Jonitz, G. Michel, H.P. Laqua, F. Noke, F. Purps, P. Brand, B. Plaum, W. Wubie, Y. Koshurinov, L. Lubyako, W. Bin, O. D'Arcangelo, High-power microwave diplexers for advanced ECRH systems, VII Int. Workshop Strong Microwaves: sources and applications, Nizhny Novgorod, July 27 – August 2, 2008, S10.

1.3. Создан макет системы для СВЧ термоабляции онкологических образований, работающей в гигагерцовом диапазоне частот. Макетируемый прибор включает в себя источник СВЧ излучения с выходной мощностью, регулируемой в пределах 20–300 Вт, и водоохлаждаемую иглу-антенну, запитываемую коаксиальной линией. Испытания в клинических условиях показали, что прибор позволяет сократить время термодеструкции биологической ткани более чем в сто раз по сравнению с используемыми устройствами радиочастотной абляции и значительно повысить качество проведения операций. Результаты предварительных экспериментов

на животных показали, что данный метод существенно расширяет возможности термодеструкции биологических тканей, позволяя проводить термоабляцию костей скелета, позвоночника, почки, поджелудочной железы, желудочно-кишечного тракта, легкого.

**Авторы:** А. В. Костров, А. В. Стриковский (ИПФ РАН), В. Е. Загайнов, Г. Г. Горохов (ПОМЦ).

**Аннотации.** Задача очаговой девитализации биологических тканей представляет значительный интерес в различных медицинских приложениях. Особенно это актуально в онкологии. Так как метод термической абляции является малоинвазивным, то последствия вмешательства в оперируемый орган сводятся к минимуму. Результаты радиочастотной термической абляции опухолевых очагов небольшого размера в печени сопоставимы с результатами традиционного хирургического лечения. Одна из проблем, возникающая при использовании термоабляции существующими устройствами заключается в том, что время воздействия на опухоль достигает десятков минут, но, в процессе операции, как правило, этого времени нет.

В ходе работы проведены исследования области термического поражения опухолевой ткани в зависимости от типа новообразования. Для точного определения границ некроза опухоли и патоморфологических изменений в прилежащих к зоне воздействия областях проведено гистологических исследований срезов ткани паренхиматозного органа. Для полного понимания процессов, происходящих при СВЧ термоабляции, проведено компьютерное моделирование взаимодействия микроволнового поля с разными типами биологической ткани.

Положительной отличительной особенностью предлагаемой системы от существующих приборов термоабляции (локальной гипертермии) является то, что имеющиеся системы являются биполярными, требующими разнесения в пространстве двух рабочих электродов, в отличие используемой, где излучающая система локализована. Большой (пассивный) электрод в используемых приборах располагается на теле пациента в удалённом от зоны воздействия месте, а второй вводится в обрабатываемую ткань. ВЧ токи при этом протекают по всему телу, а сильный нагрев происходит вблизи игольчатого электрода. Нагрев тканей по пути протекания тока в теле не контролируется. Подводимая мощность меняется от 50 до 300 Вт. Патологическое влияние на организм при этом не оценивается.

Выбор СВЧ-диапазона позволяет более эффективно вводить мощность в область термодеструкции. В результате время нагрева составляет всего 5 – 60 сек, в отличие от десятков минут (часов) при использовании известных приборов, работающих на низкой частоте.

Существующие системы доставки энергии для нагрева от генератора в ткань (электроды) технически сложны, недостаточно надёжны, дороги. Разработанная система лишена этих недостатков ввиду того, что при использовании компактной антенны-иглы происходит локальный перегрев биологической ткани, использование СВЧ диапазона позволяет эффективно вводить мощность в ограниченный объем.

Результатом работы является решение задачи методом СВЧ термоабляции чрескожно и интраоперационно (в ходе оперативного вмешательства) быстро и эффективно уничтожать первичную раковую опухоль и ее метастазов в паренхиматозных органах, в частности – в печени.

### Публикации

1. В.Е. Загайнов, А.В. Костров, Г.Г. Горохов, А.В. Стриковский, А.Ф. Плотников, Л.В. Шкалова, Д.В. Янин. Новый метод термического разрушения печени локальным воздействием энергии СВЧ. *Анналы хирургической гепатологии*. Т. 13, № 3. С. 52 (2008) (входит в Перечень).
2. Л.В. Шкалова, В.Е. Загайнов, А.В. Стриковский. Новый метод микроволновой термоабляции опухолей. *Анналы хирургической гепатологии*. Т. 13, № 3, с. 82-83 (2008) (входит в Перечень).
3. А.В. Костров, А.В. Стриковский, Д.В. Янин, В.Е. Загайнов, С.А. Васенин, И.Н. Дружкова,

Г.А. Пантелеева, З.В. Давоян. Исследование электродинамических параметров биологических тканей. Альманах клинической медицины. Т. 17, № 2, с. 96-99 (2008).

4. А.В. Костров, А.В. Стриковский, Д.В. Янин, В.Е. Загайнов, А.Ф. Плотников, Л.В. Шкалова. СВЧ термоабляция злокачественных опухолей. Альманах клинической медицины. Т. 17, № 2, с. 100-103 (2008).
5. В.Е. Загайнов, А.Ф. Плотников, А.В. Костров, Г.Г. Горохов, А.В. Стриковский, Л.В. Шкалова, С.А. Васенин, Д.Н. Белослудцев, П.И. Рыхтик. Новый метод микроволновой термоабляции опухолей печени. Медицинский альманах. № 5, с.55-60 (2008).
6. А.В. Костров, А.В. Стриковский, Д.В. Янин, В.Е. Загайнов, А.Ф. Плотников, Л.В. Шкалова. СВЧ термоабляция злокачественных опухолей. III Троицкая конференция «Медицинская физика и инновации в медицине», г. Троицк, 3-6 июня 2008 г.

1.4. При разработке мегаваттного непрерывного 170 ГГц гиротрона для ИТЭР сделан существенный шаг в достижении требуемых параметров (1 МВт / 500 сек / 50%КПД): получена мощность 1.05 МВт в импульсах до 100 секунд и 0.85 МВт в импульсах до 200 секунд и КПД 52%.

**Авторы:** А. Г. Литвак, Г. Г. Денисов, В. Е. Запечалов, А. В. Чирков, А. Н. Куфтин, Е. В. Соколов, А. Л. Вихарев, А. Б. Павельев, В. Г. Усов, В. И. Малыгин, М. А. Моисеев (ИПФ РАН), совместно с ЗАО НПП «ГИКОМ» и ИЯС РНЦ «Курчатовский Институт».

**Аннотация:** Системы электронно-циклотронного (ЭЦ) нагрева и управления током для плазменных установок УТС базируются на гиротронах – мощных источниках СВЧ излучения диапазона миллиметровых длин волн. Для использования в будущей установке ИТЭР требуются гиротроны, работающие на частоте 170 ГГц с мощностью 1 МВт в импульсах порядка 1000 секунд. Разработка таких гиротронов в России ведется в кооперации трех организаций: Института прикладной физики РАН, НПП «ГИКОМ», ИЯС РНЦ «Курчатовский институт» уже в течение 10 лет.

Для реализации непрерывного гиротрона с выходной мощностью 1 МВт выбрана рабочая мода цилиндрического резонатора  $TE_{25,10,1}$ , взаимодействующая с электронным пучком при энергии электронов 70–75 кэВ и токах 40–45 А. Проведена оптимизация параметров резонатора с учетом омических для достижения КПД 32–35 % при плотности мощности омических потерь около 2 кВт/см<sup>2</sup>. Сложная рабочая мода гиротрона эффективно преобразуется в гауссов волновой пучок, выходящий из гиротрона через барьерное окно. Содержание гауссовой моды в выходном пучке составляет не менее 95%, при этом дифракционные потери во внутреннем квазиоптическом преобразователе, состоящем из четырех профилированных рефлекторов, не превышают 3–4%.

Для барьерного окна гиротрона использован искусственный алмазный диск диаметром 106 мм и толщиной 1.85 мм выращенный по CVD технологии. Для этого материала характерна очень высокая теплопроводность (в 4–5 раз выше теплопроводности меди) и малые СВЧ потери (тангенс диэлектрических потерь около  $10^{-5}$ ), что дает возможность охлаждения окна по его краю.

В гиротронах использован коллектор с рекуперацией остаточной энергии электронов, составляющей 27–30 кэВ. Это повышает КПД гиротрона до 52%, а также существенно снижает расход воды и интенсивность рентгеновского излучения в области коллектора. Значительно упрощаются сильноточные источники питания.

Гиротрон испытан на специально созданном стенде в Курчатовском институте. При испытаниях получена мощность 1.05 МВт в импульсах до 100 секунд и 0.85 МВт в импульсах до 200 секунд и КПД до 52%. При этом ограничение длительности генерации было обусловлено возможностями стенда, а не гиротроном.

## Публикации

1. L.G. Popov, G.G. Denisov, A.G. Litvak, M.V. Agapova, A.F. Gnedenkov, A.N. Kostyna, V.O. Nischiporenko, V.E. Myasnikov, E.M. Tai, S.V. Usachev, V.E. Zapevalov, A.V. Chirkov, V. I.Ilin, V.N. Ilin, A.N. Kuftin, S.A. Malygin, V.I. Malygina, V.V. Parshin, A.B. Pavel'ev, V.G. Rukavishnikova, Yu.V. Roschin, E.V. Sokolov, E.A. Soluyanov, A.L. Vikharev. Development in Russia of 170 GHz gyrotron for ITER. The 33-th Int. Conference on Infrared and Millimeter Waves and 16-th Int. Conference on Terahertz Electronics, 2008, Sept. 2 - Sept. 7, Pasadena, USA, Conference Digest, W4U4.1472.
2. A.G. Litvak. High Power Gyrotrons. Development and Applications. The 33-th Int. Conference on Infrared and Millimeter Waves and 16-th Int. Conference on Terahertz Electronics, 2008, Sept.2- Sept.7, Pasadena, USA, Conference Digest, R1P.1734.

1.5. Предложен метод синтеза модовых преобразователей, в котором поправка к форме преобразователя на каждой итерации рассчитывается через поля на его поверхности, получаемые из решения прямой и обратной (при замене на противоположное направление времени) задач анализа. Достоинство нового метода – универсальность, позволяющая применять в процедуре синтеза любой из доступных численных методов анализа полей. Метод использован и проверен экспериментально в задачах синтеза компонент мощного 30 ГГц гироклистрона.

**Авторы:** Г. Г. Денисов, С. В. Кузиков, М. Е. Плоткин (ИПФ РАН).

**Аннотация.** Мощные микроволновые источники обычно требуют эффективных, компактных и электрически прочных преобразователей мод. Для того чтобы удовлетворить этим и другим (иногда противоречивым) требованиям, предлагается метод синтеза, основанный на итерационном улучшении преобразующей волноводной стенки.

Предполагается, что входная (начальная) структура поля и выходная (желаемая) структура поля заданы в двух (левом и правом соответственно) поперечных сечениях волновода, который должен преобразовывать одну структуру в другую. Согласно предлагаемой методике синтеза улучшающее возмущение преобразующей поверхности на каждой итерации должно быть пропорционально разности полей двух сопряженных решений. Первое из упомянутых решений соответствует интегрированию уравнений Максвелла в направлении  $t \rightarrow +\infty$  с возбуждающим (начальным) полем, заданном на левом конце преобразователя. Второе решение получается при интегрировании уравнений в направлении  $t \rightarrow -\infty$  и стартует с желаемого поля, заданного справа. Эффективность преобразования на каждой итерации вычисляется в правом сечении как коэффициент взаимной мощности полученного и желаемого распределений полей.

Предлагаемая коррекция к профилю преобразователя, которая должна вычисляться на каждой итерации, удовлетворяет нескольким условиям: когда некоторое текущее решение приближается к желаемому, коррекция стремится к нулю; когда текущее решение отличается от требуемого, коррекция производит гармоники профиля, которые улучшают эффективность преобразования; благодаря численным Фурье-фильтрам из корректирующего профиля могут быть удалены высокие пространственные гармоники, что позволяет обеспечивать необходимую электропрочность.

Предложенный метод может быть применен для расчета как волноводных преобразователей, так и зеркальных преобразователей, используя для вычисления полей алгоритмы, основанные на методе связанных волн, FDTD технике, методе интегральных уравнений и других. Универсальность метода делает его применение возможным совместно с другими мощными вычислительными кодами, такими как HFSS, Microwave Studio и другими.



Используя описанный метод, были синтезированы и протестированы на низком уровне мощности компоненты 30 ГГц гироклистрона, создаваемого в ИПФ РАН (TE<sub>53</sub>-TE<sub>01</sub> модовый преобразователь, TE<sub>53</sub>-TEM<sub>00</sub> преобразователь, коллектор электронов на основе эффекта Тальбота, компактный TE<sub>11</sub>-TE<sub>01</sub> преобразователь мод).

### Публикации

1. С.В. Кузиков, М.Е. Плоткин. Синтез многомодовых волноведущих систем на основе метода FDTD, Российская академия наук, Институт прикладной физики, Нижний Новгород, Препринт № 731, 2007. 27 с.
2. S.V. Kuzikov, M.E. Plotkin. Synthesis of multi-mode waveguide systems, Conference Digest of the Joint 32nd IRMMW Conference and 15th International Conference on Terahertz Electronics, Cardiff, UK, 3 – 7 September, 2007, Vol. 1, pp. 781-782.
3. S.V. Kuzikov, M.E. Plotkin. Synthesis of Mode Converters for High-Power Microwave Sources, VII Int. Workshop Strong Microwaves: sources and applications, Nizhny Novgorod, July 27 – August 2, 2008, s39.

1.6. Экспериментально обнаружен всплеск тока многозарядных ионов, экстрагируемых из плазмы ЭЦР разряда в прямой магнитной ловушке, на стадии пробоя газа (эффект «Preglow») при условии классического удержания плазмы. Предложено объяснение этому явлению. Построена численная нульмерная модель, удовлетворительно описывающая экспериментальные результаты. Показано, что эффект «Preglow» связан с резким уменьшением времени жизни ионов, аккумулярованных на начальной стадии пробоя газа, когда средняя энергия электронов ( $\approx 10\text{--}30$  кэВ) определяется эффектом суперрадиабатики и существенно превышает значение, соответствующее стационарной стадии разряда (1–2 кэВ). Планируется использование обнаруженного эффекта для создания пучков многозарядных ионов с длительностью импульса 30–100 мкс в интересах Европейского проекта Beta Beam.

**Авторы:** И. В. Изотов, А. В. Сидоров, В. А. Скалыга, В. Г. Зорин (ИПФ РАН), T. Thuillier, T. Lamy, L. Latrasse (Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie, Grenoble, France), M. Marie-Jeanne (CERN, Physics Department, Geneva, Switzerland).

**Аннотация.** При исследовании импульсного режима работы ЭЦР источника ионов PHOENIX, работающего с частотами СВЧ накачки 18 и 28 ГГц, были обнаружены условия, при которых на начальной стадии разряда наблюдается всплеск тока экстрагируемого пучка многозарядных ионов с амплитудой, в несколько раз превышающей стационарное значение (например, для тока иона He<sup>2+</sup> – в 5 раз, для тока иона Ar<sup>5+</sup> – в 4,5 раза). Эффект наблюдается как для низких, так и для высоких зарядовых состояний ионов на временах, меньших, чем 1 мс. Характеристики всплеска ионного тока зависят от параметров магнитного поля ловушки, СВЧ мощности и давления рабочего газа. После всплеска ионный ток релаксирует к своему стационарному состоянию. Описанное явление получило название «Preglow». Предложено объяснение наблюдаемого эффекта, построена теоретическая модель, удовлетворительно описывающая экспериментальные результаты. Показано, что всплеск ионного тока связан с накоплением ионов в магнитной ловушке ЭЦР источника на первоначальной стадии пробоя газа, когда средняя энергия электронов в пока ещё разреженной плазме велика ( $\approx 10\text{--}30$  кэВ, зависит от частоты и мощность СВЧ накачки) и определяется эффектом суперрадиабатики, а время жизни плазмы при этом существенно превышает время жизни значительно более плотной и холодной плазмы на стационарной стадии разряда. Режим «Preglow» имеет хорошую повторяемость от импульса к импульсу, ширина импульса тока ионов может быть варьирована в пределах 200–1000 мкс. Данный эффект может быть использован для различных приложений, в частности, он особенно интере-

сен для создания короткоимпульсных пучков многозарядных ионов радиоактивных изотопов для Европейского проекта Beta Beam. Этот проект предполагает исследование нейтрино и их осцилляций, образующихся при распаде радиоактивных ядер, ускоренных до энергий, близких к 100 ГэВ на нуклон.

### Публикации

1. T. Thuillier, T. Lamy, L. Latrasse, R. Geller, I. Izotov, A. Sidorov, V. Skalyga, V. Zorin, M. Marie-Jeanne. Study of pulsed electron cyclotron resonance ion source plasma near breakdown : The Preglow. Review of Scientific Instruments, 79, 02A314 (2008).
2. I. Izotov, A. Sidorov, V. Skalyga, V. Zorin, T. Lamy, L. Latrasse, T. Thuillier. Experimental and Theoretical Investigation of the Preglow in ECRIS. IEEE Transactions on plasma science. V. 36, № 4. August 2008, p. 1494.
3. T. Thuillier, T. Lamy, L. Latrasse, R. Geller, I. Izotov, A. Sidorov, V. Skalyga, V. Zorin, M. Marie-Jeanne. Study of pulsed ECRIS plasma near breakdown: The Preglow // The 12-th International Conference on Ion Sources ICIS 2007, August 26-31, 2007, Ramada Plaza Jeju Hotel, Jejudo, Korea, p. 103.

1.7. Предложена и реализована методика измерения частоты образования аэроэлектрических структур в пограничном слое атмосферы на основе разнесенного приема вариаций электрического поля. Установлено, что частота образования аэроэлектрических структур коррелирует с приземной температурой и влажностью воздуха и может служить количественным показателем интенсивности начальной стадии конвекции, что открывает перспективы совершенствования прогноза и изучения климатологии конвективной облачности в атмосфере путем использования простых дистанционных измерений.

**Авторы:** С. В. Анисимов, Э. М. Дмитриев, Н. М. Шихова (Институт физики Земли им О.Ю. Шмидта РАН), Е. А. Мареев, М. В. Шаталина (ИПФ РАН).

**Аннотация.** Предложена и реализована методика измерения частоты образования аэроэлектрических структур в пограничном слое атмосферы на основе разнесенного приема вариаций электрического поля.

На основании синхронных наблюдений аэроэлектрического поля и метеорологических параметров, проведенных в 2003 – 2008 гг. на измерительном полигоне среднеширотной геофизической обсерватории «Борок», обнаружены значимые корреляционные связи величины напряженности аэроэлектрического поля с приземной температурой и влажностью воздуха. Выполнен структурно-временной анализ данных экспериментов по разнесенному приему вариаций температуры и электрического поля в пяти точках. Обнаружены одновременные аэроэлектрические и температурные когерентные структуры, сопровождаемые короткопериодными пульсациями напряженности поля и температуры воздуха в приземном слое.

Выявлена положительная корреляция вариаций температуры и напряженности электрического поля в условиях неустойчивой стратификации (позднее утро – день) и отрицательная в условиях устойчивой стратификации (поздний вечер – ночь). Наиболее часто одновременное возрастание амплитуды пульсаций напряженности поля и температуры происходит в период локального полдня.

Показано, что частота образования аэроэлектрических структур растет с ростом интенсивности турбулентной конвекции, но рост этот замедляется с падением влажности воздуха. С учетом нелокальности поля данный процесс объясняет, в частности, опережение возмущений аэроэлектрического поля по отношению к коррелированным возмущениям температуры при положительных возмущениях последней.

С помощью метода пробных структур проведены численные расчеты, необходимые для интерпретации найденных в натуральных экспериментах закономерностей поведения спектров и структурных функций электрического поля. Анализ экспериментальных данных показывает, что напряженность аэроэлектрического поля, будучи нелокальной величиной, формируется неоднородным распределением объемных зарядов по области, окружающей точку наблюдения, что дает возможность количественной оценки состояния пограничного слоя атмосферы, параметров электрогазодинамической турбулентности и конвекции по характеристикам спектральных и структурных функций поля.

Полученные результаты дают возможность использования простых дистанционных измерений для совершенствования прогноза и изучения климатологии конвективной облачности в атмосфере.

### Публикации

1. Anisimov S.V. and Shikhova N.M. Space charge transfer in the lower atmosphere. Proceedings of International Symposium on Nonlinear Wave Physics (NWP-3), Nizhny Novgorod, Russia, 2008. P. 7-8.
2. Mareev E.A. Formation of Charge Layers in the Planetary Atmospheres // Space Science Reviews. 2008. Vol. 137, N 1-4. doi: 10.1007/s11214-008-9306-2.
3. Shikhova N.M. and Anisimov S.V. Dynamic scales and fractals of turbulent aoelectric pulsations. Proceedings of International Symposium on Nonlinear Wave Physics (NWP-3), Nizhny Novgorod, Russia, 2008. P. 91-92.
4. Шаталина М.В., Мареев Е.А., Анисимов С.В., Шихова Н.М. Моделирование динамики электрического поля методом пробных структур // Изв. ВУЗов - Радиофизика. Т. 48, № 8. 2005, с. 648-660.
5. Анисимов С.В., Мареев Е.А., Шихова Н.М. Механизмы связи аэроэлектрического и температурного полей нижней атмосферы // Изв. ВУЗов - Радиофизика. Т. 49, № 1. 2006. С. 3-20.

1.8. Предложен и исследован новый класс модельных волновых уравнений, описывающих линейное взаимодействие электромагнитных волн в трехмерно неоднородных гиротропных и анизотропных средах без пространственной дисперсии. В случаях, не связанных с вырождением анизотропии диэлектрического отклика среды и с взаимодействием с электростатическими колебаниями в окрестности резонансов среды, сформулированная модель дает универсальное описание линейного взаимодействия двух волн в средах с плавной трехмерной неоднородностью. Обнаружены новые эффекты, отсутствующие в классическом одномерном приближении, такие как существование ограниченных по апертуре волновых пучков, испытывающих безотражательную трансформацию, несимметричность трансформации встречных волн в гиротропных средах и др.

**Авторы:** Е. Д. Господчиков, А. Г. Шалашов (ИПФ РАН).

**Аннотация.** Показано, что задача о парном линейном взаимодействии электромагнитных волн в трехмерно неоднородных гиротропных и анизотропных средах без пространственной дисперсии и диссипации может быть отнесена к одному из трех типов: (1) трансформация, связанная с вырождением анизотропии диэлектрического отклика среды (реализующаяся, например, при выходе излучения магнитоактивной плазмы в вакуум), (2) конверсия в электростатические колебания в окрестности резонансов среды и (3) туннелирование электромагнитных волн с одной дисперсионной кривой на другую в окрестности поверхностей отсечки. В плавнонеоднородных средах в случаях (1) и (2) неоднородность среды не приводит к новым эффектам – линейное взаимодействие волн может быть описано в рамках эффективно одномерного подхода. Сущест-

венно неоднородные эффекты могут проявляться только в случае (3). Для этого случая найдено универсальное описание процесса линейного взаимодействия в рамках новой системы эталонных волновых уравнений, допускающих аналитическое решение в ряде практически важных случаев путем сведения задачи к двумерному случаю, исследованному ранее для частного случая нормальных волн (О и Х волны магнитоактивной плазмы). Для произвольной поляризации нормальных волн, определяемой локальным тензором диэлектрической проницаемости, исследована структура волновых полей в области линейного взаимодействия и выяснены критерии, при которых проявляются новые эффекты, отсутствующие в стандартной одномерной модели: существование ограниченных по апертуре волновых пучков, испытывающих полную безотражательную трансформацию, отсутствие симметрии процессов прямой и обратной трансформации волн в гиротропных средах и др.

### Публикации

1. A. G. Shalashov, E. D. Gospodchikov. On linear coupling of electromagnetic waves in gyrotropic media. Submitted to Phys. Rev. E (2008).

1.9. Разработан мощный непрерывный гиротрон с частотой 300 ГГц и мощностью 2,3 кВт, работающий в безжидкостном криомагните. Разработанный гиротрон не имеет мировых аналогов и в настоящее время используется в экспериментальном комплексе для исследования материалов, разработки новых технологий и медико-биологических экспериментов. Гиротрон разработан в рамках кооперации с исследовательским центром университета г. Фукуи (Япония).

**Авторы:** В. Е. Запевалов, О. В. Малыгин, М. А. Моисеев, В. И. Хижняк (ИПФ РАН), Т. Изехара (университет г. Фукуи Япония), совместно с ЗАО НПП «ГИКОМ».

**Аннотация.** Гиротроны являются наиболее мощными источниками излучения миллиметрового диапазона, способными работать в длинно-импульсном и непрерывном режимах. Выходные характеристики современных гиротронов позволяют успешно использовать их в качестве источников СВЧ-энергии в экспериментах по управляемому термоядерному синтезу, а также в области спектроскопии и технологии обработки материалов.

В связи с реализацией некоторых перспективных приложений, в настоящее время, в ряде стран проводятся исследования, имеющие своей целью существенное увеличение рабочей частоты (до 300 ГГц и более) непрерывных гиротронов использующих сравнительно простые в эксплуатации магнитные системы не применяющие в качестве хладоагентов сжиженные газы («сухие» криомагниты). Весьма привлекательной в этой связи представляется работа гиротронов на основном гирорезонансе совместно с этими криомагнитами. Разработка 300ГГц непрерывного гиротрона, киловаттного уровня мощности, работающего с 12Т безжидкостным «сухим» криомагнитом является довольно серьезной проблемой, особенно с учетом пространственных ограничений. Создание таких гиротронов в свою очередь требует разработки системы формирования винтового электронного пучка, а также реализации комплекса мер по оптимизации резонатора гиротрона в условиях высокого уровня ВЧ - омических потерь. Решение этой проблемы требует, в частности, селективного возбуждения высокоэффективного режима рабочей моды в пространственно-развитом (сверхразмерном) резонаторе гиротрона, поскольку возбуждение паразитных мод приводит, как правило, к подавлению генерации на рабочей моде.

В рамках международной кооперации с исследовательским центром университета г. Фукуи (Япония), создан и испытан 300 ГГц/2,5 кВт непрерывный гиротрон, работающий с 12Т «сухим» криомагнитом. Криомагнит создан фирмой Сумитомо Хэви индастриз (Япония) на основе катушек из материалов ниобий-титан и ниобий-олово. С помощью этого криомагнита в области резонатора может создаваться магнитное поле до 12 Т. Электронно-оптическая система гиротрона, формирующая винтовой электронный пучок, оптимизирована с учетом реального

распределения магнитного поля и наличия дополнительной катушки в области катода. Параметры электронного пучка и распределение магнитного поля были определяющими факторами при оптимизации профиля резонатора (первая гармоника гирочастоты, рабочая мода  $TE_{22,8}$ ), преобразователя и коллектора гиротрона. Проектное рабочее напряжение электронного пучка составляло 15 кВ, а ток до 1,0 А. На основе проведенных расчетов был сконструирован и изготовлен опытно-промышленный образец гиротрона.

Эксперименты с гиротроном проводились в исследовательском центре университета г. Фукуи. Экспериментальные результаты в импульсном режиме сопоставлены с расчетными данными и обнаружено хорошее соответствие. При первоначальных испытаниях разработанного гиротрона на частоте 300 ГГц продемонстрирована мощность непрерывного режима излучения 1,5 кВт. После работы по оптимизации режимов включения гиротрона удалось повысить выходную мощность до 2,3 кВт.

Совместно с системой источников питания, линией передачи, аппликатором и контрольно измерительной аппаратурой гиротрон с криомагнитом составляет уникальный исследовательский комплекс широкого применения. Разработанный гиротрон не имеет мировых аналогов и в настоящее время используется в качестве основы экспериментального комплекса для исследования материалов, разработки новых технологий и медико-биологических экспериментов.

## Публикации

1. V.E. Zapevalov, V.K. Lygin, O.V. Malygin, M.A. Moiseev, V.P.Karpov, V.I. Khizhnjak, E.M.Tai, T. Idehara, I. Ogawa, S. Mitsudo. Development of the 300 GHz/4kW/CW Gyrotron. The 29-th Int. Conference on Infrared and Millimeter Waves and 12-th Int. Conference on Terahertz Electronics, 2004, University of Karlsruhe, Sept.27-October 1, Karlsruhe ,Germany, Conference Digest, p. 149.
2. V.E. Zapevalov, V.K. Lygin, O.V. Malygin, M.A. Moiseev, V.P.Karpov, V.I.Khizhnjak, E.M. Tai, T. Idehara, I. Ogawa, S. Mitsudo. Development of the 300GHz/4kW/ CW Gyrotron, Sixth International Vacuum Electronics Conference IVEC 2005 20-22 April 2005, Huis ter Duin, Nordwijk, The Netherlands p. 121-122.
3. В.Е. Запевалов, В.И.Хижняк, Т.Идехара, Е.М.Тай. Разработка 300ГГц/4кВт непрерывного гиротрона. Всероссийский семинар по радиофизике миллиметрового и субмиллиметрового диапазона. Тезисы докладов. 1 – 5 марта 2005. Нижний Новгород, С. 60.
4. H.Hoshizuki, K.Matsuura, S.Mitsudo□T.Idehara, V.E. Zapevalov, O.V. Malygin, V.I.Khizhnjak, T. Ueda, M.Furuiti, A. Kitano, H.Nishi and J.Ishibashi. Development of the material processing system by using a 300 GHz gyrotron. The 30-th Int. Conference on Infrared and Millimeter Waves and 13-th Int. Conference on Terahertz Electronics, 2005, Sept.19- Sept.23 Williamsburg, Virginia, Conference Digest, pp. 375-376.
5. S. Mitsudo, K. Sakai, T. Idehara, T. Saito, V. E. Zapevalov. 300 GHz gyrotron material processing system. The 31-th Int. Conference on Infrared and Millimeter Waves and 14-th Int. Conference on Terahertz Electronics, 2006, Sept.18-Sept.22 Shanghai, China, Conference Digest, p. 572.
6. T. Saito, T. Nakano, K. Sakai, I. Ogawa, S. Mitsudo, Y. Tatematsu, T. Idehara, V.E. Zapevalov Analysis of Radiation Pattern of 300 GHz CW Gyrotron FU CW I. Eighth International Vacuum Electronics Conference IVEC 2007, 15-17 May 2007, Kitakyushu, Japan. pp. 345-346.
7. В.Е. Запевалов, В.К. Лыгин, О.В. Малыгин, М.А. Моисеев, В.И. Хижняк, В.П. Карпов, Е.М. Тай, Т. Идехара, С. Мицудо, И. Огава, Т. Сайто. Мощный генератор непрерывного электромагнитного излучения с частотой 300 ГГц. Известия Вузов. Радиофизика, 2007. т.L, № 6, с. 461-470.
8. T. Saito, T. Nakamo, Y. Tatematsu, S. Mitusdo, T. Idehara, V.E. Zapevalov. Operation Improvement of CW 300 GHz Gyrotron FU CW I. The 33-th Int. Conference on Infrared and Millime-

1.10. Показано, что корреляция появляемости километрового радиоизлучения Сатурна с положением на орбите одного из спутников планеты, Титана, а также ультрафиолетовое свечение атмосферы Титана, обнаруженные благодаря полету к Сатурну космических аппаратов «Кассини» и «Вояджер», обусловлены эффективным ускорением электронов в электрическом поле разделения зарядов, возникающем при взаимодействии ионосферы Титана с магнитным полем Сатурна. Периодичность в километровом излучении Сатурна вызвана уменьшением эффективности ускорения при нахождении Титана на дневной стороне Сатурна, вне пределов его магнитосферы.

**Авторы:** В. В. Зайцев, В. Е. Шапошников (ИПФ РАН), М. Л. Ходаченко, Х. О. Рукер (Институт космических исследований, г. Грац).

**Аннотация.** Интенсивное километровое радиоизлучение Сатурна (SKR) было открыто во время полета КА “Voyager” вблизи планеты. Источники этого излучения находились в высокоширотной части обоих полушарий на дневной стороне планеты. Полеты КА “Cassini” показали, что SKR наблюдается также от источников, располагающихся на ночной стороне на силовых линиях вблизи L-оболочек  $L \sim 10-15$ . Было также обнаружено, что появляемость SKR коррелирует с положением спутника Титан на его орбите: появляемость значительно возросла в моменты, когда Титан находился на ночной стороне Сатурна, и уменьшалась при нахождении спутника на дневной стороне в полуденном секторе. До полетов КА “Cassini” считалось, что единственным источником электронов, генерирующих SKR, является солнечный ветер. Однако последние наблюдения указывают, что Титан также является источником быстрых электронов. На это указывают наблюдения ультрафиолетового свечения атмосферы Титана. Оценки показывают, что ни солнечные фотоны, ни фотоэлектроны, ни энергичные электроны из магнитосферы Сатурна не могут обеспечить необходимый энергетический вклад в ультрафиолетовое свечение Титана.

В рамках выполненной работы рассмотрен механизм ускорения электронов в электродинамической цепи Сатурн – спутник Титан, обусловленный наличием у Титана проводящей ионосферы, движущейся в магнитном поле планеты. Ускорение электронов из состава ионосферы спутника происходит благодаря электрическому полю разделения зарядов. Проводимость ионосферы Титана при учете магнитного поля планеты представляет собой трехкомпонентный тензор, величина которого существенно зависит концентрации нейтралов в ионосфере спутника. Анизотропия проводимости приводит к тому, что индуцированное поле  $E_i$  генерирует в ионосфере не только перпендикулярные токи, направленные по  $E_i$ , но стремится возбудить также холловский ток, ортогональный поверхности Титана. Поскольку холловский ток не может замыкаться на поверхности спутника, то в ионосфере возникает электрическое поле разделения зарядов, имеющее проекцию на направление магнитного поля. Величина этого электрического поля может быть порядка индуцированного поля  $E_i$ . В результате в условиях ионосферы Титана энергия ускоренных электронов достигает 5–10 кэВ, что достаточно для генерации километрового радиоизлучения. Мощности ускорительного механизма оказывается также достаточно для объяснения ультрафиолетового свечения атмосферы Титана. Во время нахождения на ночной стороне Сатурна Титан попадает внутрь оболочки  $L \sim 14$ , вытянутой вследствие влияния кольцевого тока. Поэтому его электроны могут попадать в ночной источник SKR, расположенный на силовых линиях вблизи  $L \sim 10-15$ , и активировать его. Ослабление источника SKR на дневной стороне обусловлено, во-первых уменьшением магнитного поля вблизи дневной магнитопазы, что приводит к уменьшению эффективности ускорения электронов, во-вторых периодическим выходом Титана из магнитосферы планеты во время которого Титан оказывается не связанным посредством магнитного поля с источниками SKR.

## Публикации

1. V.V. Zaitsev, V.E. Shaposhnikov, M.L. Khodachenko, H.O. Rucker, M. Panchenko, Acceleration of Electrons in Titan's Ionosphere, J. Geophys. Res, submitted.
2. V.V. Zaitsev, V.E. Shaposhnikov, H.O. Rucker, 2006, Astron. Astrophys., 454, 669.

1.11. Построена теория переноса гирорезонансного излучения и рассчитана сила его давления в атмосферах нейтронных звёзд. При этом учитывалось перераспределение фотонов по частоте, связанное с релятивистскими поправками к доплеровскому резонансному условию и лоренцевским профилем сечения резонансного электрон-фотонного взаимодействия. Установлено, что указанные эффекты наряду с намагничением вакуума и неоднородностью магнитного поля определяют форму и ширину циклотронной линии в поглощении для теплового излучения фотосферы нейтронной звезды и контролируют истечение вещества из верхних слоёв её атмосферы, где сила радиационного давления может превышать силу тяжести.

**Авторы:** Гарасеев М. А., Деришев Е. В., Кочаровский Вл. В. (ИПФ РАН).

**Аннотация.** Перераспределение фотонов по частоте играет первостепенную роль в переносе излучения и формировании радиационного давления в спектральных линиях, в том числе электронно-циклотронных, возникающих благодаря резонансному перепоглощению (рассеянию) фотонов при переходах электронов между уровнями Ландау. В настоящей работе на основе последовательного аналитического и численного исследования переноса гирорезонансного излучения в рассеивающих атмосферах нейтронных звёзд впервые показано, что выход рентгеновских фотонов из циклотронной линии связан в первую очередь с релятивистскими поправками к доплеровскому резонансному условию и с лоренцевским профилем сечения рассеяния. Установлена область параметров замагниченной плазмы изотермических атмосфер компактных звёзд, в которой перенос и давление гирорезонансного излучения в существенной мере определяются найденным эффективным механизмом перераспределения фотонов по частоте (наряду с намагничением вакуума и неоднородностью магнитного поля). В частности, указаны условия, при которых давление гирорезонансного излучения во внешних слоях атмосфер нейтронных звёзд может сравниться с силой тяжести и приводить к истечению плазмы.

Выяснено, что для получения корректных результатов необходимо использовать тензор диэлектрической проницаемости бесстолкновительной плазмы в сильном магнитном поле, найденный с учётом релятивистских поправок к условию циклотронного резонанса (включая поперечный эффект Доплера), конечной естественной ширины линии, отдачи электронов при рассеянии фотонов, а также эффекта намагничения вакуума. Вычислены действительные и мнимые части показателей преломления и коэффициенты поляризации нормальных электромагнитных волн в условиях преобладания рассеяния над поглощением. Обнаружено, что релятивистские эффекты приводят к сильному изменению дисперсии и резонансного поглощения волн, распространяющихся почти поперек магнитного поля, и качественно изменяют спектр и давление гирорезонансного излучения в широкой области значений магнитных полей и температур плазмы в атмосферах звёзд.

Для численного решения уравнений переноса гирорезонансного излучения с учётом линейного взаимодействия обыкновенной и необыкновенной волн в неоднородной рассеивающей плазме разработана оригинальная программа, основанная на комбинированном использовании методов Фотриэ и ускоренных итераций. В соответствии с проведёнными расчётами, неоднородность магнитного поля нейтронной звезды играет принципиальную роль при определении зоны устойчивости атмосферы, но, как правило, не оказывает особого влияния на спектр и поляризацию выходящего излучения. Благодаря существенному возрастанию коэффициента затухания обыкновенной волны в верхних слоях атмосферы под влиянием намагничения вакуума

происходит увеличение силы давления излучения, особенно значительное в том случае, когда эти слои являются оптически тонкими. Перераспределение фотонов из центра линии на её крылья за счёт релятивистских поправок к доплеровскому условию резонанса и лоренцевского спектрального профиля сечения рассеяния, напротив, приводит к уменьшению давления гирорезонансного излучения. Совокупное действие указанных факторов может обеспечивать вытекание плазмы из атмосфер нейтронных звёзд при рентгеновских светимостях значительно ниже эддингтоновской.

Полученные результаты демонстрируют, что перераспределение фотонов по частоте при гирорезонансном рассеянии на электронах (с учётом релятивистских поправок к условию Доплера и лоренцевского профиля гирорезонансного сечения рассеяния) влияет на перенос и давление излучения в атмосферах нейтронных звёзд не меньше, чем рассматривавшиеся ранее эффекты отдачи, намагничивания вакуума и неоднородности магнитного поля. Установление эффективности этого перераспределения является существенным вкладом в физику атмосфер нейтронных звёзд, спектрально-поляризационным свойствам гирорезонансного излучения которых в последнее время уделяется особое внимание, прежде всего, благодаря возросшей точности спутниковых рентгеновских наблюдений и увеличившемуся количеству исследуемых нейтронных звёзд.

### Публикации

1. Гарасев М.А., Деришев Е.В., Кочаровский Вл.В. // Влияние релятивистских эффектов и намагничивания вакуума на перенос гирорезонансного излучения и устойчивость атмосфер компактных звезд // Письма в *Астрономический Журнал*, 2008, 34, №5, с. 339-350.
2. Гарасев М.А., Деришев Е.В., Кочаровский Вл.В. // Перенос резонансного излучения в замагниченной плазме с учётом диффузии по частоте // Труды X Конференции "Современные проблемы в астрофизике и физике космической плазмы", БШФФ-2007. Изд-во ИСЗФ СО РАН, Иркутск, 2007.

1.12. Экспериментально показана возможность повышения мощности 170 ГГц непрерывного гиротрона для ИТЭР до 1.5–2 МВт. В успешно испытанном короткоимпульсном макете гиротрона используется резонатор увеличенного размера с рабочей модой TE<sub>28,12</sub>, что позволяет решить проблему охлаждения резонатора при указанных мощностях. Требуемый режим одномодовой и одночастотной генерации на столь высокой рабочей моде обеспечивается параметрами электронной пушки и оптимизированным сценарием включения гиротрона.

**Авторы:** А. Н. Куфтин, В. Е. Запевалов, М. А. Моисеев, Н. А. Завольский, Г. Г. Денисов (ИПФ РАН).

**Аннотация.** Системы электронно-циклотронного (ЭЦ) нагрева и управления током для плазменных установок УТС базируются на гиротронах – мощных источниках СВЧ излучения диапазона миллиметровых длин волн. Для использования в будущей установке ИТЭР требуются гиротроны, работающие на частоте 170 ГГц с мощностью 1 МВт в импульсах порядка 1000 секунд. Разработка таких гиротронов в России ведется в кооперации трех организаций: Института прикладной физики РАН, НПП «ГИКОМ», ИЯС РНЦ «Курчатовский институт» уже в течение 10 лет.

Увеличение выходной мощности и надежности гиротронов, предназначенных для использования в комплексе ЭЦ нагрева ITER, представляется чрезвычайно важным, так как стоимость единичного гиротрона очень высока, а их количество в этом комплексе составляет несколько десятков. Повышение мощности единичного гиротрона может в значительной степени упростить решение ряда технических проблем и снизить стоимость комплекса за счет уменьшения количества единичных модулей: собственно гиротронов, криомагнитов, систем питания, охлаждения и линий передачи высокочастотного излучения.



В рамках аван-проекта «Парус», проводимого НПП «Гиком» и ИПФ РАН, были обоснованы возможности и определены возможные пути создания сверхмощного (1,5-2 МВт) гиротрона непрерывной генерации в диапазоне 170 ГГц для предполагаемого использования в установке ИТЭР. Для реализации непрерывного гиротрона с выходной мощностью 1,5–1,7 МВт в криомагните с диаметром теплого отверстия 160 мм была выбрана рабочая мода цилиндрического резонатора TE<sub>28,12,1</sub>, взаимодействующая с электронным пучком при значениях напряжений 90–100 кВ и токах 50–60 А. Проведена оптимизация параметров резонатора с учетом омических потерь и переизлучения волн на нерегулярностях профиля. Исследовано установление колебаний при включении гиротрона, конкуренция рабочей и паразитных мод, а также влияние пространственного заряда и его ионной компенсации. Рассмотрено влияние послерезонаторного взаимодействия в выходном волноводном переходе. Показана возможность достижения КПД 35 % без рекуперации и 65 % с одноступенчатой рекуперацией энергии электронного пучка при удельной мощности омических потерь 2.5–2.8 кВт/см<sup>2</sup>.

Для формирования винтового электронного пучка высокого уровня мощности в гиротроне использована магнетронно-инжекторная пушка (МИП). После проведенных аналитических оценок МИП была оптимизирована численно (методами траекторного анализа), сконструирована и изготовлена в нескольких вариантах с эмиттером на основе гексаборида лантана. Изготовленные варианты были исследованы экспериментально в моделирующих режимах методом тормозящего поля. Согласно расчетным и экспериментальным данным, для использования в длинноимпульсной и непрерывной версиях опытно-промышленного 170 ГГц гиротрона предпочтительна МИП, формирующая ламинарный пучок. В результате проведенных работ версия МИП с ламинарным пучком, оптимизированная численно и экспериментально, была выбрана для экспериментов с короткоимпульсным макетом гиротрона.

Все измерения проводились в режиме с заземленным коллектором (без рекуперации остаточной энергии). В экспериментах с короткоимпульсным макетом гиротрона запланированные уровни мощности устойчивой одномодовой генерации на столь высокой рабочей моде достигнуты в заданном проектном режиме (100 кВ, 50 А) с КПД 32.6 % (100 кВ, 50 А,  $P_{\max} = 1.63$  МВт). Максимальная выходная мощность 2.03 МВт с эффективностью 33.9 % была достигнута при токе пучка 60 А.

### Публикации

1. G.G. Denisov, A.G. Litvak, V.E. Myasnikov, E.M. Tai, V.I. Ilin, V.E. Zapevalov. Gyrotrons for Fusion Research. State of the art and progress trends. Abstracts of Strong microwaves: sources and applications, VII International Workshop, Nizhny Novgorod, Russia, July 27-August 2, 2008.
2. S.V. Usachev, L.G. Popov, V.I. Ilin, Yu.V. Roschin, M.V. Agapova, A.V. Chirkov, G.G. Denisov, A.Ph. Gnedenkov, V.N. Ilin, A.N. Kostyna, A.N. Kuftin, A.G. Litvak, V.I. Malygin, V.E. Myasnikov, V.O. Nichiporenko, V.G. Rukavishnikova, E.A. Soluyanova, E.M. Tai, V.E. Zapevalov. Test results of 170GHz/1MW/50% Gyrotron for ITER. Abstracts of Strong microwaves: sources and applications, VII International Workshop, Nizhny Novgorod, Russia, July 27-August 2, 2008.
3. L.G. Popov, G.G. Denisov, A.G. Litvak, M.V. Agapova, A.F. Gnedenkov, A.N. Kostyna, V.O. Nichiporenko, V.E. Myasnikov, E.M. Tai, S.V. Usachev, V.E. Zapevalov, A.V. Chirkov, V.I. Ilin, V.N. Ilin, A.N. Kuftin, S.A. Malygin, V.I. Malygina, V.V. Parshin, A.B. Pavel'ev, V.G. Rukavishnikova, Yu.V. Roschin, E.V. Sokolov, E.A. Soluyanova, A.L. Vikharev. Development in Russia of 170 GHz gyrotron for ITER. The 33-th Int. Conference on Infrared and Millimeter Waves and 16-th Int. Conference on Terahertz Electronics, 2008, Sept.2- Sept.7, Pasadena, USA, Conference Digest, W4U4.1472.

4. A.G. Litvak. High Power Gyrotrons. Development and Applications. The 33-th Int. Conference on Infrared and Millimeter Waves and 16-th Int. Conference on Terahertz Electronics, 2008, Sept.2- Sept.7, Pasadena, USA, Conference Digest, R1P.1734.

1.13. Показано, что с помощью выбора профиля концентрации плазмы можно значительно увеличить эффективность ускорения электронов лазерным импульсом, уменьшая при этом их разброс по энергии. Для этой цели предложено использовать систему из нескольких неоднородных плазменных слоев, которая позволяет на длинных трассах компенсировать нарушение синхронизма между электронами и ускоряющим полем плазменной волны.

**Авторы:** И. Ю. Костюков (ИПФ РАН), А. Пухов (Университет Дюссельдорфа, Германия).

**Аннотация.** В последнее время достигнуты серьезные успехи в плазменных методах ускорения электронов. В экспериментах удалось сгенерировать в лазерной плазме сгусток ускоренных электронов с энергией около 1 ГэВ, разбросом по энергии 2.5% и зарядом около 50 пКл. Однако для различных приложений требуется электронные пучки с еще более низким разбросом по энергии. Кроме этого, большое значение имеет повышение коэффициента трансформации лазерной энергии в энергию электронов. Решение этих задач можно добиться, управляя параметрами плазмы, в частности, выбирая нужный профиль концентрации плазмы. Следует отметить, что в последнее время значительный прогресс также наблюдается в плазменных технологиях, в частности, в создании сложных плазменных структур с заданными свойствами: плазменных капилляров, гофрированных плазменных волноводов, плазменных каналов с заданным профилем распределения концентрации плазмы.

Вычислена энергия, набираемая электроном в плазменной волне, возбуждаемой в неоднородной плазме лазерным импульсом. Выбирая заданный профиль плазмы можно компенсировать нарушение синхронизма между электронами и ускоряющим полем плазменной волны. Предложена система из нескольких неоднородных плазменных слоев, позволяющая добиться существенного увеличения эффективности ускорения электронов одним лазерным импульсом. Показано, что, подбирая плазменный профиль, можно значительно уменьшить разброс по энергии электронов внутри ускоряемого сгустка. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с результатами численного моделирования адаптивным PIC кодом, в котором на каждом шаге по времени значение концентрации плазмы выбирается из условия, чтобы центр сгустка всегда находился в максимуме ускоряющего поля.

#### Публикации

1. A. Pukhov, I. Kostyukov, Physical Review E. 2008. V. 77. № 2. Article no. 025401. P. 1-4.

1.14. Обнаружена «изрезанность» профилей линий излучения  $J = 1-0$  HCN в областях образования массивных звезд, что наряду с наблюдаемыми особенностями сверхтонкой структуры этой линии указывает на значительную мелкомасштабную неоднородность плотного газа. В рамках модели с идентичными плотными фрагментами найдено, что концентрация газа в них ( $\sim 10^6 \text{ см}^{-3}$ ) по крайней мере, на порядок выше, чем в межфрагментном газе. Размер фрагментов  $\sim 10^3$  пк, а фактор объемного заполнения для них составляет несколько процентов. Фрагменты гравитационно не связаны, их время жизни невелико ( $10^4 - 10^5$  лет) и, вероятно, они представляют собой флуктуации плотности, возникающие за счет турбулентности.

**Авторы:** Л.Е. Пирогов, И.И. Зинченко (ИПФ РАН).

**Аннотация.** На профилях линий HCN(1-0) и CS(2-1), полученных с высоким отношением сигнал/шум в направлении отдельных позиций в областях образования массивных звезд S140 и S199, обнаружена изрезанность, превышающая шумовые фоновые уровни, что может быть связано с на-

личием в диаграмме телескопа большого числа не разрешаемых мелких фрагментов. Указания на такую фрагментарность дают и другие данные, в частности, результаты моделирования наблюдаемой сверхтонкой структуры перехода  $J = 1-0$  HCN.

С помощью аналитической модели и детальных модельных расчетов определено вероятное количество фрагментов для областей с линейными масштабами  $\sim 0.2-0.5$  пк, которое составляет  $\sim 2 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^5$ .

Плотности фрагментов варьируют в диапазоне  $\sim 3 \cdot 10^5 - 10^6$  см<sup>-3</sup>, их размеры и фактор объемного заполнения пространства составляют  $\sim (1-3) \cdot 10^{-3}$  пк и  $\sim 0.03-0.12$ , соответственно. Фрагменты окружены межфрагментным газом с плотностью не менее  $\sim (2-7) \cdot 10^4$  см<sup>-3</sup>.

Внутренняя тепловая энергия газа в модельных фрагментах намного превышает гравитационную энергию, а средние времена их жизни могут определяться частотой взаимных столкновений и варьировать в диапазоне  $\sim 10^4 - 10^5$  лет. Вероятно, что подобные структуры могут являться флуктуациями плотности, возникающими за счет турбулентности в областях образования массивных звезд.

### Публикации

1. Л.Е. Пирогов, И.И. Зинченко. Поиск мелкомасштабной фрагментарности в плотных ядрах молекулярных облаков. *Астрономический журнал* 2008, т.85, No 12, стр.1072-1085.
2. L. Pirogov, I. Zinchenko, P. Caselli, L.E.V. Johanson. Chemical differentiation in regions of high-mass star formation. CS, dust and N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> in southern sources. *Astron.Astrophys.* 461, 523 (2007)
3. L. Pirogov.  $J = 1-0$  HCN toward bright far-infrared sources in the outer Galaxy. *Astron.Astrophys.* 348, 600 (1999) .

1.15. Для электрон-позитронных суперколлайдеров предложена новая ускоряющая структура на основе цепочки квазиоптических резонаторов, которая за счет уменьшения времени экспозиции поверхности мощными СВЧ полями позволяет существенно увеличить темп ускорения пучка, состоящего из периодически расположенных сгустков частиц. Увеличение электропрочности резонаторов при заданном градиенте ускорения достигается за счет использования суперпозиции эквидистантно отстоящих друг от друга разночастотных мод. Их суммарное поле представляет собой серию коротких импульсов, разделенных широкими интервалами нулевого поля и синхронизированных со сгустками ускоряемых электронов.

**Авторы:** С. В. Кузиков, М. Е. Плоткин (ИПФ РАН), С. Казаков (КЕК, Япония), Дж. Хиршфилд (Йельский университет, США).

**Аннотация.** Предлагается новая ускоряющая структура для следующего поколения тераэлектронвольных, линейных, электрон-позитронных коллайдеров [1–6]. Структура основана на ускорении последовательности сгустков частиц (ускоряемого пучка) с помощью периодической цепочки квазиоптических резонаторов, которые электродинамически не связаны друг с другом. Каждый из этих резонаторов работает на нескольких, эквидистантно расположенных по частотам собственных модах, которые возбуждаются при помощи второго (драйв-) пучка, сгруппированного с тем же периодом, что и основной пучок. Частоты мод резонаторов соответствуют гармоникам тока пучков. СВЧ поля в каждом отдельном резонаторе при этом колеблются с частотой следования сгустков, достигая пикового значения вблизи оси пучков только в течение короткого интервала времени, когда очередной сгусток влетает в резонатор, в остальное время электромагнитная энергия распределена по объему этого резонатора. Достигаемое таким образом уменьшение времени экспозиции поверхности структуры сверхсильными электромагнит-

ными полями позволяет рассчитывать на улучшение электропрочности за счет увеличения порогов пробоя и импульсного нагрева и позволяет, следовательно, повысить темп ускорения.

Предложенная структура имеет также меньшее отношение  $\alpha$  максимального поверхностного поля к ускоряющему градиенту ( $1 < \alpha < 2$ ) в сравнении с обычной одночастотной ускоряющей структурой, где это отношение близко к 2. Структура также имеет ряд других привлекательных свойств: резонаторы полностью состоят из металла, нет передающих или связывающих структур между драйв- и ускоряемым пучками, поля симметричны вокруг осей драйв-пучка и ускоряемого пучка.

Показано, что высокая эффективность и коэффициент трансформации мощности драйв-пучка в мощность ускоряемого пучка может быть обеспечена при помощи эффекта детьюнинга. В соответствии с ним драйв-пучок с большим током запитывает большое число резонаторов, оставляя свою мощность распределенным образом на большой длине ускорителя. Это достигается благодаря отстройке собственных частот резонаторов от частоты следования банчей драйв-пучка.

Расчеты двух-пучковой ускоряющей структуры, состоящей из резонаторов прямоугольной формы с параллельными драйв- и ускоряемым пучками, показывают, что градиент ускорения ( $\sim 150$  МВ/м), низкое поверхностное поле ( $\sim 190$  МВ/м) и высокая эффективность (25%) достижимы при параметрах пучков, запланированных для коллайдера CLIC (ЦЕРН).

### Публикации

1. Kuzikov S.V., High-Power RF components for accelerators, CLIC'07 Workshop, Geneva, October 16-18, 2007.
2. S.V. Kuzikov, M.E. Plotkin. Quasi-optical accelerating structure operated on superposition of synchronized modes, Conference Digest of the Joint 32st International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 15th International Conference on Terahertz Electronics, Cardiff, UK, 2007. V. 2, pp. 797-798.
3. Kazakov S., Kuzikov S.V., Hirshfield J.L., "Multimode, multi-frequency, two-beam accelerating structure", High-Gradient Collaboration Workshop, Univ. Maryland, Jan. 23-24, 2008.
4. S.V. Kuzikov, S.Yu. Kazakov, M.E. Plotkin, J.L. Hirshfield. High-Gradient Multi-Mode Two-Beam Accelerating Structure, Proc. of EPAC08 Conf., Genoa, 2008, WEPP133.
5. S.V. Kuzikov, S.Yu. Kazakov, J.L. Hirshfield, V. Yakovlev Two-Beam, Multi-Mode, Detuned Accelerating Structure, Proc. of AAC'08, Santa Kruz, July 27 – August 2, 2008 (в печати).
6. S.V. Kuzikov, S. Kazakov, M.E. Plotkin, J.L. Hirshfield. High-Gradient Quasi-Optical Accelerating Structure, VII Int. Workshop Strong Microwaves: sources and applications, Nizhny Novgorod, July 27-August 2, 2008, s41.

1.16. Развита теория аномальной теплопроводности плазмы с ионно-звуковой турбулентностью, которая позволила рассчитать профили температуры в хромосфере Солнца с резким перепадом температуры на расстояниях, меньших 100 км. Зависимость потока тепла от градиента и величины температуры определена с помощью установленной связи между коэффициентами аномальной электро и теплопроводности изотропной плазмы.

**Авторы:** П. А. Беспалов (ИПФ РАН), О. Н. Савина (НГТУ).

**Аннотация.** На основе нового выражения для потока тепла, зависящего от температуры и ее градиента, рассмотрены свойства стационарного турбулентного температурного перепада в

хромосфере с постоянным потоком тепла. При известном из наблюдений потоке тепла через хромосферу в ней реализуется режим развитой ионно-звуковой турбулентности, являющийся причиной низкой теплопроводности плазмы и высокого градиента температуры. Определен зависящий от локальных параметров среды критический поток тепла, который может пропустить через себя плазма в режиме сравнительно малых температурных градиентов. В переходном слое, где поток тепла превышает критический, формируется температурный перепад с масштабом, не превосходящим 100 км.

Для плазмы с развитой ионно-звуковой турбулентностью предложено преобразование, которое решению задачи об аномальной электропроводности ставит в соответствие решение задачи об аномальной теплопроводности. На основе этого преобразования установлена связь аномальных коэффициентов электро и теплопроводности в изотропной плазме с развитой ионно-звуковой турбулентностью, обобщающая обычные соотношения между коэффициентами теплопроводности и проводимости плазмы с кулоновскими соударениями. Установленные соотношения дают новое выражение для потока тепла, зависящего от температуры и ее градиента, так как проблема аномальной теплопроводности рассматривалась не так подробно, а аномальная проводимость в свое время тщательно изучалась теоретически и экспериментально.

### Публикации

1. P.A. Besspalov, O.N. Savina. Generalized Wiedemann - Franz law and temperature jump in space plasmas with ion - acoustic turbulence. Mon. Not. R. Astron. Soc., 2007, v. 382, L63–L66, doi:10.1111/j.1745-3933.2007.00389.x.
2. П.А. Беспалов, О.Н. Савина. Влияние аномальной теплопроводности на структуру переходной области солнечной атмосферы. Письма в АЖ, 2008, т. 34, №5, с. 378-386.

1.17. Продемонстрирована возможность использования двумерной распределенной обратной связи для генерации мощного пространственно-когерентного излучения в лазерах на свободных электронах с ленточными и трубчатыми релятивистскими электронными пучками с поперечными размерами, более чем на порядок превосходящими длину волны. Для организации обратной связи используются двумерные брэгговские структуры, формирующие поперечные потоки энергии, которые синхронизируют излучение отдельных частей пространственно-развитого электронного пучка. Экспериментально измеренная ширина линии излучения в МСЭ планарной (диапазон 75 ГГц) и коаксиальной геометрии (диапазон 37 ГГц) близка к естественному пределу, обусловленному ограниченностью длительности импульса.

**Авторы:** Н. С. Гинзбург, Н. Ю. Песков, А. С. Сергеев, В. Ю. Заславский (ИПФ РАН), А. В. Аржанников, П. В. Калинин, С. Л. Сеницкий (ИЯФ СО РАН, Новосибирск), А. Д. Р. Фелпс, А. В. Кросс, И. В. Коноплев (Стратклайдский университет, Глазго, Великобритания).

**Аннотация.** Двумерная распределенная обратная связь (РОС) является универсальным методом получения мощного когерентного излучения пространственно-развитых активных сред, к числу которых относятся сильноточные релятивистские электронные пучки (РЭП) ленточной и трубчатой геометрии, а также лазерные среды. Двумерная РОС реализуется с помощью двумерных брэгговских резонаторов, которые представляют собой отрезки волноводов с двоякопериодической двумерной гофрировкой, обеспечивающей цикл обратной связи с вовлечением поперечных потоков электромагнитной энергии, которые осуществляют синхронизацию излучения различных частей электронного потока.

Проведенные теоретические исследования и численное моделирование показывают принципиальную возможность получения на основе нового механизма обратной связи про-

странственно-когерентного излучения гигаваттного уровня мощности от ленточных и трубчатых РЭП с поперечными размерами, достигающими  $10^2 - 10^3$  длин волн. В «холодных» электродинамических тестах продемонстрирована высокая селективность двумерных брэгговских структур при поперечных размерах, достигающих до 50 длин волн.

Макеты мазеров на свободных электронах (МСЭ) разработаны в диапазонах 37 ГГц (коаксиальная геометрия) и 75 ГГц (планарная геометрия) в сотрудничестве ИПФ РАН (Н.Новгород), ИЯФ СО РАН (Новосибирск) и Стратклайдского университета (Глазго, Великобритания). В качестве селективного элемента этих МСЭ использован комбинированный резонатор, составленный из одномерного и двумерного брэгговских зеркал. В этой схеме входное двумерное брэгговское зеркало обеспечивает синхронизацию излучения широкого РЭП, а выходное одномерное зеркало служит для замыкания цепи обратной связи, одновременно снижая уровень омических потерь в системе. Экспериментальные исследования МСЭ с двумерной РОС продемонстрировали селективное возбуждение электронным потоком рабочей моды двумерного брэгговского резонатора при сверхразмерности пространства взаимодействия  $\sim 25$  длин волн. При интегральной мощности излучения в несколько десятков мегаватт ширина линии спектра излучения была близка к естественному пределу, обусловленному ограниченностью длительности импульса тока.

### Публикации

1. А.В.Аржанников, Н.С.Гинзбург, В.Ю.Заславский, В.Г.Иваненко, И.А.Иванов, П.В.Калинин, А.С.Кузнецов, С.А.Кузнецов, Н.Ю.Песков, А.С.Сергеев, С.Л.Синицкий, В.Д.Степанов. Генерация пространственно-когерентного излучения в мазере на свободных электронах с двумерной распределенной обратной связью. Письма в ЖЭТФ, 2008, т.87, вып.11, с.715-719.
2. N.S.Ginzburg, N.Yu.Peskov, A.S.Sergeev, G.G.Denisov, S.V.Kuzikov, V.Yu.Zaslavsky, A.V.Arzhannikov, P.V.Kalinin, S.L.Sinitsky, M.Thumm. Observation of the high-Q modes inside resonance zone of 2D Bragg structures. Appl. Phys. Lett., 2008, v.92, p.103512.
3. I.V.Konoplev, A.W.Cross, A.D.R.Phelps, W.He, K.Ronald, C.G.Whyte, C.W.Robertson, N.S.Ginzburg, N.Yu.Peskov, A.S.Sergeev, V.Yu.Zaslavsky, M.Thumm. Co-axial Free-Electron Maser based on two-dimensional distributed feedback. **Phys. Rev. E**, 2007, v.76, p.056406.
4. A.V.Arzhannikov, A.W.Cross, N.S.Ginzburg, W.He, P.V.Kalinin, I.V.Konoplev, S.A.Kuznetsov, N.Yu.Peskov, A.D.R.Phelps, K.Ronald, A.S.Sergeev, S.L.Sinitsky, V.D.Stepanov, C.G.Whyte, V.Yu.Zaslavsky. Production of powerful spatially coherent radiation in planar and coaxial FEM exploiting two-dimensional distributed feedback. IEEE Trans. on Plasma Science (accepted).

1.18. По данным, полученным с борта спутника СТЕРЕО, обнаружена суточная модуляция аврорального километрового излучения (АКР), что обусловлено вращением магнитного диполя Земли по отношению к Солнцу. Установлено также, что в обоих источниках АКР (Северной и Южной полусфер) интенсивность излучения максимальна на ночной стороне. Это связано с вариациями отношения плазменной и гиро-частот в авроральной зоне, которое является определяющим для генерации АКР.

**Авторы:** А. Г. Кисляков (ИПФ РАН, ННГУ), М. Панченко, М. Л. Ходаченко, Х. О. Рукер (ИКИ ААН, Грац, Австрия), Я. Ханаш (Центр Космических исследований АН Польши), М.Л.Кайзер (НАСА/Центр Годдарда) .

**Аннотация.** Все планеты солнечной системы, имеющие достаточно плотные и протяженные магнитосферы (это Земля, Юпитер, Сатурн и Нептун), излучают интенсивное нетепловое радиоизлучение на частотах, близких локальной циклотронной частоте электронов. Типичным примером такого излучения является нетепловое авроральное километровое излучение (АКР), генерируемое земной магнитосферой. На частотах от 20 до 1000 кГц это излучение превышает по интенсивности любое излучение промышленного происхождения, но АКР не наблюдается на поверхности Земли вследствие его экранировки ионосферой (на высоте ~100 км). Тем не менее, история наблюдений АКР насчитывает более 40 лет благодаря развитию его внеатмосферных исследований с помощью ИСЗ.

Несмотря на обширные данные об АКР, остаются неясными некоторые аспекты, относящиеся к его происхождению, а также к влиянию всего земного комплекса на АКР. В частности, до недавних пор было неясно, может ли суточное вращение Земли привести к модуляции АКР, аналогично тому, как вращение Сатурна с периодом 10,7 ч модулирует его километровое излучение (СКР).

В работах, составляющих основу заявляемого результата, авторы впервые показали наличие суточных (24 ч) вариаций АКР. Более того, предлагается простой механизм, который связывает это явление с вращением Земли. Это стало возможным благодаря уникальным измерениям с борта ИСЗ STEREO во время его пролета вблизи Земли.

Установлена, в частности, связь частоты появления импульсов АКР с вращением магнитного диполя Земли относительно Солнца. Показано, что в каждой полусфере (северной и южной) АКР появляется чаще в течение периодов времени, когда ось магнитного диполя Земли ориентирована к ночной стороне полусферы, т.е. в направлении, противоположном направлению на Солнце. В это же время наблюдается уширение спектра АКР. В итоге проведенный анализ приводит к заключению о физической связи между обнаруженной суточной модуляцией АКР и изменениями направления магнитного диполя Земли по отношению к Солнцу. Мы предполагаем, что эта связь заключается в модуляции локальной плотности плазмы внутри источника АКР, обусловленной изменениями инсоляции авроральной ионосферы при суточном вращении Земли. Это, в свою очередь, приводит к суточной модуляции отношения плазменной и гиро- частот,  $f_p/f_c$ , известного как ключевой фактор при генерации АКР.

Результат, полученный в настоящем исследовании, может пролить свет на загадку периодичности СКР, известную по данным ИСЗ VOYAGER и CASSINI.

### Публикации

1. Panchenko, M., Khodachenko, M.L., Kislyakov, A.G., Rucker, H.O., Hanasz, J., Kaiser, M.L., Zarka, P., Lamy, L., Daily variations of Auroral Kilometric Radiation observed by STEREO, *Geophys. Res. Lett.*, 2008 (принята в печать).
2. Panchenko, M., Khodachenko, M.L., Kislyakov, A.G., Rucker, H.O., Hanasz, J., Kaiser, M.L., Bale, S.D., Lamy, L., Zarka, P., Goetz, K., Signatures of terrestrial rotation in auroral kilometric radiation observed by STEREO/WAVES, 3-rd European Planetary Science Congress, Muenster, Sept. 2008.
3. Panchenko, M., Khodachenko, M.L., Kislyakov, A. G., Rucker, H. O., Hanasz, J. and STEREO/WAVES team, Terrestrial rotation influence on AKR, STEREO SWG meeting, Paris, France, 20-22 April, 2008.
4. Panchenko, M., Khodachenko, M.L., Kislyakov, A.G., Rucker, H.O., Hanasz, J., Zarka, P., Kaiser, M., AKR modulations controlled by Earth's rotation, as observed by STEREO, EGU General Assembly 2008, Vienna, Apr. 2008.

1.19. Создана система активного радиовидения СВЧ диапазона, позволяющая, в отличие от существующих систем, получать двумерные изображения объектов в реальном времени (с частотой десятки кадров в секунду). В качестве двумерного быстродействующего сенсора использован плоский слой плазмы Cs-Xe разряда. С частотой следования кадров 12,5 Гц получены теневые радиоизображения объектов, освещаемых импульсным СВЧ излучением восьми миллиметрового диапазона длин волн невысокой интенсивности (средняя интенсивность порядка 1 мВт/см<sup>2</sup>). Экспериментально показано, что данный метод радиовидения может применяться для регистрации динамических процессов, а также для оперативного обнаружения скрытых предметов.

**Авторы:** М. С. Гитлин, А. И. Цветков (ИПФ РАН)

**Аннотация.** Методы активного радиовидения с использованием миллиметровых волн применяются в системах неразрушающего контроля, досмотра и обеспечения безопасности и т.д. В связи с этим, весьма актуальной является задача разработки метода визуализации СВЧ излучения применимого в системах активного радиовидения в реальном времени. Нами была впервые продемонстрирована возможность применения новой методики, использующей широкополосное оптическое излучение плоского положительного столба (ПС) Cs-Xe разряда, для преобразования теневых радиоизображений объектов, освещаемых миллиметровыми волнами, в видимые изображения. Принцип действия такого газоразрядного радиовизора основан на эффекте локального увеличения яркости в видимом диапазоне e-Xe тормозного континуума при нагреве электронов под действием падающего на плазму СВЧ излучения. Такой метод регистрации радиоизображений, формируемых миллиметровыми волнами, обладает микросекундным временным разрешением и высокой энергетической чувствительностью (порядка 10 мкДж/см<sup>2</sup> в восьмимиллиметровом диапазоне), что позволяет его использовать для визуализации излучения невысокой средней интенсивности (порядка 1 мВт/см<sup>2</sup> при регистрации с телевизионной частотой кадров). Пространственное разрешение метода составляет около 2 миллиметров. В проведенных экспериментах по радиовидению для создания пространственно однородного слоя плазмы положительного столба Cs-Xe разряда размером около 10 см x 8 см использовалась отпаянная газоразрядная трубка специальной конструкции. Она была заполнена ксеноном при давлении 45 Тор. Для получения требуемой плотности паров цезия трубка нагревалась в термостате. Пространственное распределение интенсивности видимого континуума регистрировалось при помощи ПЗС телекамеры. Перед объективом телекамеры был установлен оптический фильтр, не пропускающий линейчатое излучение ПС Cs-Xe разряда. Время экспозиции телекамеры было равным 1 мс или 0,1 мс. Источником СВЧ излучения с длиной волны 8,5 мм служил магнетрон. Длительность импульсов СВЧ излучения составляла около 10 мс, частота повторения импульсов была 12,5 Гц. Ширина СВЧ пучка в области плазменного слоя составляла около 8 см, а интенсивность в центре пучка была около 0,3 Вт/см<sup>2</sup>. Исследуемые объекты располагались вблизи окна газоразрядной трубки. Изображения объектов были получены с частотой следования кадров 12,5 Гц. Для определения характеристик данного метода регистрации радиоизображений использовались тестовые амплитудные и фазовые объекты. Объекты размером несколько сантиметров легко распознавались, несмотря на то, что их изображения были искажены из-за влияния дифракции. Было экспериментально показано, что данный метод может применяться для оперативного обнаружения таблеток, порошков и ювелирных украшений, помещенных в почтовые конверты и бандероли. Эксперименты по визуализации процесса вытекания воды из стеклянной трубки, колебаний маятника, движения пальцев руки и т. д. продемонстрировали возможность использования данной методики для визуализации радиоизображений в реальном времени.

## Публикации



1. M. S. Gitlin, V. V. Golovanov, and A. I. Tsvetkov, Real-Time Shadow Projection Millimeter-Wave Imaging Using Visible Continuum from a Slab of the Cs-Xe DC Discharge // IEEE Transactions on Plasma Science, 2008, v. 36, No. 4, p. 1398.
2. M. S. Gitlin, V. V. Golovanov, and A. I. Tsvetkov, and V. V. Zelenogorsky. Shadow Projection Millimeter-Wave Imaging Using Visible Continuum from a Slab of the Cs-Xe DC Discharge, Abstracts of the VII International Workshop "Strong Microwaves: Sources and Applications", Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, July 27 – August 2, 2008, p. 130.
3. M. S. Gitlin, V. V. Golovanov, A. I. Tsvetkov, V. V. Zelenogorsky. Real-Time Shadow Projection Millimeter-Wave Imaging Using Visible Continuum from a Slab of the Cs-Xe DC Discharge, 33rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Pasadena, USA, September 15-19, 2008, paper 1189.
4. М. С. Гитлин, А. И. Цветков «Использование оптического континуума, излучаемого Cs-Xe разрядом, для визуализации в реальном времени теневых радиоизображений объектов, освещаемых СВЧ излучением». Тезисы докладов XVIII Всероссийской научно-технической конференции Неразрушающий контроль и техническая диагностика, 29 сентября – 03 октября 2008 г., Нижний Новгород, Машиностроение, 2008, с. 38.

1.20. Создан резонаторный спектрометр для высокоточного изучения атмосферного поглощения в уникально широком диапазоне частот 46–380 ГГц, оснащенный климатической камерой, позволяющей проводить исследования в диапазоне температур от  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$  и в интервале влажностей от 0% до 80%. Для исследования континуального атмосферного поглощения разработана методика измерений на базе сдвоенного резонатора Фабри – Перо, позволяющая исключить влияние неконтролируемой абсорбции паров воды зеркалами резонатора. Проведены исследования температурных параметров резонансных атмосферных линий и континуального поглощения, выявившие значительные систематические ошибки предшествующих лабораторных измерений, не учитывающих особенности влияния зеркал резонатора при определении поглощения во влажных газах.

**Авторы:** В. В. Паршин, М. Ю. Третьяков, А. Ф. Крупнов, В. Н. Шанин, А. П. Шкаев, А. Ф. Андриянов. (ИПФ РАН).

**Аннотация.** Создан резонаторный спектрометр для высокоточного изучения атмосферного поглощения в уникально широком диапазоне частот 46–380 ГГц, оснащенный климатической камерой, позволяющей проводить исследования в диапазоне температур от  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$  и в интервале влажностей от 0% до 80%.

Принципиальным отличием резонаторного спектрометра от всех существующих в мире, является применение двух резонаторов с различной оптической длиной. Разработанная оригинальная методика измерений континуального атмосферного поглощения позволяет исключить влияние неконтролируемой абсорбции паров воды зеркалами резонатора. Абсорбция паров воды зеркалами резонатора приводит к неконтролируемой "добавке" к величине измеряемого в водяном паре поглощения и, соответственно, к кажущемуся увеличению поглощения в атмосфере при отличных от нуля влажностях.

Проведённые исследования температурных зависимостей поглощения в окне прозрачности атмосферы (вблизи 140 ГГц), выявили значительные систематические ошибки предшествующих лабораторных резонаторных измерений, не учитывающих особенности влияния зеркал резонаторов при определении поглощения во влажных газах. Выявлено, что при отрицательных температурах систематическая ошибка определения величины поглощения доходит до 1000%.

Применение методики на базе сдвоенного резонатора позволило продвинуть исследования в низкотемпературную область и впервые получить прецизионную информацию о поглощении в атмосфере при отрицательных температурах. До сих пор для построения моделей ат-

мосферного поглощения при отрицательных температурах используется экстраполяция "тёплых" измерений.

По чувствительности резонаторный спектрометр на порядок превосходит зарубежные резонаторные спектрометры, а по уникально широкому диапазону частот и интервалу температур не имеет аналогов ни за рубежом, ни в России.

В Российской Федерации подобные прецизионные исследования атмосферного поглощения ведутся только в ИПФ РАН.

### Публикации

1. В.В. Паршин, М.Ю. Третьяков, В.Н. Шанин, А.П. Шкаев. "Аппаратурный комплекс для прецизионного исследования распространения ММ и СубММ волн в атмосфере." 22 Всероссийская конф. по распространению радиоволн (РРВ-22). п. Лучезарный 22 - 26 сентября 2008.
2. М.Ю. Третьяков, В.В. Паршин, М.А. Кошелев, А.Ф. Крупнов, Г.Ю. Голубятников, И.А. Коваль, Д.С. Макаров. "Атмосферное поглощение в миллиметровом-субмиллиметровом диапазонах: прецизионные данные для построения моделей распространения." 22 Всероссийская конф. по распространению радиоволн (РРВ-22). п. Лучезарный 22 - 26 сентября 2008.
3. Д.С. Макаров, М.Ю. Третьяков, В.В. Паршин, М.А. Кошелев, Л.М.Кукин, И.А. Коваль. "Поглощение ММ-излучения атмосферным кислородом: Возможность точного моделирования". 22 Всероссийская конф. по распространению радиоволн (РРВ-22). п. Лучезарный 22 - 26 сентября 2008.
4. D.S. Makarov, I.A. Koval, M.A. Koshelev, V.V. Parshin and M.Yu. Tretyakov. Collisional parameters of the 118-GHz oxygen line: temperature dependence. J. Molec. Spectrosc. 2008. Accepted for publication.

1.21. Разработан комплект сверхмалозумящей широкоформатной ПЗС – системы нового поколения для астрономических исследований в оптическом диапазоне, отличающийся:

- криосистемой азотного уровня температуры с пространственно разнесенными криокамерой и криоаккумулятором (сплит-охладитель), обеспечивающей предельно высокую эффективность по световому потоку и минимальное затенение в камерах спектрографов с внутренним фокусом;

- новейшим ПЗС-приемником изображения научного класса CCD203 со специально разработанным высокопроизводительным ПЗС-контроллером и управлением широкоформатным охлаждаемым ПЗС-детектором, отстоящим от контроллера на существенное расстояние.

**Авторы:** Вдовин В. Ф., Густяков В. Н., Коротаев Д. В., Мамаев Ю. Н., Новиков Е. А., Перминов В. Г. (ИПФ РАН), Ардиланов В. И., Афанасьева И. В., Борисенко А. Н., Иващенко Н. Г., Маркелов С. В. Мурзин В. А. (САО РАН).

**Аннотация.** Целью работы являлось построение ПЗС-системы для регистрации спектров астрономических объектов в видимом диапазоне длин волн с квантовой эффективностью не менее 86 % в максимуме спектральной чувствительности, шумом считывания не более 3.5 электронов и высокой фотометрической стабильностью.

Результат: разработан комплект широкоформатной ПЗС – системы нового поколения для астрономических исследований в оптическом диапазоне, отличающийся:

- криосистемой азотного уровня температуры с пространственно разнесенными криокамерой и криоаккумулятором (сплит-охладитель) обеспечивающей предельно высокую эффектив-

ность по световому потоку и минимальное затенение луча зрения в камерах с внутренним фокусом;

основные характеристики криосистемы:

- температура криостатирования – 100 °С,
- объем криоаккумулятора – 2,0 л,
- время непрерывной работы без заливки азота – 24 часа;
- новейшим ПЗС – приемником изображения научного класса CCD203 с форматом 4096 × 4096 пикселей размерами 12 × 12 мкм;
  - большим размером матрицы ПЗС – 40 × 40 мм и входного оптического окна-гермоввода входного сигнала D 83 мм;
- специально разработанным и реализованным высокопроизводительным ПЗС-контроллером нового (4-го) поколения с характеристиками:
  - скорость считывания до 16 Мпиксел/с,
  - собственный шум менее 2 электрон,
  - связь с компьютером по оптоволокну до 500 м;
- реализацией управления широкоформатным охлаждаемым ПЗС-детектором, отстоящим от контроллера на существенное расстояние (вынесенным во внутренний фокус спектрографа).  
Фотометрическая нестабильность составляет 0.03% за 2 суток.

### Публикации

1. Борисенко А.Н., Вдовин В.Ф., Густяков В.Н., Коротаев Д.В., Мансфельд М.А., Маркелов С.В., Перминов В.Г. Конструирование, производство и исследования характеристик специализированных систем криостатирования астрономических приемников излучения// Радиоастрономическая конференция «Повышение эффективности и модернизация радиотелескопов», 22-27 сентября, 2008г., п. Нижний Архыз, Карачаево-Черкессия, тезисы докладов, с. 29.

## 2. Отделение гидрофизики и гидроакустики

2.1. Для изучения распространения слабонелинейных волн на поверхности вязкой жидкости предложен метод модифицированных лагранжевых координат. Метод позволяет эффективно исследовать движение жидкости как в глубине, так и в тонком приповерхностном пограничном слое, при этом проблема учета секулярных по времени слагаемых формализована для всех приближений. В качестве примера построено и проанализировано решение для трехмерных периодических волн на поверхности бесконечно глубокой вязкой жидкости. В квадратичном приближении по малой крутизне волн найдено выражение для усредненной (на длине волны) скорости горизонтального дрейфа жидких частиц, обобщающее результат Лонге-Хиггинса для двумерных поверхностных волн.

**Авторы:** А. А. Абрашкин ( ИПФ РАН).

**Аннотация.** Характерная особенность исследования эволюции поверхностных волн в вязкой жидкости состоит в том, что толщина пограничного слоя вблизи свободной поверхности может быть мала по сравнению с амплитудой волны. Вследствие этого ставить поверхностные граничные условия на уровне  $y = 0$  ( $y$  – вертикальная декартова координата) не представляется удовлетворительным. Лучшим вариантом является выбор системы отсчета, движущейся с волной, и использование ортогональной криволинейной координатной системы, в которой свободная поверхность является координатной поверхностью. При эйлеровом описании течения ее вид неизвестен, поэтому при изучении двумерных линейных волн граничные условия формулируются на плоской поверхности  $y = 0$ , а при рассмотрении квадратичных эффектов на синусоидальной поверхности, соответствующем профилю линейной волны. Анализ эффектов в третьем приближении по малой крутизне волны предполагает знание профиля во втором порядке теории возмущений и т.д. Изучение пространственных волн при таком подходе представляется нереальным ввиду значительного объема требуемых вычислений.

Все эти трудности, однако, отсутствуют при лагранжевом описании волнового движения. Форма свободной поверхности при таком подходе задается условием  $b = 0$ , где  $b$  – вертикальная лагранжевая координата. Оно не зависит ни от порядка теории возмущений, ни от размерности задачи.

В настоящей работе лагранжево описание волн в вязкой жидкости обобщается на трехмерный случай. Обычный лагранжевый подход усовершенствован путем перехода к модифицированным лагранжевым координатам. В рамках предложенного описания проблема учета секулярных по времени слагаемых формализована для всех (в том числе, высших) приближений. Решена задача о распространении линейных трехмерных волн на поверхности вязкой жидкости. Отличительным их свойством является наличие завихренности в направлении распространения. В квадратичном приближении по малой крутизне волны найдено выражение для усредненной (на длине волны) скорости горизонтального дрейфа жидких частиц

### Публикации

1. Abrashkin A.A. On the mean current induced by the spatial surface wave in a viscous fluid // Proceedings of International Symposium “Topical Problems of Nonlinear wave Physics”. Nizhny Novgorod, 2008. P. 5-6.
2. Абрашкин А.А. Пространственные волны на поверхности вязкой жидкости // Изв. РАН. Механика жидкости и газа, 2008. №6 (будет опубликована).

2.4. Разработана приближенная теория взаимодействия составных солитонов, образованных кинками – перепадами поля разной полярности. Учет составного характера таких солитонов позволил впервые исследовать динамику их взаимодействий как протяженных (не точечных) образований. Обнаружен и объяснен ряд особенностей взаимодействия солитонов, обусловленных их составной структурой: появление уединенных волн противоположной полярности в процессе столкновения, аномально большие сдвиги фаз и др.). Существование этих особенностей подтверждено численными экспериментами в рамках моделей внутренних волн, допускающих существование составных солитонов.

**Авторы:** К. А. Горшков, И. А. Соустова, Н. В. Зайцева, Л. М. Шевц (ИПФ РАН).

**Аннотация.** Известно, что особенности взаимодействия уединенных волн – солитонов – удобно выявлять в рамках приближенных подходов. Приближенные подходы оказываются полезными для получения общей картины взаимодействия больших ансамблей солитонов; при этом часто удается получить аналитические выражения для некоторых характеристик процесса взаимодействия, что позволяет легко проводить сравнение с результатами экспериментальных данных при любых начальных условиях. В случае так называемых слабых взаимодействий, когда солитоны имеют близкие параметры, задача хорошо решается на основе приближенных асимптотических методов. В этом случае взаимодействие солитонов описывается лагранжианом для классических частиц с парным потенциалом взаимодействия. Однако в ряде случаев возникают экстремальные ситуации, не укладывающиеся в рамки слабых взаимодействий. Так, солитоны, являющиеся решениями ряда модельных уравнений (уравнение Гарднера, уравнение Choi-Camassa, Ostrovsky –Grue), имеют особенность, которая заключается в неограниченном росте пространственного масштаба солитона, когда его амплитуда стремится к предельному значению. Важно, что структура таких предельных солитонов близка к суперпозиции двух кинков – перепадов поля противоположной полярности. Нами предложен модифицированный приближенный подход для описания взаимодействия и эволюции таких составных солитонов, в основе которого лежит представление солитона (в нулевом приближении) в виде суперпозиции кинков с неизвестными координатами  $S_i(\varepsilon x, \varepsilon t)$ , медленно зависящими от времени и координат ( $\varepsilon$  – малый параметр). Алгоритм построения решения в следующих приближениях состоит в нахождении поправок к каждому ( $i$ -ому) кинку и их последующему сращиванию, что приводит уже в первом приближении к интегрируемой системе уравнений в обыкновенных производных для координат кинков  $S_i(\varepsilon x, \varepsilon t)$ . Это обстоятельство позволяет описать эволюцию и взаимодействие уединенных волн в широком диапазоне их амплитуд и скоростей, в том числе и близких к предельным. Важно, что в этом представлении приближенные уравнения, описывающие эволюцию произвольных последовательностей уединенных волн, допускают получение точных N-солитонных решений. Проведено сравнение приближенного описания стационарных солитонов и их взаимодействий в рамках различных моделей распространения нелинейных внутренних волн. Установлено, что с точностью до масштабных (по  $x, t$ ) преобразований отдельных солитонов, для расстояний между кинками, формирующих солитоны, и для расстояний между кинками соседних уединенных волн, динамика столкновения солитонов в разных моделях протекает одинаково: общий характер движения солитонов отвечает их взаимному отталкиванию с полным восстановлением их параметров после столкновения.

Результаты приближенного описания динамики составных солитонов находятся в хорошем количественном соответствии с результатами прямого численного моделирования уравнений Гарднера, Choi –Camassa. Следует заметить, что поскольку указанные модельные уравнения описывают динамику интенсивных внутренних волн (уравнение Гарднера – слабонелинейные волны, уравнение Choi – Camassa справедливо для сильно нелинейных внутренних волн) полученные результаты могут оказаться принципиальными при исследовании характера взаимодействия интенсивных солитонов внутренних волн при произвольных начальных условиях.

### Публикации

1. Gorshkov, K.; Soustova, I.; Shevz, L., N.V. Zaitseva Interaction of composite solitons in the CC model // Proc. of III Int. Conf. "Frontiers in nonlinear physics". 2007. С. 58-59. Print. IAP RAS. Nizhny Novgorod. 2007.
2. Gorshkov, K.; Soustova, I; Shevz, L. Composite solitons for the Choi-Camassa model (CÑ-model) and their importance for the description of the evolution of internal waves without amplitude and velocity constraint. NP6.02-1WE3P-0680; Poster: 18.4. (13:30-15:00) Board XY0680 Area Halls X/Y.
3. Gorshkov K.A., Soustova I.A., Ostrovsky L.A., Irisov V.G. Perturbation theory for kinks and application for multisoliton interactions in hydrodynamics // Physical Review E. V. 69. 2004. P. 1-10.

4. Горшков К.А., Соустова И.А., Зайцева Н.В. Построение приближенного N-солитонного решения уравнения Гарднера методом сращиваемых асимптотических разложений. VIII Всероссийская конференция «Нелинейные колебания механических систем», сентябрь, 2008.

2.5. Для улучшения характеристик авиационных батиметрических лидаров и для дистанционных измерений характеристик поверхностных волн предложен и исследован новый способ коррекции рефракционных искажений в лидарных изображениях морского дна, наблюдаемого через взволнованную поверхность моря, основанный на измерении центра распределения яркости изображения сигнала обратного рассеяния от толщи воды. Показано, что контроль угла преломления пучка указанным способом обеспечивает возможность существенного улучшения частотно-контрастной характеристики лазерной системы видения.

**Авторы:** Л. С. Долин, А. Г. Лучинин (ИПФ РАН).

**Аннотация.** В ряде прикладных задач, связанных с диагностикой приповерхностного слоя воды, возникает необходимость дистанционного определения уклонов волн или, в общем случае, характеристик поверхностных волн. Такая проблема существует, в частности в задаче восстановления изображений подводных объектов, наблюдаемых через взволнованную поверхность, при лидарных батиметрических измерениях, а также при фундаментальных исследованиях взаимодействия океана и атмосферы. Предлагаемый метод дает возможность улучшения характеристик систем наблюдения, использующих в качестве источника подсветки импульсный лазер с узкой диаграммой направленности. В таких системах изображение формируется за счет углового сканирования пучка подсветки. Возможность коррекции такого изображения может быть реализована за счет определения локального уклона поверхности в точке проникновения светового импульса через границу раздела с помощью приемника излучения с некоторой специальной диаграммой направленности. Располагая информацией об истинном направлении распространения пучка подсветки в воде, можно ввести в формируемое изображение соответствующую коррекцию в положение каждого элемента изображения и тем самым улучшить его качество. Информацию об угле преломления лазерного пучка предлагается извлекать из углового распределения яркости обратно рассеянного водой сигнала.

Изменение направления распространения пучка приводит к смещению светового пятна на водном слое, из которого приходит отраженный сигнал в заданный момент времени (рис. 1).

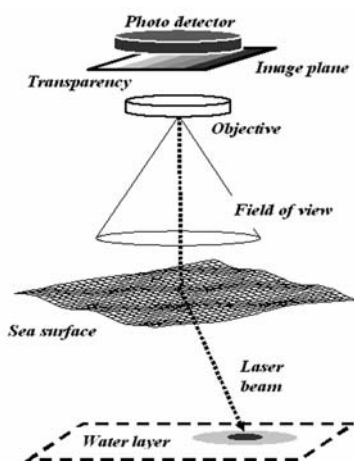


Рис. 1

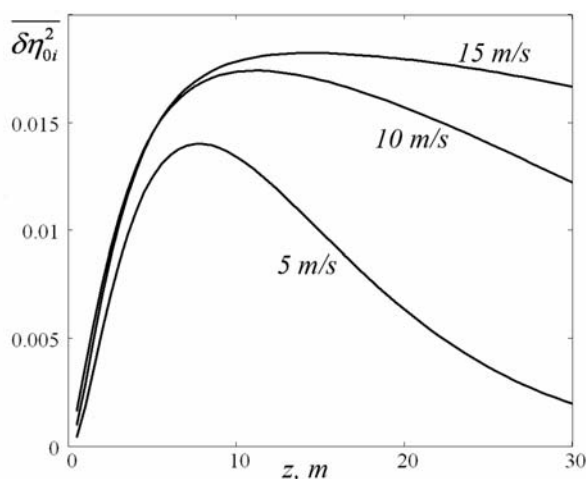


Рис. 2. Относительная дисперсия ошибки

Объектив приемника формирует «мгновенное» изображение этого пятна в фокальной плоскости, однако, при использовании одноэлементного фотодетектора информация о его по-

ложении и структуре утрачивается. Поэтому для регистрации смещений пучка предлагается использовать дополнительные фотоприемники с несимметричными диаграммами направленности, которые реагируют на изменения угловой структуры сигнала обратного объемного рассеяния. Указанным свойством обладают, например, приемники с линейно-неоднородной по полю зрения чувствительностью (их можно создавать путем наложения маски с линейно-неоднородной прозрачностью на фотокатод ФЭУ). При отклонении пучка в сторону увеличения чувствительности фотодетектора обратный рассеянный сигнал будет возрастать, а при его отклонении в противоположном направлении – уменьшаться. Для регистрации отклонений пучка в двух ортогональных направлениях необходимо располагать по крайней мере двумя дополнительными фотоприемниками, чувствительность которых изменяется в соответствующих направлениях.

Вместе с тем получаемый сигнал обратного рассеяния и соответственно измерение положения центра тяжести изображения зашумлено искажениями, вызванными случайным преломлением обратного рассеянного излучения. Поэтому измерение локального угла преломления зондирующего пучка сопровождается ошибками мультипликативного характера, зависящего от состояния поверхности и оптических характеристик воды. Пример оценки этой ошибки, как функции глубины слоя, от которого регистрируется сигнал обратного рассеяния, приведен на рис. 2. Величина этой ошибки фактически определяет возможность и точность коррекции изображения дна. На рис. 3 приведен пример расчета частотно-контрастных характеристик системы наблюдения (функции передачи контраста) без коррекции, с коррекцией предлагаемым способом и системы наблюдения в отсутствие волнения. Нетрудно видеть, что предлагаемый способ в значительной степени компенсирует влияние волнения и существенно увеличивает разрешающую способность системы наблюдения.

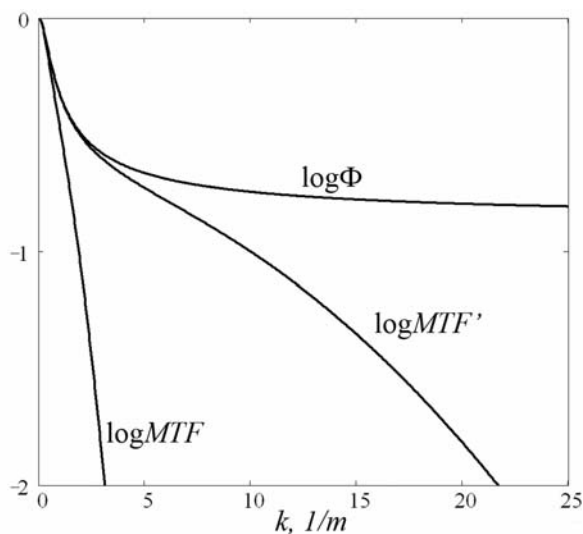


Рис. 3. Частотно-контрастная характеристика воды ( $\Phi$ ), воды и поверхности ( $MTF$ ), воды и поверхности после коррекции ( $MTF'$ )

### Публикации

1. Lev S. Dolin, Alexander G. Luchinin. Possibility of using a water-scattered signal to compensate for the rough sea surface effect on bottom lidar imaging. Applied Optics. (accepted).

2.6. Установлено, что в изображениях мутных сред, получаемых методом оптической когерентной томографии, присутствует пространственный шум со специфическими свойствами («теневой» шум), который несет информацию о флуктуациях оптических характеристик среды. Этот шум возникает в результате затенения заданного слоя среды находящимися перед ним трехмерными неоднородностями показателей поглощения и рассеяния. Разработана теория теневого шума и выявлены признаки, по которым его можно отличать от шумов другой природы. Выводы теории подтверждены экспериментами на модельной мутной среде с поглощающими неоднородностями. Установлено, что теневые шумы присутствуют в томограммах биотканей. Показана принципиальная возможность оценки флуктуаций показателей поглощения и обратного рассеяния, а также абсолютных значений показателя обратного рассеяния по относительным флуктуациям мощности ОКТ-сигнала.

**Авторы:** Л. С. Долин, Е. А. Сергеева, И. В. Турчин (ИПФ РАН).

**Аннотация.** До настоящего времени алгоритмы определения оптических свойств биотканей по их томограммам строились на основе теории распространения света в мутных средах с одно-

родными или регулярно-неоднородными оптическими характеристиками. Между тем, известно, что пространственные флуктуации концентрации поглощающего вещества в среде увеличивают ее прозрачность («эффект решета»), а это может приводить к ошибкам при определении средней концентрации поглотителя по ослаблению светового пучка в среде. Поэтому было важно выяснить, каким образом флуктуации оптических характеристик мутной среды отображаются в ОКТ-сигналах, и ответить на вопрос о том, не проявляются ли эти флуктуации в томограммах биотканей.

С этой целью была разработана математическая модель относительных флуктуаций мощности сигнала, образующего изображение среды со случайно неоднородными показателями поглощения и обратного рассеяния. Согласно этой модели в изображении среды с флуктуирующим показателем поглощения должен присутствовать пространственный шум, который мы назвали «теневым». Этот шум возникает в результате того, что сигнал, приходящий от заданного слоя мутной среды, ослабляется по-разному в зависимости от того, через какие поглощающие неоднородности он прошел. Отражающие неоднородности тоже могут участвовать в неоднородном затенении ниже лежащих слоев среды. Поэтому они проявляются в изображении двояко: в виде вариаций яркости изображения, воспроизводящих пространственную неоднородность показателя обратного рассеяния (изображение неоднородностей), и в виде теневого шума.

Теневой шум обладает специфическими признаками, по которым его можно отличать от аппаратных шумов и спекл-шума:

- 1) Он может наблюдаться при достаточно высоких уровнях принимаемого сигнала.
- 2) Масштабы его корреляции не определяются размерами элемента разрешения томографической системы.
- 3) Вертикальный масштаб корреляции теневого шума (масштаб в направлении зондирования среды) может существенно превышать горизонтальный масштаб.
- 4) По мере увеличения глубины, с которой приходит сигнал, дисперсия его относительных флуктуаций вначале растет, на некоторой глубине достигает максимума, а затем начинает убывать.
- 5) В томограммах среды со случайно-неоднородным показателем обратного рассеяния проявляются эффекты статистической связи между изображением неоднородностей и теневыми структурами.

Пространственно-корреляционная обработка томограмм биотканей и модельной мутной среды показала, что в них присутствует пространственный шум с указанными свойствами.

Предполагалось, что относительные флуктуации мощности томографического сигнала  $\delta P(x, z)$  статистически однородны в горизонтальной плоскости (по координате  $x$ ) и неоднородны по глубине  $z$ . Они характеризовались корреляционной функцией  $B_P(\rho, z_1, z_2) = \langle \delta P(x + \rho/2, z_1) \delta P(x - \rho/2, z_2) \rangle$ . В процессе обработки томограмм проводилось вычисление дисперсии флуктуаций сигнала  $d_P(z) = \langle \delta P^2 \rangle = B_P(0, z, z)$ , функции продольной корреляции его флуктуаций  $B_P(0, z_1, z_2)$ , коэффициента продольной корреляции флуктуаций  $R(z_1, z_2) = B_P(0, z_1, z_2) / \sqrt{d_P(z_1) d_P(z_2)}$ , а также функции пространственной корреляции относительных флуктуаций сигнала, усредненной по интервалу глубин зондирования  $0 < z < z_0$ :

$$\bar{B}_P(\rho, \zeta) = \frac{1}{z_0} \int_0^{z_0} B_P(\rho, z + \zeta/2, z - \zeta/2) dz.$$

При сопоставлении теоретической модели шумов изображения с результатами корреляционной обработки томограмм мы не имели возможности воспользоваться данными о параметрах флуктуаций оптических характеристик исследуемой среды, поскольку методов их измерения пока не существует. Поэтому наша задача заключалась в выяснении возможности подгонки теории под эксперимент путем перебора численных значений параметров среды, входящих в расчетные формулы. Приведенные на рис. 1–4 данные подтверждают возможность такой подгонки.



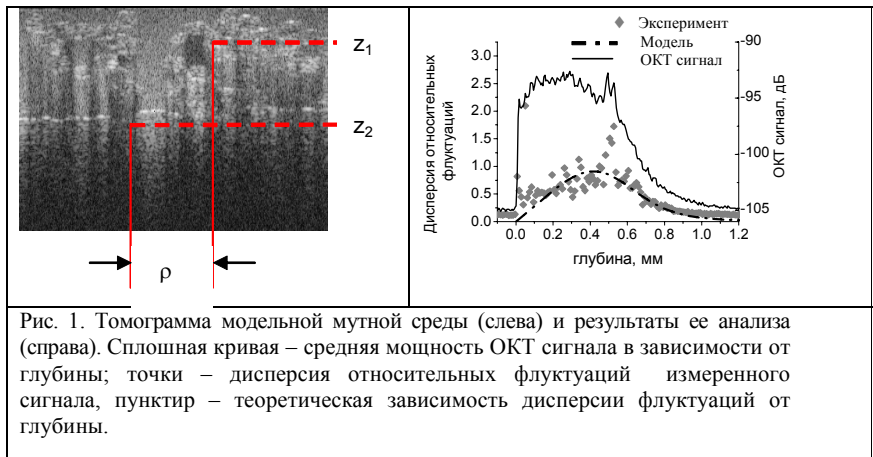


Рис. 1. Томограмма модельной мутной среды (слева) и результаты ее анализа (справа). Сплошная кривая – средняя мощность ОКТ сигнала в зависимости от глубины; точки – дисперсия относительных флуктуаций измеренного сигнала, пунктир – теоретическая зависимость дисперсии флуктуаций от глубины.

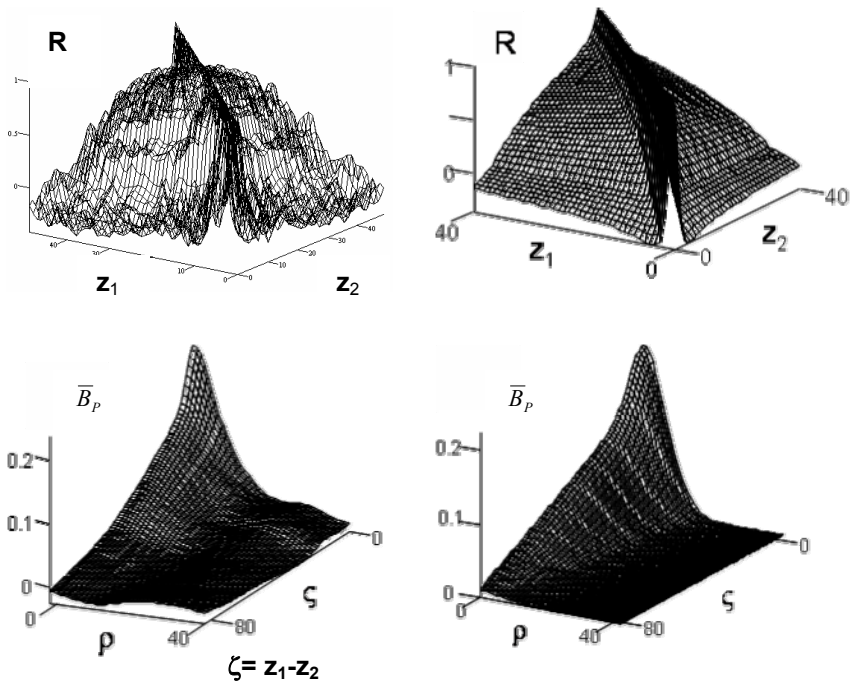
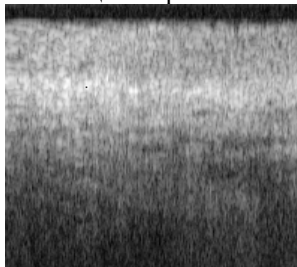
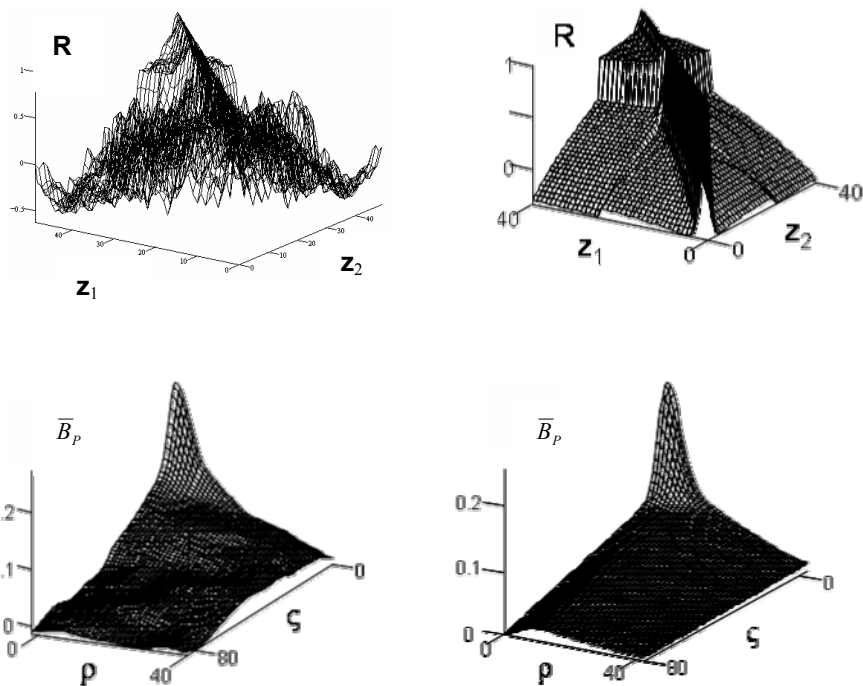
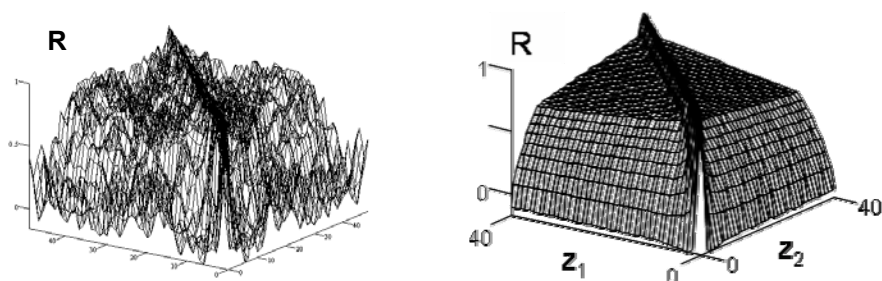
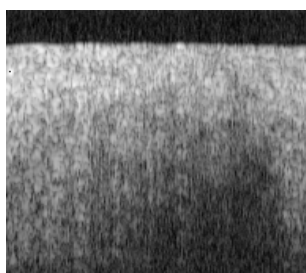


Рис. 2. Корреляционные характеристики томограммы, приведенной на рис. 1: сверху – коэффициент продольной корреляции  $R(0, z_1, z_2)$  шумов изображения, внизу – усредненная по глубине функция пространственной корреляции шумов  $\bar{B}_p(\rho, \zeta)$ ; левый столбец – результаты обработки томограммы, правый столбец – теория.





**Рис. 3.** Томограмма слизистой оболочки без патологии и ее корреляционные характеристики; слева – эксперимент, справа – теория.



**Рис. 4.** Томограмма слизистой оболочки с патологией и ее корреляционные характеристики; слева – эксперимент, справа – теория.

Обработка томограмм показала, что их корреляционные характеристики обладают характерными признаками, предсказанными теорией теневого шума. Экспериментальная зависимость  $d_p(z)$ , показанная на рис.1, качественно согласуется с теоретической. Результаты измерения коэффициента продольной корреляции шумов изображения  $R(0, z_1, z_2)$  (рис. 2–4) и функции корреляции  $\bar{B}_p(\rho, \zeta)$  (рис. 2, 3) подтверждают наличие высокой корреляции между флуктуациями сигналов, приходящих с различных глубин, и указывают на существенное различие горизонтального и вертикального масштабов их корреляции. В рельефе функции  $\bar{B}_p(\rho, \zeta)$  присутствует пик, воспроизводящий функцию пространственной корреляции флуктуаций показателя обратного рассеяния, и «гребень», описывающий теньевые шумы изображения. Рисунок 3

демонстрирует появление «ступеньки» в рельефе функции  $R$  при резком изменении дисперсии флуктуаций или среднего значения показателя обратного рассеяния на некоторой глубине.

На основании результатов экспериментальной проверки теории и качественного анализа информативных свойств корреляционных характеристик ОКТ-изображения можно сделать вывод о принципиальной возможности раздельного определения параметров среды, которыми оперирует модель шумов изображения. К числу этих параметров относятся: дисперсия флуктуаций показателя обратного рассеяния и его среднее значение, радиусы поперечной корреляции флуктуаций показателей поглощения и обратного рассеяния, радиус продольной корреляции флуктуаций показателя обратного рассеяния, произведение дисперсии флуктуаций показателя поглощения на радиус их продольной корреляции.

### Публикации

1. Л. С. Долин, Е. А. Сергеева, И. В. Турчин. Теневые шумы в оптических томограммах биотканей // Квантовая электроника. 2008. Т.38, № 6. С. 543-550.
2. Долин Л.С., Сергеева Е.А., Турчин И.В. Теневые шумы в оптических томограммах биотканей // Препринт ИПФ РАН № 721, Н. Новгород, 16 стр. (2006).
3. Долин Л.С., Турчин И.В. Корреляционные характеристики ОКТ – изображения мутной среды со случайно-неоднородными оптическими параметрами // Препринт ИПФ РАН № 750, Н. Новгород, 24 стр. (2007).

2.7. С использованием нелинейно-акустической методики впервые экспериментально продемонстрирована возможность регистрации микроструктурных перестроек - предвестников лавины в объеме гранулированного материала. С приближением состояния среды к критическому уровень нелинейной компоненты зондирующего сигнала обнаруживает сильные флуктуации, появление которых служит диагностическим признаком подготовки лавины. Статистика этих флуктуаций переходит от нормального распределения к степенному, что также характерно для систем, теряющих устойчивость. Показано, что в основе эффекта лежит селективная чувствительность нелинейных компонент сигнала к изменению состояния наиболее слабых контактов в материале.

**Авторы:** В. Ю. Зайцев (ИПФ РАН), P. Richard, R. Delannay (Institut de Physique de Rennes, Universit'e Rennes-1, France), V. Tournat, V. E. Gusev (Laboratory of Acoustics and Solid State Laboratory, Universit'e du Maine, Le Mans, France).

**Аннотация.** Лавины в гранулированных средах являются типичными пороговым явлением, при которых происходит потеря устойчивости гранулированной упаковки, когда ее уклон достигает некоторого критического значения. Обнаружение структурных перестроек-предвестников приближения лавинообразной неустойчивости помимо фундаментального интереса имеет очевидную практическую важность. В настоящее время в этом отношении известны фактически только результаты визуального наблюдения косвенных проявлений таких структурных перестроек на поверхности. Традиционно применяемые для исследования структуры гранулированных сред методы не способны регистрировать в объеме материала быстрые переходные процессы-предвестники лавины, ожидаемые из физических соображений и численных моделей.

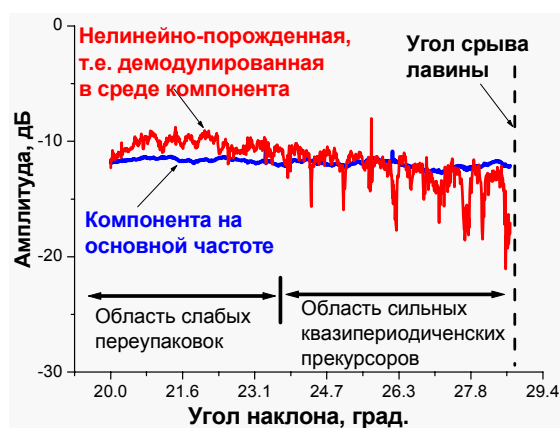
В данной работе впервые экспериментально продемонстрирована возможность регистрации такого рода прекурсоров лавины в объеме гранулированной среды на основе оригинальной нелинейно-акустической методики, основанной на использовании компонент зондирующего сигнала, порожденных на нелинейности среды. Этот подход, благодаря своей селективной чувствительности к перестройке наиболее «слабых» фракций контактов в гранулированном ма-

териале, позволил зарегистрировать как предвестники лавины, так и медленно спадающие по интенсивности после срыва лавины переупаковки во внешне статичной среде. По мере приближения лавины микроскопические переупаковки перерастают в более интенсивные квазипериодические прекурсоры непосредственно перед срывом лавины. При этом статистика флуктуаций зондирующего сигнала переходит от гауссового типа к степенному поведению, что типично для систем, теряющих устойчивость метастабильного состояния. Дальнейшее развитие этой методики в сочетании с известными методами открывает новые широкие возможности в лабораторных исследованиях гранулированных сред. Имеются основания рассчитывать, что подобный мониторинг может быть реализован и в натуральных условиях, по крайней мере, на масштабах инженерной сейсмологии.

## Публикации

1. V.Yu. Zaitsev, P. Richard, R. Delannay, V. Tournat, and V.E. Gusev, Nonlinear acoustic precursors of avalanche-type events in granular packing: laboratory demonstrations, Proc. ICA2007-International Congress on Acoustics, Madrid, 2-7 September 2007, Section PHY-03-006, 6 pages (ISBN: 84-87985-12-2).

2. V.Yu. Zaitsev, P. Richard, R. Delannay, V. Tournat and V.E. Gusev, Pre-avalanche structural rearrangements in the bulk of granular medium: Experimental evidence, Europhysics Letters, 2008 V.83, 60043(1-6).



Пример резкого контраста чувствительности фундаментальной компоненты зондирующего сигнала и компоненты, порожденной за счет нелинейности среды. На последних нескольких градусах наклона перед срывом лавины хорошо видны сильные квазипериодические вариации-прекурсоры лавины.

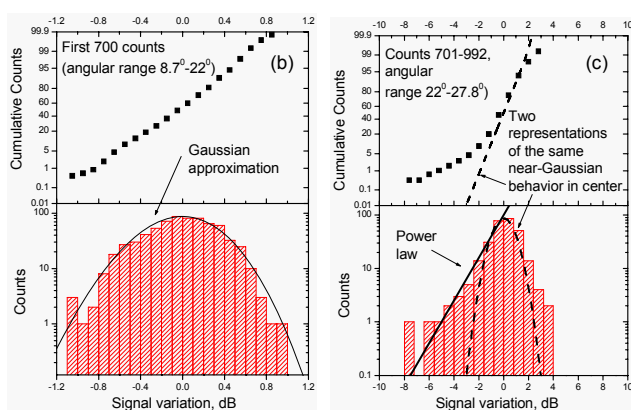


Иллюстрация смены статистических свойств флуктуаций нелинейно-порожденной компоненты зондирующего сигнала. Слева – гистограмма флуктуаций (и соответствующее кумулятивное число отсчетов) на начальном этапе, когда статистика хорошо аппроксимируется гауссовым законом. Справа – аналогичные зависимости в области прекурсоров, где статистика переходит к степенному закону.

2.9. Предложено объяснение эффекта стабилизации аэродинамического сопротивления поверхности моря при ураганных условиях, обусловленное экранированием ветрового потока во впадинах поверхностных волн. Проведены количественные расчеты коэффициента сопротивления в рамках оригинальной модели турбулентного пограничного слоя над взволнованной водной поверхностью. Показано их хорошее согласие с экспериментальными данными для широкого диапазона скоростей ветра -от умеренных до ураганных. Предложена простая параметризация коэффициента сопротивления и инкремента поверхностных волн при ураганных ветрах, удобная для использования в моделях прогноза ветра и волн.

**Авторы:** Ю. И. Троицкая, Г. В. Рыбушкина (ИПФ РАН), И. А. Репина (ИФА РАН).

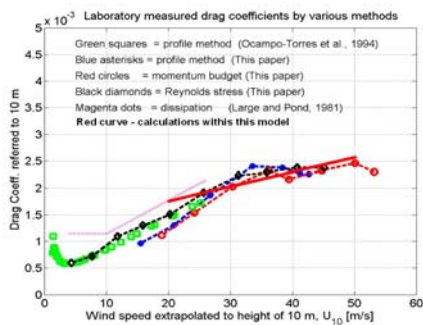
**Аннотация.** Коэффициент аэродинамического сопротивления поверхности моря является критически важным параметром в теории тропических ураганов. Характеристики тропического циклона главным образом определяются балансом энергии, поступающей в атмосферу из океана и работой касательных напряжений трения ветра; при этом скорость ветра определяется отношением числа Стентона к коэффициенту сопротивления морской поверхности. Традиционные балк-формулы, выведенные на основании обобщения экспериментальных данных, полученных при скоростях ветра менее 30 м/с, дают завышенные значения коэффициента сопротивления морской поверхности при ураганных ветрах. При этом диссипация энергии за счет трения оказывается слишком высокой, чтобы объяснить наблюдаемую скорость ураганного ветра при реалистичных источниках энергии. Проблема объяснения высоких значений скорости ветра при ураганах может быть разрешена, если коэффициент сопротивления морской поверхности не нарастает при увеличении скорости ветра. Эта идея получила подтверждение в ряде экспериментов, в которых производилось измерение скорости ветра внутри тропических циклонов с помощью падающих GPS-зондов, показавших, что коэффициент сопротивления морской поверхности не нарастает и даже может падать, если скорость ветра превышает 30–35 м/с. Аналогичный эффект наблюдался в лабораторных экспериментах Донелана с соавторами, где было обнаружено, что при скоростях ветра, превышающих 25–30 м/с, коэффициент сопротивления поверхности воды стремится к постоянному значению, приблизительно равному 0.0023. В последнее время измерения параметров атмосферы в ураганах стали производить с самолетов, которые совершают полеты над морем на малой высоте. При этом измеренные величины  $C_D$  имеют значительный разброс, при этом средние значения оказываются ниже тех, которые следуют из экстраполяции экспериментальных данных, полученных при «обычных ветрах». Во время рейса в рамках проекта «NABOS» на борту НИС «Виктор Буйницкий» в октябре 2007 г. были получены уникальные результаты измерений скорости ветра, потоков импульса, тепла и влаги в зоне полярного урагана в море Лаптевых и Карском море, скорость ветра при этом достигала 28 м/с. Полученные значения коэффициента сопротивления также были существенно ниже традиционных значений.

Существующие в настоящее время немногочисленные полуэмпирические модели взаимодействия ураганного ветра с морской поверхностью предполагают, что главной причиной снижения коэффициента сопротивления является подавление турбулентных флуктуаций в приводном слое атмосферы за счет присутствия брызг, при этом количественные оценки этого эффекта отличаются у разных авторов.

В настоящей работе показано, что низкие значения коэффициента сопротивления поверхности моря получаются и без учета брызг за счет влияния на ветер волновых возмущений, индуцируемых в воздухе волнами на поверхности воды. Генерация волн ветром вызывает передачу импульса от ветра к волнам, в результате турбулентное напряжение вблизи поверхности сильно снижается. Это приводит к уменьшению коэффициента турбулентного обмена (вихревой вязкости) вблизи поверхности и деформации профиля скорости ветра, сопровождающейся его обострением вблизи поверхности, что эквивалентно снижению коэффициента сопротивления.

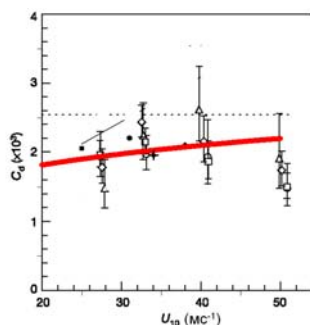
Для количественного расчета этого эффекта была использована квазилинейная модель ветрового пограничного слоя над взволнованной водной поверхностью. При реалистичных моделях спектра ветровых волн получено хорошее количественное согласие этих расчетов с данными как натуральных, так и лабораторных экспериментов (рис. 1). На основе расчетов предложены параметризации коэффициента сопротивления и инкремента поверхностных волн, пригодные для использования в численных моделях оперативного прогноза ветра и волнения.

Лабораторный эксперимент, университет Майами  
Donelan et al, GRL, 2004



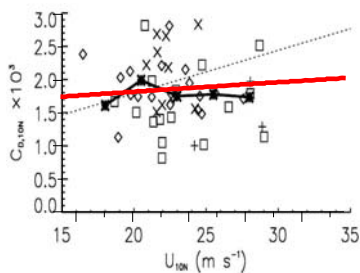
а

Натурные измерения с помощью подвешенных GPS-зондов  
M. D. Powell, P. J. Vickery & T. A. Reinhold, Nature, 2003



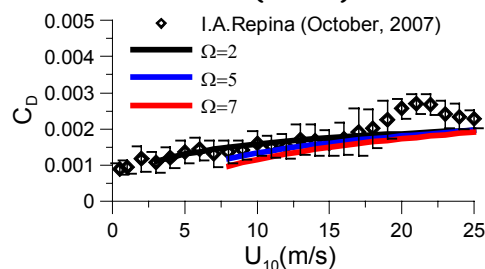
б

Натурные измерения с самолета  
French, J. R., W. M. Drennon, J. A. Zhang, and P. G. Black. J. Atmos. Sci., 2007, v.64, p.1089-1102.



в

Натурные измерения с с борта НИС «Виктор Буйницкий», октябрь 2007 г. Данные предоставлены И.А.Репиной (ИВА РАН).



г

Рис. 1. Коэффициент сопротивления поверхности океана при ураганном ветре: расчеты в рамках модели и экспериментальные данные

## Публикации

1. Ю.И. Троицкая, Г.В. Рыбушкина Квазилинейная модель взаимодействия поверхностных волн с сильными и ураганными ветрами Известия РАН ФАО. Т. 44. №5, с. 670-694, 2008.
2. Yu.I. Troutskaaya, G.V. Rybushkina, Øyvind Sætra A quasi-linear model of the sea surface drag and wave growth rate at hurricane wind speeds –NWP-2008.
3. Ю.И. Троицкая особенности взаимодействия волн с ураганым ветром Материалы Всероссийской школы "Нелинейные волны", 2008.
4. I. Repina and A. Smirnov Non-linear effects in sea surface drag coefficient in different conditions–NWP-2008.

2.10. Разработана физическая модель низкочастотной акустической маломодовой импульсной томографии, включающая в себя модели возбуждения, распространения, дифракции и приема маломодовых импульсов, формирования реверберационных помех и шумов, а также методики оценки параметров наблюдаемых неоднородностей для конкретных районов мелкого моря. Разработанная модель, в виде программно-алгоритмического комплекса с интерфейсом для управления и представления данных, использована для прогноза характеристик конкретных систем наблюдения, а также для проектирования системы, обеспечивающей требуемую эффективность в заданных морских районах. Эффективность модели подтверждена натурными экспериментами в Балтийском и Баренцевом морях.

**Авторы:** Лучинин А. Г., Хилько А. И., Бурдуковская В. Г., Смирнов И. П., Раевский М. А., Стромков А. А., Зверев В. А., Кержаков Б. В., Кулинич В. В. (ИПФ РАН).

**Аннотация.** Физическая модель нового перспективного метода акустического наблюдения в океане – низкочастотной акустической маломодовой импульсной томографии (МИТ) океана реализует идею мультистатистического гидроакустического лоцирования с помощью согласованных с океаническим волноводом низкочастотных маломодовых импульсов, когда осуществляется возбуждение хорошо распространяющихся мод волновода, и приеме всех мод, дифрагированных наблюдаемыми неоднородностями.

Модель наблюдения МИТ (рис. 1) является совокупностью парциальных физических моделей возбуждения (блоки  $M1$ ,  $I_{ik}$ ,  $\Pi_{jl}$  на рис. 1), распространения, дифракции на телах, рассеяния на случайных неоднородностях (блоки  $M1$ ,  $M2$ ,  $M3$ ) и согласованного приема маломодовых импульсов (блок  $C_{ijkl}$ ) в конкретных районах мелкого моря (блок УП), модели формирования низкочастотных шумов океана, а также алгоритмов построения изображений наблюдаемых неоднородностей (блоки АМ, ТП, РУ и  $\Sigma$ ). Для описания районов наблюдения используются геоинформационные модели конкретных районов наблюдения (блок УП) учитывающих строение морской среды, подводные течения, а также скорость и направление ветра.

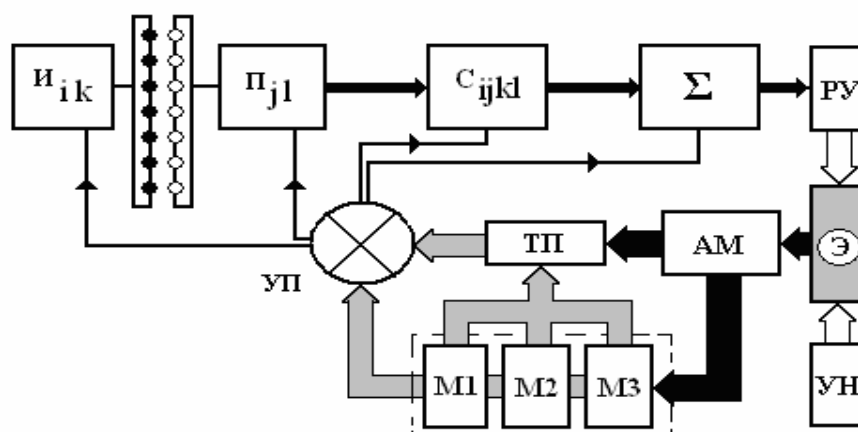


Рис. 1. Структура модели акустического наблюдения МИТ океана

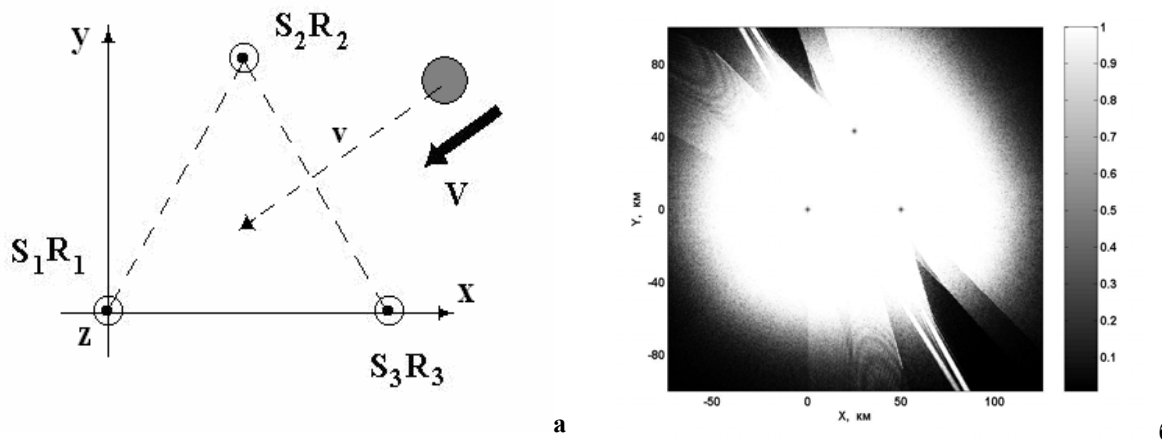


Рис. 2. Пример прогноза эффективности наблюдения методом МИТ для района Мурманской возвышенности в Баренцевом море. Система наблюдения (а) состояла из трех приемно-излучающих трансиверов ( $S_iR_j$ ). Пространственное распределение вероятности наблюдения айсберга при учете девяти пространственных и десяти модовых томографических проекций (б) построено для случая, когда мощности источника составляла 200 Вт, частота 200 Гц, зондирующие импульсы имели длительность 10 с и полосу 10 Гц, скорость ветра составляла 5 м/с, скорость перемещения айсберга вдоль показанных на схеме (а) траекторий равнялась 1.5 м/с, район наблюдения имел с глубину 300 м, наблюдения рассматривалось в случае типичной для Баренцева моря летней гидрологии.

В модели наблюдения для описания возбуждения и приема маломодовых импульсов в океанических волноводах с помощью вертикально ориентированных решеток в присутствии

подводных шумов используются оптимальные согласованные с волноводом апертурные распределения, позволяющие достигать существенного ослабления уровня интерференционных помех, а также увеличения пространственного разрешения и чувствительности системы наблюдения.

Явление дифракции когерентных и частично-когерентных маломодовых импульсов в океанических волноводах рассмотрено как для случая дифракции как на абсолютно жестких анизотропных телах больших волновых размеров, так и для упругих тел малых волновых размеров.

При учете формирования реверберационных помех учитывается рассеяния маломодовых импульсов в океанических волноводах в приближении как однократного, так и многократного рассеяния на ветровом волнении, а также донных неоднородностях. При этом учитывалась модуляция резонансных компонент ветрового волнения низкочастотными составляющими спектра ветрового волнения.

При описании влияния аддитивных океанических шумов учитывалось ослабление возникающего за счет ветрового волнения поверхностного шума за счет многократного рассеяния.

В алгоритме наблюдения, который заключается в оценке параметров наблюдаемой неоднородности с заданной достоверностью, использованы методы проверки гипотез с решающими статистиками, основанными на использовании согласованных фильтров. При получении результирующего томографического изображения использовались алгоритмы логического накопления парциальных вероятностей отдельных томографических проекций.

С помощью разработанной модели наблюдения МИТ в мелком море осуществлены исследования эффективности наблюдения для районов Баренцева Черного и Балтийского морей в зависимости от вариаций гидрологических характеристик, скорости и направления ветра, интенсивности судоходства, скорости подводных течений, параметров и числа излучающих и приемных решеток, характеристик излучаемых импульсов и других параметров задачи. Получены прогнозные оценки эффективности наблюдения системы МИТ заданной конструкции для конкретных районов мелкого моря.

## Публикации

1. М.А. Раевский, А.Г. Лучинин, В.Г. Бурдуковская, А.И. Хилько. О роли объемного рассеяния при формировании поверхностной реверберации в океане. Изв. Вуз Радиофизика. Т. 46, № 12. 2003. С. 210-221.
2. Раевский М.А., Хилько А.И. Эффективность согласованной пространственной фильтрации мод в мелководном звуковом канале. Изв. Вуз Радиофизика. Т. 47, № 7. 2004. С. 534-548.
3. Лучинин А.Г., Хилько А.И. Низкочастотная акустическая томография мелкого моря с использованием маломодовых импульсов // Акуст. журнал. Т. 51, № 2. 2005. С. 124-145.
4. Раевский М.А., Хилько А.И. О теоретической модели низкочастотных динамических шумов в мелком мор // Изв. Вуз Радиофизика. Т. XLIX, № 3. 2006. С. 199-205.
5. Кержаков Б.В., Кулинич В.В., Кошкин А.Г., Хилько А.И. Особенности возбуждения маломодового низкочастотного акустического поля вертикальной антенной решеткой в мелком море // Изв. Вуз. Радиофизика. Т. XLIX, № 4. 2006. С. 224-232.
6. Кержаков Б.В., Кулинич В.В., Кошкин А.Г., Хилько А.И. Возбуждение маломодовых акустических сигналов вертикальной решеткой в мелком море в присутствии подводных течений // Изв. Вуз. Радиофизика. 2006. № 11. С. 925–942.
7. Зверев В.А., Стромков А.А., Хилько А.И. Выделение мод в мелком море с помощью вертикальной антенной решетки // Акуст. журнал. 2006. Т. 52, №. 6. С. 784-790.
8. А.Г. Лучинин, А.И. Хилько, В.Г. Бурдуковская, И.П. Смирнов. Маломодовая томография неоднородностей мелкого моря // Акуст. журнал. 2007. Т. 53, № 3. С. 437–450.
9. Раевский М.А., Хилько А.И. Влияние случайного сноса резонансных гармоник на частотный спектр поверхностной акустической реверберации в океане // Изв. Вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50. № 2. С. 20-30.



10. Зверев В.А., Стромков А.А., Хилько А.И. Особенности сложения мод акустического сигнала в условиях мелкого моря // Акуст. журнал. 2007. Т. 53, № 4. С. 597-600.
11. Кержаков Б.В., Кулинич В.В., Кошкин А.Г., Хилько А.И. Пространственная фокусировка маломодовых акустических сигналов в мелком море в присутствии подводных течений // Изв. Вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 6. С. 495-511
12. Смирнов И.П., Хилько А.И., Романова Т.В. Оптимальное выделение модовых сигналов на фоне помех вертикальными решетками в плоскостойких волноводах // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 1. С. 50-62.
13. Смирнов И. П., Бурдуковская В. Г., Кошкин А. Г., Хилько А. И. Нелинейные колебания кольцевых мембран низкочастотного акустического излучателя // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 3. С. 199-215.
14. Смирнов И. П., Бурдуковская В. Г., Кошкин А. Г., Хилько А. И. Исследование вынужденных колебаний системы взаимодействующих акустических излучателей // Изв. Вузов. Радиофизика. 2008 (принята к печати).
15. Стромков А.А., Лучинин А.Г., Хилько А.И. Исследование донной реверберации при возбуждении маломодовых акустических импульсов вертикальной решеткой низкочастотных излучателей в мелком море // Акуст. журнал. 2008. Т. 54, № 4. С. 589-598.
16. Раевский М.А., Хилько А.И. Обобщение теории низкочастотной поверхностной реверберации для коротких импульсных акустических сигналов в океане // Изв. Вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 4. С. 295-303.
17. Раевский М.А., Хилько А.И. Теоретическая модель поверхностной реверберации, учитывающая интерференцию акустических мод // Изв. Вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 5. С. 391-413.

### **3. Отделение нелинейной динамики и оптики**

3.1. Предложена и экспериментально реализована эффективная схема генерации терагерцового излучения фемтосекундными лазерными импульсами в сэндвич-структуре с тонкой

нелинейной сердцевиной ( $\text{LiNbO}_3$ ) и обкладками из материала с малым поглощением на терагерцовых частотах (Si). Механизм генерации – черенковское излучение терагерцовых волн в обкладках движущейся в сердцевине нелинейной поляризации, наводимой при оптическом выпрямлении лазерных импульсов. В эксперименте достигнута рекордная эффективность оптико-терагерцовой конверсии  $\sim 0,12\%$ . Разработана теория эффекта, предсказывающая возможность дальнейшего повышения эффективности в несколько раз.

**Авторы:** Бодров С. Б., Степанов А. Н., Шишкин Б. В., Иляков И. Е., Ахмеджанов Р. А., Бакунов М. И.

**Аннотация.** Предложена и экспериментально реализована новая эффективная схема генерации широкополосного терагерцового излучения на основе механизма оптического выпрямления фемтосекундных лазерных импульсов. В данной схеме импульсы титан-сапфирового лазера фокусируются цилиндрической линзой в тонкую пластину нелинейного материала ( $\text{LiNbO}_3$ ) зажатую между кремниевыми призмами, обладающими слабым поглощением на терагерцовых частотах. Распространяющийся в такой волноведущей сэндвич-структуре лазерный импульс создает в  $\text{LiNbO}_3$  за счет оптического выпрямления нелинейную поляризацию, которая, в свою очередь, излучает в кремниевые призмы черенковский конус (точнее, клин) терагерцовых волн в виде короткого импульса. Вывод терагерцового излучения в вакуум происходит через скошенные грани призм. Данная схема генерации позволяет минимизировать поглощение терагерцового излучения в нелинейном материале, в то же время пластина  $\text{LiNbO}_3$  выполняет роль волновода для лазерного импульса. Оба эти фактора позволяют формировать черенковский клин терагерцовых волн, ограниченный только геометрическими размерами сэндвич-структуры. Дополнительным преимуществом схемы является использование цилиндрической фокусировки, которая позволяет варьировать генерируемую терагерцовую энергию путем изменения ширины лазерного пучка. В проведенном эксперименте достигнута рекордная эффективность оптико-терагерцовой конверсии  $\sim 0,12\%$ . Важно отметить, что энергия накачки, необходимая для достижения указанной эффективности, лежит в диапазоне 10-100 мкДж в зависимости от длительности лазерного импульса. Это на 1–2 порядка меньше, чем энергия накачки в схеме с наклонным фронтом интенсивности [K.L. Yeh, et. al, Opt. Communication, v.281, p.3567 (2008)], которая демонстрирует близкую эффективность конверсии. Нами разработана теория генерации терагерцового излучения в сэндвич-структуре, предсказывающая возможность дальнейшего повышения эффективности в несколько раз.

### Публикации

1. S. B. Bodrov, M. I. Bakunov, and M. Hangyo, «Efficient Cherenkov emission of broadband terahertz radiation from an ultrashort laser pulse in a sandwich structure with nonlinear core», J. Appl. Phys., 2008 (в печати).
2. S.B. Bodrov, A.N. Stepanov, B.V. Shishkin, I.E. Ilyakov, R.A. Akhmedzhanov, M.I. Bakunov, «Efficient Optical-to-Terahertz Conversion of Femtosecond Laser Pulses Propagating Along a Sandwich Structure with Thin  $\text{LiNbO}_3$  Core» // Conference guide of 33rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves California Institute of Technology, W5D43, 1581, Pasadena, California, USA, September 15 - 19, 2008.
3. S.B. Bodrov, A.N. Stepanov, B.V. Shishkin, I.E. Ilyakov, R.A. Akhmedzhanov «Efficient terahertz generation via Cherenkov radiation from a femtosecond laser pulse propagating in a Si- $\text{LiNbO}_3$ -glass structure»// Technical program of International Conference “Laser Optics 2008”, WeR1-24, St. Petersburg, Russia, June 23-28, 2008.
4. С.Б. Бодров, М.И. Бакунов «Современные схемы эффективной генерации терагерцового излучения фемтосекундными лазерными импульсами в электрооптических средах» // Тези-

сы докладов конференции «Фундаментальные и прикладные задачи нелинейной физики», С. 13-14, Н. Новгород, 1-7 марта, 2008.

3.2. Предложена и реализована новая схема создания оптических импульсов предельно короткой длительности с плавно перестраиваемой центральной длиной волны на основе полностью волоконной эрбиевой системы. Экспериментально продемонстрирована генерация импульсов длительностью 24 фемтосекунды с центральной длиной волны перестраиваемой в диапазоне 1.8–1.9 мкм, включающих в себя лишь четыре периода оптических колебаний.

*Авторы:* Андрианов А. В., Ким А. В., Муравьев С. В. (ИПФ РАН).

*Аннотация.* Предложен новый метод создания оптических импульсов предельно короткой длительности с плавно перестраиваемой длиной волны на основе полностью волоконной эрбиевой системы. Метод включает три этапа последовательного преобразования оптического сигнала: адиабатическую перестройку частоты солитонного импульса вблизи точки нулевой дисперсии в световоде с уменьшающейся по длине аномальной дисперсией, уширение спектра при генерации суперконтинуума в сильнонелинейном волокне с нормальной дисперсией и последующую компрессию импульса в соответствующем линейном световоде. Отличительной особенностью предложенной схемы является использование световода с уменьшающейся по длине аномальной дисперсией на первом этапе, что позволяет подготовить высококачественный импульс накачки для генерации суперконтинуума и осуществить перестройку его центральной длины волны.

Оптическая система состоит из задающего генератора на легированном ионами эрбия оптическом волокне, работающего в режиме пассивной синхронизации мод, двухкаскадного волоконного эрбиевого усилителя с накачкой лазерными диодами, световода с уменьшающейся по длине аномальной дисперсией, высоконелинейного волокна с нормальной дисперсией и волоконного дисперсионного компрессора. Экспериментально продемонстрирована генерация суперконтинуума, в диапазоне длин волн 1.7–2.0 мкм. Минимальная длительность выходного импульса составила 24 фс при перестройке центральной длины волны в диапазоне 1.8–1.9 мкм, что соответствует спектрально-ограниченному ультракороткому импульсу, содержащему всего четыре периода оптических колебаний. Полученные экспериментальные результаты качественно согласуются с проведенным численным моделированием нелинейной динамики оптических импульсов в указанной схеме.

### Публикации

1. A.V. Andrianov, A.V. Kim, S.V. Muraviev, A.A. Sysoliatin, Widely Tunable Ultrashort Pulses from a Totally Fiber Integrated Optical Source Using DDF, XIII-th Conf. on Laser Optics, St. Petersburg, June 22–28, 2008, P. 71.
2. A. V. Andrianov, A. V. Kim, S. V. Muraviov, A. A. Sysoliatin, Widely wavelength-tunable few-cycle laser pulses of 24 fs duration directly from an all-fiber erbium-doped system, Opt. Lett. (submitted).

3.3. Проведено первое систематическое исследование столкновительных параметров вращательного спектра молекулы сероокси углерода (OCS) в основном и возбужденном  $\nu_2$  колебательном состоянии в мм/субмм диапазоне длин волн. Полученные данные в совокупности с ранее известной информацией о центральных частотах и интенсивностях линий позволяют использовать ячейку, заполненную газообразным OCS при определенном давлении, в качестве эталона абсолютного поглощения во всем диапазоне мм/субмм волн, причем амплитудно-частотная характеристика такого эталона будет известна с точностью до единиц процентов.

**Авторы:** Кошелев М.А., Третьяков М.Ю. (ИПФ РАН).

**Аннотация.** Молекула сероокиси углерода (OCS) является «удобной» эталонной молекулой: интенсивные, часто и регулярно распределенные по всему миллиметровому и субмиллиметровому диапазону длин волн линии вращательного спектра OCS могут служить эталоном для калибровки различной спектроскопической аппаратуры. Кроме того, OCS является основной и наиболее стабильной (долгоживущей) серосодержащей микропримесью атмосферы Земли, а также межзвездной молекулой. Понимание физических и химических процессов, происходящих в атмосфере Земли и межзвездном пространстве возможно благодаря использованию различной аппаратуры дистанционного зондирования наземного, бортового и спутникового базирования. Для анализа данных зондирования требуется прецизионная информация о параметрах спектральных линий, в частности, центральная частота, интенсивность, параметры уширения и сдвига центра линий давлением основных атмосферных газов ( $N_2$ ,  $O_2$ ), которые могут быть получены только в лаборатории. Наименее изученными характеристиками линий в настоящее время являются их столкновительные параметры (уширение и сдвиг давлением).

Нами впервые проведено систематическое исследование столкновительных параметров линий вращательного спектра OCS давлением азота и кислорода при комнатной температуре в широчайшем интервале частот от 24 до 850 ГГц, соответствующем изменению вращательного квантового числа  $J$  от 1 до 69. Использовался спектрометр с радиоакустическим детектированием сигнала поглощения (РАД). Разработанные и успешно примененные в ходе исследования новые методики получения и обработки данных позволили уменьшить влияние возможных систематических ошибок. Кроме того, анализ систематических ошибок эксперимента и контрольные измерения линий возбужденного колебательного состояния  $\nu_2$  и вращательных переходов молекулы CO (параметры которых хорошо известны) позволили оценить реальную точность и достоверность полученных данных. Неопределенность определения параметров уширения линий составляет менее 1% от величины параметра. В результате работы были также исследованы параметры сдвига частоты линий OCS давлением. В пределах экспериментальной неопределенности, составляющей  $\pm 15$  кГц/Торр ни самосдвиг, ни сдвиг сторонними газами не наблюдался для всех линий вращательного спектра.

Полученные в результате работы зависимости параметров уширения от  $J$  в совокупности с известной формой линий поглощения и полученной из предшествующих исследований информацией о центральных частотах и интенсивностях линий (в том числе всех наиболее распространенных изотопологов и низколежащих колебательных состояний) позволяют с высокой точностью рассчитать зависимость коэффициента поглощения OCS от частоты. При атмосферном давлении линии спектра OCS сильно перекрываются между собой, что позволяет использовать его как эталон абсолютного поглощения мм/субмм волн. Величину поглощения можно варьировать, добавляя азот (не обладающий заметным поглощением в этом частотном диапазоне) в качестве буферного газа. Следует отметить, что в настоящее время никакой другой газ не может быть использован аналогичным образом из-за недостаточной плотности линий, либо из-за недостатка спектроскопической информации о его линиях. Использование в качестве эталона поглощения диэлектрических материалов требует проведения высокоточной калибровки во всем диапазоне, что в настоящее время представляется невозможным. Работа впервые открыла возможность создания эталона поглощения мм/субмм волн.

### Публикации

1. M.A. Koshelev, M.Yu. Tretyakov, Collisional broadening and shifting of OCS rotational spectrum lines, *J. Quant. Spectrosc. Radiative Transfer*, 2008, accepted for publication.
2. М.Ю. Третьяков, М.А. Кошелев, Д.С. Макаров, М.В. Тонков. Прецизионные измерения столкновительных параметров спектральных линий с помощью спектрометра с радио-

акустическим детектированием поглощения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах. Приборы и техника эксперимента, 2008, No. 1, с. 87–98.

3. М.А. Кошелев, А.Е. Кузнецов, М.Ю. Третьяков, Столкновительные параметры спектральных линий OCS для задач мониторинга атмосферы в мм/субмм диапазоне длин волн, Труды 22-й всероссийской конференции Распространение радиоволн, г. Лоо, 2008, т. III, с. 108-111.
4. А.Е.Кузнецов, М.А.Кошелев, М.Ю.Третьяков. Исследование столкновительных параметров спектральных линий OCS, Труды 12 Научной конференции по радиофизике, Нижний Новгород, ННГУ, 2008 г. В печати.
5. А.Е.Кузнецов, М.А.Кошелев, М.Ю.Третьяков. Исследование эффективного сечения межмолекулярного взаимодействия серооксида углерода в нескольких вращательных состояниях. Труды 11 Научной конференции по радиофизике, Нижний Новгород, ННГУ, 2007 г., с. 105-106.

3.5. Предложен интерференционно-растровый метод измерения характеристик поверхностей с разрешениями, не ограниченными дифракционным пределом. Метод обеспечивает на несколько порядков более быстрый съем данных по сравнению с традиционной ближнепольной сканирующей оптической микроскопией. Метод основан на преобразовании ближнего светового поля, в котором содержится информация о субволновой структуре поверхности, в распространяющиеся волны при помощи маски с субволновой структурой с широким спектром пространственных частот. Предложенный метод опробован в численных экспериментах.

**Авторы:** И. Е. Кожеватов, Д. Е. Силин (ИПФ РАН).

**Аннотация.** Еще недавно считалось, что существование дифракционного предела раз и навсегда ограничивает возможности оптической микроскопии и минимальный размер различимого объекта сравним с длиной волны используемого света. В то же время, получение субволнового разрешения в оптическом диапазоне очень востребовано, поскольку использование более коротковолнового излучения (рентгеновский, гамма-диапазон, электронная микроскопия) не всегда удобно, а в некоторых задачах просто невозможно. Например, в биологических исследованиях оптические методы позволяют изучать биологические объекты без их повреждения и в естественном окружении.

В последнее время появились приборы, способные преодолеть дифракционный предел и получившие название ближнепольных сканирующих оптических микроскопов. Работа этих устройств основана на регистрации при помощи оптического зонда ближнего светового поля, локализованного на расстояниях от поверхности, меньших длины волны  $\lambda$ . В ближнем поле содержится информация о субволновой структуре поверхности. Эту информацию несут так называемые нераспространяющиеся моды, которые экспоненциально затухают в направлении, перпендикулярном поверхности. Пространственные периоды этих мод примерно соответствуют характерным поперечным размерам мелких деталей исследуемого образца и могут быть значительно меньше  $\lambda$ . Но указанные приборы имеют серьезный недостаток: сканирование исследуемой поверхности происходит поточечно и поэтому очень медленно.

Авторами был предложен интерференционно-растровый метод измерения характеристик поверхностей с разрешениями, не ограниченными дифракционным пределом. Этот метод позволяет получать информацию о структуре образца одновременно по всей его поверхности, что обеспечивает на несколько порядков более быстрый съем данных по сравнению с ближнепольной сканирующей оптической микроскопией. Идея метода основана на переносе пространственного спектра ближнего поля в область более низких пространственных частот при помощи маски с субволновой структурой, расположенной в непосредственной близости от исследуемой

поверхности. При взаимодействии с маской, структура которой имеет широкий спектр пространственных частот, нераспространяющиеся моды частично превращаются в распространяющиеся. Распределения амплитуды и фазы формируемого маской волнового поля измеряются вдали от образца средствами обычной интерферометрии. Эти распределения используются в качестве исходной информации для обратной задачи, решение которой позволяет восстановить субволновую структуру исследуемой поверхности. Предложенный метод был опробован в численных экспериментах.

### Публикации

1. И. Е. Кожеватов, Д.Е. Силин, Оптические интерференционные методы преодоления дифракционного предела // Известия ВУЗов. Радиофизика (направлена в печать).

3.6. Разработан метод контрастирования структурных элементов покровных тканей при оптической когерентной томографической визуализации, основанный использовании вводимых в биоткань наноразмерных частиц. Проведено сравнение эффективности применения различных наночастиц в качестве контрастирующих агентов на коже животных *in vivo*. Максимальный контраст (10 дБ, на глубине 500–700 мкм) был достигнут при использовании золотых наноболочек, обладающих плазмонным резонансом на частоте локации.

**Авторы:** В. А. Каменский, И. В. Турчин, М. Ю. Кириллин, А. Г. Орлова, П. Д. Агрба (ИПФ РАН), Е. В. Загайнова, М. В. Ширманова (НГМА).

**Аннотация.** Последние годы характеризуются значительным прогрессом в области разработки новых оптических методов и технологий для применения в биомедицинской диагностике. Одним из таких методов является метод оптической когерентной томографии (ОКТ), получивший широкое распространение и применяющийся в клиниках для диагностики патологий биологических тканей. Одним из основных направлений совершенствования метода является повышение пространственного разрешения и глубины визуализации с помощью управления оптическими свойствами объекта (просветление, диффузия наночастиц и др.).

Одной из методик управления оптическими свойствами является диффузия раствора наночастиц внутрь исследуемого образца биоткани. Обладая фазовой функцией рассеяния, существенно отличающейся от характерной фазовой функции биоткани, наночастицы, диффундируя в определенные области, изменяют их оптические свойства. Таким образом, наличие наночастиц в одних областях исследуемого объекта и их отсутствие в других вызывает существенное различие в оптических свойствах этих областей, что приводит к их контрастированию на ОКТ-изображениях.

При апробации настоящего метода использовались частицы диоксида титана (средним радиусом 100 нм) и золотые наноболочки с силикатным ядром (радиус ядра 75 нм, толщина оболочки 25 нм). Пилотные исследования проводились на одно- и многослойных агаровых гелях и коже кролика *in vivo* с применением раствора золотых наноболочек [1–3]. Результаты экспериментов продемонстрировали контрастирование структурных элементов кожи на получаемых изображениях. Параллельно с экспериментальными исследованиями, методом Монте-Карло было проведено численное моделирование ОКТ-изображений кожи до и после применения раствора наночастиц, считавшихся изотропными рассеивателями, результаты которого качественно повторили экспериментальные данные [1].

Результаты экспериментов, проведенных на коже свиньи, более близкой по структуре к коже человека, с применением обоих типов наночастиц [4, 5] вновь продемонстрировали их контрастирующие свойства. После применения наночастиц на ОКТ-изображениях повысился контраст границы эпидермиса и дермы, а также проток, желез и волосяных фолликул. Результаты численного моделирования с применением теории Ми также продемонстрировали контра-

стирующие свойств наночастиц. Получение ОКТ-изображений в различные моменты времени, начиная с момента применения наночастиц, позволило также наблюдать динамику проникновения вещества и образование агрегатов наночастиц [5].

### Публикации

1. Е.В. Загайнова, М.В. Ширманова, В.А. Каменский, М.Ю. Кириллин, А.Г. Орлова, И.В. Балалаева, Б.Н. Хлебцов, А.М. Сергеев, "Исследование контрастирующих свойств золотых наночастиц для метода ОКТ", Российские Нанотехнологии, 2 (7-8), 135-143 (2007).
2. E.V. Zagaynova; M.V. Shirmanova; A.G. Orlova; I.V. Balalaeva; M.Y. Kirillin; V.A. Kamensky, "In vivo study of contrasting properties of gold nanoparticles for optical coherence tomography" in Biophotonics 2007: Optics in Life Science, J. Popp; G. von Bally - Eds, Proc. SPIE, 6633, 663316 (2007).
3. E.V. Zagaynova, M.V. Shirmanova, M.Yu. Kirillin, B.N. Khlebtsov, A.G. Orlova, I.V. Balalaeva, M.A. Sirotkina, M.L Bugrova, P.D. Agrba and V.A. Kamensky, "Contrasting properties of gold nanoparticles for optical coherence tomography: phantom, in vivo studies and Monte Carlo simulation", Phys. Med. Biol., 53, 4995-5009 (2008).
4. E.V. Zagaynova, M.V. Shirmanova, A.G. Orlova, I.V. Balalaeva, M.Yu. Kirillin, V.A. Kamensky, M.L. Bugrova, M.A. Sirotkina, "Gold nanoshells for OCT imaging contrast: from model to in vivo study", in Nanoscale Imaging, Sensing, and Actuation for Biomedical Applications V, A.N. Cartwright, D.V. Nicolau - Eds, Proc. SPIE. 6865, 68650K (2008).
5. M.Yu. Kirillin, M.V. Shirmanova, M.A. Sirotkina, M.L. Bugrova, B.N. Khlebtsov and E.V. Zagaynova, "Contrasting properties of gold nanoshells and titanium dioxide nanoparticles for OCT imaging of skin: Monte Carlo simulations and in vivo study"/ принято к печати в J.Biomed. Opt.

3.7. В экспериментах по изучению воздействия излучения ХеСl лазера на основные белки хрусталика глаза было установлено, что в присутствии некоторых пептидов происходит избирательное замедление агрегации этих белков. Такие исследования позволили создать и запатентовать комбинацию ди – и тетра - пептидов, которая наиболее эффективно защищает основные белки хрусталика от воздействия УФ излучения. Комбинация была апробирована на экспериментальных животных и показала замедление в несколько раз развития у них УФ-индуцированной катаракты.

**Авторы:** Соустов Л. В., Челноков Е. В., Битюрин Н. М. (ИПФ РАН), Немов В. В. (НИИ эпидемиологии и микробиологии им. И.Н. Блохиной), Аветисов С. Э., Полунин Г. С., Шеремет Н. Л., Карпова О. Е (НИИ глазных болезней РАМН), Муранов К. О., Островский М. А. (Институт биохимической физики им. Н.М. Эммануэля РАН).

**Аннотация.** Под воздействием УФ излучения основные белки хрусталика глаза, альфа-, бета- и гамма-кристаллины, агрегируют, что приводит к помутнению хрусталика, то есть к развитию катаракты. Альфа-кристаллин является молекулярным шапероном и замедляет агрегацию бета- и гамма-кристаллинов, однако с возрастом его защитные свойства ослабевают. С помощью разработанной в ИПФ РАН методики с использованием ХеСl эксимерного лазера нами исследовано действие D- пантетина, пантотеновой кислоты, L-карнозина и N-ацетилкарнозина на скорость УФ-индуцированной агрегации кристаллинов. Установлено, что скорость агрегации бетаL-кристаллина практически не меняется при добавлении D-пантетина, карнозина или пантотеновой кислоты, но существенно уменьшается при добавлении N-ацетилкарнозина. С другой стороны, D-пантетин эффективно замедляет агрегацию смеси бетаL- и альфа-кристаллинов, то

есть улучшает защитные свойства альфа-кристаллина. На основании полученных результатов нами создана комбинация из N-ацетилкарнозина и D-пантетина, которая лучше замедляет агрегацию смеси бетаL- и альфа-кристаллинов, чем каждое из этих веществ по отдельности. Комбинация была апробирована на экспериментальных животных (крысах) и показала существенное (в несколько раз) замедление развития у них УФ-индуцированной катаракты. Получено решение Роспатента о выдаче патента на изобретение (заявка № 2007144339) «Фармацевтическая композиция для профилактики развития и лечения начальной стадии возрастной катаракты (варианты)».

### Публикации

1. Ostrovsky M.A., Sergeev Y.V., Atkinson D.L., Soustov L.V., Hejtmancik J.F. Comparison of UV-induced photo-kinetics for lens-derived and recombinant beta-crystalline. // *Molecular Vision*. 2002. V. 8. P. 72-78.
2. Л. В. Соустов, Е. В. Челноков, Н. М. Битюрин, В. В. Немов, Ю. В. Сергеев, М. А. Островский. Фотоагрегация водорастворимого белка (карбоангидразы) под действием ультрафиолетового излучения ХеСl-лазера. // Доклады Академии Наук, 2003, т.388, с. 683, 2003 г.
3. Yury V. Sergeev, Lev V. Soustov, Eugene V.Chelnokov, Nikita M. Bityurin, Peter S. Backlund, Jr, Paul T. Wingfield, Mikhail A. Ostrovsky, and J. Fielding Hejtmancik. Increased Sensitivity of Amino-Arm Truncated  $\beta$ A3-Crystallin to UV Light-Induced Photoaggregation, *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, v. 46, № 9, p. 3263-3273, 2005.
4. Соустов Л. В. , Челноков Е. В. , Сапогова Н. В., Битюрин Н. М. , Немов В. В. , Карпова О. Е. , Шеремет Н. Л. , Полуниин Г. С. , Аветисов С. Э. , Островский М. А. «Исследование влияния шапероноподобной (защитной) активности короткоцепочечных пептидов на скорость УФ-индуцированной эксимерным лазером агрегации бета-кристаллина.» // Вестник офтальмологии, 124(2), с.6-8, 2008.
5. Аветисов С.Э., Полуниин Г.С., Шеремет Н.Л., Макаров И.А., Федоров А.А., Карпова О.Е., Муранов К.О. , Тимофеева А.К., Соустов Л. В. , Челноков Е. В. , Битюрин Н. М. , Сапогова Н. В., Немов В. В., Болдырев А.А., Островский М.А. «Изучение воздействия смеси ди- и тетра-пептидов на «продолженной» модели ультрафиолет-индуцированной катаракты у крыс.» // Вестник офтальмологии, 124(2), с.12-16, 2008.
6. Л.В. Соустов, Е.В. Челноков, Н.В. Сапогова, Н.М. Битюрин, В.В. Немов, Ю.В. Сергеев, М.А. Островский «Исследование механизмов агрегации кристаллинов, индуцированной импульсным лазерным УФ-излучением 308 нм», (обзор), *Биофизика* 53, 582-597 (2008).
7. Evgeny Chelnokov, Lev Soustov, Natalia Sapogova, Mikhail Ostrovsky, and Nikita Bityurin, "Non-reciprocal XeCl laser-induced aggregation of beta-crystallins in water solution", *Optics Express*, V. 16, Iss. 23, p. 18798–18803 (2008).

3.8. Разработана двухстадийная методика УФ индуцированного создания наночастиц золота непосредственно в твердой полимерной матрице, допированной прекурсором золота. Построена теоретическая модель, позволяющая описать это явление. Экспериментально продемонстрирована возможность изменения распределения наночастиц по размерам, путем модификации полимерной матрицы. Разработана технология создания методом полимеризации объемных образцов с рекордно большой концентрацией прекурсоров золота ( $\sim 10^{19}$  см<sup>-3</sup>). Показано, что на этапе фотолиза золотого прекурсора возможно формирование в полимерной матрице двух- и трехмерных структур при помощи УФ лазерного облучения образца.

**Авторы:** А. П. Александров, Н. А. Агарева, Н. В. Сапогова, Н. М. Битюрин (ИПФ РАН), Л. А. Смирнова, Н. О. Якимович, Т. А. Грачева (ННГУ).



**Аннотация.** Создание нанокomпозиционных материалов, состоящих из наночастиц металлов, внедренных в полимерную матрицу, является основой многих современных нанотехнологий. При этом для введения наночастиц в матрицу используют различные специальные приемы. Нами разработана методика (технология) фотоиндуцированного формирования наночастиц золота непосредственно в твердой полимерной матрице, допированной прекурсором золота, без введения специальных восстановителей и стабилизаторов, их роль выполняет полимерная среда.

Процесс формирования наночастиц золота проходит в два этапа. На первом – при УФ фотолизе прекурсора образуются ионы  $Au^{3+}$ , затем происходит восстановление ионов до атомов, на втором – рост наночастиц. При этом для ускорения формирования наночастиц Au полимерный образец нагревается до температуры (70–80 °С). Установлено, что на первом этапе отжига устанавливается распределение частиц золота по размерам, которое далее в процессе отжига практически не меняется. Растет только общее число частиц. Построена теоретическая модель, позволяющая описать это явление. Показано, что свойства полученных наночастиц (размер, распределение по размерам) определяются природой полимерной матрицы. Экспериментально продемонстрирована возможность менять это распределение, меняя полимерную матрицу.

В настоящее время прекурсоры золота в количестве, достаточном для формирования наночастиц, вводятся только в пленочные образцы. Нами разработана технология создания методом полимеризации объемных образцов с рекордно большой концентрацией прекурсоров золота ( $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ).

Выделение отдельно этапа фотолиза прекурсора золота открывает принципиальные возможности формирования в полимерной матрице двух- и трехмерных структур требуемой топографии в процессе управляемого по соответствующей программе УФ лазерного облучения полимерного образца. При последующей термообработке образца («проявления» скрытого изображения) из наночастиц золота формируется цветное изображение заданной структуры.

### Публикации

1. A. Alexandrov, L. Smirnova, N. Yakimovich, N. Sapogova, L. Soustov, A. Kirsanov, N. Bityurin, UV-initiated growth of gold nanoparticles in PMMA matrix. *Appl. Surf. Sci.*, 248 (2005), p.181–184.
2. Л.А. Смирнова, А.П. Александров, Н.О. Якимович, Н.В. Сапогова, А.В. Кирсанов, Л.В. Соустов, Н.М. Битюрин, УФ-индуцированное формирование наноразмерных частиц золота в полиметилметакрилатной матрице. *ДАН*, 400(6)б 2005, с. 779-781.
3. Н.О. Якимович, Н.В. Сапогова, Л.А. Смирнова, А.П. Александров, Т.А. Грачева, А.В. Кирсанов, Н.М. Битюрин, Золотосодержащие нанокomпозиционные материалы на основе гомо- и сополимеров метилметакрилата, *Хим. физика*, т.27, №1, 2008, с.61-68.
4. Н. А. Агарева, А. П. Александров, Л. А. Смирнова, Н. М. Битюрин. Синтез блочного полиметилметакрилата, содержащего прекурсор для фотоиндуцированного формирования наночастиц золота. *Перспективные материалы*. (направлено в печать).
5. N. Sapogova, N. Bityurin, Model for UV Induced Formation of Gold Nanoparticles in Solid Polymeric Matrices, *Appl.Surf. Sci.* (направлено в печать).

3.9. Построена группа симметрии внутренней динамики димеров  $(H_2O)_2$  и  $(D_2O)_2$ , учитывающая реальную геометрию нежестких движений, отвечающих наиболее низким энергетическим барьерам (инверсионного движения, обменного движения акцептора и донора через транс-конфигурацию и бифуркационного движения). На этой основе получены эффективные операторы Гамильтона и электродипольного момента, ведущие к простой алгебраической схеме

расчета спектра и впервые правильно передающие все его наблюдаемые качественные особенности.

**Автор:** Буренин А.В. (ИПФ РАН).

**Аннотация.** Экспериментальное и теоретическое исследование спектра высокого разрешения димеров воды ( $(H_2O)_2$ ) и ( $(D_2O)_2$ ) началось тридцать лет назад и этой проблеме посвящены уже сотни работ. Анализ многочисленных экспериментальных данных, полученных в микроволновом и инфракрасном диапазонах длин волн, и расчеты методами квантовой химии показали, что равновесная конфигурация димеров отвечает низкой симметрии и это ведет к появлению ряда нежестких движений, делокализирующих димер по восьми эквивалентным конфигурациям, отличающимся перестановками тождественных ядер. При этом основной вклад дают три движения с наиболее низкими барьерами. К ним относятся инверсионное движение (барьер около  $150 \text{ см}^{-1}$ ), обменное движение (барьер около  $200 \text{ см}^{-1}$ ) и бифуркационное движение (барьер около  $400 \text{ см}^{-1}$ ). Задача построения описания внутренней динамики с их учетом очень сложна, причем наибольшие трудности связаны с обменным движением, для которого принципиальна тождественность мономеров, хотя они и расположены в равновесной конфигурации неэквивалентно. Поэтому важнейшая роль в построении физически корректной модели принадлежит методам симметрии. Традиционно для этой цели используется подход на основе группы молекулярной симметрии ( $MS$ -группы), включающей перестановки тождественных ядер и их произведения с операцией пространственной инверсии. Конкретно для димеров ( $(H_2O)_2$ ) и ( $(D_2O)_2$ ) эта группа была построена еще тридцать лет назад. Однако получить адекватную модель единого описания проявляющихся в спектре движений не удалось. Причем речь идет о качественных расхождениях. Поэтому экспериментальные данные обрабатываются отдельными полосами.

Возникающие проблемы в построении единой модели связаны, прежде всего, с особенностями анализа на основе  $MS$ -группы. Во-первых, эта группа включает лишь преобразования симметрии гамильтониана. Но преобразования, задающие инверсионное и бифуркационное движения, не оставляют гамильтониан инвариантным. Во-вторых,  $MS$ -группа безразлична к геометрии внутренних движений. Поэтому геометрия фиксируется заданием хотя бы приближенных решений для стационарных состояний. Сделать это физически корректно для димера воды крайне сложно. Чтобы привязать  $MS$ -группу к геометрии, «руками» задается действие ее преобразований на приближенные решения. Полученные свойства симметрии приближенных решений можно использовать лишь для некоторого упрощения процедуры их уточнения.

Поэтому в данном исследовании используются развитые автором методы цепочки групп симметрии [Буренин А.В. //УФН, 2006. Т. 176, с. 847-856; Буренин А.В. Симметрия квантовой внутримолекулярной динамики, 2-е изд., Н. Новгород, ИПФ РАН, 2006, 368 с.], в которых описание внутренней динамики целиком строится исходя только из принципов симметрии. Важную роль здесь играют группы, учитывающие реальную геометрию нежестких движений. Такая группа была построена для димера воды с учетом трех указанных выше движений. Она имеет в восемь раз больше элементов, чем  $MS$ -группа, причем половина геометрических элементов не является преобразованиями симметрии гамильтониана ( $MS$ -группа уже по своему определению не может иметь ничего подобного). На этой основе получены эффективные операторы Гамильтона и электродипольного момента, ведущие к простой алгебраической схеме расчета спектра и впервые правильно передающие все его наблюдаемые качественные особенности. Подчеркнем, что корректность такого описания ограничивается лишь правильностью выбора симметрии внутренней динамики.

Интересно, что геометрия внутренних движений в димере воды обладает серьезной особенностью, отсутствующей в ранее рассмотренных методами цепочки групп многочисленных молекулярных системах. То есть, исследование также расширяет область приложения данных методов.

## Публикации

1. Буренин А.В.//Оптика и спектроскопия, 2008, т. 104, с. 365-371.
2. Буренин А.В.//Оптика и спектроскопия, 2008, т. 104, с. 553-559.
3. Буренин А.В.//Оптика и спектроскопия, 2008, т. 104, с. 560-566.

3.10. В диапазоне  $0\text{--}20000\text{ см}^{-1}$  рассчитаны колебательно-вращательные спектры основных изотопологов молекулы воды ( $\text{H}_2^{16}\text{O}$ ,  $\text{H}_2^{17}\text{O}$ ,  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  и  $\text{D}_2^{16}\text{O}$ ) с точностью  $0.02\text{ см}^{-1}$ , что соответствует средней точности известных экспериментальных данных. При расчетах использовались новые оптимизированные *ab initio* поверхности потенциальной энергии и высокоточная *ab initio* дипольная поверхность. Полученные спектры в настоящий момент являются наиболее полным и точным источником информации о спектре паров воды.

**Авторы:** Зобов Н.Ф., Ширин С.В., Полянский О.Л. (ИПФ РАН).

**Аннотация.** Рассчитаны списки линий колебательно-вращательных переходов молекул  $\text{H}_2^{16}\text{O}$ ,  $\text{H}_2^{17}\text{O}$ ,  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  и  $\text{D}_2^{16}\text{O}$ , покрывающие диапазон  $0\text{--}20\,000\text{ см}^{-1}$  ( $0\text{--}16000\text{ см}^{-1}$  для  $\text{D}_2^{16}\text{O}$ ) и интервал вращательных состояний до  $J = 20$  ( $J = 30$  для  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  и  $\text{D}_2^{16}\text{O}$ ) [1, 2]. Расчеты выполнены вариационными методами на основе новой *ab initio* поверхности потенциальной энергии [1], оптимизированной с использованием морфической функции и экспериментальных уровней энергии. Расчеты воспроизводят уровни энергии со стандартным отклонением  $0.025\text{ см}^{-1}$ , что соответствует средней точности известных экспериментальных данных. Данные списки линий являются на настоящий момент наиболее точными глобальными расчетами (производится одновременный расчет всех колебательно-вращательных переходов) спектров изотопологов молекулы воды.

Интенсивности переходов рассчитываются с использованием *ab initio* поверхности дипольного момента [3]. Корреляционная–релятивистская–валентная (CVR) поверхность дипольного момента (DMS) для молекулы воды, была рассчитана методами *ab initio*. Проверка точности проведена как по интенсивности линий, так и по постоянному дипольному моменту молекулы. Результаты хорошо согласуются с предыдущей DMS Партриджа – Швенке [D.W. Schwenke, N. Partridge, J. Chem. Phys. 113 (2000) 6592–6597], но имеют большую точность. В частности, более точные значения интенсивностей предсказываются для весьма слабых обортонных переходов, а рассчитанное значение дипольного момента молекулы воды совпадает с экспериментальным в пределах ошибок. Точность расчетов интенсивностей линий проверена сравнением с недавними высокоточными измерениями Lisak и Hodges [J. Mol. Spectr., V. 249(1), 2008, P. 6-13], интенсивности сильных линий воспроизведены с точностью не хуже 3%. Для слабых линий расчеты интенсивностей более точны, чем измерения.

То, что эти списки линий дают отличную стартовую точку для спектроскопического моделирования и анализа колебательно-вращательных спектров, продемонстрировано в работе [A. Campargue, O. Leshchishina, O. Naumenko, J. Mol. Spectr., 2008, in press]. В ней спектр молекулы  $\text{D}_2^{16}\text{O}$ , полученный с помощью внутривибронного спектрометра был отождествлен в диапазоне  $13600\text{--}14020\text{ см}^{-1}$  на основе наших расчетов.

## Публикации

1. S.V. Shirin, N.F. Zobov, R.I. Ovsyannikov, O.L. Polyansky, J. Tennyson, Water line lists close to experimental accuracy using a spectroscopically determined potential energy surface for  $\text{H}_2^{16}\text{O}$ ,  $\text{H}_2^{17}\text{O}$  and  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ , J. Chem. Phys, 128, 224306 (2008).

2. S.V. Shirin, N.F. Zobov, O.L. Polyansky, Theoretical line list of  $D_2^{16}O$  up to  $16,000\text{ cm}^{-1}$  with an accuracy close to experimental // J. Quant. Spectr. Rad. Transfer. 109, 549-558 (2008).
3. L. Lodi, R.N. Tolchenov, J. Tennyson, A. E. Lynas-Gray, S.V. Shirin, N.F. Zobov, O.L. Polyansky, A.G. Csaszar, J.N.P. Van Stralen, L. Visscher, A new ab initio ground state dipole moment surface for water, J. Chem. Phys., 128, 044304 (2008).

3.11. Впервые показано, что в двухкомпонентной среде реакционно-диффузионного типа возможно существование неоднородных устойчивых локализованных структур. Структуры представляют собой уединенные группы элементов среды в состоянии синхронной активности на фоне остальных элементов, находящихся в состоянии покоя. Ключевое значение для формирования структур имеет свойство автоколебательности элемента среды и наличие у него двух порогов возбуждения. Параметры (ширина, высота, профиль) структур могут быть как постоянными (стационарные структуры), так и изменяться во времени (нестационарные структуры). Установлено, что ширина и высота нестационарных структур изменяются во времени периодически, квазипериодически и хаотически. Показано, что существование нестационарных структур связано с подавляющим и перезапускающим свойствами границ среды. Полученные результаты имеют значение для понимания процессов обработки и передачи информации в нейронных сетях, для формирования структур в гелях, микроэмульсиях, жидких кристаллах и гранулированных материалах.

**Авторы:** А.С. Дмитричев, В.И. Некоркин.

**Аннотация.** Проведено исследование пространственно-временной динамики системы, моделирующей коллективные процессы возбуждения нейронной сети электрически связанных нейронов с бистабильными и осцилляторно – пороговыми свойствами. Систему можно трактовать как дискретную версию двухкомпонентной среды с диффузией. Обнаружено формирование пространственно – локализованных стационарных и нестационарных структур активности. В каждый момент времени такие структуры представляют собой уединенные группы элементов – нейронов, находящихся в состоянии одновременной генерации потенциалов действия (импульсов возбуждения – спайков), на фоне других нейронов, демонстрирующих состояние относительного покоя. При этом форма возбужденной области стационарной структуры (а вместе с тем и ее скорость) не зависят от времени. Напротив, форма возбужденной области нестационарной структуры может совершать периодические, квазипериодические или хаотические колебания. Выявлены динамические механизмы формирования структур. В случае стационарных структур показано, что пространственная локализация связана с установлением баланса между силовым воздействием на элементы, находящиеся вблизи “края” структуры и области притяжения устойчивого состояния равновесия. При нарушении этого баланса структуры теряет свою устойчивость. Нестационарные структуры образуются за счет компенсации процесса “расплывания” структуры в поперечном к распространению направлении “диссипирующим” воздействием граничных элементов сети. Установлено, что локализованные структуры соответствуют разнообразным аттракторам в многомерном фазовом пространстве системы. В зависимости от параметров это может быть устойчивый предельный цикл, инвариантный тор или же хаотический аттрактор. Для нестационарных структур с помощью построения отображений Пуанкаре выделены области, отвечающие соответственно периодическим, квазипериодическим и хаотическим колебаниям, а также области бистабильности. Показано, что хаотические колебания в системе рождаются в результате каскадов бифуркаций удвоения периода или через перемежаемость. Для стационарных структур построены зависимости размера и скорости от параметров системы. Показано наличие связанных состояний, режима бистабильности и даже мультистабильности структур. Исследовано взаимодействие структур друг с другом и с границами системы. Выделена область параметров, где структуры обладают частице подобным поведением.

## Публикации

1. А.С. Дмитричев, В.И. Некоркин. Стационарные локализованные структуры активности в двумерном ансамбле модельных нейронов ФитцХью-Нагумо с осцилляторным порогом, Изв. ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика, т. 16, №3, 71-86, 2008.
2. A.S. Dmitrichev, V.I. Nekorkin. Localized patterns in a two-dimensional lattice of electrically coupled modified FitzHugh-Nagumo Neurons, Proc. Of the 16<sup>th</sup> Int. Workshop on Nonlinear Dynamics of electronic systems (NDES - 2008), Nizhny-Novgorod, Russia, July 2008, p. 14.
3. V.I. Nekorkin. Heteroclinic contours and self-replicated wave patterns in a neural networks with complex threshold excitation, Abstr. Of the Int. Workshop-School on Chaos and Dynamics in Biological Networks, Cargese, France, May 2008, p. 14.
4. В.И. Некоркин, А.С. Дмитричев. Стационарные локализованные структуры активности в двумерном ансамбле модельных нейронов ФитцХью-Нагумо с осцилляторным порогом, В кн.: Нелинейные волны-2008 (в печати).

3.12. Разработан метод экспресс-оценки соответствия стандартам лекарственных средств, а также выявления наркотических веществ в сыворотке крови с помощью программно – аппаратного комплекса, регистрирующего динамику акустомеханического импеданса, который отражает структурную эволюцию высыхающих капель многокомпонентных жидкостей. Информативность метода определяется особенностями динамики фазовых переходов в высыхающих каплях, чрезвычайно чувствительных к составу и структуре жидкостей.

**Авторы:** Т.А. Яхно, А.Г. Санин, О.А. Санина, В.Г. Яхно, О.Б. Шапошникова, Chris Vacca, Frank Falcione (Aria Analytics, Inc., USA).

**Аннотация.** Проведен качественный анализ экспериментальных данных, касающихся механизмов структурообразования в высыхающих каплях биологических жидкостей. Показано, что структурная эволюция высыхающих капель представляет собой сложный многоэтапный процесс, в котором условно можно выделить две стадии: события, происходящие во время испарения свободной воды, и структурообразование, связанное с испарением рыхлосвязанной воды.

К структурообразующим этапам первой стадии относятся: взаимодействие жидкости с подложкой – при условии смачивания – образование линии прикрепления к субстрату и развитие центробежного течения капиллярной природы; образование стеклообразного белкового валика по периферии капли; распределение растворенных компонентов в соответствии с их поверхностными свойствами и образование адсорбционных слоев по границам раздела фаз; каскад фазовых переходов белка – от мицелл и коацерватов до геля (гелей, образованных разными компонентами); кристаллизация соли (солей) в гелевой матрице. К структурообразующим этапам второй стадии относятся: макро-растрескивание высохшей полимерной пленки вследствие развития изгибной деформации; вторичное деление пленки поперечными трещинами на отдельные фрагменты, имитирующие структуру «клеток с ядрами» в результате той же изгибной деформации; образование спиральных трещин внутри «ядер» как результат снижения эластичности пленки и развития сил механической деформации, направленных внутрь «ядра».

Проведены испытания разработанного ранее «Способа интегральной идентификации многокомпонентных жидкостей» для использования в некоторых полезных приложениях. Динамика акустомеханического импеданса (АМИ), отображающаяся в виде кривой на экране, интегрально включает в себя такие физические характеристики объекта, как вязкость, эластичность, трение и массу с разной степенью адгезии к подложке. Каждая величина представлена со своим весовым коэффициентом, который имеет исходно разное значение у разных жидко-

стей и изменяется по-разному в процессе высыхания капли, в зависимости от свойств жидкости (состава, структуры). Это вносит индивидуальность в динамику АМИ, отражающуюся на форме кривой изменения АМИ от времени. Экспериментально установлено, что форма кривой АМИ является паспортной характеристикой жидкости. Параметризация полученных данных с помощью программного обеспечения позволяет получать статистические различия между сравниваемыми жидкостями.

На основе метода разработаны следующие приложения.

1. Выявление фальсифицированных лекарственных средств (совместно с Нижегородским Областным Центром по Контролю Качества и Сертификации Лекарственных Средств – НОЦККСЛС). Разработаны методологические подходы для создания экспресс-метода оценки ликвидности лекарственных препаратов на основе регистрации динамики структуризации их капель при высыхании. Метод основан на сравнении испытуемых препаратов с эталонными образцами. Показана перспективность данного подхода, отличительными качествами которого является точность, быстрота (5–15 мин), простота использования и дешевизна по сравнению с функциональными аналогами.

2. Определение присутствия наркотических средств в сыворотке крови трупов (совместно с ГОУ ВПО Нижегородская государственная медицинская академия и ГУЗ Нижегородское бюро судебно-медицинской экспертизы). Показано, что высыхающие капли сыворотки крови, содержащей метаболиты наркотических веществ, отличаются отсутствием в них гелеобразования, что меняет их механические характеристики, делая более хрупкими. Эти особенности могут быть выявлены количественно.

3. Оценка качества очистки плазмы крови от токсических метаболитов с помощью плазмафереза при использовании разных сорбентов (совместно с Нижегородским научно-исследовательским институтом травматологии и ортопедии). Показана перспективность метода для сравнительной оценки качества разных сорбентов.

### Публикации

1. T. Yakhno. Salt-induced Protein Phase Transitions in Drying Drops. // Journal of Colloid and Interface Science, 2008, 318, 225-230.
2. Т.А. Яхно, А.Г. Санин, В.Г. Яхно. Динамика фазовых переходов в высыхающих каплях биологических жидкостей: физико-химические основы, способ регистрации и извлечения диагностической информации. // Медицина в зеркале информатики, М: Наука, 2008, 63-78.
3. Т.А. Яхно, В.Г. Яхно. Основы структурной эволюции высыхающих капель биологических жидкостей. // ЖТФ. Подана в печать в июле 2008.
4. Т.А. Яхно, А.Г. Санин, С. Васса, В.Г. Яхно. Способ регистрации динамики фазовых переходов в высыхающих жидкостях и его приложения в технике и медицине. // Тезисы докладов V Международной научной конференции «Кристаллизация для нанотехнологий, техники и медицины», 23-26- сентября 2008, Иваново, 97.
5. Л.М. Обухова, Н.С. Эдалев, А.С. Конов, Т.А. Яхно, О.Б. Шапошникова. Некоторые параметры сыворотки крови при отравлении наркотическими веществами. // Тезисы докладов V Международной научной конференции «Кристаллизация для нанотехнологий, техники и медицины», 23-26- сентября 2008, Иваново, 230.
6. О.А. Санина, О.Б. Шапошникова, А.Г. Санин, Т.А. Яхно, В.Г. Яхно. Исследование возможности оценки качества лекарственных средств на основе регистрации динамики фазовых переходов при высыхании их растворов. // Тезисы докладов V Международной научной конференции «Кристаллизация для нанотехнологий, техники и медицины», 23-26- сентября 2008, Иваново, 236.