

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

2. Отделение геофизических исследований, Центр гидроакустики

2.1. Впервые в мире найдены и включены в климатическую модель высокого разрешения параметризации основных генераторов глобальной электрической цепи – квазистационарных токов электрически активных облаков. Модельные расчеты ионосферного потенциала для эпохи инструментальных наблюдений (XX в.) продемонстрировали суточную и сезонную изменчивость, хорошо соответствующие наблюдаемому. Показано, что при развитии глобального потепления в типичных сценариях роста содержания парниковых газов в атмосфере ионосферный потенциал должен уменьшаться в соответствии с уменьшением площади конвекции в тропиках.

Авторы: Е.А. Мареев, А.В. Калинин (Институт прикладной физики РАН), Е.М. Володин (Институт вычислительной математики РАН)

Аннотация. Квазистационарные токи электрически активных облаков, как показывают расчеты и их сравнение с экспериментальными данными, являются основными генераторами глобальной электрической цепи (ГЭЦ). Поэтому параметризации вклада этих токов в величину ионосферного потенциалов позволяет применить современные климатические модели высокого разрешения для исследования изменчивости глобальной цепи в условиях изменяющегося климата и дать прогноз ее поведения в будущем. Впервые в мире такие параметризации были найдены и включены в климатическую модель высокого разрешения INMCM4 в работах [2-4]. Вклад квазистационарных токов электрически активных облаков в ионосферный потенциал ГЭЦ был выполнен для модели распределенных источников стороннего в сферической геометрии цепи с экспоненциально растущей проводимостью. Были выполнены модельные расчеты ионосферного потенциала глобальной электрической цепи в XX и XXI веке. При настройке параметризации варьировался только коэффициент, характеризующий площадь, занятую грозовыми облаками; оказалось, что средний потенциал близок к наблюдаемому при его значении, равном 0.4. Моделирование изменений климата в 1900-2005 гг. было проведено с использованием наблюдавшихся концентраций радиационно активных газов и аэрозолей. Проведено сравнение с экспериментальными данными измерений, выполненных во второй половине XX века. Полученный в модели суточный ход, осредненный по всем дням, хорошо соответствует наблюдаемому. Максимум потенциала приходится на 16-20 часов UST, когда конвекция в Африке и Южной Америке максимальна. Годовой ход потенциала имеет максимум летом северного полушария, когда количество случаев конвекции над континентами больше, что также соответствует экспериментальным данным. Межгодовая изменчивость ионосферного потенциала в модели невелика и составляет не более 1% от среднего значения. Важно отметить, однако, что она хорошо коррелирует с температурой поверхности океана в районе Эль-Ниньо [3]. Установлено, что при развитии глобального потепления в модели происходит уменьшение потенциала. Показано, что падение потенциала ионосферы при глобальном потеплении обусловлено уменьшением площади конвекции. Уменьшение площади при потеплении вполне закономерно, и его первопричиной является увеличение разницы между сухоадиабатическим и влажноадиабатическим градиентом температуры при увеличении температуры, что приводит к уменьшению площади конвекции в тропиках [3,5].

Публикации

1. Е.А. Мареев. Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи // УФН. 2010. Т. 180, № 5. С. 527-534.

2. Kalinin A.V., Mareev E.A., Zhidkov A.A. Calculation of Different-Type Clouds in the Global Atmospheric Electric Circuit // Proc. XIV Int. Conf. on Atmos. Electr. ICAE2011, Rio de Janeiro, Brazil, Aug 2011.

3. Mareev E.A., Volodin E.M. Simulation of Lightning Activity and Global Electric Circuit Evolution Using a GCM Model // Geophys. Res. Lett., 2011 (accepted).

4. Mareev E.A., Volodin E.M. Simulation of Lightning Activity and Global Electric Circuit Evolution Using a GCM Model // Proc. XIV Int. Conf. on Atmos. Electr. ICAE2011, Rio de Janeiro, Brazil, Aug 2011.

5. Е.А.Мареєв. Эффекты атмосферного электричества в климатических моделях. В сб. Нелинейные волны – 2010. Н.Новгород, 2011.

2.2. Разработан метод расчета атмосферных эмиссий загрязняющих веществ от природных пожаров для применения в рамках трехмерной химическо-транспортной модели. Ключевыми особенностями метода являются использование суточных максимумов интенсивности инфракрасного излучения от пожаров по данным спутниковых измерений, а также ассимиляция моделью данных наземного мониторинга загрязнения атмосферы. На примере применения данного метода для анализа экстремальной ситуации лета 2010 г. впервые достигнуто удовлетворительное количественное согласие между результатами расчетов межсуточных вариаций концентраций основных загрязнителей атмосферы (монооксида углерода, озона, взвешенного вещества) и соответствующих данных независимых измерений в условиях сильного возмущения состава атмосферы вследствие природных пожаров.

Авторы: И.Б. Коновалов (ИПФ РАН), M. Beekmann, (CNRS, Франция), И.Н. Кузнецова, А.Ю. Юрова (Гидрометцентр России), А.М. Звягинцев (ЦАО)

Аннотация. Природные пожары являются важным фактором окружающей среды, оказывающим существенное влияние на состав атмосферы, как на глобальном, так и региональном масштабах. Мощные выбросы продуктов горения от природных пожаров эпизодически приводят к многократному превышению допустимого уровня загрязнения атмосферы и к резкому снижению видимости в крупных густонаселенных регионах. Наиболее общий подход к оценке и прогнозу атмосферных эффектов, связанных с природными пожарами, предполагает их моделирование в рамках трехмерных химическо-транспортных моделей (ХТМ) атмосферы. Однако работы, в которых предприняты попытки учета эмиссий от пожаров в региональных ХТМ до сих пор носят единичный характер, и их результаты не являются однозначно положительными, что, в частности, связано с неточностями расчетов эмиссий атмосферных примесей от пожаров.

В работах [1,2] разработан оригинальный метод учета эмиссий от пожаров в рамках ХТМ на основе спутниковых измерений, а также представлены результаты его применения для моделирования загрязнения атмосферы в Центрально-Европейском регионе России. Ключевыми особенностями метода являются (1) использование суточных максимумов интенсивности инфракрасного излучения от пожаров по данным спутниковых измерений, (2) оптимизация параметров алгоритма расчета эмиссий на основе усвоения химическо-транспортной моделью данных наземного мониторинга загрязнения атмосферы, и (3) коррекция возможного систематического занижения измеренных величин интенсивности излучения от пожаров вследствие экранирования спутникового сенсора дымовым аэрозолем.

Эффективность разработанного метода продемонстрирована в ходе исследования эпизода экстремального загрязнения атмосферы в регионе московского мегаполиса летом 2010 г. Показано, что в результате учета эмиссий от пожаров в ХТМ CHIMERE на основе этого метода коэффициент корреляции (r) между рассчитанными и измеренными суточно-

осредненными концентрациями (не использованными при оптимизации модели) превышает 0.8, как в случае монооксида углерода (CO), так и в случае взвешенного вещества (PM₁₀). В случае суточных максимумов концентрации озона (O₃) достигнуто значение r , равное 0.75, что является хорошим результатом ввиду сильной временной и пространственной изменчивости концентрации озона в присутствии мощных возмущений состава и оптических свойств атмосферы вследствие пожаров. Таким образом, впервые продемонстрирована возможность достижения удовлетворительного количественного согласия между измеренными межсуточными вариациями концентраций ряда основных загрязнителей атмосферы (CO, PM₁₀, O₃) и расчетами загрязнения атмосферы в условиях интенсивных природных пожаров.

Практическая реализация метода осуществляется в рамках разрабатываемой в настоящее время (совместно с Гидрометцентром России) системы оценки и прогноза качества воздуха в Центрально-Европейском районе России.

Публикации

1. Konovalov I.B., M. Beekmann, I.N. Kuznetsova, Zvyagintsev A.M., Yurova A. Atmospheric impacts of the 2010 Russian wildfires: integrating modelling and measurements of an extreme air pollution episode in the Moscow region. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 10031–10056, 2011.

2. Коновалов И.Б., Бикманн М., Кузнецова И.Н., Глазкова А.А., Вивчар А.В., Зарипов Р.Б. Оценка влияния природных пожаров на загрязнение воздуха в регионе московского мегаполиса на основе комбинированного использования химическо-транспортной модели и данных измерений // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2011. 47. №2. С. 496-507.

2.3. Построена аналитическая модель развития каскадов энергичных частиц во вращающемся электрическом поле, описывающая функции распределения электронов, позитронов и жёстких фотонов для энергий, во много раз больших средних энергий частиц в каскаде. Построена самосогласованная численная модель динамики каскада. Продemonстрировано сильное поглощение энергии двух сталкивающихся лазерных импульсов из-за генерации электрон-позитронной плазмы и гамма-излучения. Показано, что поглощение становится существенным уже при интенсивности лазерного излучения 1024 Вт/см^2 , достижимой в ближайшем будущем. Управляя параметрами взаимодействия, можно создавать направленное гамма-излучение высокой интенсивности.

Авторы: Е.Н. Неруш, В.Ф. Башмаков, И.Ю. Костюков (Институт прикладной физики РАН); А.М. Федотов, Н.Б. Нарожный, М.В. Легков (МИФИ), N.V. Elkina, H. Ruhl (Университет Мюнхена, Германия)

Аннотация. В настоящее время в мире проектируются лазерные системы (например, ELI в Европе <http://www.extreme-light-infrastructure.eu>, ЦИЭС в России), где интенсивность излучения превысит 10^{24} Вт/см^2 . Такое высокое значение лазерной интенсивности позволит исследовать структуру физического вакуума, проверить основы квантовой электродинамики, разработать яркие источники гамма-излучения. Одним из квантовых эффектов, вызывающий повышенный интерес в настоящее время, является образование электрон-позитронной плазмы и гамма-квантов в сверхсильном лазерном поле. Электрон-позитронная плазма может быть образована в результате развития электромагнитного каскада: затравочная зараженная частица сначала ускоряется в лазерном поле и излучает высокоэнергетичный фотон, который распадается в лазерном поле на электрон-позитронную пару. Образовавшаяся пара также ускоряется в лазерном

поле и образует следующее поколение электрон-позитронных пар и фотонов. В недавних работах было предсказано, что существенная часть лазерной энергии расходуется на образование и нагрев электрон-позитронной плазмы. Такой процесс может ограничить интенсивность, достижимую лазером в лабораторных условиях. Предсказание о существенном поглощении лазерного в образующейся электрон-позитронной плазме было сделано с помощью простых оценок и нуждается в количественной проверке с помощью более точных моделей.

В наших работах [1,2] построена самосогласованная численная модель, учитывающая обратное влияние электромагнитных полей образовавшейся электрон-позитронной плазмы на динамику каскада и поглощение лазерной энергии. Предполагается, что каскад развивается в поле двух сталкивающихся линейно-поляризованных лазерных импульсов. Впервые исследована стадия насыщения каскада в результате генерации собственных полей электрон-позитронной плазмы и поглощения лазерной энергии [1]. Вычислена пороговое значение интенсивности лазерного излучения, после превышения которого начинается развитие каскада [1]. В работе [3] на базе системы кинетических уравнений построена теория электромагнитного каскада во вращающемся электрическом поле. Найдены соотношения подобия для параметров каскада. Вычислен энергетический спектр частиц каскада. В работе [4] исследована возможность направленного излучения гамма-квантов, возникающих в результате развития каскада. Показано, что направление гамма-излучения можно контролировать, подбирая нужным образом начальные условия (начальную форму лазерных импульсов, положение затравки в начальный момент).

Публикации

1. E.N. Nerush, I.Yu. Kostyukov, A.M. Fedotov, N.B. Narozhny, N.V. Elkina, H. Ruhl, Field Absorption in Self-Generated Electron-Positron Pair Plasma, *Physical Review Letters*, **106**, 035001 (2011).

2. N.V. Elkina, A.M. Fedotov, I.Yu. Kostyukov, M.V. Legkov, N.B. Narozhny, E.N. Nerush, and H. Ruhl. QED cascades induced by circularly polarized laser fields, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **14**, 054401 (2011).

3. E.N. Nerush, V.F. Bashmakov, I.Yu. Kostyukov. Analytical model for electromagnetic cascades in rotating electric field, *Phys. Plasmas* **18**, 083107 (2011).

4. E.N. Nerush, I.Yu. Kostyukov, Kinetic modelling of quantum effects in laser-beam interaction, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **653**, 7 (2011).

2.4. В лабораторном эксперименте по изучению аэродинамического сопротивления поверхности воды при сильном ветре, обнаружена тенденция к насыщению коэффициента сопротивления при эквивалентной скорости ветра, превышающей 25 м/с, которое объясняется насыщением дисперсии уклонов поверхностных волн. Результаты измерения коэффициента аэродинамического сопротивления поверхности воды находятся в хорошем соответствии с расчетами в рамках квазилинейной модели турбулентного пограничного слоя над взволнованной водной поверхностью с учетом вклада высокочастотной части спектра волнения.

Авторы: Троицкая Ю.И., Сергеев Д.А., Казаков В.И., Кандауров А.А., Байдаков Г.А., Вдовин М.А.

Аннотация. Исследование и параметризация процессов обмена импульсом в пограничных слоях атмосферы и океана является важной задачей с точки зрения развития моделей прогноза погоды и климата. Основным параметром, характеризующим этот процесс является коэффициент аэродинамического сопротивления.

В настоящей работе в рамках лабораторного моделирования ветро - волнового взаимодействия в широком диапазоне изменения скорости ветра (вплоть до ураганной), получено подтверждение эффекта стабилизации коэффициента аэродинамического сопротивления при превышении порогового значения эквивалентной скорости ветра (скорость на 10 м высоте). Найденное значение порога около 25 м/с, хорошо согласуется с ранее полученными результатами лабораторного эксперимента [Donelan M.A., Haus В.К., Reul N., Plant W.J., Stiassnie M., Graber H. C., Brown O. B., Saltzman E. S. On the limiting aerodynamic roughness of the ocean in very strong winds. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, V. 31, L18306] и данными натурных наблюдений [Powell, M.D., Vickery P.J., Reinhold T.A. Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones. *Nature*, 2003, V. 422, p. 279-283]. Сопоставление этого результата с параллельными измерениями параметров поверхностного волнения (осуществленными впервые) показало, что одновременно происходит стабилизация уклона энергонесущих волн, при том же пороге. Сопоставление этих результатов с визуальными наблюдениями, которые проводились параллельно, позволили связать эти явления с эффектом сильного обрушения волн (с образованием брызг), которое начинает регулярно проявляться при превышении порога скорости. На основе данных эксперимента были сделаны теоретические расчеты в рамках квазилинейной модели турбулентного пограничного слоя. При этом было получено, что результаты расчетов находятся в сильной зависимости от учета коротковолновой части возмущений поверхности (возмущения с пространственным масштабом в диапазоне от 1 до 10 см⁻¹). При их учете на основе модельных спектров, данные теории и эксперимента находятся в хорошем согласии.

Публикации

1. Troitskaya Yu.I., Sergeev D.A., Ermakova O.S., and Balandina G.N. Statistical Parameters of the Air Turbulent Boundary Layer over Steep Water Waves Measured by the PIV Technique // *J. Physical Oceanography*. 2011. V. 41, p. 1421-1454.

2. Yuliya Troitskaya, Daniil Sergeev, Alexander Kandaurov and Vasilii Kazakov. Air-sea interaction under hurricane wind conditions in "Recent Hurricane Research - Climate, Dynamics, and Societal Impacts" ISBN 978-953-307-238-8 Book edited by: Prof. Anthony Lupo 2011. p. 247-268.

3. Yu.I. Troitskaya, D.A. Sergeev, A.A. Kandaurov Laboratory modeling of wind - surface wave interaction under severe conditions // Сб. тезисов докладов Международной научной школы молодых ученых специалистов "Механика неоднородных жидкостей в полях внешних сил. Вихри и волны". Москва, 25 июня - 1 июля 2011. С. 49-51.

2.5. Разработан подход к описанию процессов, протекающих в сложных (*высокоразмерных*) природных системах, основанный на построении эмпирических *низкоразмерных* моделей в форме случайных динамических систем. Эффективность подхода продемонстрирована на примере временных рядов, порожденных как классическими динамическими моделями (системы Ресслера, Лоренца, Маккея-Гласса и др.) со случайным внешним воздействием, так и моделями атмосферно-океанических систем разного уровня сложности. В том числе, для таких систем показана возможность корректного прогноза критических переходов.

Авторы: Д. Н. Мухин, Я. И. Мольков, Е. М. Лоскутов, Р. И. Тимушев, А. М. Фейгин

Аннотация. Возрастающий с каждым годом интерес к задачам реконструкции (построения математических моделей) систем, порождающих наблюдаемые процессы, связан со сложностью изучаемых в различных прикладных областях науки природных

объектов, не позволяющей во многих случаях создавать обладающие необходимой универсальностью и грубостью модели на основании первых принципов. С другой стороны, созданные к настоящему времени методы построения моделей оператора эволюции системы по временным рядам оказываются неприменимыми к анализу реальных данных в силу высокой размерности лежащей в основе данных системы, существенной случайной компоненты, ограниченности исследуемой выборки и т.д.

Очевидно, что построение адекватной детерминированной модели невозможно в размерности, меньшей наименьшей размерности вложения аттрактора, поскольку в ней не существует однозначного оператора эволюции. Одним из возможных способов корректного описания этой неоднозначности может быть введение в динамику системы случайной компоненты, т.е. оператор эволюции в восстановленном фазовом пространстве считается стохастическим, содержащим как детерминированную, так и случайную компоненты.

Для описания наблюдаемой высокоразмерной динамики и реконструкции ключевых свойств неизвестной исследуемой динамической системы предлагается использовать стохастические модели в форме случайных динамических систем. В основе такого подхода лежит гипотеза, согласно которой базовые динамические свойства системы, определяющие наблюдаемый режим поведения, могут быть описаны конечным числом степеней свободы, а остальные, не учтенные в этих уравнениях мелкомасштабные процессы, имеют вид стохастического возмущения, неоднородного по фазовому пространству. Важным преимуществом стохастического описания является существенно более широкий класс систем, для которых такое описание является адекватным. Как правило, временные ряды, наблюдаемые в реальном эксперименте, являются короткими и/или зашумленными, что делает невозможным не только оценить размерность вложения, но и установить факт детерминированности породившей их системы как таковой. В такой ситуации стохастическое описание становится существенно более адекватным, поскольку не базируется на этих оценках. Другими словами, с «экспериментальной» точки зрения высокоразмерный хаос в условиях ограниченного объема данных неотличим от случайного процесса, поэтому идея описания высокоразмерных детерминированных динамических систем с помощью низкоразмерных стохастических моделей выглядит вполне оправданной.

Эффективность разработанного подхода продемонстрирована на примере временных рядов, порожденных как классическими динамическими моделями (системы Ресслера, Лоренца, Маккея-Гласса и др.) со случайным внешним воздействием, так и моделями атмосферно-океанических систем разного уровня сложности. В том числе, для таких систем показана возможность корректного прогноза критических переходов.

Публикации

1. D. N. Mukhin, Y. I. Molkov, E. M. Loskutov, R. I. Timushev, A.M. Feigin. Phys. Rev. E 84, 036215, 2011.

2. Y. I. Molkov, D. N. Mukhin, E. M. Loskutov, A.M. Feigin. Phys. Rev. E, 2011

2.6. В экспериментах на крупномасштабном плазменном стенде «Крот» обнаружен эффект генерации квазистационарного магнитного поля (КМП) в слабостолкновительной замагниченной плазме в пространственно-неоднородном высокочастотном поле свистового диапазона частот. Источниками КМП являются нелинейные токи, возбуждаемые за счет продольной и поперечной компонент усредненной пондеромоторной силы, действующей на заряженные частицы в пространственно локализованном высокочастотном поле накачки. Показано, что время установления КМП определяется временем включения высокочастотного поля, а перенос импульсных токов и

магнитных полей из области их генерации происходит со скоростью низкочастотных свистовых волн. Результат важен для изучения электродинамики ионосферной и магнитосферной плазмы.

Авторы: Н. А. Айдакина, М. Е. Гуцин, И. Ю. Зудин, С. В. Коробков, А. В. Костров, А. В. Стриковский

Аннотация. Явления генерации квазистационарных токов и магнитных полей при взаимодействии электромагнитного излучения с плазмой представляют значительный фундаментальный интерес и важны для ряда приложений. На протяжении нескольких десятилетий активно исследуются квазистационарные магнитные поля (КМП), возбуждаемые в лабораторной плазме излучением оптического, микроволнового или радиочастотного диапазонов. В околоземной плазме КМП, возбуждаемые интенсивными электромагнитными волнами, интересны с точки зрения генерации искусственных геомагнитных пульсаций в активных ионосферных экспериментах. При взаимодействии пространственно-неоднородных высокочастотных полей умеренной (дорелятивистской) интенсивности со слабостолкновительной плазмой с пренебрежимо малой диссипацией электромагнитной энергии одним из основных источников нелинейных эффектов является усредненная пондеромоторная сила. Если плазма помещена во внешнее магнитное поле, то в локализованном в пространстве высокочастотном поле усредненная пондеромоторная сила может приводить, с одной стороны, к перераспределению плазмы, а с другой – к возбуждению замкнутых токов, протекающих по плазме без возмущения ее плотности. Возмущения концентрации замагниченной плазмы, а также возбуждаемые вихревые токи могут быть источниками КМП, являющихся, фактически, возмущениями внешнего магнитного поля.

Изучение данных явлений актуально в связи с исследованиями волновых процессов в ионосфере и магнитосфере Земли. В частности, интерес представляет генерация КМП накачкой свистового диапазона частот. Волны данного типа, возбуждаемые в диапазоне крайне низких и очень низких частот (КНЧ и ОНЧ) наземными станциями и мощными бортовыми передатчиками космических аппаратов, можно использовать для активного воздействия на околоземную плазму и популяцию энергичных заряженных частиц, захваченных геомагнитной ловушкой. Кроме того, недавно в магнитосфере Земли были обнаружены естественные излучения свистового диапазона аномально большой амплитуды, режим взаимодействия которых с околоземной плазмой является существенно нелинейным. Указания на возможность генерации КМП накачкой свистового диапазона можно найти в ряде теоретических работ, однако прямые экспериментальные наблюдения данного эффекта до настоящего времени отсутствовали.

Эксперименты, в которых были обнаружены КМП, выполнялись на крупномасштабном плазменном стенде "Крот", предназначенном для моделирования физических явлений в космической плазме. Квазиоднородный цилиндрический столб замагниченной плазмы длиной около 500 см и диаметром 150 см формировался импульсным высокочастотным индукционным разрядом низкого давления в атмосфере инертного газа (аргона). Для возбуждения локализованных в пространстве ВЧ полей накачки использовались одновитковые рамочные антенны диаметром 2-7 см, к которым подводились импульсные сигналы на частотах 65-85 МГц, соответствующих свистовому диапазону, мощностью до 300 Вт. Длительность импульса накачки (0,1-20 мкс) выбиралась существенно меньшей характерных времен нагрева электронов ВЧ полем. Таким образом, эффекты тепловой нелинейности не успевали развиваться, и основной нелинейностью, приводящей к возмущениям концентрации плазмы и генерации КМП, являлась нелинейность, обусловленная усредненной пондеромоторной силой.

Исследования показали, что взаимодействие импульса ВЧ накачки со слабостолкновительной замагниченной плазмой сопровождается возбуждением уверенно

регистрируемых магнитными зондами КМП. В области плазмы, занятой полем накачки, аксиальная компонента КМП усиливает внешнее магнитное поле: наблюдается парамагнитный эффект. В условиях эксперимента величина КМП достигала 10 мГс, что соответствует возмущению внешнего магнитного поля на уровне до 0,01%. Также, одновременно с обнаруженными КМП, регистрировались возмущения концентрации плазмы на уровне до 1%. В целом, зависимость возбуждаемых КМП от времени не повторяет форму огибающей импульса ВЧ накачки. Анализ этой зависимости позволяет выделить две составляющие наведенного в плазме магнитного поля, соответствующие, по-видимому, двум различным механизмам его генерации. Первая составляющая, медленно меняющаяся на масштабах длительности импульса ВЧ накачки, коррелирует с регистрируемыми в ближней зоне ВЧ антенны возмущениями плотности плазмы. Вытеснение плазмы из ближней зоны антенны продолжается после окончания импульса накачки. Вторая составляющая аксиального КМП воспроизводит огибающую импульса ВЧ накачки, и не связана с возмущениями концентрации плазмы. Характерное время установления и релаксации этой составляющей КМП определяется, фактически, длительностью фронтов ВЧ импульса (менее 200 нс).

Измерения показывают, что возбуждаемые КМП имеют как продольную (аксиальную), так и поперечную (в основном – азимутальную) компоненты, сравнимые по абсолютной величине. Максимальные величины КМП достигаются в области плазмы, занятой ВЧ полем накачки (ближняя зона рамочной антенны), но пространственная структура обеих компонент КМП достаточно сложна. Отметим только, что поперечное распределение аксиальной компоненты КМП качественно воспроизводит структуру ближнего ВЧ магнитного поля рамочной антенны. Из обработки результатов измерений КМП следует, что в плазме возбуждается система квазистационарных токов, величина и направление которых сложным образом изменяются по радиусу плазмы. Абсолютное значение плотности продольного тока максимально напротив антенного провода; в соответствующих поперечных позициях знак продольного тока соответствует движению электронов от антенны, т.е. их вытеснению из области сильного ВЧ поля. В то же время, полный продольный ток через сечение плазмы равен нулю, а его плотность монотонно уменьшается по мере удаления от антенны вдоль оси камеры. По-видимому, возбуждаемые токи образуют замкнутую систему, причем их замыкание происходит непосредственно в области плазмы, занятой полем ВЧ накачки, и ее ближайшей окрестности.

Отдельный интерес представляет крупномасштабная динамика КМП, возбуждаемых импульсной ВЧ накачкой. На больших расстояниях от рамочной антенны в экспериментах регистрировались импульсные магнитные возмущения, переносимые вдоль направления внешнего магнитного поля, при этом возмущения концентрации плазмы вдали от антенны не наблюдались. Сигналы с магнитных зондов, разнесенных по продольной координате, качественно повторяют друг друга с точностью до задержки, увеличивающейся по мере удаления от ВЧ антенны вдоль оси камеры. Экспериментально полученные зависимости скорости продольного переноса магнитных возмущений от концентрации плазмы и величины внешнего магнитного поля хорошо соответствуют теоретическому закону дисперсии квазипродольных свистовых волн, для характерных частот 1–5 МГц, определяемых длительностью фронта импульса ВЧ накачки. Таким образом, перенос индуцированных в плазме импульсных токов и магнитных полей осуществляется низкочастотными волнами свистового диапазона. Подобный характер переноса импульсных токов и магнитных полей соответствует режиму электронной магнитной гидродинамики, и экспериментально исследовался Стензелом с соавторами. Новизна полученных в данной работе результатов заключается в том, что генерация импульсных плазменных токов осуществляется не коротким видеоимпульсом, поданным на антенну, а за счет нелинейных эффектов, развивающихся в поле приложенного к антенне ВЧ радиоимпульса.

По нашему мнению, основным источником генерации КМП является усредненная пондеромоторная сила, действующая на заряженные частицы в пространственно-неоднородном ближнем ВЧ поле рамочной антенны. Уменьшение концентрации плазмы, наблюдаемое в эксперименте, обусловлено продольной компонентой усредненной пондеромоторной силы. На границах формируемой в ближней зоне ВЧ антенны плазменной неоднородности возникают некомпенсированные токи намагничивания, которые приводят к локальному увеличению внешнего магнитного поля (парамагнитный эффект). Динамика данной составляющей КМП повторяет динамику перераспределения плазмы. Полученная из условия баланса поперечных давлений плазмы и магнитного поля оценка аксиальной компоненты КМП хорошо согласуется с полученными в эксперименте значениями.

Поперечная компонента усредненной пондеромоторной силы вызывает дрейфовое движение электронов по траекториям, охватывающим плазменную область, занятую полем ВЧ накачки, по азимуту. Этот дрейфовый ток, по-видимому, является источником КМП, аксиальная составляющая которого воспроизводит огибающую импульса ВЧ накачки. Генерация данной составляющей КМП не связана с возмущениями концентрации плазмы, динамика установления и релаксации КМП определяется исключительно временем возбуждения и релаксации нелинейного тока, т.е. длительностью фронтов ВЧ импульса.

Обнаруженные эффекты генерации КМП, характерные для слабостолкновительной замагниченной плазмы, могут наблюдаться в активных экспериментах, проводимых в верхней ионосфере и магнитосфере Земли, в частности, с использованием мощных передатчиков диапазона ОНЧ на борту ИСЗ и ракет. Учет подобных эффектов важен при планировании активных экспериментов; также, при периодической модуляции ВЧ накачки, явления генерации КМП могут использоваться для возбуждения низкочастотных электромагнитных волн, например – свистовых или альфвеновских.

Публикации

1. Н.А. Айдакина, М.Е. Гушин, И.Ю. Зудин, С.В. Коробков, А.В. Костров, А.В. Стриковский. Квазистационарное магнитное поле, возбуждаемое радиоимпульсом свистового диапазона частот. Письма в ЖЭТФ, Т.93, №9, с.555-560 (2011).

2. Н.А. Айдакина, М.Е. Гушин, И.Ю. Зудин, С.В. Коробков, А.В. Костров, З.А.В. Стриковский. Возмущения замагниченной плазмы в ближней зоне мощных радиоимпульсных антенных устройств. Тезисы докладов XXXVIII Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, г. Звенигород, 14-18 февраля 2011 г, с.252.

4. M. Gushchin, S. Korobkov, A. Kostrov, A. Strikovskiy. Quasistationary and low-frequency magnetic fields generated by whistlers. Abstracts of 38th COSPAR Scientific Assembly, Bremen, Germany, July 18-25, 2010, C52-0026-10.

5. A.V. Kostrov, M.Gushchin, S.V. Korobkov, A.V. Strikovskiy. Modeling of space plasma physics phenomena on large KROT plasma device. Abstracts of European Planetary Science Congress, Rome, Italy, September 19-24, 2010, abstract EPSC2010-159.

2.7. Построена стохастическая лучевая теория для анализа распределения интенсивности звукового поля в плоскости «время прихода – глубина» на тысячекилометровых трассах в океане. Показано, что накапливающееся с дистанцией рассеяние звука на слабых флуктуациях показателя преломления приводит к появлению сигналов в тех частях плоскости, которые в невозмущенном волноводе недостижимы для лучей, то есть образуют зону геометрической тени. Дано количественное объяснение того факта, что волны, попадающие в зону тени из-за рассеяния на случайных неоднородностях и распространяющиеся при этом вдоль хаотических лучей, формируют устойчивые пики принимаемого сигнала. Вариации времен прихода этих пиков могут

быть использованы в качестве входных параметров при решении задачи акустического мониторинга средней температуры океана.

Авторы: А. Л. Вировлянский, А. Ю. Казарова, Л. Я. Любавин

Аннотация. В 1990-е годы американскими акустиками была проведена большая серия широкомасштабных натуральных экспериментов в Северной части Тихого океана по распространению низкочастотных звуковых импульсов (несущие частоты около 100 Гц) на дистанциях порядка 3-5 тысяч километров. В большинстве этих экспериментов сигналы принимались на элементы донных антенных решеток.

Был обнаружен неожиданный эффект. Оказалось, что сигналы, регистрируемые донными приемниками, имеют стабильные пики, отвечающие временам прихода звуковых импульсов, распространяющихся вдоль относительно пологих лучей, которые не должны достигать дна. По отношению к таким лучам приемники находятся в зоне геометрической тени. Для выяснения физического механизма, лежащего в основе этого эффекта, в 2004 году был выполнен специальный морской эксперимент с использованием протяженных вертикальных антенн. Результаты обработки экспериментальных данных и их последующего анализа опубликованы в двух недавних статьях [L.J. Van Uffelen et al. The vertical structure of shadow-zone arrivals at long range in the ocean. *J. Acoust. Soc. Am.* V. 125. No. 6. P. 3569-3588 (2009); L.J. Van Uffelen et al. Effects of upper ocean sound-speed structure on deep acoustic shadow-zone arrivals at 500- and 1000-km range. *J. Acoust. Soc. Am.* V. 127. No. 4. P. 2169-2181 (2010)].

В этих работах установлено, что сигналы попадают в зону тени вследствие рассеяния на флуктуациях скорости звука, генерируемых случайными внутренними волнами.

Однако осталось непонятным, по какой причине, звуковые импульсы, попадающие в зону тени вследствие рассеяния на случайных неоднородностях среды, образуют там стабильные пики, времена прихода которых (i) практически не зависят от конкретной реализации неоднородностей и (ii) близки временам прихода пологих (не достигающих дна) лучей в невозмущенном подводном звуковом канале (ПЗК).

В статье [1] даны количественные ответы на эти и некоторые другие вопросы, связанные с описанием обсуждаемого эффекта. Использованный в ней подход базируется на развитой в наших предыдущих работах стохастической лучевой теории для описания хаотической динамики лучей в случайно-неоднородном ПЗК. Выяснено, что устойчивые пики образуются благодаря известному в подводной акустике эффекту кластеризации времен прихода хаотических лучей с одинаковым количеством точек поворота.

В статье получены аналитические оценки средних интенсивностей и длительностей пиков, определены условия их разрешения. Показано, что рассеяние на случайных неоднородностях приводит к уширению озвученной области вертикального сечения ПЗК не только вниз, то есть в направлении дна, но и вверх, то есть по направлению к поверхности. Дано (количественное) объяснение того факта, что рассеяние вверх, гораздо слабее рассеяния вниз.

Полученный результат может иметь и прикладное значение. Ведь он фактически означает, что времена прихода пиков звуковых импульсов, регистрируемых донными приемниками, могут использоваться в качестве входных параметров при реализации акустического мониторинга климатических вариаций средней температуры океана.

Публикации

1. A.L. Virovlyansky, A.Yu. Kazarova, L.Ya. Lyubavin. Ray-based description of shadow zone arrivals. *J. Acoust. Soc. Am.* V. 129. No. 5. P. 2851–2862 (2011).

2. А. Л. Вировлянский, А. Ю. Казарова, Л. Я. Любавин. Статистическое описание эффекта проникновения звуковых волн в зону тени на тысячекилометровых трассах. Акустика океана. Доклады XIII-й школы семинара им. акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2011. С. 33-36.

2.8. Для не имевшего более 30 лет удовлетворительной интерпретации эффекта модуляции эндогенных сейсмических шумов лунно-солнечными приливами предложен физический механизм, связывающий эту модуляцию с влиянием приливных деформаций на уровень поглощения упругих волн в горных породах. Развита и на основе натуральных данных апробирована модель гигантской тензочувствительности диссипации упругих волн в сухих и флюидонасыщенных породах. Дано объяснение наблюдаемому уровню приливной модуляции шумов и ряду специфических особенностей этого явления в преддверии сильных землетрясений, прежде всего, эффекту стабилизации фазы приливной модуляции сейсмических шумов, что указывает на обоснованную возможность использования этого эффекта как эмпирического признака предстоящего землетрясения.

Авторы: В.Ю. Зайцев, Л.А. Матвеев (Институт прикладной физики РАН), В.А. Салтыков (Камчатский филиал геофизической службы РАН)

Аннотация. Для не имевшего более 30 лет удовлетворительной интерпретации эффекта модуляции эндогенных сейсмических шумов лунно-солнечными приливами предложен физический механизм, связывающий эту модуляцию с влиянием приливных деформаций на уровень поглощения упругих волн в горных породах [1,2,4,7,8]. Развита и на основе натуральных данных апробирована модель гигантской тензочувствительности диссипации упругих волн в сухих и флюидонасыщенных породах [2,3,5,6,8,9]. Предлагаемое объяснение основано на полученном заключении о том, что приливные деформации достаточны для того, чтобы заметно (на величину порядка 10%) менять декремент поглощения горных пород из-за наличия в них «мягких» включений (трещин, контактов), на которых деформация может быть локально многократно повышена по сравнению со средним значением в среде. Роль таких мягких дефектов учитывается во многих известных моделях, описывающих нелинейно-упругие и диссипативные свойства структурно-неоднородных горных пород, однако чаще всего обсуждаются нелинейность гистерезисного типа. По физической природе такая пороговая нелинейность не должна эффективно проявляться при деформациях, характерных для приливов и тем более шумов, имеющих еще значительно меньшие амплитуды. В [1, 2, 4, 7–9] обращается внимание на непороговый и негистерезисный механизм амплитудно-зависимого поглощения, основанный на совместном влиянии упругой нелинейности мягких дефектов и локализованных на них линейных по происхождению потерь (термоупругого или вязкостного происхождения – в случае флюидонасыщенных трещин). В обоих случаях показана принципиальная важность наличия в содержащихся в породе трещинах внутренних полосковых контактов [2, 3, 5, 6, 8, 9]. Анализ показал, что предлагаемый механизм приливной модуляции является достаточно грубым по отношению к распределению параметров трещин, причем для его работоспособности достаточно очень небольшой (порядка процента и даже менее) доли трещин с необходимыми геометрическими особенностями [2]. Предложенный механизм позволяет дать объяснение ряду экспериментально обнаруженных особенностей приливной модуляции высокочастотных сейсмических шумов, выявленных в ходе многолетних наблюдений на Камчатке: (I) глубина модуляции порядка первых процентов, (II) стабилизация фазы модуляции в период, предшествующий сильному землетрясению, (III) часто отмечаемое почти скачкообразное изменение фазы на противоположную после прохождения землетрясения, (IV) последующий период относительной нестабильности фазы,

(V) временное доминирование компоненты модуляции на второй гармонике приливного воздействия в окрестности момента землетрясения [2]. Для наиболее устойчиво отмечающегося практически перед всеми сильными землетрясениями эффекта стабилизации фазы модуляции может быть дано следующее объяснение: в результате накопления перед землетрясением сильных и не меняющих знак напряжений обеспечивается стабилизация положения релаксационного максимума на оси частот относительного наблюдаемой компоненты сигнала. Напротив, после снятия накопившегося напряжения в результате землетрясения остающиеся фоновые напряжения и деформации, хотя и заметно превышающие приливные, некоторое время не являются стабильными и могут существенно менять не только величину, но и знак. Следствием этого должна быть нестабильность положения релаксационного максимума и, соответственно, нестабильность фазы модуляции, как пояснено выше. Схематично эффект противофазной модуляции декремента на разных склонах релаксационной кривой проиллюстрирован на Рис.1. Всё это указывает на обоснованную возможность использования эффекта стабилизации фазы приливной модуляции сейсмических шумов как эмпирического признака предстоящего землетрясения. Полученные результаты расширяют представления о механизмах высокой тензочувствительности диссипативных свойств структурно-неоднородных материалов.

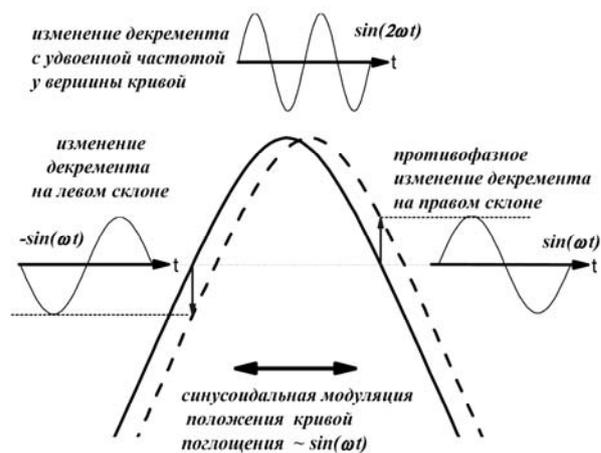


Рис. 1. Схематическое пояснение противофазного изменения декремента по разные стороны от максимума релаксационной кривой при её периодическом смещении под действием приливных деформаций. В силу почти нулевой производной вблизи максимума при любом направлении его смещения знак изменения декремента одинаков, в связи с чем в этой области в модуляции поглощения преобладает вторая гармоника.

Публикации

1. В.Ю. Зайцев, В.А. Салтыков, Л.А. Матвеев. О связи приливной модуляции сейсмических шумов с амплитудно-зависимыми потерями в горных породах // Акуст. журн. 2008. Т. 54, № 4, 621-628.
2. В.Ю. Зайцев, В.А. Салтыков, Л.А. Матвеев, Модуляция высокочастотных сейсмических шумов приливными деформациями: особенности эффекта перед сильными землетрясениями и предлагаемый физический механизм // Физика Земли, 2011, № 11, 3-17.
3. V.Yu. Zaitsev, L.A. Matveev, Giant strain-sensitivity of acoustic energy dissipation in solids containing dry and saturated cracks with wavy interfaces // JASA, 2011 (в печати).
4. В.Ю. Зайцев, В.А. Салтыков, Л.А. Матвеев «Негистерезисные амплитудно-зависимые потери в геоматериалах и модуляция сейсмических шумов приливными деформациями» // Сборник Трудов XIX сессии Российского акустического общества. Т. 1. М.: ГЕОС, 2007, 324-227.
5. В.Ю. Зайцев, Л.А. Матвеев «О высокой чувствительности акустической диссипации к малым деформациям в упругом материале, содержащем флюидонасыщенные трещины с волнистыми поверхностями» // Сборник Трудов XXII сессии Российского акустического общества. 2010. Т. 1. С. 175-179.
6. В.Ю. Зайцев, Л.А. Матвеев «О высокой чувствительности акустической диссипации к малым деформациям в упругом материале, содержащем сухие трещины с

волнистыми поверхностями» // Сборник Трудов XXII сессии Российского акустического общества, 2010, Т. 1. С. 179-183.

7. Салтыков В.А., Зайцев В.Ю., Кугаенко Ю.А., Матвеев Л.А., Патонин А.В. «К разработке физической модели приливного воздействия на сейсмическую эмиссию» // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений. Пятая международная конференция. С. Паратунка, Камчатский край, 2-7 августа 2010 г. Сборник докладов. Петропавловск-Камчатский: ИКиР ДВО РАН, 2010. С. 428-431.

8. V. Zaitsev, V. Saltykov and L. Matveev, Nonhysteretic Nonlinear Losses at Intergrain Contacts in Rocks: Application to Tidal Modulation Phenomena in Seismics, In: Nonlinear acoustics - fundamentals and applications, 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics (ISNA 18), Stockholm, Sweden 7 – 10 July 2008, AIP conference proceedings (Melville, New York, 2008), 421-424.

9. Yu. Zaitsev, L.A. Matveev “Giant strain-sensitivity of local acoustic dissipation near inner wavy contacts in dry and fluid-saturated cracks” AIP Conference Proceedings - International Congress on Ultrasonics 2011, 5 — 8 September 2011 Gdansk, Pol.

2.9. Предложен и апробирован метод определения глобальной частоты грозовых разрядов облако-земля по статистическим характеристикам естественного электромагнитного шума в полосе частот 1-30 Гц. Полученная оценка частоты разрядов облако-земля $10 \div 30 \text{ с}^{-1}$, в $3 \div 5$ раз меньшая характерной частоты регистрируемых на ИСЗ оптических вспышек, согласуется с известным средним соотношением между частотой разрядов «облако-Земля» и внутриоблачных разрядов. Показано, что последовательная во времени активизация грозовых центров сопровождается увеличением частоты разрядов, но не их средней мощности. Предложенный метод позволяет оперативно измерять количественные характеристики молниевой активности в глобальной токовой цепи и оценивать ее отклик на внешние воздействия, такие как форбуш-понижения потока космических лучей во время солнечных вспышек.

Авторы: В.В. Клименко, Ю.В. Шлюгаев, А.Г. Вяткин

Аннотация. Число разрядов из всей совокупности грозовых облаков на Землю в единицу времени является важным параметром, характеризующим ЭДС глобальной электрической цепи, а также мощность генератора электромагнитного шума в полости Земля-ионосфера. Подсчет молний с орбиты ИСЗ по числу оптических вспышек включает все разряды, в том числе более многочисленные внутриоблачные и междуоблачные, тогда как основными генераторами ЭДС и электромагнитного шума являются разряды облако-Земля.

Авторами был предложен и опробован метод детектирования глобального числа грозовых разрядов на Землю по статистическим характеристикам естественного э.м. шума, наблюдаемого в полосе 1-30 Гц. Исходя из вида эмпирической плотности вероятности мгновенных значений шума, имеющей близкое к нормальному распределение в области малых значений (менее $\sim 2 \cdot \text{с}$, где s^2 – эмпирическая дисперсия) и медленно спадающие «хвосты» в области больших значений (более $2 \div 3 \text{ с}$), задана двухкомпонентная модель источника шума в виде суммы нормального шума и импульсного шума, состоящего из случайной последовательности экспоненциально затухающих радиоимпульсов со случайными амплитудами и фазами. В рамках заданной модели получено аналитическое выражение для плотности вероятности мгновенных значений шума, параметрами которого являются дисперсия нормальной компоненты σ_N^2 , средний квадрат амплитуды импульсов a_0 и плотность импульсов $\nu = n \cdot \tau_0$, (n – число импульсов в единицу времени, $\tau_0 = 2/\Delta\omega$ – характерная длительность импульса, равная времени экспоненциального затухания и определяемая по ширине спектрального пика). Параметры модели оптимизированы с помощью процедуры минимизации невязки между

эмпирическим и расчетным распределениями. В результате обработки экспериментальных данных (данные ELF приемников на полигоне Новая Жизнь, Нижегородская обл.) получено: 1) плотность импульсов ν и интенсивность нормального шума σ_N имеют характерный суточный ход, обусловленный последовательной во времени активизацией грозových центров (азиатского, африканского и американского); 2) отсутствует суточная вариация амплитуды импульсов a_0 , что может быть интерпретировано, как увеличение в грозových центрах лишь частоты разрядов, но не их средней мощности; 3) оценка числа разрядов на Землю дает значения $n \sim 10 \div 30 \text{ с}^{-1}$, которые в 3÷5 раз меньше характерного числа детектируемых на ИСЗ оптических вспышек ($50 \div 100 \text{ с}^{-1}$), что согласуется с известным соотношением между числом разрядов «облако-Земля» и «облако-облако». Можно предположить, что источником нормального шума являются именно внутриоблачные и междуоблачные разряды, менее эффективные для возбуждения шумановских резонансов (из-за малости вертикальной компоненты токов), но более многочисленные, для которых при плотности $\nu \sim 10$ распределение нормализуется. Целью предложенного метода является получение счетной характеристики молниевой активности и оценка мощности генератора глобальной токовой цепи. Он также может быть полезен при исследованиях отклика глобальной токовой цепи на внешние воздействия, такие например, как форбуш-понижения потока космических лучей во время солнечных вспышек, в периоды которых происходит глобальная модуляция электрической проводимости атмосферы, так как позволяет проследить наличие или отсутствие соответствующей модуляции ЭДС. Это является важным дополнением к большинству работ на эту тему, где исследуется только отклик электрических характеристик атмосферы в областях хорошей погоды, т.е. в области нагрузки в терминах электрических цепей.

Публикации

1. А.Г. Вяткин, В.В. Клименко, Ю.В. Шлюгаев. Статистические характеристики электромагнитного шума в резонаторе «Земля-ионосфера» // VI Российская конференция по атмосферному электричеству. 1-7 октября 2007 г. Нижний Новгород. Сборник трудов. Нижний Новгород. 2007. С. 46-47.

2. А.Г. Вяткин, В.В. Клименко, Ю.В. Шлюгаев. Детектирование планетарного числа молний на основе статистического анализа характеристик электромагнитного шума в диапазоне шумановских резонансов // PGI-09-01-125. Physics of Auroral Phenomena. 32nd Annual Seminar. Abstracts. 3-6 March 2009. Apatity. 2009. P. 81-82.

3. V.V. Klimenko, Yu.V. Shlyugayev, A.G. Vyatkin. Planetary number of lightnings detection by the statistical analysis of the electromagnetic noise in the Schumann band characteristics // Physics of Auroral Phenomena. Proc. XXXII Annual Seminar. Apatity, 2009. P. 154-157.

4. V.V. Klimenko, Yu.V. Shlyugayev, A.G. Vyatkin. Detection of the global cloud-to-ground lightning number by the statistical analysis of electromagnetic noise in the Schumann resonance band // Proc. XIV Int. Conf. on Atmos. Electr. ICAE2011, Rio de Janeiro, Brazil, Aug 2011.

5. E.A. Mareev, Yu.V. Shlyugaev, V.V. Klimenko. Statistical properties of lightning discharge // Atmospheric research (accepted).

2.10. Экспериментально выявлена корреляция между типами симметрии и направлением главных осей тензоров упругости и магнитной восприимчивости образцов некристаллических метаморфических и осадочных горных пород. Наличие такой корреляции позволяет предположить наличие одного и того же источника возникновения анизотропии магнитных и акустических характеристик – текстуры горной породы. Для

образцов поликристаллических горных пород в отсутствии сторонних сил выраженная трехосная акустическая анизотропия позволяет судить о наличии и степени разрушения, вызванного тектоническими нагрузками.

Авторы: А.В. Лебедев, В.В. Бредихин (Институт прикладной физики РАН), Ю. С. Бретштейн (Институт тектоники и геофизики ДВО РАН)

Аннотация. Выполнено комплексное экспериментальное исследование, целью которого было установление связи между магнитными и акустическими характеристиками метаморфических осадочных горных пород. По предварительной договоренности между авторами для исключения субъективности акустические измерения тензоров модулей упругости исследованных материалов проводились при отсутствии информации о месте происхождения, геологическом описании и, тем более, магнитных свойствах образцов. Акустические измерения позволили сгруппировать материалы по типу анизотропии. Последующее сопоставление с геологическим описанием показало четкую корреляцию акустических характеристик с генезисом материала образцов. Так, например, статистически изотропный материал с относительно малой величиной внутренних механических потерь представлял собой метаморфическую горную породу, подвергшуюся за время своего существования сильному термическому воздействию (отжигу), что привело к стиранию внутренних дефектов. Поперечно-изотропные материалы представляли собой либо осадочную породу, формировавшуюся в условиях спокойного осадконакопления, либо породу, испытавшую за свою историю перекристаллизацию в условиях высокого давления недр Земли. В первом случае наличие оси внутренней симметрии однозначно связано с направлением силы тяжести в момент седиментации, а в последнем случае перекристаллизация привела к стиранию внутренних дефектов и образованию текстуры, подобной геометрии кристаллитов, образующих горную породу. Образцы с ярко выраженными тремя осями и сравнительно высоким уровнем механических потерь предположительно имеют большую плотность упорядоченных внутренних дефектов (трещины и расслоения), что указывает на тектоническое воздействие на соответствующие материалы, когда наряду с силой тяжести присутствовали поперечные (сдвиговые) силы. Последовавшее сравнение полученных акустических данных с данными измерений тензора магнитной восприимчивости позволило утверждать следующее. Во-первых, направления главных осей тензоров модулей упругости и магнитной восприимчивости совпадают с точностью несколько градусов. Во-вторых, количество осей внутренней симметрии (одна, три или отсутствие для изотропного материала) одинаково как для тензора модулей упругости, так и для тензора магнитной восприимчивости. Это позволило обоснованно предположить наличие одного и того же источника возникновения анизотропии магнитных и акустических характеристик – текстуры горной породы. В дальнейшем этот факт может быть использован для организации диагностики напряженного состояния метаморфических горных пород по их магнитным характеристикам.

Публикации

1. Лебедев А.В., Бредихин В.В., Бретштейн Ю.С. О соотношении упругой анизотропии и анизотропии магнитной восприимчивости горных пород / Препринт №784 ИПФ РАН, Нижний Новгород, 2009, 22 с.
2. Andrey Lebedev, Vladimir Bredikhin, and Yuri Bretshtein On the correlation between the acoustic anisotropy and the magnetic susceptibility anisotropy of the rocks // JASA 2010. V. 128(4). Pt. 2. P. 2424.

3. Лебедев А.В., Бредихин В.В., Бретштейн Ю.С. Корреляция анизотропии упругих и магнитных свойств метаморфических горных пород / Труды 24-й сессии Российского акустического общества. Москва: ГЕОС. 2011. Т. 1. С. 284-288.

4. Лебедев А.В., Бредихин В.В., Бретштейн Ю.С. О возможной корреляции упругой анизотропии и анизотропии магнитной восприимчивости осадочных и метаморфических горных пород // Акустический Журнал (2012, Т.58(2), принята к публикации).

2.11. Создан комплекс технических средств для исследования вибрационных и акустических характеристик сложных механоакустических систем для судостроительной, авиационной и строительной областей. Аппаратура комплекса обеспечивает формирование когерентного поля возбуждения (до 256 каналов) и синхронные измерения акустического давления и виброускорения при размерах исследуемого объекта порядка сотен метров. Цифровое управление, сбор данных и синхронизация в рамках локальной сети с интерфейсом Ethernet реализует динамическое управление типом возбуждения, регистрацию, анализ и наблюдение в реальном времени за вибрационным и акустическим полем в диапазоне до 20кГц. Комплекс включает до 512 пьезоакселерометров с интерактивным контролем измерительных трактов и до 1024 гидрофонов, как одиночных приемников, так и гидрофонов антенных систем, в том числе цифровых. Комплекс в различных вариантах комплектования использован для целей акустического проектирования, отработки алгоритмов апертурного синтеза, создания систем активного гашения, разработки и контроля характеристик гидроакустического оборудования.

Авторы: Артельный В.В., Артельный П.В., Балалаев А.Я., Кибардин Г.А., Кияшко Б.В., Коротин П.И., Соков А.М., Соков Е.М., Харитонов А.В., Циберев А.В., Чащин А.С.

Аннотация. В состав комплекса входят многоканальные системы синхронного возбуждения и регистрации сигналов вибрационного и акустического полей в частотном диапазоне до 20 кГц. Сбор данных, возбуждение и их синхронизация, синхронизация разнесенных в пространстве устройств обеспечиваются в рамках интерфейса Ethernet. Программное управление комплекса позволяет выбирать произвольные типы и режимы возбуждения, формирует оперативное отображение и визуализацию полей. Комплекс укомплектован датчиками вибраций, акустическими антеннами и гидрофонами, блоками ввода и коммутаторами собственной разработки.

Комплекс использован в процессе:

- исследования влияния конструктивных особенностей на виброакустические характеристики изделий;
- отработке диагностических алгоритмов контроля;
- верификации математических моделей и численных методов расчета виброакустических характеристик;
- измерений эффективности виброизоляции движительных комплексов и пространственно развитых трехмерных конструкций;
- измерения силы цели и других характеристик вторичного поля;
- эффективности звукопоглощающих покрытий;
- разработке методов прогноза внешнего поля по измерениям в ближнем поле и на поверхности объекта;
- апертурного синтеза;
- апробации адаптивных методов измерений и обнаружения;
- определения вклада отдельного механизма в общее шумовое поле объекта и поиска источников виброактивности.

Публикации

1. Иваненков А.С., Коротин П.И., Д.А. Орлов, А.А. Родионов, Турчин В.И. Пеленгация источников тонального сигнала с использованием движущихся приёмных антенных решёток // Гидроакустика, 2011, вып.14, № 2.

2. Коротин П.И., Салин Б.М., Салин М.Б., Соков Е.М., Суворов А.С. Расчет рассеяния звука на трехмерных упругих телах и верификация результатов математического моделирования // Труды X всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: «Наука», 2010. С. 347-350.

3. П.В. Артельный, П.И. Коротин, А.М. Соков, Е.М. Соков, А.С. Суворов. Экспериментальная реализация метода поиска источников виброактивности и эксплуатационных дефектов в сложных конструкциях.// Акустический Журнал, Т. 57, № 1, с. 10-19, 2011.

4. В.В. Ткалич, А.М. Соков, М.Б. Емельянов Разработка многоканального генератора ШИМ-сигнала на базе микросхемы с программируемой логикой // Труды X Всероссийской конференции "Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики" (ГА-2010). С. 140-143, СПб.: «Наука», 2010.

2.12. Исследованы возможности диагностики ветрового волнения с помощью средств подводного видения. Разработаны модели случайной реализации и статистических характеристик изображения взволнованной морской поверхности, наблюдаемой из-под воды в условиях естественного освещения. Показано, что обработка изображений солнечной дорожки, которая образуется в результате преломления прямого света Солнца на морской поверхности, позволяет наряду с дисперсиями уклонов и кривизны поверхности определять коэффициенты пространственной и временной корреляции ее уклонов, а, следовательно, и коротковолновую часть спектра ветрового волнения. Найдены алгоритмы определения указанных характеристик по подводной солнечной дорожке и проведена их апробация с использованием данных численного и натурального экспериментов. Тем самым создана методическая основа для использования донных оптических датчиков в качестве средства контроля поверхностного волнения на мелководье.

Авторы: А. А. Мольков, Л. С. Долин

Аннотация. Возможность определения характеристик ветровых волн по оптическим изображениям водной поверхности достаточно широко используется при проведении научных океанологических экспериментов и для решения задач дистанционного мониторинга природных водоемов. По изображению солнечной дорожки восстанавливается функция распределения уклонов и кривизны поверхности, оценивается скорость и направление приводного ветра, определяются параметры длинных волн. Наблюдение поверхности в рассеянном свете неба (вне зоны солнечных бликов) дает информацию о спектрально-энергетических характеристиках волнения, позволяет обнаруживать пленки поверхностно-активных веществ (в том числе нефтяные загрязнения) и изучать динамические процессы в верхнем слое океана (неоднородные течения, внутренние волны) по их проявлениям на морской поверхности. Указанные возможности реализуются с помощью оптических систем наблюдения, размещенных на летательных аппаратах, на борту судна или надводной платформе.

Нами был предложен и исследован новый метод измерения характеристик ветровых волн, который основывается на регистрации и анализе “просветных” изображений морской поверхности, получаемых с помощью средств подводной

видеосъемки. Разработка указанного метода открывает возможности для мониторинга состояния водной поверхности с помощью донных оптических датчиков.

В публикациях, посвященных этому методу, приводятся:

- математическая модель случайной реализации подводного изображения взволнованной морской поверхности, применимая при произвольных условиях освещения; модель описывает структуру двух основных элементов изображения – подводной солнечной дорожки, которая образуется в результате преломления прямого света Солнца на случайно-неровной границе раздела воздух-вода, и искаженного волнением круга Снеллиуса (подводного изображения небосвода);

- модель статистически среднего (накопленного) изображения подводной солнечной дорожки;

- модель пространственно-временной корреляционной функции изображения солнечной дорожки;

- алгоритмы определения функции распределения и дисперсии уклонов поверхности по накопленному изображению подводной солнечной дорожки;

- алгоритмы определения коэффициента пространственной корреляции уклонов и дисперсии кривизны поверхности по функции пространственной корреляции флуктуаций яркости подводной солнечной дорожки;

- алгоритм определения коэффициента временной корреляции уклонов поверхности по функции корреляции флуктуаций видимой яркости ее заданного элемента;

- результаты компьютерной и экспериментальной проверки части указанных алгоритмов, которые подтверждают перспективность использования средств подводного видения для дистанционной диагностики ветрового волнения.

Публикации:

1. A.A. Molkov, L.S. Dolin. Determination of wind wave parameters by sea surface image observed from under water // Proceeding of V International Conference “Current Problems in Optics of Natural Waters”, St. Petersburg – 2009.

2. А.А. Мольков, Л.С. Долин. Информативные свойства подводной солнечной дорожки // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2009. Т.52, № 1, С. 36-45.

3. A.A. Molkov, L.S. Dolin. The underwater image of the sea surface as the source of information of wind waves // Proceeding of VI International Conference “Current Problems in Optics of Natural Waters”, St. Petersburg – 2011.

4. А.А. Мольков, Л.С. Долин. Подводное изображение морской поверхности как источник информации о ветровом волнении // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана (принята в печать).

2.13. Предложены метод измерения 3-х мерных пространственно-временных спектров поверхностного волнения и схема расчета частотно-угловых характеристик акустической поверхностной реверберации тональных сигналов. Работоспособность и точность метода измерений, основанного на анализе видеоизображения поверхности с заякоренными вешками, и схемы расчета проверены при проведении одновременных измерений спектров волнения и параметров реверберации. Предложенная схема измерений и расчета обеспечивает оперативную прогнозную оценку уровня помех тонально-импульсным бистатическим гидролокаторам диапазона 400 – 2000 Гц, работающим в режиме доплеровского выделения цели. Обнаружена слабая зависимость уровня помех от скорости ветра, что объясняет высокую эффективность бистатического наблюдения с тональной подсветкой акватории и упрощает разработку подобных систем.

Авторы: Бородина Е.Л., Салин Б.М., Салин М.Б.

Аннотация. Для тонально-импульсных гидролокаторов, использующих доплеровский принцип выделения рассеянного сигнала, основным мешающим фактором является рассеяние звуковых тонального импульса на движущихся с различными скоростями ветровых волнах. Поэтому возможность выполнения расчета спектра реверберации, обусловленной ветровыми волнами, позволяет сделать оценку дальности действия гидролокатора при различных скоростях движения рассеивателя и определить в совокупности с другими данными оптимальные частоты локации.

В гидроакустике хорошо исследованы и доведены до практического применения вопросы, связанные с энергетической оценкой рассеяния акустического сигнала на ветровом волнении.

Так, например, для расчета локально силы цели (СЦ) $\sigma_{loc}^2(f)$ обратного рассеяния 1 м^2 взволнованной поверхности на рабочей частоте локации f используется формула Марша - Шулкина

$$\sigma_{loc}^2(f)_{dB} = -36 + 40 \lg(\text{tg } \bar{\chi}) \quad (1)$$

Здесь $\bar{\chi}$ - среднее значение угла захвата волновода. Зависимость СЦ от частоты акустического сигнала отсутствует из-за разнонаправленной степенной зависимости от f эффективности рассеяния акустических волн и амплитуды колебания ветрового волнения.

В приближении Рэлея для однородных волноводов нами были найдены относительно простые схемы расчета спектра реверберации на различных дистанциях от тонального источника, основанные на брегговской модели рассеянии и использовании информации о 3-х мерных пространственно-временных спектрах волнения.

Найденные схемы расчета позволяют преобразовывать трехмерные спектры волнения $G^2(\mathbf{K}, \Omega)$ (здесь \mathbf{K} - волнового вектора волнения, Ω - циклическая частота волнения) в частотно-угловые характеристики реверберации.

В частности для условий мелкого моря с глубинами H найдено выражения для спектра реверберационного сигнала в произвольной точке однородного пространства \mathbf{r}_o .

$$p_{norm}^2(\mathbf{r}_o, f, \Omega) = \frac{2\pi^2 k^2 r_o}{H^3 \chi_*} \sum_{m,n} \frac{\sin^2(\chi_m) \cdot \sin^2(\chi_n)}{\cos(\chi_m) \cdot \cos(\chi_n)} \cdot \int_S \frac{G^2(-\text{sign}\Omega \cdot \mathbf{K}_{m,n}(\mathbf{r}), |\Omega|)}{r |\mathbf{r} - \mathbf{r}_o|} ds \quad (2)$$

Здесь $\mathbf{K}_{m,n}(\mathbf{r}) = k_m \frac{\mathbf{r}}{r} + k_n \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_o}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_o|}$, \mathbf{r} , - переменная интегрирования, определяющие координаты областей рассеяния на поверхности S , $r = 0$ – местоположение излучателя, а f – его рабочая частота ($f = kC/2\pi$), $k_m; k_n$ - продольные волновые числа, соответствующие «модовым» углам $\chi_m; \chi_n$.

Для режима моностатической локации получено выражение для спектра сигнала рассеянного на одном кв. метре поверхности, в которое входит сечение 3-х мерного спектра волнения на удвоенной пространственной частоте акустического сигнала $\mathbf{K}_{m,n}(\mathbf{r}) \approx 2k(\mathbf{r}/r)$

$$\sigma_{loc}^2(\mathbf{r}/r, f, \Omega) = 9^{-1} (k)^4 \sin^2(\chi_M) \sin^2(\chi_N) \cdot G^2(-\text{sign}\Omega \cdot 2k \frac{\mathbf{r}}{r}, |\Omega|) \quad (3)$$

Здесь \mathbf{r}/r - азимутальное направление при котором оценивается спектральная характеристика локальной силы цели рассеяния.

Как видно из представленных выражений, основной зависимостью, определяющей реверберацию, является трехмерный спектр волнения. Нами была найден способ и возможность его измерения непосредственно в процессе проведения акустических испытаний, основанный на видеонаблюдении за взволнованной поверхностью с расположенными на ней «оптическими» вешками [1].

Публикации

1. Бородина Е.Л., Салин М.Б. Оценка пространственно-временных характеристик поверхностного волнения по видеоизображению. // Изв. РАН. ФАО. 2010. Т. 46. № 2. С. 263-273.
2. Бородина Е.Л., Салин Б.М. Оценка влияния поверхностного волнения на спектральные характеристики тональных сигналов, распространяющихся на стационарных трассах в мелком море // Акуст. журн. 2010. Т. 56, № 5. С. 633-641.
3. Салин Б.М., Салин М.Б. Методы и схемы расчета основных параметров реверберации, обусловленных рассеянием низкочастотных акустических волн на ветровом волнении с известными пространственно-временными характеристиками // Акуст. журн. 2011. Т. 57, № 6. С. 818–827.
4. Salin B.M., Salin M.B., Spindel R.C. Investigation of the Influence of Wind Waves on the Spectral and Angular Characteristics of Sea Surface Reverberation from a CW Source // Proceedings of OCEANS 2010. Seattle, USA, 2010.
5. Borodina E.L., Salin B.M., Salin M.B. Estimating the surface reverberation and the wind wave characteristics from the video image of the sea surface // Proc. of 10th European Conf. on Underwater Acoustics (ECUA-2010), Istanbul, Turkey, V. 3, 2010. P. 1619-1625.
6. Borodina E.L., Salin B.M. Low-frequency bistatic scattering by surface wind waves. Measurements and Modeling // Proc. of the 10th European conf. on underwater acoustics (ECUA-2010), July 5-9, 2010, Istanbul, Turkey. 2010. V. 3. P. 1347-1355.
7. Salin B.M., Salin M.B., Spindel R.C. Frequency and angular (vertical and azimuthal) characteristics of reverberation of low-frequency tonal signals (200–300 Hz) in shallow water due to wind waves // J. Acoust. Soc. Am. 2011. V. 129, No. 4. Pt. 2. P. 2510(A).
8. Salin B.M., Salin M.B., Spindel R.C. Reconstruction of reverberation levels based on measured surface roughness: Theory and experiment. // J. Acoust. Soc. Am. 2011, v. 129, No. 4. Pt. 2, p. 2510(A).
9. Salin M.B., Borodina E.L., Salin B.M. Calculations of reverberation levels and patterns, based on measured surface roughness field: theory and experiment // Proc. of Forum Acusticum 2011. Aalborg, Denmark. P. 2519-2514.
10. Салин Б.М., Салин М.Б., Spindel R.C. Расчет спектра реверберационной помехи для доплеровской схемы локации // Акуст. журн. 2011 г. [в печати].

2.14. Предложен и реализован расчетно-экспериментальный метод определения вклада отдельных механизмов в вибрационное и акустическое поле сложных конструкций. Метод основан на измерении вибраций в наборе точек на пути распространения колебательной энергии от работающего механизма и дальнейшем расчете динамических сил и внешнего поля с помощью численной суперэлементной модели конструкции. Метод сохраняет работоспособность при наличии наведенных сторонними источниками вибраций, превышающих собственные уровни механизма. Экспериментальная реализация показала работоспособность метода в случае, когда вклад рассматриваемого механизма меньше суммарного внешнего поля на величину до 20 дБ, а также устойчивость метода к погрешностям численной модели и ограничению количества контрольных точек для распределенных схем крепления механизма.

Авторы: Артельный П.В., Суворов А.С.

Аннотация. Оценка вклада отдельного механизма в общее вибрационное и акустическое поле объекта может быть произведена в случае, когда известны силы, действующие на фундамент со стороны работающего механизма и коэффициенты передачи, связывающие данные силы и оцениваемый параметр (вибрации в некоторой

точке конструкции, акустическое поле во внешней среде, и т.д.). Действующую на фундамент силу можно оценить по перепаду вибраций на амортизации механизма, а для коэффициента передачи от фундамента во внешнее акустическое поле использовать простейшую модель, например, модель дипольного излучения силы. Однако такой способ оценки весьма груб и непригоден во многих случаях: во-первых, при наличии на фундаменте наведенной вибрации, создаваемой другими механизмами; и, во-вторых, для сложных и многоопорных схем крепления механизма.

Предложенный метод определения вклада отдельного источника, также как и описанная выше оценка, использует измерения вибраций в наборе контрольных точек на поверхности контакта механизма и фундамента. Новизна рассматриваемого подхода заключается в использовании численной суперэлементной модели (СЭМ) конструкции и совместной обработке экспериментальных и расчетных данных. СЭМ используется для определения импедансных характеристик фундамента, механизма и системы его виброизоляции. Совокупность измеренных и численных данных позволяет провести определение вклада внутренних источников механизма в действующую на фундамент силу независимо от наличия на фундаменте наведенной сторонними источниками вибрации. Необходимые коэффициенты передачи от найденных сил во внешнее поле также определяются с помощью СЭМ.

Экспериментальная апробация метода проведена на масштабной модели энергетической установки, представляющей собой агрегатную сборку, соединенную с остальной частью сложной оболочечной конструкции посредством пространственно-распределенной системы виброизоляции в виде балочных опор. По результатам экспериментов установлено:

- для оценки вклада внутренних источников во внешнее акустическое поле даже при отсутствии локальных опор и связей источника с несущими конструкциями достаточно небольшого числа контрольных точек на фундаменте (~25).

- достигнутая точность оценки внешнего акустического поля в третьоктавных полосах составляет 3...6 дБ и реализуется в ситуации, когда вклад отдельного источника на 15...20 дБ меньше общего поля конструкции.

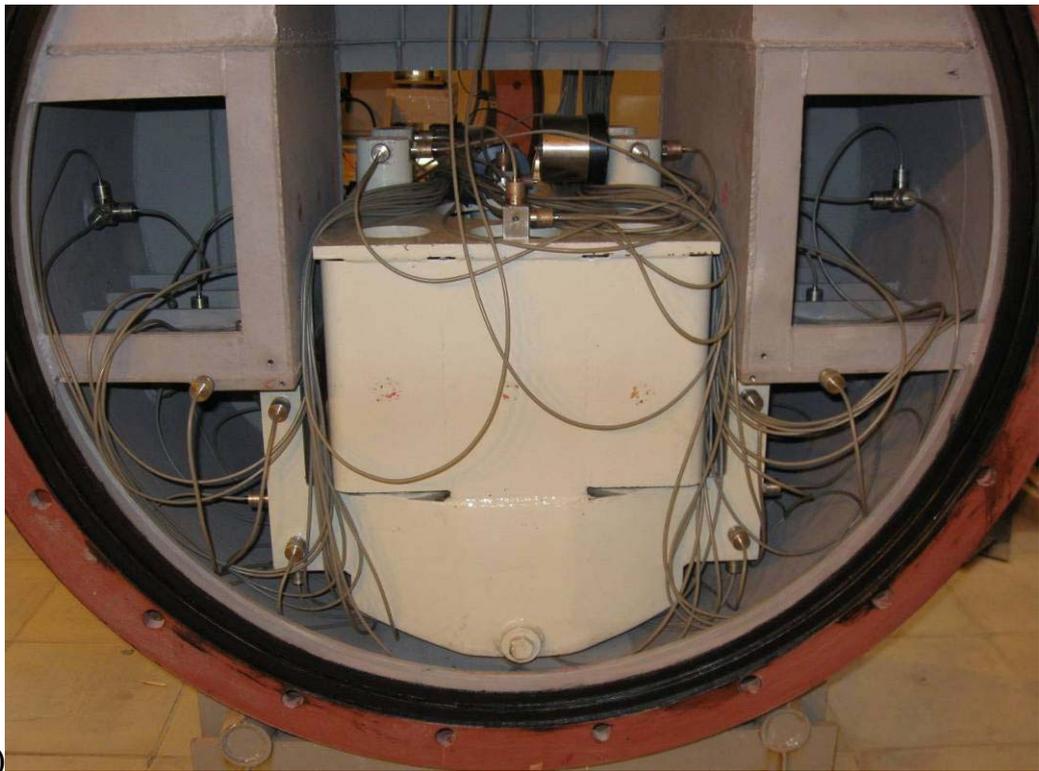
Публикации

1. М.Б. Салин, Е.М. Соков, А.С. Суворов. Численный метод исследования акустических характеристик сложных упругих систем на основе суперэлементов и аналитических граничных условий // Гидроакустика, 2011г., Вып.14, №2.

2. В.В. Артельный, П.И. Коротин, А.С. Суворов. Определение вклада источника в вибрационное и акустическое поле сложной механоакустической системы // Сборник трудов XIX сессии российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2007. Т. 3. С. 227-231.

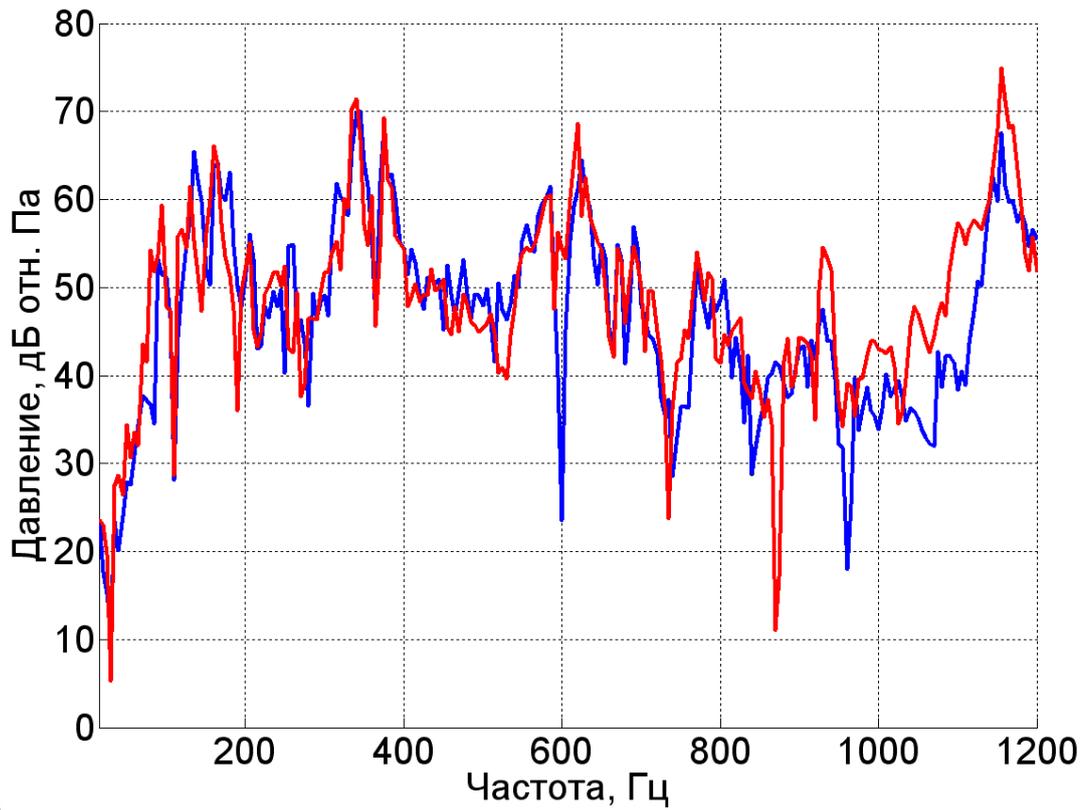


а)

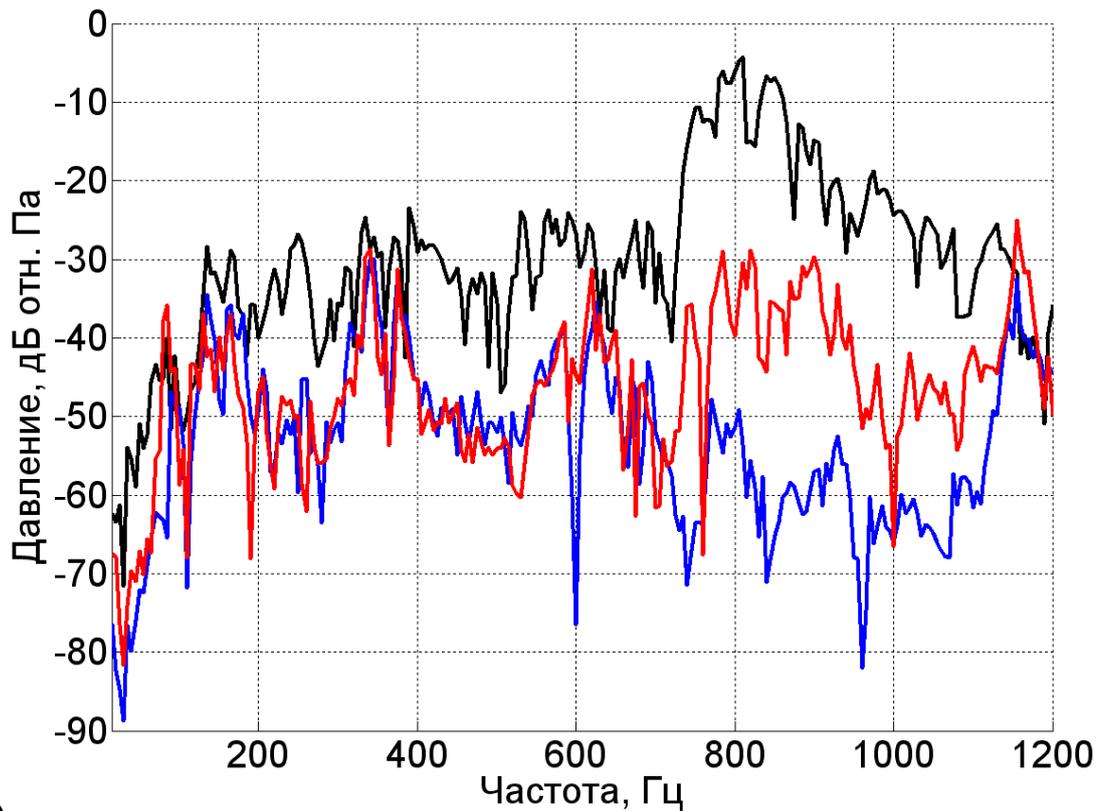


б)

Рис. 1. Фотографии макета конструкции (а) и входящего в ее состав механизма (б), вклад которого во внешнее акустическое поле определялся в ходе экспериментальной отработки метода.



а)



б)

Рис. 2. Результат эксперимента по определению вклада механизма в излученное акустическое поле. Амплитудно-частотная характеристика акустического поля в двух ситуациях: *а* – суммарное поле определяется исследуемым механизмом, *б* – суммарное поле определяется совокупностью источников, сторонние механизмы вносят большой вклад. Черная кривая – полное поле, синяя кривая – вклад рассматриваемого механизма, красная кривая – прогноз вклада механизма по предложенному методу.

2.15. Предложен и экспериментально апробирован в мелком море метод сканирования гидроакустических систем с использованием для фокусировки по дальности и глубине обращения времени широкополосных сигналов пробного источника. Метод использует для обращения разложение сигнала пробного источника по выбранному модовому спектру с известными дисперсионными соотношениями и направлен на уменьшение числа пробных источников для обеспечения согласованного приема. Работоспособность метода проверена в эксперименте в мелком море глубиной 125 м на дистанции 17.5 км с использованием разложения по сплошному спектру мод идеального волновода. При полосе частот сигнала от 100 до 300 Гц сечение сформированной фокальной области не превышает 10 метров по глубине на 50 метров по дальности, что практически соответствует экспериментально измеренным размерам фокальной области пробного источника по глубине и только втрое больше по дальности. Сканирование фокального пятна без значительных искажений обеспечивается по всей глубине волновода и в пределах нескольких сотен метров по дальности. Применение метода позволит уменьшить необходимое количество постановок пробных источников не менее чем в 40 раз.

Авторы: В.А. Зверев, П.И. Коротин, А.Л. Матвеев, А.А. Стромков

Аннотация. Предложенный в середине 90-х годов прошлого столетия метод временного обращения акустических сигналов (TRM) позволяет достаточно просто обеспечить повышение эффективности гидроакустических систем за счет эмпирического согласования со средой. Вместе с тем, поскольку такое согласование достигается только для области среды, в которой располагается пробный источник (ПИ), использование предложенного метода оказывается ограничено в виду технической невозможности применения большого числа ПИ. Продольный размер фокального пятна (рис. 1а)

$$\Delta_r \approx \frac{2H^2}{\lambda m^2},$$

где H – толщина волновода, λ – средняя длина волны сигнала, m – число распространяющихся мод. Вертикальный размер фокального пятна:

$$\Delta_z \approx \frac{H}{m}.$$

Эти оценки для приведенного эксперимента дают вертикальный размер при 10 модах порядка 10м, продольный размер около 42м (волновод 125 м, источник сигнала точечный на глубине 50 м, полоса частот 100-300 Гц, дистанция 17,5 км). Таким образом, для создания одного вертикального барьера надо не менее 12 пробных источников, что ограничивает возможности применения обращения времени ограниченным рядом приложений (например, при акустической передаче данных в океане или в ряде медицинских применений). В системах активного зондирования мелководных районов океана (локационных приложениях), где применение временного обращения сулит наибольшие выгоды, именно малые размеры (продольные и вертикальные) фокального пятна не позволяют эффективно контролировать большие акватории. Возможным путем преодоления этой проблемы является перефокусирование ГАС с обращением времени, заключающееся в синтезе пробного сигнала для нового положения на основе реально принятого сигнала пробного источника. Перефокусировку может обеспечить использование согласованной со средой обработки (MFP- Match Field Processing). Самостоятельное использование MFP не позволяет фокусировать ГАС на большие расстояния, поскольку для реализации расчетных алгоритмов нужен большой объем информации о параметрах среды. В то же время, при фокусировке ГАС на большое расстояние с помощью обращения времени, перефокусирование с помощью MFP позволяет обеспечить при одном пробном источнике за большой акваторией.

Предложенный метод позволяет по принятому сигналу пробного источника определить модовый состав сигнала, используя простую аналитическую модель идеального изоскоростного волновода [1]. Затем, используя полученное эмпирическое разложение, трансформировать модовый спектр пробного сигнала для смещенной точки по дистанции и глубине [2-4] по известным дисперсионным соотношениям модельного волновода. Алгоритмы такого подхода описаны в [5-7].

Основным условием реализации предложенного подхода к рефокусировке является возможность разделения мод по дисперсии на выходе согласованного фильтра. Это накладывает определенные требования на среднюю частоту, полосу частот используемого сигнала ПИ и дистанцию, на которой расположен ПИ. Естественно, частотный диапазон ограничен снизу критическими частотами мод. Простые оценки дают два условия, накладываемые на частоту сигнала и дистанцию, где моды можно разделить:

$$R > \frac{2f^2 H^2}{\delta f c}, \quad f > \frac{cm}{4H},$$

где R – дистанция, на которой разрешаются соседние моды, H – толщина волновода, f – частота сигнала, δf – полоса сигнала, c – скорость звука, m – номер обращаемой моды.

Проверка работоспособности метода была проведена с использованием данных эксперимента выполненного в мелком море. Глубина моря составляла 125м, средняя дистанция 17.5 км. Полоса частот сигнала лежала от 100 до 300 Гц. Фокусировался точечный источник, расположенный на глубине 50м. В этом случае моды можно разделить на расстояниях более 5 км и все моды распространяются.

На рис. 1а приведено изображение фокального пятна, при фокусировке этого источника в описываемом волноводе на дистанции 17.5 км и с использованием принятого сигнала пробного источника. На рис. 1б приведена фокусировка с использованием синтезированного с использованием предложенного алгоритма пробного источника. На рис. 1в показан результат фокусировки экспериментальных данных на другой пробный источник, смещенный на 100 м по дистанции и 12 м по глубине относительно первого ПИ. Результат рефокусировки на синтезированный источник представлен на рис. 1в. Новый пробный источник был реконструирован на основе измеренного модового спектра пробного источника, модифицированного с использованием предложенного алгоритма. Для оценки эффективности фокусировки применялся критерий, названный фактором фокусировки равный отношению амплитуды в точке фокусировки к среднеквадратичному значению поля вне фокального пятна.

Использование предлагаемого подхода позволяет обойтись без подробного исследования характеристик среды и большого количества тестовых измерений с пробным источником.

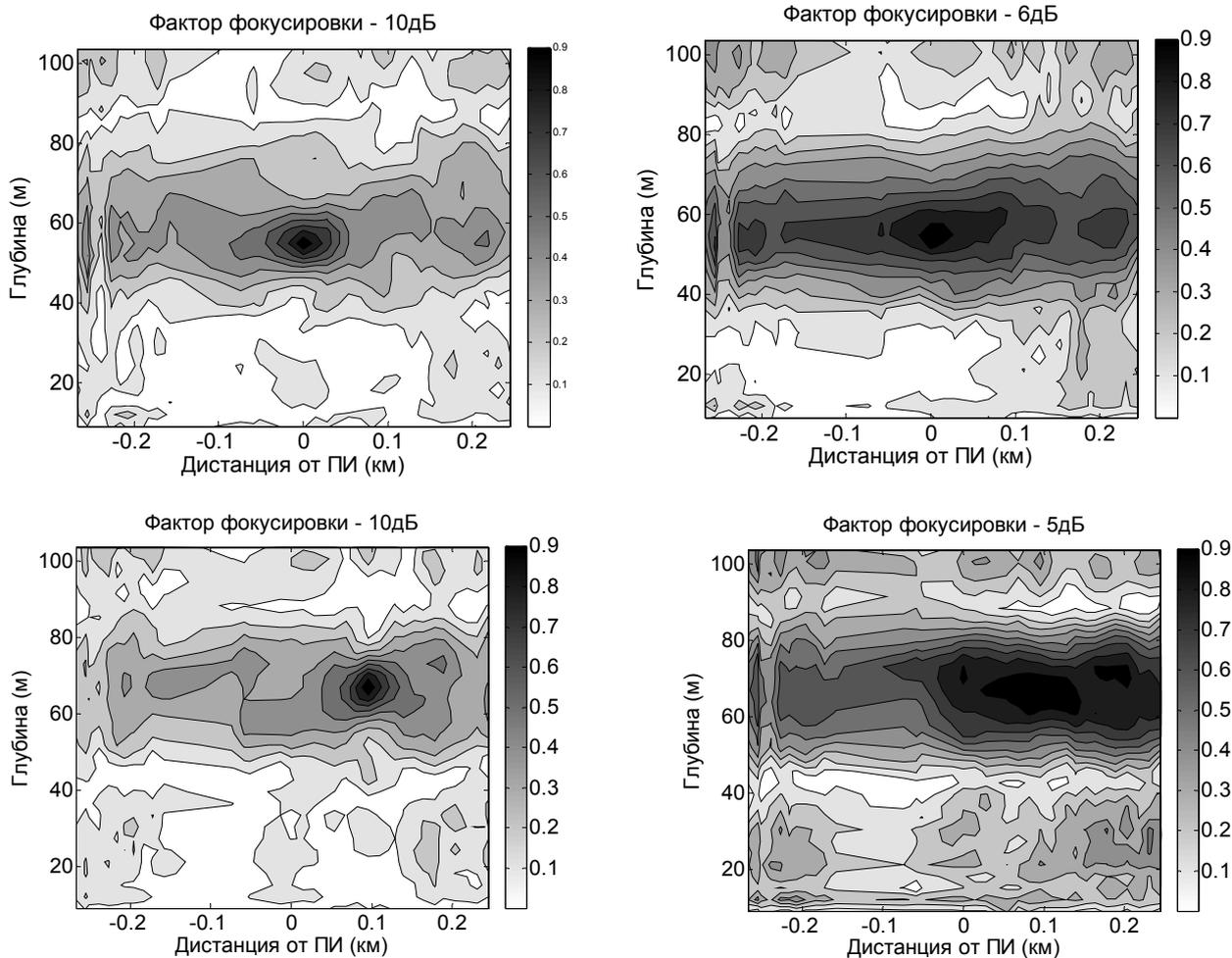


Рис. 1. Вид фокального пятна: *а* – результат измерений пятна фокусировки в точку пробного источника (ПИ), *б* – фокусировка на синтезированный ПИ, *в* – результат фокусировки на ПИ смещенный относительно на 100 м по дистанции и 12 м по глубине, *г* – рефокусировка на синтезированный ПИ, смещенный на 100 м, по дистанции и 12 м по глубине.

Публикации

1. В.А. Зверев, Б.М. Салин, А.А. Стромков, А.И. Хилько. Селекция мод мелкого моря в натуральных измерениях с использованием модели Пеккериса моря // Доклады XI научной школы-семинара акад. Л.М.Бреховских «Акустика океана», совмещенной с XVII сессией РАО: М.: ГЕОС, 2006, с. 82-85.
2. А.А. Стромков. Анализ подходов к перефокусировке антенн, использующих обращение времени // Акустические измерения и стандартизация. Электроакустика. Ультразвук и ультразвуковые технологии. Атмосферная акустика. Акустика океана. Сборник трудов XIX сессии Российского акустического общества. Т. 2. – М.: ГЕОС, 2007, с. 340-342.
3. В.А. Зверев, А.А. Стромков. Рефокусировка гидроакустических систем, использующих обращение времени в мелком море. // Труды Нижегородской конференции по радиофизике, ННГУ, 2009.
4. В.А. Зверев, П.И.Коротин, А.А. Стромков Выделение мод в мелком море путем их обращения. // Акустический журнал, 2009, т. 55, № 6, с. 754-761.
5. В.А. Зверев, П.И.Коротин, А.Л. Матвеев, А.А.Стромков. Измерение параметров моды реального волновода. // Акустический журнал, 2010, т. 56, № 2, с. 230-244.

6. В.А. Зверев, П.И. Коротин, А.Л. Матвеев, А.А. Стромков. Дисперсионный и угловой анализ акустических мод в мелком море // Акустический журнал, 2010, т. 57, № 1, с. 75-84.

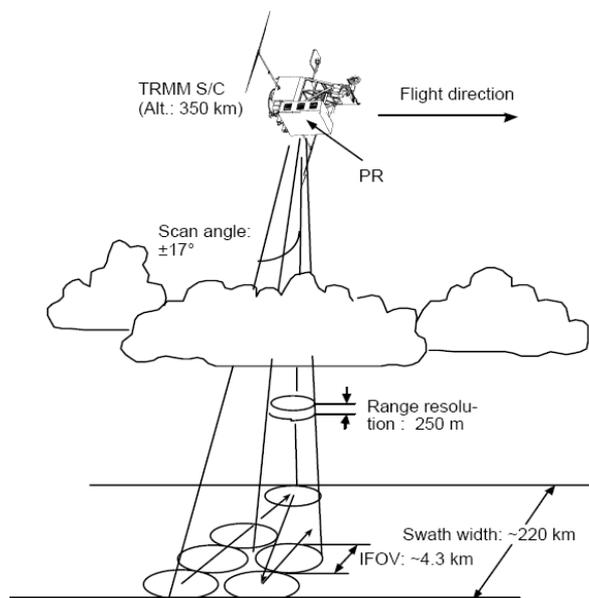
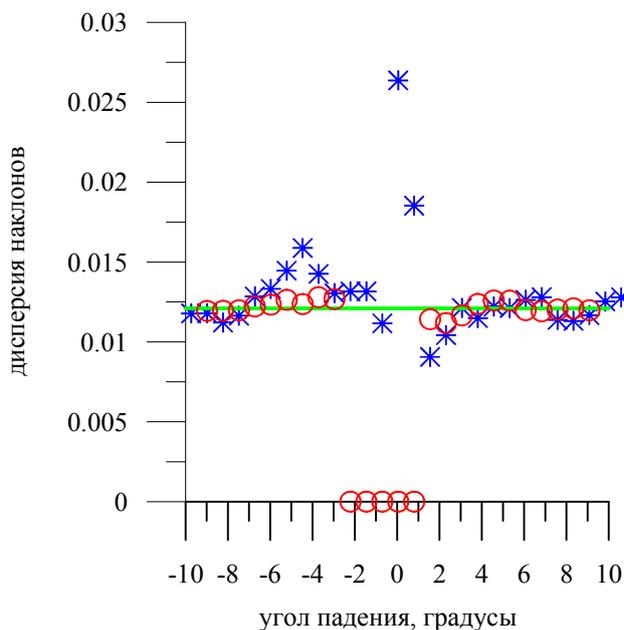
7. В.А.Зверев, А.А. Стромков. Экспериментальное исследование эффективности рефокусировки систем обращения времени в мелком море // Доклады XIII научной школы-семинара академика Л.М. Бреховских "Акустика океана", совмещенной с XXIII сессией Российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2011, с. 53-56.

2.16. Впервые предложена и апробирована корректная процедура восстановления статистических характеристик ветрового волнения в океане и скорости ветра по данным дождевого радиолокатора (PR-радиолокатора). Продемонстрирована работоспособность нового однопараметрического алгоритма восстановления дисперсии наклонов по удельному эффективному поперечнику рассеяния, измеряемого радиоальтиметром при зондировании в надир.

Авторы: В. Караев, М. Каневский, М. Панфилова, Е. Мешков, Г. Баландина (ИПФ РАН), К. Чу (Институт океанологии Китайской Академии наук, Циндао).

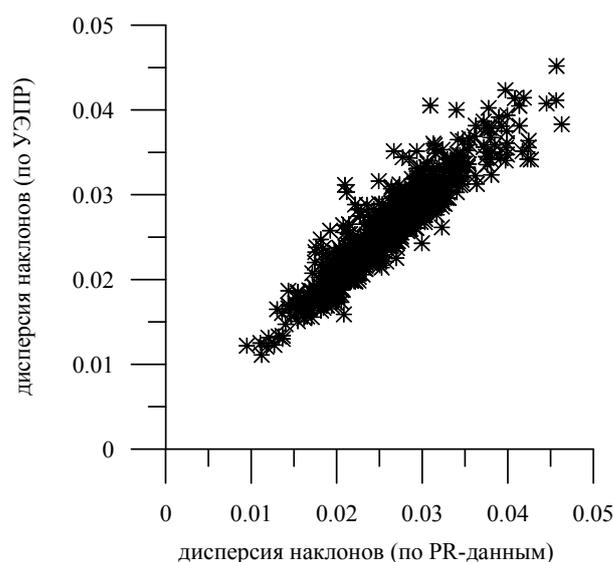
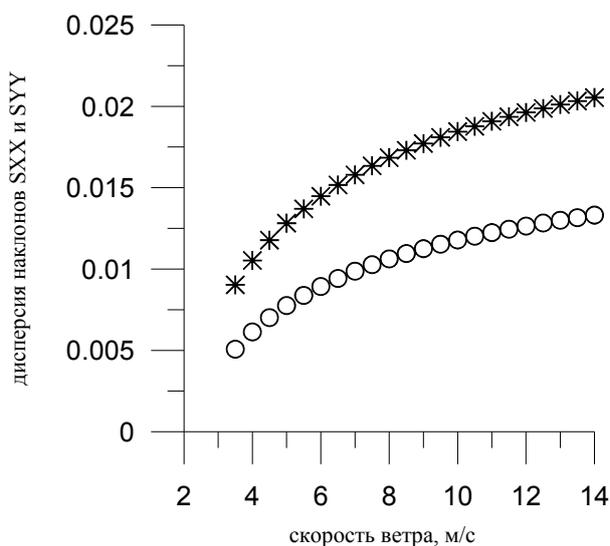
Аннотация. Разработана процедура обработки данных дождевого радиолокатора (PR-радиолокатора), основанная на применении двух независимых алгоритмов для измерения дисперсии наклонов крупномасштабного волнения, что впервые позволяет удалять недостоверные значения и, таким образом, контролировать точность восстановления.

В результате проведенной обработки PR-данных была построена зависимость дисперсии наклонов крупномасштабного волнения (длина волны радиолокатора 0,021 м) от скорости ветра для случая полностью развитого ветрового волнения и



получена зависимость граничного волнового числа от скорости ветра для модельного спектра волнения.

Выполненный анализ зависимости дисперсии наклонов крупномасштабного волнения и сечения обратного рассеяния от скорости ветра показал, что сечение обратного рассеяния при надирном зондировании сильнее коррелирует с дисперсией наклонов, чем со скоростью ветра. Предложен эффективный однопараметрический алгоритм восстановления дисперсии наклонов по удельному эффективному поперечнику рассеяния (УЭПР), измеряемого радиоальтиметром при нулевом угле падения.



Публикации

1. Караев В.Ю., Каневский М.Б., Мешков Е.М., К.Чу, Восстановление дисперсии наклонов крупномасштабного волнения по данным PR радиолокатора, Восьмая всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", Москва, ИКИ РАН, 15-19 ноября 2010, Тезисы докладов, с. 186.

2. В.Ю. Караев, М.А. Панфилова, Г.Н. Баландина, К. Чу, «Восстановление дисперсии наклонов морских волн по радиолокационным измерениям в СВЧ-диапазоне», Исследование Земли из космоса, выйдет 2012, № 2.

2.17. Разработан и экспериментально апробирован новый перспективный метод акустического наблюдения в прибрежных районах океана – пучковая импульсная томография. Метод основан на использовании вертикальных излучающих и приемных антенных решеток и совместной обработке формируемых в подводном канале сложно-модулированных импульсных сигналов в виде согласованных с волноводом пучков. Разработаны физическая модель метода и программно-алгоритмический комплекс с интерфейсом управления и представления данных, позволяющие оптимизировать томографическую систему для конкретных районов мелкого моря, а также управлять ее потенциалом во время работы. Работоспособность метода подтверждена натурными экспериментами, выполненными в прибрежных морских акваториях.

Авторы: А.И. Хилько, И.П. Смирнов, А.И. Малеханов (Институт прикладной физики РАН), А.А. Хилько (ННГУ им. Н.И. Лобачевского), В.Н. Кравченко, А.В. Гринюк, А.Т. Трофимов, М.М. Тихомиров (ФГУП НИИ «Атолл»), В.В. Коваленко (Научный совет по комплексной проблеме «Гидрофизика» при Президиуме РАН)

Публикации

1. Смирнов И.П., Хилько А.И., Хилько А.А. Томографическое наблюдение пространственно локализованных неоднородностей мелкого моря вертикальными приёмными решётками при зондировании фокусированным высокочастотным акустическим полем. I. Структура имитационной модели // Известия вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 2. С.134-148.

2. Смирнов И.П., Хилько А.И., Хилько А.А. Томографическое наблюдение пространственно локализованных неоднородностей мелкого моря вертикальными приёмными решётками при зондировании фокусированным высокочастотным акустическим полем. II. Исследование эффективности наблюдения // Известия вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 3. С. 192-207.

3. Лазарев В.А., Мазанников А.А., Неронов А.Н., Хилько А.А. Экспериментальная оценка параметров сферы, с помощью высокочастотно модулированных гидроакустических импульсов // Акустический журнал. 2009. Т. 55, № 2. С. 198-207.

4. А.В. Гринюк, В.Н. Кравченко, В.В. Коваленко, А.Т. Трофимов, О.И. Трусова, А.А. Хилько, А.И. Малеханов, А.И. Хилько. Эксперименты по возбуждению и приему когерентных высокочастотных акустических сигналов в мелководном районе морского шельфа // Акустический журнал. 2011. Т. 57, №. 4. С. 485-494.

5. А.В. Гринюк, В.Н. Кравченко, В.В. Коваленко, А.Т. Трофимов, О.И. Трусова, А.А. Хилько, А.И. Малеханов, А.И. Хилько. Высокочастотное акустическое наблюдение неоднородностей в мелком море с неровным дном в присутствии сильной реверберации // Акустический журнал. 2011. Т. 57. №. 5. С.642-648.

2.18. Исследована динамика и статистика ансамблей интенсивных нерегулярных однонаправленных волн на поверхности глубокой воды в приложении к проблеме «волн-убийц» на основе численного моделирования и результатов лабораторных экспериментов. Для разнообразных начальных условий показано существование 2-х качественно различных режимов эволюции, зависящих от соотношения интенсивности волн и ширины спектра, определяемых индексом модуляционной неустойчивости. При больших индексах модуляционной неустойчивости ансамбль волн эволюционирует в квазиравновесное состояние с более широким спектром через стадию «обострения», которая сопровождается повышенной вероятностью возникновения экстремальных волн и определяется возникающими корреляциями в спектре. В случае малого индекса переходной стадии не найдено, и эволюция параметров системы происходит плавно.

Авторы: А.В. Сергеева, А.В.Слюняев (Институт прикладной физики РАН), Л. Шемер, Д. Либерзон (Tel-Aviv Univ., Израиль)

Аннотация. Проведенные численные и лабораторные исследования по проблеме морских «волн-убийц» базируются на едином подходе – т.н. «стохастическом моделировании» или «прямом моделировании», являющемся аналогом метода Монте-Карло. В нем моделируется эволюция квазислучайных реализаций поля волн с последующим осреднением данных по ансамблю. Как следствие, в отличие от кинетических теорий, в рамках стохастического моделирования не используются дополнительные предположения на поля волн (в частности, гипотеза случайности и независимости фаз). Лабораторные данные были получены в 300-метровом канале Ганноверского университета в рамках международной кооперации.

Начальное условие во всех экспериментах задается как суперпозиция синусоидальных волн, удовлетворяющая заданной форме спектра, со случайными фазами. Далее рассматривалась эволюция волн в пространстве (в рамках лабораторных экспериментов и сопоставительного численного моделирования в рамках приближенных моделей) или во времени (в рамках приближенных численных моделей, а также исходных уравнений гидродинамики). Результаты, полученные в рамках различных моделей и лабораторных измерений, сопоставлены, и выделены различия и пределы применимости приближенных моделей.

Рассмотрены волны разной интенсивности и различные профили начальных спектров: модельные узкие спектры, а также спектр JONSWAP. Найдено две качественно

различных области начальных параметров: когда не наблюдается заметного изменения волновой системы и когда имеется существенная изменчивость ширины спектра, статистических моментов смещения поверхности, функции распределения вероятностей высот волн. На больших временах волновая система приходит в квазиравновесное состояние.

Случай сильной эволюции волновых полей возникает при достаточно интенсивных волнах либо достаточно узком спектре и связывается с действием модуляционной неустойчивости волн. В этих случаях показано возникновение фазовых корреляций в энергонесущей части спектра, демонстрирующих присутствие нелинейных волновых групп. Длительность неравновесной стадии соответствует характерному времени 4-волновых нелинейных взаимодействий волн. В это время наблюдаются максимально высокие волны и значения эксцесса, что говорит о большей вероятности экстремальных волн (стадия «обострения»).

В случае широкого спектра JONSWAP с небольшими значениями пиковатости переходной стадии с «обострением» не найдено, эволюция параметров системы происходит плавно. В лабораторных экспериментах замечен эффект обужения спектра за счет большего затухания волн малых масштабов.

Использование численного моделирования позволило рассмотреть длительную эволюцию волн, а привлечение данных лабораторных экспериментов – верифицировать модели и рассмотреть случаи очень интенсивных волн (без существенного обрушения), а также случаи волн с эпизодическим обрушением.

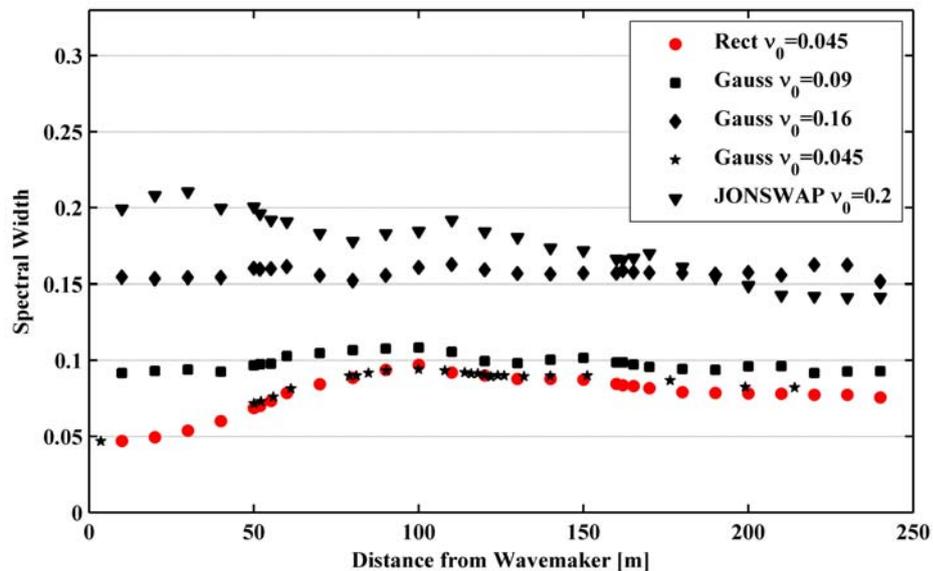


Рис. 1. Эволюция ширины усредненного спектра, наблюдавшаяся в лабораторных экспериментах для волновых систем с одинаковой характерной амплитудой волн и разными начальными профилями и ширинами v_0 спектров

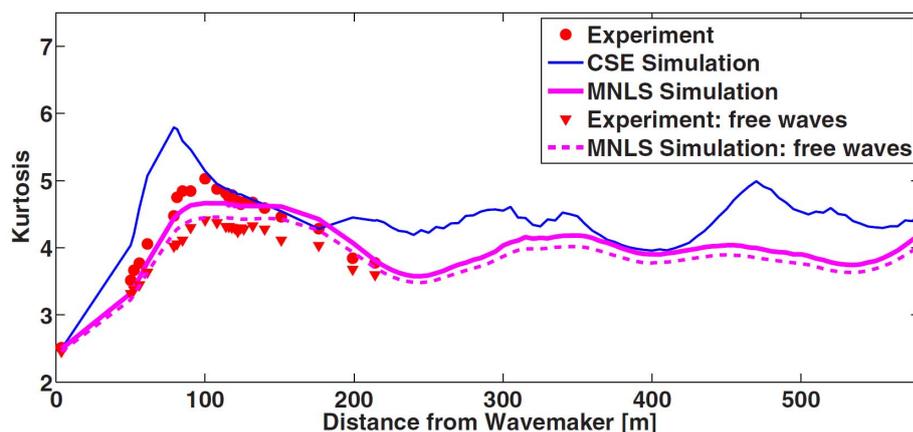


Рис. 2. Зависимости эксцесса (четвертого статистического момента) смещения поверхности воды от дистанции по данным лабораторного эксперимента (кружки; по выделенной компоненте свободных волн – треугольники) и численного моделирования (сплошная тонкая линия – НУШ, сплошная толстая линия – МНУШ, пунктир – по компоненте свободных волн в МНУШ)

Публикации

1. L. Shemer, A. Sergeeva, *J. Geophys. Res. Oceans* (2009).
2. L. Shemer, A. Sergeeva, A. Slunyaev, *Phys. Fluids* (2010).
3. L. Shemer, A. Sergeeva, D. Liberzon, *J. Geophys. Res. Oceans* (2010).
4. A. Slunyaev, *Eur. Phys. J. Special Topics* (2010).
5. А.В. Слюняев, А.В. Сергеева, *Письма в ЖЭТФ* (2011 в печати)
6. L. Shemer, A. Sergeeva, A. Slunyaev, Proc. Workshop “Rogue Waves 2008”;
7. A.V. Slunyaev, A.V. Sergeeva, E.N. Pelinovsky, In: *Marine Technology and Engineering* (Taylor & Francis, 2011, In Press);
8. A. Slunyaev, In: *Nonlinear and Complex Dynamics* (Springer Science+Business Media, 2011)

2.19. Определено преимущество синтеза апертуры с использованием антенных систем и криволинейных траекторий движения при пассивной локации тональных источников. Показано, в частности, что при прямолинейном движении антенной решетки при скорости малой относительно скорости звука возможна оценка четырех параметров (частота, пеленг, дистанция, продольная скорость) источника, в то время как при синтезе с одиночным приемником эта задача, как известно, решения не имеет. Для криволинейной траектории возможна одновременная оценка пяти параметров, включая поперечную скорость, даже в случае одиночного приемника. На основе границы Крамера-Рао определены зависимости точности оценок от длины траектории, частоты сигнала, размера приемной апертуры и т.п. Эффективность предложенного метода продемонстрирована в серии натуральных экспериментов с движением антенной решетки по прямой и окружности.

Авторы: В.В. Артельный, П.В. Артельный, А.С. Иваненков, П.И. Коротин, Д.А. Орлов, А.А. Родионов, В.И. Турчин

Аннотация. Задача пассивного апертурного синтеза, т.е. определение положения источника звука с помощью движущейся приемной системы, была исследована теоретически и экспериментально. В целом, пассивный апертурный синтез менее информативен, чем активный (когда определение координат источника производится с использованием лоцирующего сигнала), поскольку сигнал от источника обычно

неизвестен. В частности, использование единственного гидрофона не позволяет однозначно определить частоту и пеленг плоской волны. Тем не менее, было разработано несколько методов пассивного апертурного синтеза, таких как ЕТАМ (extended towed array measurements) [Stergiopoulos S., Sullivan E.J.], максимально правдоподобный оценщик [Nuttall A.H.], когерентное суммирование по диаграммам субапертур [Yen N.-C., Carey W.] и некоторые другие. Проведенные исследования, однако, ограничивались лишь случаем прямолинейного движения приемной системы. Кроме того, не рассматривалась ситуация, когда источник находится на конечном расстоянии от приемной системы, и одновременно с пеленгом должна оцениваться дистанция. Для заполнения этого пробела были проведены теоретические исследования возможностей апертурного синтеза в пассивной локации при одновременной оценке пяти параметров источника: частота, пеленг, дистанция, две компоненты скорости. Принципиальным моментом здесь явилось использование границы Крамера-Рао для получения аналитических выражений точности оценки разных параметров. Такой подход позволил определить качественные связи точности оценки неизвестных параметров и размеров физической и синтезируемой апертур, частоты источника, типа движения и т.п. Насколько известно, такой анализ был проведен впервые.

Показано, что при прямолинейном движении решетки точность оценки пеленга соответствует угловому разрешению решетки (ее движение не повышает точность определения угловой координаты), однако точность оценки дальности до источника повышается и соответствует длине траектории, пройденной решеткой, т.е. длине синтезированной апертуры. В этом случае может быть определена также тангенциальная компонента скорости источника при его равномерном и прямолинейном движении, в то время как радиальная компонента скорости источника не может быть определена однозначно. Если радиальная компонента отлична от нуля, ее игнорирование приводит к смещению оценок остальных параметров, однако им можно пренебречь при малом отношении скорости источника к скорости звука. Показано, что при движении даже одного приемного элемента по криволинейной замкнутой траектории (например, окружности) могут быть однозначно определены все параметры, характеризующие источник (частота, пеленг, дистанция, проекции скорости источника), причем точность оценок пеленга и дальности соответствует эффективной апертуре, примерно равной диаметру окружности. Для незамкнутой криволинейной траектории эта точность практически достигается для траектории в виде полуокружности.

Для апробации апертурного синтеза на Ладожском озере в 2009-2011 гг была проведена серия натурных экспериментов. Использовалась 32-элементная АР длиной ~6 м, закрепленная вдоль образующей упругой цилиндрической оболочки, моделирующей судно-носитель. Оболочка с АР буксировалась в подводном положении на глубине 5 м с помощью лебедки с фиксированными скоростями 0.14 м/с и 0.32 м/с. Излучатель, положение которого требовалось определить, помещался на различных расстояниях от центра траектории движения. Излучались тональные сигналы на различных частотах в диапазоне от 0.5 кГц до 5 кГц. В качестве помехи выступал фоновый шум озера. На рис.1 и 2 показаны результаты апертурного синтеза для случая, когда тональный источник с частотой 1500.08 Гц и полосой 10^{-3} Гц располагался на расстоянии около 120 м от центра траектории при скорости движения 0.32 м/с; длина траектории составляла примерно 100 м. Отношение сигнал/шум на отдельном гидрофоне в полосе 1 Гц составляло примерно 30 дБ. На рис.1 показано сечение функции неопределенности (ФН) в плоскости «частота – синус пеленга» для математической модели принимаемого сигнала в отсутствие шума (а) и для экспериментальных данных (б) в логарифмическом масштабе. Видно, что источник уверенно локализуется по пеленгу и частоте, а форма экспериментальной ФН близка к теоретической; это говорит о достаточной адекватности используемой модели принимаемого сигнала. На рис.2 показано пространственное сечение ФН (в декартовых координатах) для математической модели сигнала (а) и для

экспериментальных данных (б). Нулевое значение координаты X соответствует положению АР в начале движения. Видно, что источник уверенно локализуется в пространстве, а форма экспериментальной ФН в целом близка к теоретической.

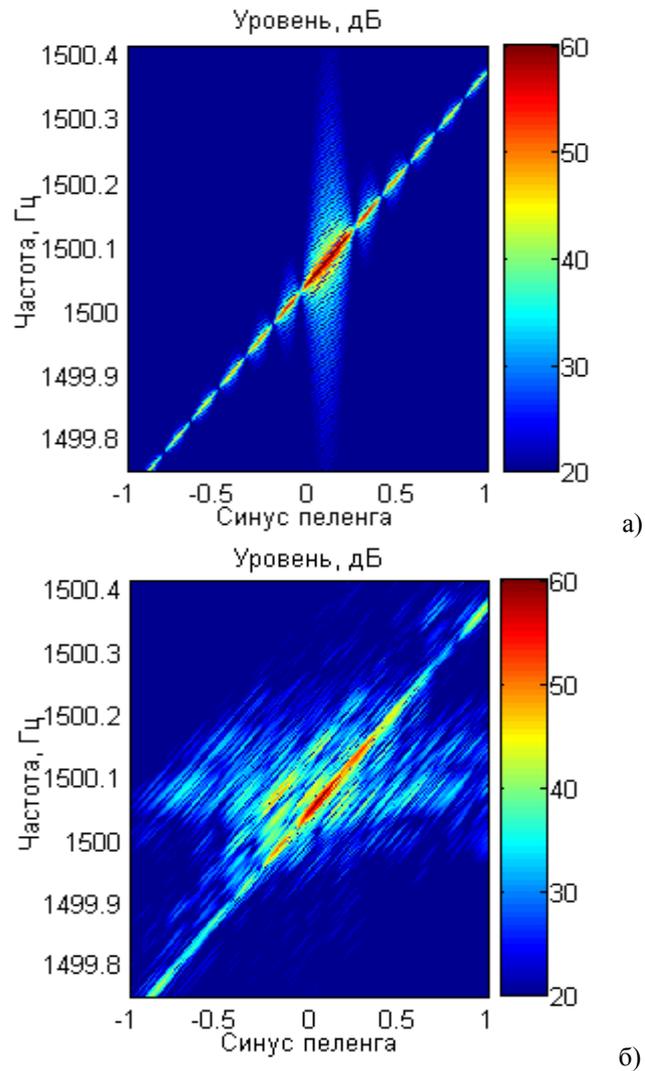


Рис. 1. Пример теоретической (а) и экспериментальной (б) ФН в зависимости от частоты и синуса пеленга в логарифмическом масштабе.

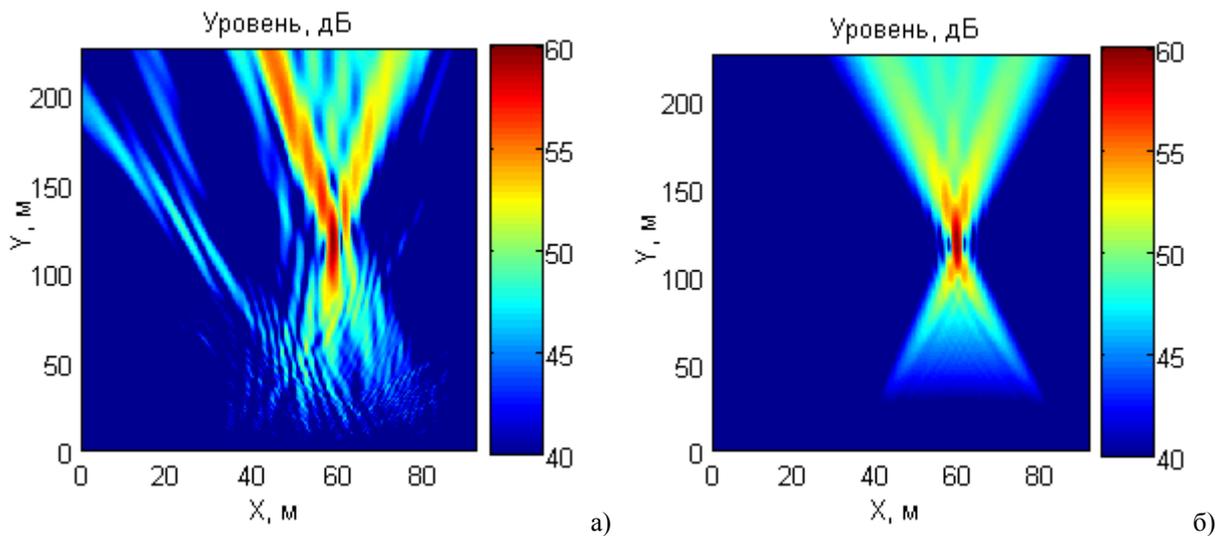


Рис. 2. Пример теоретической (а) и экспериментальной (б) ФН в декартовой системе пространственных координат в логарифмическом масштабе.

Помимо экспериментов с прямолинейным движением антенной решетки, проводились также эксперименты с движением по замкнутой траектории, близкой к окружности. При этом антенная решетка оставалась неподвижной, а для имитации её движение использовалось движение источника. Очевидно, что на практике невозможно обеспечить движение строго по окружности. При этом для реализации апертурного синтеза необходимо достаточно точно знать траекторию движения. Для её определения был предложен оригинальный метод, использующий излучаемый источником специальный тональный реперный сигнал с известной частотой. На рис.3. показана найденная таким способом траектория движения излучателя; там же показана оценка его траектории по данным GPS; как следует из рис.3, отклонение между этими оценками траектории вполне соответствует точности GPS.

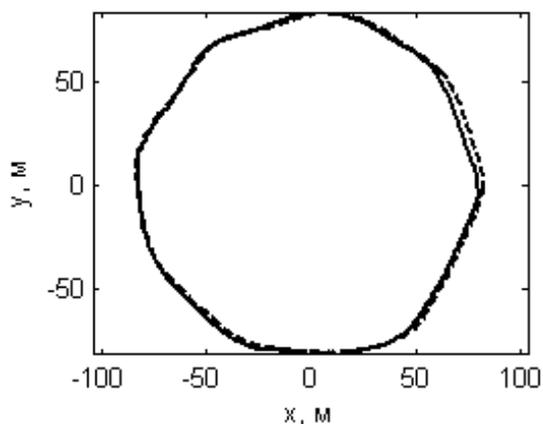


Рис. 3. Сравнение восстановленной траектории движения и траектории по GPS

После определения траектории может быть осуществлен собственно апертурный синтез. На рис.4 показаны теоретическая (слева) и экспериментальная (справа) функции неопределенности частота/пеленг для частоты 525.02 Гц. Видно, что источник уверенно локализуется, а функции неопределенности имеют сходную форму. Это говорит об адекватности используемой для апертурного синтеза модели траектории и метода её определения, а также показывает перспективность предложенного метода экспериментального исследования апертурного синтеза для произвольных замкнутых траекторий.

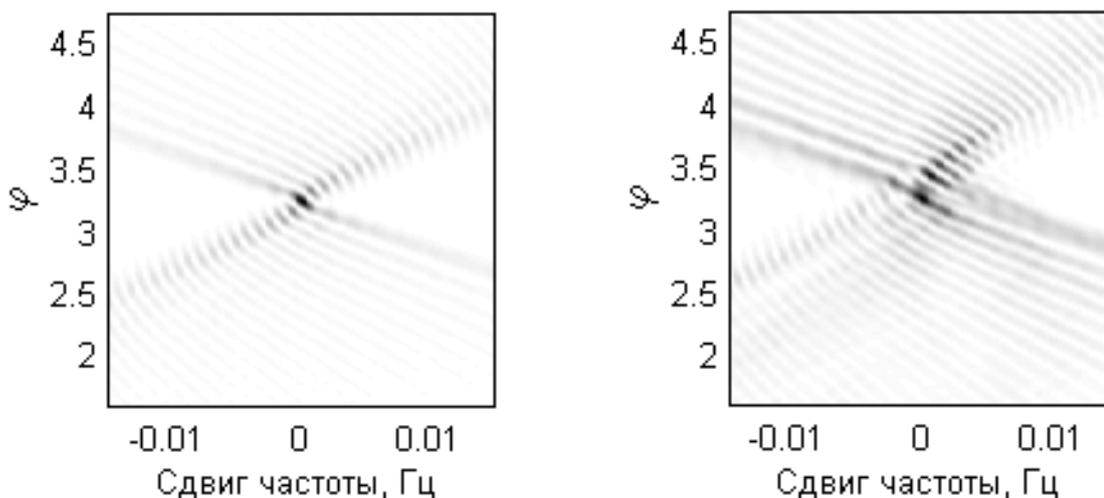


Рис. 4. Теоретическая (слева) и экспериментальная (справа) функции неопределенности частота/пеленг для частоты 525.02 Гц.

Приведенные экспериментальные результаты показывают работоспособность апертурного синтеза в натуральных условиях.

Публикации

1. Ivanenkov A.S., Korotin P.I., Orlov D. A., Rodionov A.A., Turchin V.I. Localization of a narrowband source using a moving horizontal array: Experimental results, Proceedings of Forum Acusticum 2011, Aalborg, Denmark, pp. 2509–2514.

2. Ivanenkov A.S., Korotin P.I., Orlov D. A., Rodionov A.A., Turchin V.I. On the ability to estimate frequency, bearing and range of a narrowband source using a moving horizontal array, Proceedings of Forum Acusticum 2011, Aalborg, Denmark, pp. 2825–2830.

3. Иваненков А.С., Коротин П.И., Орлов Д.А., Родионов А.А., Турчин В.И. Использование пассивного апертурного синтеза для определения координат тональных источников // Сборник трудов XXIV сессии Российского акустического общества. Т. 2. – М.: ГЕОС, 2011, с. 205–209.

4. Артельный В.В., Артельный П.В., Коротин П.И., Родионов А.А., Турчин В.И. Экспериментальное исследование локализации источника звука в случае движения приёмной системы по произвольной замкнутой траектории // Сборник трудов XXIV сессии Российского акустического общества. Т. 2. – М.: ГЕОС, 2011, с. 233–236.

5. Орлов Д.А. Определение положения неподвижного гидроакустического источника с помощью движущейся антенной решётки в реальном масштабе времени// Сборник трудов XXIV сессии Российского акустического общества. Т. 2. – М.: ГЕОС, 2011, с. 229–233.

6. Иваненков А.С., Коротин П.И., Д.А. Орлов, А.А. Родионов, Турчин В.И. Пеленгация источников тонального сигнала с использованием движущихся приёмных антенных решёток // Гидроакустика, вып. 14, № 2.