

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

## 2. Отделение гидрофизики и гидроакустики

**2.1.** Разработаны физические основы адаптивного метода наблюдения морского дна и подводных объектов через взволнованную морскую поверхность, позволяющего уменьшить искажения изображения, обусловленные преломлением света на границе раздела вода-воздух (рефракционные искажения). Идея нового метода наблюдения заключается в одномоментной регистрации изображения дна (в сине-зеленой части спектра) и изображения волн на морской поверхности (в красной части спектра) и устранении рефракционных искажений с помощью информации о рельефе морской поверхности, содержащейся в ее изображении. Разработаны и апробированы алгоритмы коррекции искаженных волнением изображений, их эффективность подтверждена лабораторными экспериментами.

*Авторы:* Л.С. Долин, А.Г. Лучинин, Д.Г. Турлаев, В.И. Титов (ИПФ РАН), И.М. Левин, В.Ю. Осадчий, В. Савченко (СПб филиал ИО РАН).

*Аннотация.* При наблюдении морского дна или находящихся в воде объектов через взволнованную поверхность моря их изображения случайным образом искажаются вследствие преломления света на границе раздела вода – воздух (рефракционные искажения изображения). Эти искажения предлагается устранять путем совместной обработки изображений дна и поверхности, полученных в разных частях оптического спектра. Найден способ восстановления пространственного распределения уклонов поверхности по ее видимой яркости вне зоны солнечных бликов при квазинадирном наблюдении.

Предложены и апробированы (на модельных изображениях) алгоритмы коррекции рефракционных искажений. Установлено, что их полное устранение возможно при условии точного знания пространственного распределения уклонов поверхности в момент наблюдения и точной регистрации пространственных вариаций видимой яркости объекта наблюдения. При формировании изображений с конечным числом элементов разрешения фокусировка света ветровыми волнами может приводить к необратимой потере информации о деталях объекта, которые хорошо видны в отсутствие волнения. Для уменьшения негативного влияния этого эффекта на качество восстановленного изображения система наблюдения должна иметь определенный резерв разрешающей способности.

Показано, что для улучшения качества изображения могут быть использованы достаточно грубые аппроксимации распределения уклонов поверхности, построенные на основе данных о положении бликов на морской поверхности.

Эффективность разработанных алгоритмов коррекции подтверждена лабораторными экспериментами.

### *Публикации*

1. Л.С. Долин, А.Г. Лучинин, Д.Г. Турлаев, Алгоритм восстановления изображений подводных объектов, искаженных поверхностным волнением // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 2004, т. 40, № 6, с. 856-864.
2. А.Г. Лучинин, Л.С. Долин, Д.Г. Турлаев. О коррекции изображений подводных объектов при неполной информации о поверхностном волнении // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41, № 2, с. 272-277.
3. L.S. Dolin, A.G. Luchinin, D.G. Turlaev. Advanced algorithm for correction of sea bottom images distorted by surface waves. Proceedings of III International Conference "Current Problems in Optics of Natural Waters", St. Petersburg, 2005, p. 321-325.
4. Долин Л.С., Лучинин А.Г., Титов В.И., Турлаев Д.Г. О возможностях использования изображений морской поверхности для коррекции изображений подводных объектов // Труды Междунар. конф. «Прикладная оптика-2006», Санкт-Петербург, 16-20 октября 2006 г.

5. L.S. Dolin, A.G. Luchinin, V.I. Titov, D.G. Turlaev. Correcting images of underwater objects distorted by sea surface roughness // Proc. of SPIE, 2007, V. 6615, 66150K – 1-12.

6. V.Ju. Osadchy, V.V. Savtchenko, I.M. Levin. Correction of image distorted by wavy water surface: laboratory experiment // Proc. of IV Int. Conf. “Current Problems in Optics of Natural Waters”, Nizhny Novgorod-2007, September 11-15, p. 91-93.

**2.2** Показана возможность существования стационарных нелинейных внутренних волн – бризеров (осциллирующих волновых пакетов со стационарной огибающей) в стратифицированной жидкости. В рамках асимптотической теории доказано, что бризеры внутренних волн существуют при определенных плотностных стратификациях, когда коэффициент кубической нелинейности имеет положительный знак, и найдены аналитически некоторые типы стратификаций, для которых это реализуется. Впервые проведено моделирование генерации и долговременного распространения бризеров внутренних волн в рамках нелинейных уравнений Эйлера в трехслойном потоке. На основе мировых баз данных по гидрологии океана определены районы в Мировом океане, где возможно существование бризеров внутренних волн.

**Авторы:** Т. Г. Талипова, Е. Н. Пелиновский, А. В. Слюняев, О. Е. Полухина (ИПФ РАН).

**Аннотация.** Асимптотическая теория предсказывает существование двух типов нелинейных стационарных и квазистационарных внутренних волн в стратифицированной жидкости – солитонов и бризеров (Pelinovsky et al., 2007; Clarce et al., 2000; Талипова и др., 1999). Однако, решения, предсказанные асимптотической теорией, не всегда реализуются в исходных уравнениях, и, тем более, в реальных средах, которые эти уравнения описывают. Существование солитонов внутренних волн в исходных уравнениях Эйлера для стратифицированной жидкости (Dubriel-Jacotin, 1932; Stastna and Lamb, 2002) доказано математически, а многочисленные лабораторные эксперименты и натурные наблюдения убеждают нас в существовании солитоноподобных волн в реальных стратифицированных жидкостях. По-другому обстоит дело с бризерами внутренних волн. Во-первых, для их существования необходимы определенные типы стратификаций, которые, тем не менее, широко присутствуют на океанских шельфах. Во-вторых, наличие дополнительной осцилляторной степени свободы, очевидно, не позволит провести математическое исследование существования внутреннего бризера в рамках уравнений Эйлера. Лабораторные эксперименты по генерации и распространению внутренних бризеров отсутствуют, а определить бризер по записям натуральных внутренних волн в точке не представляется возможным из-за той же самой дополнительной осцилляторной степени свободы. Здесь нужны наблюдения хотя бы в двух точках по ходу распространения бризера. Поэтому проведение численных экспериментов по генерации и распространению внутренних бризеров в рамках уравнений Эйлера для стратифицированной жидкости представляется важным для понимания возможности их существования и их свойств в полнонелинейных исходных уравнениях. Проведенное численное моделирование генерации и распространения внутреннего бризера показало, что в численной модели уравнений Эйлера внутренний бризер генерируется из начального возмущения и распространяется с постоянной нелинейной скоростью по крайней мере в течение 8–10 характерных времен нелинейности, что определялось возможностями компьютера (Lamb et al., 2007). Показано соответствие параметров малоамплитудного бризера в рамках уравнений Эйлера и бризера той же амплитуды, описываемого асимптотической теорией. Проведенный численный эксперимент позволяет надеяться на успех дальнейших лабораторных экспериментов по наблюдению бризеров внутренних волн.

### **Публикации**

1. Pelinovsky E.N., Slunyaev A.V., Polukhina O.E., Talipova T.G. Internal Solitary Waves. In Book: *Solitary Waves in Fluids* (ed. By R.Grimshaw), WIT Press, Southampton, Boston, 2007, 85-11.

2. Clarke S., Grimshaw R., Miller P., Pelinovsky E., Talipova T. On the generation of solitons and breathers in the Modified Korteweg – de Vries Equation. 2000, *Chaos*, 10, 2, 383-392.

3. Талипова Т.Г., Пелиновский Е. Н., Лэмб К., Гримшоу Р., Холловой П. Влияние кубической нелинейности на трансформацию интенсивных внутренних волн // *Доклады Российской Академии наук*, 1999, 364, 6, 824-827.

4. Dubriel-Jacotin L. Sur les ondes type permanent dans les liquids heterogenes. *Atti della reale Academic Nationalite dci Lincei*, 1932, 15 (6), 44-52.

5. Stastna, M., and K. G. Lamb. Large fully nonlinear internal solitary waves: The effect of background current, *Phys. Fluids*, 2002, 10, 2897–2999.

6. K. Lamb, O. Polukhina, T. Talipova, E. Pelinovsky, W. Xiao, A. Kurkin. Breather Generation in the Fully Nonlinear Models of a Stratified Fluid. *Physical Rev. E*. 2007, 75, 4, 046306.

**2.3.** Разработана аналитическая модель лидарного изображения пикноклиновых внутренних волн (ВВ). Показано, что изображение ВВ представляет собой суперпозицию двух изображений – отражательного и теневого (просветного). В первом из них отображаются возмущения профиля показателя обратного рассеяния света в поле ВВ, а во втором – возмущения оптической толщины водного слоя, в котором внутренняя волна нарушила горизонтальную однородность оптических характеристик. Предложены алгоритмы восстановления поля ВВ по этим изображениям. Показано, что теневое изображение, в отличие от отражательного, не чувствительно к тонким деталям профилей гидрооптических характеристик и может быть использовано для определения параметров ВВ на основе очень грубых данных об оптических свойствах воды. На примере Баренцева моря, с привлечением реальных, одновременно измеренных профилей плотности воды и показателя ослабления светового пучка, продемонстрирована возможность определения модового состава, длины и амплитуды мод ВВ по их лидарным изображениям до глубин порядка 40 м.

**Авторы:** Л.С. Долин, И.С. Долина, В.А. Савельев (ИПФ РАН).

**Аннотация.** Модель лидарного изображения пикноклиновых внутренних волн (ВВ) является результатом объединения аналитической модели поля ВВ (модель Грена) и разработанной в ИПФ РАН модели лидарного эхо-сигнала, приходящего из стратифицированной водной среды. Модель позволяет определять характеристики мод ВВ по заданному профилю плотности воды и рассчитывать лидарные изображения суперпозиции мод ВВ с заданными амплитудами на основе данных о вертикальном распределении показателя ослабления светового пучка.

Компьютерное моделирование изображений ВВ с использованием реальных профилей температуры, солености и показателя ослабления показало, что информативный сигнал приходит не только с глубин, где внутренняя волна возмущает профиль показателя обратного рассеяния. Оказалось, что возмущения профилей оптических характеристик воды (прежде всего, показателя поглощения), возникающие под влиянием ВВ в области пикноклина, проявляются (в виде теневых полос) в изображении нижележащих водных слоев с однородными (или слабо неоднородными) оптическими свойствами. Теневое изображение формируется в результате горизонтально неоднородного ослабления лазерного импульса при двукратном прохождении через водный слой, в котором внутренняя волна нарушила горизонтальную однородность оптических характеристик. Оно несет информацию о возмущениях оптической толщины этого водного слоя.

Использование корреляционных связей между различными гидрооптическими характеристиками позволило разделить два указанных изображения и построить алгоритм восстановления поля ВВ по его отражательному изображению в интервале глубин, где оптический показатель ослабления воды резко меняется с глубиной. Апробация алгоритма показала, что он предъявляет весьма жесткие требования к точности измерения профиля показателя ослабления. Поэтому отражательное изображение рекомендуется использовать в основном для определения модового состава поля ВВ, который хорошо проявляется в этом изображении.

Было установлено, что теневое изображение ВВ, в отличие от отражательного, не чувствительно к тонким деталям профиля показателя ослабления и может быть

использовано для определения длины и амплитуды ВВ на основе очень грубых данных об оптических свойствах воды. Длина ВВ определяется по периоду полос, образующих это изображение, а амплитуда – по их контрасту.

### *Публикации*

1. L.S. Dolin, I.S. Dolina, V.A. Savel'ev. The model of lidar images of internal waves // Proc. 4 Int. Conf. "Current Problems in Optics of Natural Waters" (ONW'2007), N.Novgorod, Russia, 2007, Sept. 11-15, p. 124-128.

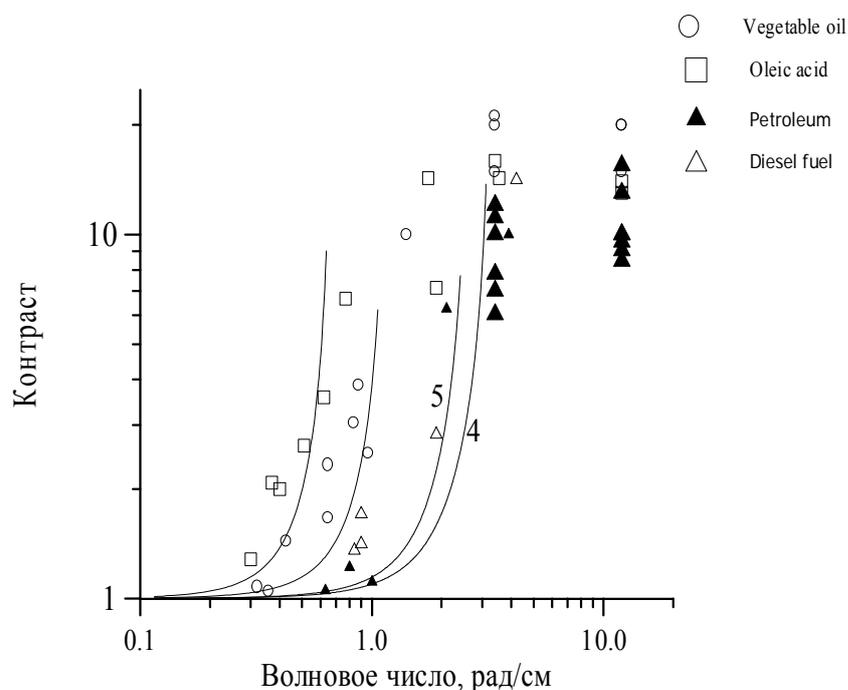
2. I.S. Dolina, L.S. Dolin, I.M. Levin, A.A. Rodionov, V.A. Savel'ev. Inverse problems of lidar sensing of the ocean // Proc. SPIE. 2007. V. 6615, 66150C – 1-10.

3. И.С. Долина, Л.С. Долин, И.М.Левин, А.А.Родионов. О возможностях лидарного наблюдения внутренних волн малой амплитуды в Баренцевом море // Седьмая международная конференция "Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики", 8-10 июня 2004, Санкт-Петербург, Труды конференции, с. 27-30.

**2.4.** На основе данных натурных экспериментов по радиолокационному и оптическому зондированию морской поверхности показано, что гашение ветровых волн см-диапазона в разливах нефтепродуктов существенно меньше, чем при наличии пленок, моделирующих биогенные. Выполнены лабораторные измерения характеристик коротких гравитационно-капиллярных волн в присутствии пленок различной природы и на основе сравнения с теоретическими расчетами восстановлены значения параметров, характеризующих вязкоупругие свойства пленок. Получено, что пленки нефтепродуктов характеризуются существенно меньшими модулями упругости по сравнению с биогенными пленками. Восстановленные параметры пленок позволяют рассчитывать гашение ветрового волнения в широком диапазоне длин для пленок различной природы, в том числе, в задачах диагностики нефтяных разливов на морской поверхности оптическими и радиолокационными методами.

**Авторы:** С. А. Ермаков, И. А. Сергиевская, Л. А. Гуцин, Э. М. Зуйкова, Ю. Б. Щегольков (ИПФ РАН).

**Аннотация.** В ходе натурных экспериментов с поверхностными пленками различной природы (органическими мономолекулярными, моделирующими биогенные пленки на морской поверхности и пленками нефтепродуктов) с использованием радиолокационных и оптических методов измерений ветрового волнения было получено, что контраст (степень подавления интенсивности в спектре ветровых волн) растет с уменьшением длины ветровых волн см-диапазона и имеет максимум в мм-диапазоне, при этом контраст для см-волн сильно возрастает с ростом упругости пленок. Значения контрастов для ветровых волн см-диапазона для пленок нефтепродуктов небольшой толщины значительно меньше, чем для "биогенных" пленок (см. рис.). Показано, что основным физическим механизмом воздействия пленок на ветровые волны см-диапазона является затухание волн, обусловленное вязкоупругими свойствами пленок. Вязкоупругие свойства пленок исследовались разработанным в ИПФ РАН методом, основанным на измерении характеристик (коэффициента затухания и длины волны) гравитационно-капиллярных волн, параметрически возбуждаемых в вертикально осциллирующей кювете.



На основе сравнительного анализа теоретически рассчитанных и измеренных в лабораторных условиях характеристик коротких гравитационно-капиллярных волн (ГКВ) на поверхности воды с пленкой, впервые восстановлены физические параметры пленок поверхностно-активных веществ и нефтепродуктов, в т.ч. нефти, керосина, дизельного топлива. Для расчетов использовалась модель ГКВ на поверхности жидкости с пленкой конечной толщины, пленка описывалась объемной вязкостью, а также поверхностными и межфазными вязкостями, упругостями и коэффициентами натяжения. При анализе предполагалось, что восстанавливаемые параметры не зависят от толщины пленок и частоты возбуждения волн, последнее предположение подтвердили результаты экспериментов выполненных на нескольких частотах ГКВ. Восстановленные параметры позволяют рассчитывать гашение ветровых ГКВ в широком диапазоне длин ветровых волн, поверхностных концентраций (для мономолекулярных) и толщин (для нефтяных) пленок и могут быть использованы, в частности, в задачах диагностики нефтяных разливов на морской поверхности оптическими и радиолокационными методами.

#### **Публикации**

1. С.А.Ермаков, И.А.Сергиевская, Л.А. Гуцин, Пленки на морской поверхности и их дистанционное зондирование. В сб. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (ред. Е.А.Лупян, О.Ю. Лаврова), Москва: ООО "Азбука-2000", вып.3, 2006, т. II, с. 86-98.
2. I.Sergievskaya, S. Ermakov, On detection and identification of marine films using optical images, Proceedings EGU 2007, Vienna, CD.
3. Ермаков, И.А.Сергиевская, Э.М.Зуйкова, С.В.Кияшко, Ю.Б.Щегольков, Об эффекте изменения доплеровских сдвигов частоты радиолокационных сигналов в присутствии органических пленок на морской поверхности // ДАН. 2003. Т. 388, №1, с. 109-112.

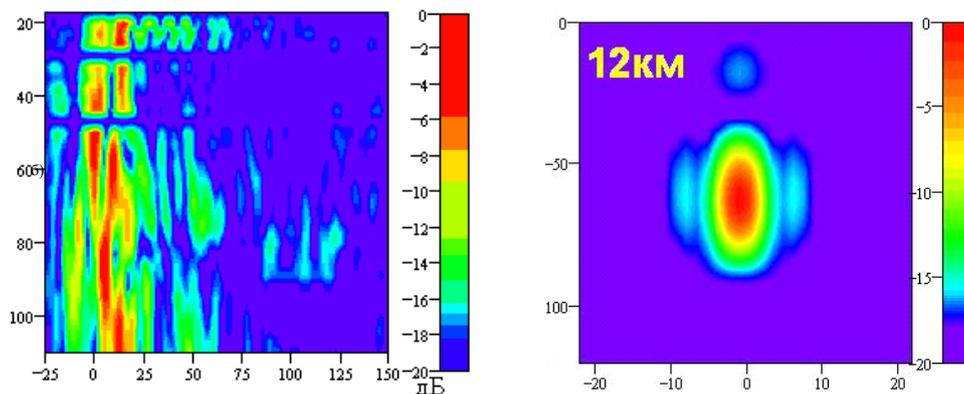
**2.5.** Предложен и реализован метод повышения эффективности пассивной локации в мелком море на основе обращения времени. Метод использует численное определение формы обращенного на вертикальной антенне акустического поля без излучения сигналов в среду с использованием упрощенных теоретических моделей волновода и дна. Экспериментальная апробация метода выполнена на данных полученных в акватории Баренцевого моря на дистанциях до 12 км. Фокусировка широкополосного сигнала неизвестной природы дает увеличение отношения сигнала к шуму эквивалентное

десятикратному увеличению приемной апертуры. Метод позволяет также контролировать стабильность среды и проверять соответствие параметров трассы распространения звука их теоретической модели.

**Авторы:** В.А. Зверев, П.И. Коротин, А.А. Стромков (ИПФ РАН).

**Аннотация.** Реализация метода временного обращения широкополосных сигналов в сложных рассеивающих и диспергирующих средах является крупным достижением современной акустики. Первым морским экспериментам с использованием обращения около 10 лет. Метод дает удивительно красивые результаты, которые используются для повышения эффективности активной и пассивной гидролокации, улучшения качества звукоподводной связи. Техническая реализация метода сложна. Для обращения поля нужна приемоизлучающая антенна, а проверка качества фокусировки сигналов требуется вторая приемная антенна в месте фокусировки.

Предложен и реализован упрощенный метод обращения акустического сигнала использующий численную модель среды. Метод разработан для мелкого моря, когда в многомодовом волноводе сигнал распространяется в малом числе мод. Такая ситуация характерна для распространения сигналов в мелком море на большие дистанции, на которых высшие моды затухают. Получить сфокусированное обращенное поле удастся путем разложения принятого поля на отдельные моды и обращения отдельных мод в численном эксперименте в рамках принятой модели дисперсионных соотношений волновода с учетом импеданса дна. Эффективность фокусировки и корректность принятой модели контролируется по фокальному пятну обращенного поля. Метод требует одну приемную вертикальную антенну, эффективность которой надо увеличить, и тестового широкополосного излучателя. Он может применяться и в нестационарных средах с течениями. По результатам эксперимента в Баренцевом море со 100-метровой 32-элементной антенной на дистанциях до 12 км показано увеличение отношения сигнала к шуму в антенной решетке до 10 дБ, что эквивалентно увеличению приемной апертуры в десять раз. Такой прием в мировой практике предложен и успешно осуществлен впервые.



Вид отклика среды (а) на импульсный сигнал на вертикальной антенне в мелком море (полоса частот 100 Гц – 300 Гц) и результат обращения акустического поля (б) на расстоянии 12 км. Вдоль вертикали глубина моря в м. Вдоль горизонтали время в мсек.

Повышается эффективность приемной антенны за счет фокусировки в дальней зоне. Обеспечивает фокусировку численное обращение поля с использованием выбранной модели среды. Модель среды выбирается исходя из априорных представлений, и может быть более сложной и точной, что не меняет принцип действия алгоритма.

Проверена работоспособность алгоритма и для сигналов неизвестного происхождения, когда в соответствии с алгоритмом форма сигнала неизвестного

источника должна быть аппроксимирована, например, принята за одиночный импульс или ЛЧМ сигнал.

### *Публикации*

1. В.А. Зверев Обращение волнового фронта для снижения влияния многолучевости на результат активной локации // Акуст. журн. 2003, т. 49, № 6, с. 814-819.
2. В.А. Зверев О корреляционном шуме при обращении волнового фронта в акустике // Акуст. журн. 2004, т. 50, № 5, с. 523-527.
3. В.А. Зверев Получение изображений акустической антенной через толстый слой крупномасштабных неоднородностей // Акуст. журн. 2004, т. 50, № 2, с. 198-203.
4. В.А. Зверев Принцип акустического обращения волн и голография // Акуст. журн. 2004, т. 50, № 6, с. 685-693.
5. В.А. Зверев Структура фокальной области при фокусировке с обращением волны в неоднородной среде // Акуст. журн. 2005, т. 51, № 3, с. 366-373 .
6. В.А. Зверев О пространственной фокусировке импульса, обращенного во времени // Изв. вузов. Радиофизика. 2003, т. 46, № 7, с. 572-578.
7. В.А. Зверев, П.И. Коротин, А.А. Стромков Численное временное обращение волн // Акуст. журн. 2007, № 6.
8. В.А. Зверев, П.И. Коротин, А.А. Стромков. Эффект снижения уровня шума при согласовании приемной антенны со средой // Акуст. журн. (Статья прошла рецензирование и принята к печати).
9. В.А. Зверев, П.И. Коротин, А.А. Стромков. Пространственная протяженность области акустического обращения волн // Акуст. журн.

**2.6.** Впервые в натуральных условиях обнаружена медленная, логарифмическая по времени релаксация возмущений модуля сдвига, измеренного по величине скорости волны Рэлея, после ударного воздействия на грунт. Показано, что медленная релаксация связана с метастабильными состояниями гранулированной среды при частичном заполнении жидкостью пространства между зернами. Полученные результаты имеют значение для задач сейсмоакустического исследования структуры природных сред в натуральных условиях.

**Авторы:** В.С. Авербах, А.В. Лебедев, А.П. Марышев, В.И. Таланов (ИПФ РАН).

**Аннотация.** Представлены результаты экспериментальных исследований на полигоне ИПФ РАН «Безводное», проведенных в 2005 и 2006 гг. При проведении экспериментов были разработаны методы исследований свойств природных сред в натуральных условиях, основанные на использовании портативного вибрационного источника. Рассматриваются два вида измерений. Во-первых, те, что используют информацию об электромеханических характеристиках источника (метод эквивалентных схем или импедансные методы измерений). И, во-вторых, методы, основанные на анализе изменений характеристик волн, излучаемых источником, в результате воздействия каких-то факторов.

Степень консолидации природных сред в значительной степени определяется величиной модуля сдвига. При использовании первого метода исследований удается измерить модуль сдвига и коэффициент Пуассона, связать измеренные величины с возмущениями целостности грунта. Полученные результаты свидетельствуют о высокой чувствительности импедансного метода диагностики состояния грунта. Также в работе рассмотрены источники нелинейных искажений и вопрос стабильности характеристик излучения, показана определяющая роль области контакта. При использовании второго метода исследований была обнаружена логарифмическая по времени (медленная) релаксация возмущений скорости волны Рэлея, которая связана с наличием метастабильных локализованных состояний гранулированной среды с частичным

заполнением пустот жидкостью. Полученные результаты имеют значение для задач сейсмоакустического исследования структуры природных сред в натуральных условиях.

### Публикации

1. Авербах В.С., Лебедев А.В., Марышев А.П., Таланов В.И., Акустическая диагностика физических свойств неконсолидированных сред в натуральных условиях: Препринт № 714 ИПФ РАН, Нижний Новгород, 2006.

2. Авербах В.С., Лебедев А.В., Марышев А.П., Таланов В.И., Диагностика акустических свойств неконсолидированных сред в натуральных условиях // Акуст. журнал (направлена в печать).

3. Авербах В.С., Лебедев А.В., Марышев А.П., Таланов В.И., Акустическая диагностика физических свойств неконсолидированных сред в натуральных условиях // Сб. тр. 19-й сессии РАО, Нижний Новгород 2007, 328-331.

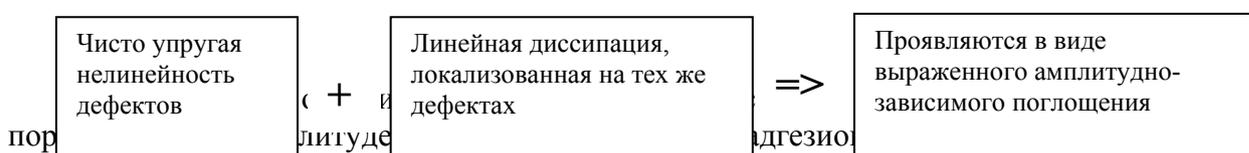
4. Авербах В.С., Лебедев А.В., Марышев А.П., Таланов В.И., Наблюдение эффектов медленной динамики в неконсолидированных средах в натуральных условиях // Сб. тр. 19-й сессии РАО, Нижний Новгород 2007, с. 331–335.

5. Авербах В.С., Лебедев А.В., Марышев А.П., Таланов В.И., Акустические методы исследования физических свойств неконсолидированных сред в натуральных условиях // Сб. трудов семинара научной школы проф. С.А. Рыбака, Москва, РАО, 2007 (в печати).

**2.7.** На основе анализа данных наблюдений нелинейно-диссипативных акустических и сейсмических эффектов выявлен и теоретически описан механизм амплитудно-зависимого поглощения, отличающийся от известных. Предложенный механизм специфичен для микронеоднородных сред, содержащих мягкие по сравнению с окружающей средой-матрицей дефекты (микротрещины, контакты и т.п.) Физически он основан на совместном действии линейной диссипации (например, термоупругой или вязкой) и упругой реактивной нелинейности, локализованных на одних и тех же дефектах. В связи с этим изменение параметров линейной релаксации на дефектах за счет их реактивной нелинейности проявляется как амплитудно-зависимое поглощение. Показано, что вклады данного механизма и известной гистерезисной нелинейности могут быть сравнимы, но различаться по частотному поведению. Это необходимо учитывать при интерпретации нелинейных взаимодействий упругих волн, наблюдающихся в лабораторных и натуральных условиях.

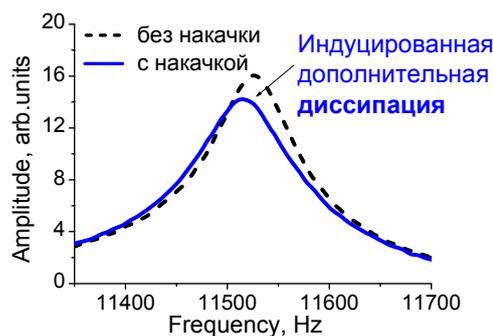
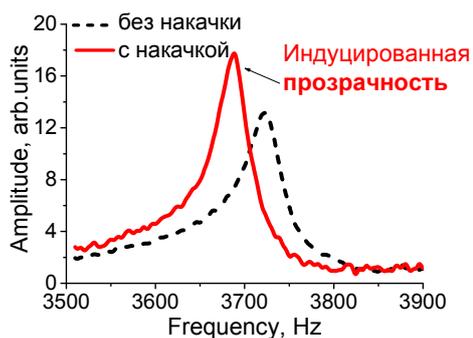
**Авторы:** В.Ю. Зайцев, Л.А. Матвеев (ИПФ РАН), P. Sas (Catholic University of Leuven, Belgium), V. Gusev, B. Castagnede, L. Fillinger (Université du Maine, France)

**Аннотация.** На основе анализа собственных и известных из литературы наблюдений нелинейно-диссипативных акустических и сейсмических эффектов, выявлен и теоретически обоснован механизм амплитудно-зависимого поглощения, отличающийся от известных. Предложенный механизм специфичен для микронеоднородных сред, содержащих мягкие по сравнению с окружающей средой-матрицей дефекты (микротрещины, контакты и т.п.) Физически он основан на совместном действии линейной диссипации (например, термоупругого или вязкого происхождения) и упругой реактивной нелинейности, которые локализованы на одних и тех же дефектах. В связи с этим изменение параметров линейных релаксационных процессов на дефектах за счет их реактивной нелинейности может выглядеть как амплитудно-зависимое поглощение (даже в отсутствие собственно нелинейных каналов диссипации типа гистерезисной нелинейности или нелинейной вязкости).



предложенный механизм в своей физической основе не является пороговым. В однородных твердых телах с нелокализованной решеточной нелинейностью эффективность такого механизма пренебрежимо мала.

Для микронеоднородных сред (типа горных пород или конструкционных материалов с повреждениями) теоретически показано и подтверждено наблюдениями, что в зависимости от параметров за счет данного механизма возможны как увеличение, так и уменьшение диссипации одной (пробной) волны в присутствии другой интенсивной волны. Кроме того, за счет выявленного механизма также возможны одновременные изменения упругого модуля и поглощения, которые сравнимы с вкладом обычно обсуждаемой гистерезисной нелинейности (хотя различие этих вкладов возможно за счет различий в частотном поведении). Этот факт существенно влияет на интерпретацию многих экспериментальных данных, традиционно описываемых в рамках моделей гистерезисной нелинейности. Исследованы частотные особенности предложенного механизма, отличающего его проявлений квазистатического гистерезиса. В частности, обнаружено, что при определенных соотношениях между частотами релаксации дефектов и упругих волн нелинейное изменение упругого модуля для акустической волны может обращаться в ноль, так что данный механизм проявляется в виде «чисто диссипативной» нелинейности, способной менять поглощение на десятки процентов в акустическом диапазоне амплитуд. Выявленный механизм необходимо учитывать при интерпретации нелинейных взаимодействий упругих волн, наблюдающихся в микронеоднородных средах в лабораторных и природных условиях.



Экспериментальный пример наблюдения нелинейно-индуцированных интенсивной волной накачки «просветления» пробной волны для одной моды (около 3.7 кГц) и дополнительной диссипации для других (на частотах выше 11.5 кГц) мод пробной волны в твердотельном образце с трещиной.

### Публикации

1. V.Yu. Zaitsev, P. Sas, Dissipation in microinhomogeneous solids: inherent amplitude-dependent attenuation of a non-hysteretical and non-frictional type, *Acustica-Acta Acustica*, 2000, V. 86, 429-445.
2. V. Zaitsev, V. Gusev, B.Castagnede, Luxemburg-Gorky Effect Retooled for Elastic Waves: A Mechanism and Experimental Evidence, *Phys. Rev. Lett.*, 2002, V. 89(10), 105502.
3. V. Zaitsev, V. Gusev, B.Castagnede, “Thermoelastic mechanism for logarithmic slow dynamics and memory in elastic wave interaction with individual cracks”, *Phys. Rev. Lett.* 2003, V. 90, No 7, 075501.
4. L.Fillinger, V. Zaitsev, V. Gusev and B. Castagnede, Nonlinear relaxational absorption/transparency for acoustic waves due to thermoelastic effect, *Acta Acustica -Acustica*, 2006, V. 92, No 1, p. 24-34.
5. В.Ю.Зайцев, Л.А. Матвеев, О микроструктурно-обусловленном амплитудно-зависимом поглощении негистерезисного происхождения, Сб. трудов 18-ой Сессии Российского Акустического Общества (Таганрог, 14-18 сентября, 2006), М. ГЕОС, 2006. Т. 1, с. 318-322.

6. В.Ю.Зайцев, Л.А.Матвеев, Амплитудно-зависимая диссипация в микронеоднородных средах с линейным поглощением и упругой нелинейностью // Геология и Геофизика, 2006, т. 47, № 5, с. 695-710.

**2.8.** Впервые показаны широкие диагностические возможности доплеровского радиолокатора СВЧ-диапазона с ножевой диаграммой направленности антенны при измерении с летательного аппарата при малых углах падения зондирующего излучения. Разработаны новые алгоритмы восстановления дисперсии наклонов взволнованной водной поверхности, дисперсии орбитальных скоростей, средней фазовой скорости поверхностного волнения, средней длины волны, высоты значительного волнения и генерального направления распространения волн.

Проведен цикл теоретических и экспериментальных работ по изучению обратного рассеяния электромагнитного СВЧ-излучения взволнованной водной поверхностью при малых углах падения и исследованы свойства доплеровского спектра и мощности отраженного сигнала. Обработка данных натурального эксперимента подтвердила работоспособность алгоритмов и корректность сделанных теоретических выводов.

*Авторы:* В.Ю. Караев, М.Б. Каневский, Е.М. Мешков (ИПФ РАН).

**Аннотация.** Разработана модифицированная модель обратного рассеяния электромагнитных волн СВЧ-диапазона, справедливая для случая надирного зондирования и учитывающая особенности ножевой диаграммы направленности антенны. Проведенный теоретический анализ позволил предложить новый метод измерения наклонов, использующий энергетические характеристики отраженного радиолокационного сигнала. Разработанные в рамках нового метода алгоритмы впервые позволяют определять дисперсию наклонов водной поверхности без ограничения по высоте полета.

Возможность восстановления дисперсии наклонов обусловлена зависимостью мощности отраженного сигнала от дисперсии наклонов отражающей поверхности и, таким образом, алгоритмы являются «прямыми», т.е. не зависящими от других факторов, влияющих на обратное рассеяние.

Первый алгоритм основан на сравнении мощностей отраженного сигнала для ножевой диаграммы направленности антенны и узкой диаграммы направленности. Последняя формируется за счет специальной обработки отраженного сигнала, принятого антенной с ножевой диаграммой. Это позволяет использовать при измерении одну антенну.

Второй алгоритм использует зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения, восстанавливаемую при обработке отраженного сигнала. Характер зависимости связан с дисперсией наклонов поверхности.

Для проверки алгоритма был проведен натурный эксперимент по измерению обратного рассеяния во время полета над водной поверхностью. Выполненная обработка данных подтвердила его работоспособность.

Результатами дальнейшего теоретического анализа явились новые алгоритмы восстановления коэффициента корреляции вертикальной составляющей орбитальной скорости и наклонов водной поверхности, а также дисперсии орбитальных скоростей, по ширине доплеровского спектра отраженного радиолокационного сигнала в случае движущегося радиолокатора. Алгоритмы основаны на зависимости ширины доплеровского спектра от дисперсии наклонов, указанного выше коэффициента корреляции и дисперсии орбитальных скоростей. Движение поверхности оказывает влияние на ширину доплеровского спектра и, следовательно, характеристики движения могут быть измерены. Использование восстановленного значения дисперсии наклонов с

помощью упомянутых выше алгоритмов позволило разработать алгоритмы восстановления коэффициента корреляции и дисперсии орбитальных скоростей по ширине доплеровского спектра.

Результаты обработки данных натурального эксперимента подтвердили эффективность разработанных алгоритмов восстановления этих параметров и показали однозначность определения направления распространения волнения.

Возможность однозначного определения направления волнения связана с тем, что при движении по волнению фазовая скорость вычитается, а при направлении навстречу – складывается со скоростью движения носителя, и для самолета это хорошо измеряемая величина. Преимуществом применения в алгоритмах ширины доплеровского спектра является то, что, в отличие от мощности отраженного сигнала, ширина спектра не зависит от таких факторов как температура и соленость воды, вариации скорости ветра, влияющих на мелкомасштабную составляющую волнения. Последующий теоретический анализ и численное моделирование продемонстрировали возможность определения средней фазовой скорости поверхностного волнения, средней длины волны и высоты значительного волнения по данным эксперимента.

Новые алгоритмы обработки впервые позволяют восстанавливать столь полную информацию о статистических характеристиках рассеивающей водной поверхности. Разработанный «диагностический продукт» значительно расширяет возможности дистанционного зондирования состояния водной поверхности радиолокационными методами с движущегося носителя.

#### *Публикации*

1. В.Ю. Караев, М.Б. Каневский. К вопросу о радиолокационном определении параметров морского волнения // Исследование Земли из космоса. 1999, N 4, с. 14-21.
2. V.Yu. Karaev, M.B. Kanevsky, P.D. Cotton, P.G. Challenor. Is it possible to measure ocean surface slopes with a microwave radar // Int. J. Remote Sensing. 2002, v. 23, N 16, p. 3251-3262.
3. В.Ю. Караев, М.Б. Каневский, Г.Н. Баландина, Е.М. Мешков, П. Челленор, М. Срокош, К. Гомменджинджер. Методы измерения наклонов водной поверхности радиолокатором с ножевой диаграммой направленности антенны // Исследование Земли из Космоса. 2003, 5, 51-63.
4. В. Караев, М. Каневский Г. Баландина Е. Мешков П. Челленор М. Срокош, К. Гомменджинджер. Новые средства дистанционной диагностики океана: радиолокатор СВЧ-диапазона с ножевой диаграммой направленности антенны // Исследование Земли и Космоса, 2004, N 2, 41-52.
5. Е. Мешков, В.Ю. Караев. Определение параметров морского волнения по доплеровскому спектру радиолокационного СВЧ сигнала, отраженного водной поверхностью // Изв. ВУЗов, сер. Радиофизика. 2004, т. 47, N3, с. 231-244.
6. В. Караев, Е. Мешков, Г. Баландина, Э. Зуйкова, В. Гольдблат, В. Титов. Изучение обратного рассеяния радиолокационного СВЧ-сигнала при малых углах падения в ходе натуральных измерений // Изв. ВУЗов, сер. Радиофизика. 2005, т. 48, 8, с. 661-673.
7. V. Karaev, M.B. Kanevsky, G.N. Balandina, P. Challenor, C. Gommenginger, M. Srokosz. The concept of a microwave radar with asymmetric knife-like beam for the remote sensing of ocean waves // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2005, N 11, p. 1809-1820.
8. V. Karaev, M. Kanevsky, E. Meshkov, V. Titov, G. Balandina. Measurement of variance of slopes of wind waves by radar with knife-like antenna system // The Sixth International Kharkov Symposium on Physics and engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter waves, Kharkov, Ukraine, June 25-30, 2007, Symposium Proceedings, v. 1, p. 424-426.
9. В.Ю. Караев, М.Б. Каневский, Е.М. Мешков, В.И. Титов, Г.Н. Баландина. Измерение дисперсии наклонов водной поверхности радиолокационными методами: проверка алгоритмов // Изв. ВУЗов, сер. Радиофизика. 2007 (принята к печати).
10. В.Ю. Караев, М.Б. Каневский, Е.М. Мешков. Восстановление параметров поверхностного волнения по результатам радиолокационных измерений // Исследование из Космоса. 2007 (принята к печати).

11. V. Karaev, M. Kanevsky, E. Meshkov. Application of Doppler spectrum for retrieval of statistical parameters of sea waves // The Second European conference on Antennas and Propagation (EuCap 2007), The Edinburg International Conference Centre, UK, 11-16 November 2007.

**2.10.** Экспериментально показано, что связанная с поверхностным волнением модуляция, возникающая при распространении в мелком море низкочастотного тонального звука, обусловлена в первую очередь береговой компонентой рассеянного на ветровом волнении звукового сигнала. Построенные на основе этой гипотезы и проверенные на экспериментальных данных простые аналитические выражения позволяют легко прогнозировать спектр реверберации тонального сигнала исходя из параметров трассы и спектра мощности поверхностного волнения.

**Авторы:** Б.М. Салин, Е.Л. Бородина, А.Л. Матвеев, А.И. Потапов, О.Н. Кемарская, А.В. Лебедев (ИПФ РАН).

**Аннотация.** На основе экспериментов по распространению тональных звуковых сигналов в диапазоне частот 200 Гц – 3 кГц в шельфовых зонах на дистанциях от 10 до 100 глубин места (200 м ÷ 10 км) исследованы спектральные характеристики реверберации, обусловленные поверхностным волнением. Показано, что при рассеянии звуковых волн на поверхностном волнении форма спектра мощности реверберационного сигнала вблизи частот ветрового волнения (0.1–1.5 Гц) совпадает с формой спектра ветрового волнения.

Для модели Бреговского рассеяния акустических волн на ветровом волнении при выполнении условия Релея относительно амплитуды волнения получено выражение для формы спектра модуляции сигнала

$$I(f) = \frac{p^2(f)}{p_0^2} = \frac{8\pi^2 RF^2 \chi_*^5}{9c^2 H} S(f) \quad (1),$$

которое объясняет наблюдаемые эффекты

Здесь  $p^2(f)$  – спектральная плотность мощности рассеянного сигнала давления в точке приема,  $p_0^2$  – средний квадрат звукового давления, создаваемого излучателем в точке приема,  $S(f)$  – спектральная плотность мощности поверхностного волнения,  $H$  – глубина волновода,  $c$  – скорость звука,  $2\chi$  – характерный сектор углов, который захватывается волноводом,  $R$  – длина трассы,  $F$  – рабочая частота излучателя.

Выполненные в 2006 г. целенаправленные экспериментальные исследования, в процессе которых на стац. трассах 200 м и 2000 м исследовались характеристики реверберации при тональной подсветки акватории в диапазоне частот 1–3 кГц и измерялось поверхностное волнение, показали:

- а) удовлетворительное совпадение формы спектра реверберации и ветрового волнения,
- б) хорошее совпадение рассчитанных согласно (1) значений амплитуд спектров, с экспериментальными данными,
- в) независимость формы спектра реверберации от частоты сигнала подсветки

#### **Публикации**

1. А.В. Лебедев, Б.М. Салин. Исследование эффектов локализации областей рассеяния звука на ветровом волнении // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 6. С. 813-826.

2. Е.Л. Бородина, Б.М. Салин. Исследование угловой зависимости реверберационного сигнала в вертикальной и горизонтальной плоскостях при тональной засветке мелководной акватории в диапазоне частот 200-400 Гц // Сб. тр. XVIII сессии РАО. М.: ГЕОС, 2006. С. 211-214.

3. Е.Л. Бородина, Б.М. Салин. Исследование характеристик реверберационного сигнала на вертикальной антенне при тональной засветке мелководной акватории // Акуст. журн. 2006. Т. 52. № 6. С. 753-759.

4. Е.Л. Бородина, Б.М. Салин. Исследование влияния ветрового волнения на спектральные характеристики уровней реверберации при тональном сигнале подсветки // Сб. тр. XVIII сессии РАО.Т.2. М.: ГЕОС, 2007. С. 284-288.

5. Е.Л. Бородина, Б.М. Салин. Исследование влияния частотно-угловых характеристик ветрового волнения на расположение областей резонансного рассеяния звука // Сб. тр. XVIII сессии РАО.Т.2. М.: ГЕОС, 2007, С. 386-390.

6. Е.Л. Бородина, Б.М. Салин. Исследование азимутальной зависимости реверберационного сигнала при тональной засветке мелководной акватории // Акуст. журн. 2007 (в печати).

**2.11.** Разработан алгоритм определения характеристик вторичного гидроакустического поля упругих тел с внутренними связями на основе метода конечных элементов. Численная схема, построенная на основе модели сложного инженерного объекта, позволяет восстановить ближнее рассеянное поле, изучить его структуру и вычислить характеристики, определяющие силу цели. Проанализированы возможности влияния характеристик внешних и внутренних конструкций объекта на диаграмму направленности и величину вторичного поля при акустическом проектировании. Выполнено сравнение численных результатов с физическими экспериментами.

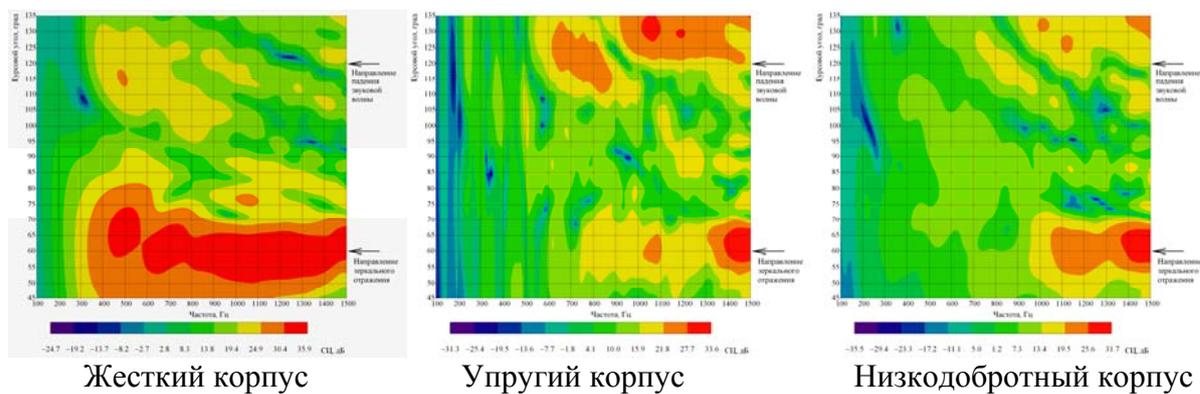
*Авторы:* В.В. Артельный, П.И. Коротин, Б.М. Салин, А.С. Суворов (ИПФ РАН).

*Аннотация.* Определение характеристик рассеянного звукового поля на упругих телах со сложной геометрией оболочки и с учетом внутренних конструкций представляет собой сложную задачу, которая решается преимущественно экспериментально. Теоретический анализ возможен для тел канонической формы только в рамках целого ряда упрощений. Развитие вычислительных и программных средств дало возможность численного решения задачи.

В работе на базе конечно-элементного моделирования создан алгоритм расчета рассеянного поля, позволяющий определять ближнее вторичное поле упругих тел произвольной сложности. Для определения стандартных характеристик дальнего рассеянного гидроакустического поля использованы распределенное возбуждение для создания плоской падающей волны и распределенная приемная система в ближнем поле рассеивателя. Рассмотрены случаи нестационарного и гармонического возбуждения.

Целью исследования было определение влияния внутренних конструкций и упруго-массовых характеристик оболочки на формирование вторичного поля. Расчет возможен в широком диапазоне частот от первых форм изгибных колебаний тела до частот оболочечных резонансов. Проведено сравнение результатов численного счета на КЭМ оболочечной конструкции состоящей из 200 тысяч элементов с физическим экспериментом.

В качестве примера влияния упруго-массовых параметров на рассеяние на рис. 1 дан результат работы созданной имитационной модели при расчете угловой зависимости вторичного гидроакустического поля. Сравняется рассеяние упругого тела и того же тела при внесении в его оболочку увеличенной жесткости и при увеличении внутренних потерь.



**Рис. 1**

Для жесткого корпуса звук отражается зеркально, а для упругого корпуса на отдельных частотах незеркальное отражение может превалировать, при этом соотношение зависит от добротности конструкции. Анализ показал соответствие результатов имитационной численной модели серии физических экспериментов с масштабной моделью изделия.

### *Публикации*

1. Отчет НИР «Дальность-МФ» 2002 г.
2. В.В. Артельный, П.И. Коротин, А.С. Суворов. Определение вклада источника в вибрационное и акустическое поле сложной механоакустической системы // Сб. трудов XIX сессии Российского акустического общества. Т. 3, г. Н. Новгород, 2007, с. 227-231.
3. В.В. Артельный, П.И. Коротин, В.А. Лаухин. Численное конечно-элементное моделирование при оценке акустического качества конструкций // Труды Нижегородской акустической научной сессии, ННГУ, 2002, с. 130.
4. В.В. Артельный, П.И. Коротин, С.Ю. Петров, А.С. Суворов. Технология расчетно-экспериментального акустического проектирования // Сб. трудов конференции Корабельная ядерная энергетика, Н.Новгород, 2004, с. 17.
5. А.В. Лебедев, Б.М. Салин. Экспериментальный метод определения сечения рассеяния вытянутых тел. // Акуст. журн. 1997. Т. 43, № 3, с. 376-385.
6. Б.М. Салин. Измерение характеристик рассеяния в области низких частот // Сб. научных трудов: Системы наблюдения, измерения и контроля в вибро- и гидроакустике. Н. Новгород, ИПФ РАН, 2002, с. 187-206.

