

УДК 534.2.517.4

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СХЕМЫ МОНИТОРИНГА МЕЛКИХ МОРЕЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

© 2020 г. Б. И. Гончаренко¹, К. В. Дмитриев¹, С. Н. Сергеев^{1,2, *}, А. С. Шуруп^{1,2}

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, физический факультет, кафедра акустики,
Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Институт океанологии имени П.П. Ширшова Российской академии наук”, Москва, Россия

*E-mail: sergeev@aesc.msu.ru

Поступила в редакцию 16.12.2019 г.

После доработки 20.01.2020 г.

Принята к публикации 26.02.2020 г.

Рассматриваются различные подходы к созданию гидроакустических систем мониторинга параметров мелководных морей, преимущественно арктического шельфа. Оптимальной с точки зрения затрат на практическую реализацию и обработку данных является использование схемы пассивной модовой томографии с использованием одиночных приемников.

DOI: 10.31857/S0367676520060125

ВВЕДЕНИЕ

Задача мониторинга морской акватории, особенно шельфовой зоны, обусловлена многими потребностями: научными, хозяйственными, оборонными. Стоит отметить особо проблему мониторинга изменения климата, которая в Арктике неразрывно связана с проблемой таяния льдов. Роль акустических методов в задачах мониторинга представляется исключительно важной именно в этом регионе, поскольку контактно-точечные способы получения информации о состоянии морской среды (посредством автономных зондов, оснащенных необходимыми датчиками), получившие широкое применение в исследовании состояния мирового океана, оказываются малоприменимыми в высоких широтах из-за наличия толстого слоя льда, мешающего автономным аппаратам выходить к поверхности для определения положения и передачи накопленных данных. Между тем акустические сигналы способны распространяться на большие (сотни и тысячи километров) расстояния, и они чувствительны к состоянию водной среды и подстилающей поверхности. Основной проблемой использования акустики в задачах мониторинга является техническая сложность, связанная с излучением и приемом звуковых сигналов (как правило, низкочастотных), а также сложности, возникающие при их последующей обработке. В данной работе рассматриваются различные аспек-

ты задачи акустического мониторинга мелководных морей.

МОДОВАЯ ТОМОГРАФИЯ

Для восстановления параметров среды строится схема томографического типа, суть которой состоит в том, что исследуемый регион окружается по периметру системой приемно-передающих антенн. В качестве исходных данных принимается возмущение (по сравнению с некоторым фоновым значением, например, средним по сезонам) времени распространения отдельных акустических мод, которые в таком случае должны быть выделены тем или иным способом [1]. Выбор именно модового представления звукового поля для решения задач томографического типа обусловлен тем, что каждая мода является двумерным объектом, так как распространяется вдоль горизонтальной плоскости (две координаты) со скоростью, определяемой в каждой точке этой плоскости параметрами дна, поверхности и неоднородностями водного слоя, распределенными по глубине. В результате можно экономно решить задачу распространения каждой из рассматриваемых мод вдоль ее “горизонтального” луча. Как было показано ранее [2], возможность использования мод в задачах акустической томографии позволяет существенно сократить время накопления сигнала в пассивной схеме, в кото-

рой исключаются основные сдерживающие развитие томографии условия – излучатели звука.

В процессе томографического восстановления параметры среды представляются в виде линейной комбинации некоторых введенных базисных функций с неизвестными коэффициентами. На следующем этапе вводятся фоновые (невозмущенные) значения этих восстанавливаемых параметров и рассчитывается матрица возмущений, образованная возмущениями характеристик рассматриваемых мод при наличии неоднородностей среды в виде базисных функций с единичной амплитудой. Выбор базисных функций, как было показано в [3], может быть достаточно произвольным и определяется лишь возможностью описания неоднородностей среды с требуемой точностью, а также удобством построения матрицы возмущений. В предположении линейности связи возмущения характеристик мод, наблюдаемых в эксперименте, с теми возмущениями характеристик мод, которые вызываются базисными функциями (рассчитанными при построении матрицы возмущений), строится система линейных уравнений относительно неизвестных коэффициентов разложения неоднородностей среды по выбранному базису. МНК-решение этой системы с привлечением различных процедур регуляризации, основанных, как правило, на априорной информации о восстанавливаемых функциях (например, об их гладкости), дает оценку неизвестных коэффициентов разложения искомым характеристикам акватории по выбранному базису. Если получаемое решение не объясняет наблюдаемые данные, то есть дает большую неувязку по правой части, то проводится итерация решения обратной задачи. В этом случае восстановленные на предыдущем итерационном шаге характеристики акватории используются в качестве фоновых для реализации последующей итерации. Для новых фоновых значений строится матрица возмущений, рассчитываются новые значения возмущений параметров мод и ход решения повторяется до тех пор, пока не будет достигнута сходимость итераций.

Восстановление трехмерных характеристик акватории по данным двумерных задач распространения мод может быть осуществлено несколькими способами. Например, на первом шаге восстанавливают двумерные карты скоростей мод разных номеров в различных частотных диапазонах, а на втором шаге полученные двумерные карты тем или иным способом пересчитывают в трехмерные характеристики среды. Ограничения такого подхода связаны с плохой обусловленностью второго шага, так как количество неизвестных, как правило, заметно превосходит количество данных. Возможен другой подход [4, 5], включающий промежуточный этап восстановления двумерных карт скоростей отдельных мод. Этот

подход основан на экономном представлении восстанавливаемых характеристик среды с помощью так называемого “полосчатого” базиса. Важной отличительной особенностью такого базиса является возможность в едином подходе описать и профиль скорости звука, и течения, и характеристики дна. Преимущество использования полосчатого базиса в задачах томографии определяется соображениями удобства, в первую очередь, при решении прямой задачи с целью построения матрицы возмущений, а также при описании всех типов неоднородностей в едином подходе [3–5]. При этом получившаяся система линейных уравнений содержит информацию сразу о модах всех номеров во всех используемых частотных диапазонах, что позволяет заметно улучшить помехоустойчивость решения обратной задачи.

ВЫДЕЛЕНИЕ МОД В ПАССИВНОЙ СХЕМЕ С ОДИНОЧНЫМИ ПРИЕМНИКАМИ

Существуют два основных подхода к выделению мод. Если расстояние и особенности образованного морем волновода приводят к заметной межмодовой дисперсии, то моды можно сепарировать одиночными гидрофонами, даже если это невозможно сделать по временам прихода (рис. 1). Если этого сделать нельзя, используют систему вертикальных антенн, перекрывающих всю глубину волновода (используется свойство ортогональности мод по всей глубине волновода). Такой подход порождает серьезные проблемы, связанные с развертыванием вертикальных антенн и контролем положения отдельных гидрофонов, что вместе с задачей развертывания излучателей и привело к тому, что томография океана не вышла за рамки отдельных экспериментов и не стала полноценной схемой мониторинга морских акваторий. Возможность использования пассивной (без акустического излучателя) схемы и одиночных приемных гидрофонов, показанная в последние годы, изменила ситуацию кардинальным образом.

Идея метода состоит в том, что в качестве источника сигнала можно использовать собственные шумы моря или шумы удаленного судоходства. Если такой шум проходит поочередно через два гидрофона, то он играет роль сигнала, который накапливается в течение необходимого времени – схема работоспособна, если это время мало по сравнению с характерным временем изменения процесса, подлежащего мониторингу (например, временем жизни и временем ухода из акватории вихря). Шум моря, проходящий только через один приемный гидрофон, играет роль помехи. Теоретической основой является соотношение, устанавливающее связь двухточечной функции корреляции с функцией Грина среды. Ранее в работах авторов [6] был разработан подход, основанный на

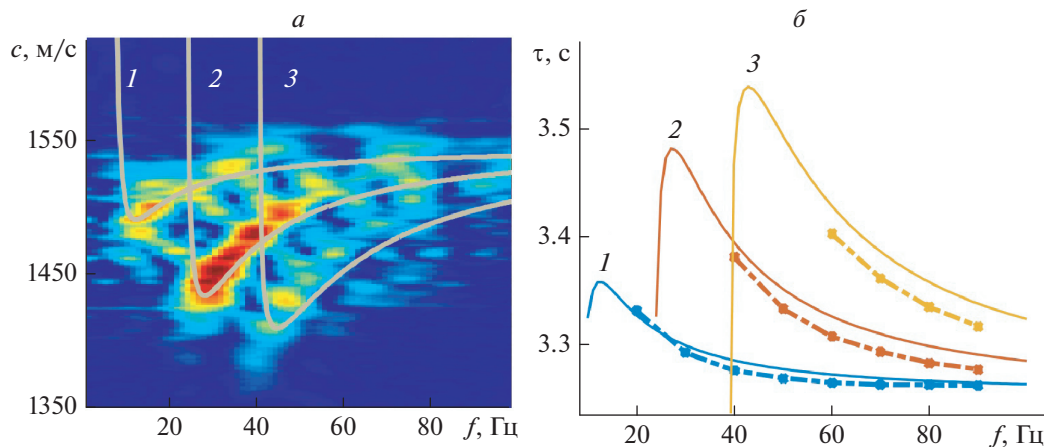


Рис. 1. Выделение мод одиночными гидрофонами в Баренцевом море при сильной дисперсии. Глубина моря 200 м, расстояние между гидрофонами 1 км. *a* – Спектрограмма экспериментальной корреляционной функции с нанесенными теоретическими кривыми; *б* – выделенные групповые скорости первых трех мод (пунктирные линии) с теоретическими дисперсионными кривыми (сплошные линии). Цифрами обозначены номера мод.

использовании в данном методе выделенных из принятого сигнала отдельных мод, а не полного поля, что позволило существенно (в разы) сократить необходимое время накопления шумового сигнала. В результате формируется пассивная схема модовой томографии, в которой после выделения отдельных мод происходит томографическое восстановление параметров неоднородностей по описанной в предыдущем разделе процедуре.

Создание схемы томографии с использованием отдельных гидрофонов вместо вертикальных антенн имеет ряд особенностей. В частности, в том случае, когда дисперсия на трассе распространения сигнала проявляется слабо (например, при небольшом расстоянии между гидрофонами), задача построения схемы пассивного мониторинга заметно усложняется, так как времена распространения отдельных мод определить не удастся. В этом случае исходными данными для решения обратной задачи могут быть частотно-временные смещения локализованных максимумов, наблюдаемых в спектрограмме функции взаимной корреляции шумов при изменении параметров волновода. Однако использование подобной информации не всегда возможно, так как формирование максимумов спектрограммы может быть вызвано двумя конкурирующими факторами – межмодовой интерференцией и точкой стационарной фазы, соответствующей волне Эйри, которая дает основной вклад в акустическое поле на сравнительно небольших расстояниях до источника. В итоге однозначная интерпретация наблюдаемых данных в общем случае затруднена или невозможна. Ситуация заметно улучшается, когда при анализе экспериментальных данных заранее выбирается частотный диапазон, в котором шумовое поле формируется низшей модой. В этом случае исходными данными для решения томографической задачи может выступать фаза

функции взаимной корреляции шума, которая дает оценку фазы функции Грина при одномодовом распространении (рис. 2). В итоге восстановление параметров среды осуществляется в три этапа: 1) сначала вычисляется фаза функции взаимной корреляции шумов в заданной полосе частот, где поле сформировано преимущественно первой модой; 2) далее рассчитывается фаза функции Грина для модели волновода с заданными параметрами; 3) строится функционал невязки между модельными и экспериментальными данными и поиск его глобального минимума на заданном множестве допустимых значений параметров волновода. Те значения параметров модели, при которых функционал невязки достигает минимума, являются оценкой истинных значений. Проведенное численное моделирование свидетельствует о возможности получения оценок в рамках такого подхода с приемлемой точностью даже при наличии шумов в исходных данных.

Эта схема была апробирована при обработке данных эксперимента в Баренцевом море, в результате чего удалось оценить значение скорости звука в приповерхностном слое дна. В этом эксперименте полоса присутствия первой моды составляла 0.5–5 Гц, т.е. основное влияние на распространение звука оказывали характеристики дна. Следует отметить, что важным преимуществом рассмотрения одномодового распространения является заметное улучшение отношения сигнал/помеха, т.е. существенное (до 4 раз) сокращение времени накопления шумов для восстановления параметров волновода. К очевидным недостаткам относится сокращение объема исходных данных по сравнению со случаем многомодового зондирования, что требует “загрубления” модели среды за счет уменьшения количества восстанавливаемых параметров. Для повышения обусловленности обратной задачи можно

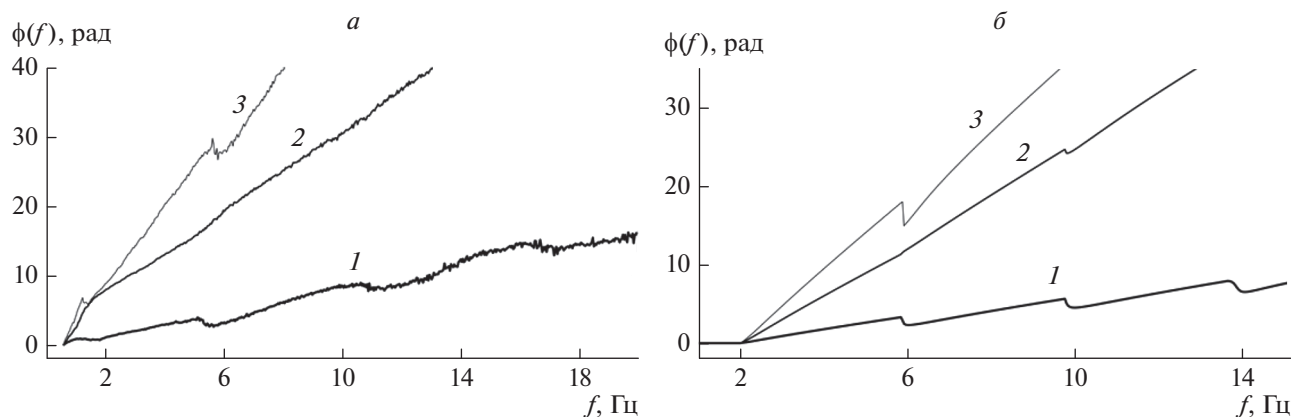


Рис. 2. *a* – Фаза функции взаимной корреляции шумовых сигналов, зарегистрированных в эксперименте на Баренцевом море донными гидрофонами, разнесенными на расстояния порядка 240 м (линия 1), 600 м (линия 2) и 1 км (линия 3); *б* – фаза функции Грина, рассчитанная для модели Пекериса с параметрами, близкими к условию эксперимента, для тех же расстояний, что и на рис. *a*. Схожесть графиков *a* и *б* подтверждает работоспособность предложенного метода.

использовать дополнительную информацию в виде критических частот отдельных мод, которые, как оказалось, хорошо идентифицируются по характерным скачкам фазы функции взаимной корреляции шумов. Кроме того, в случае одномодового распространения интерференция мод исключена, и в спектрограмме корреляционной функции однозначно идентифицируется единственный максимум, соответствующий на шкале частот минимуму групповой скорости первой моды, т.е. частоте, на которой преобладает волна Эйри, а на шкале временных задержек – времени распространения этой волны между точками приема. В итоге, помимо информации о фазе, оказывается возможным дополнительно использовать при решении томографической задачи данные о критических частотах мод, о частоте, соответствующей минимуму групповой скорости первой моды (эта частота определяется параметрами волновода), а также о времени распространения волны Эйри между точками приема (также зависит от характеристик среды распространения).

ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА

Для апробации описанной схемы разрабатывались системы регистрации сигналов для всепогодных натурных исследований в мелководных водоемах. Разработаны новые многоэлементные антенны и входящие в их состав гидрофоны. Гидрофоны представляли собой пьезокерамические сферы, внутри которых располагались предварительные усилители и фильтры. Такое размещение усилителей внутри гидрофонов в сочетании с общей экранировкой устройств позволяет существенно уменьшить долю помех, вызванных паразитными наводками. Фильтры необходимы, чтобы исключить запись низкочастотных сигналов, вызванных волнением поверхности,

которые имеют высокую амплитуду и снижают динамический диапазон гидрофона. Антенна сделана по модульному принципу: гидрофоны возможно подключать к ней независимо через герморазъемы. Это позволяет при необходимости варьировать конфигурацию приемного оборудования. После изготовления аппаратура прошла испытания на герметичность в барокамере при давлении около 6 атмосфер в течение суток.

В результате разработана дешевая и надежная конструкция, которую можно применять в различных экспериментальных условиях, определяемых температурным режимом (т.е. сезонами года), глубиной и геометрией водоема. Апробацию системы в натурных условиях мы проводили на шельфе Белого моря в ледовой обстановке. Сигналы регистрировались в двух точках, расстояние между которыми варьировалось в пределах 10–200 м. Измерения вели как в активном, так и в пассивном режиме. Полученные записи были обработаны корреляционным способом. В итоге испытаний было экспериментально показано, что дно в месте проведения измерений можно считать акустически жестким, что соответствует априорной информации. При пассивных измерениях, когда фиксируются собственные акустические поля водоема, времени накопления в несколько секунд оказалось достаточно для выделения корреляционных максимумов; выявлена временная изменчивость положения корреляционных максимумов, которая находится в однозначном соответствии с приливно-отливными процессами (рис. 3).

ФУНКЦИОНАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Используемые на практике методы решения томографических задач в гидроакустических приложениях позволяют получить решение в некоторых конкретных постановках, однако являются

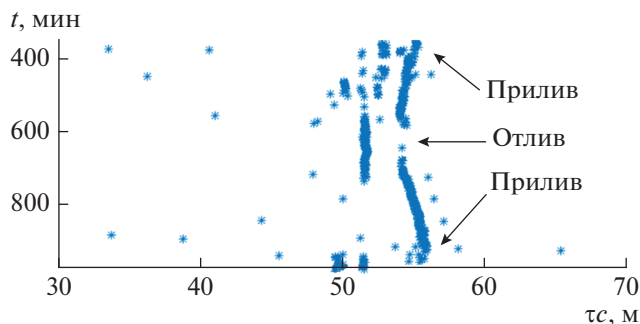


Рис. 3. Изменение положения корреляционных максимумов шумового сигнала со временем; из независимых источников указаны прилив и отлив. Здесь τ – временной сдвиг, при котором корреляционная функция достигает максимума, c – скорость звука в воде.

приближенными и, следовательно, в общем случае ограничены в их практической применимости, например, в случае восстановления сильных неоднородностей. Принципиально иной подход осуществляется в функциональном методе [7], который обладает рядом преимуществ, например, учитывает процессы многократного рассеяния волн; позволяет одновременно восстановить как скалярные, так и векторные характеристики среды и в то же время не имеет принципиальных ограничений на область его применимости. Кроме того, использование функциональных алгоритмов дает возможность продвинуться в разработке новых методов волновой акустической томографии океанских акваторий, позволяющих учесть неадиабатические эффекты.

ВЕКТОРНО-ФАЗОВЫЕ МЕТОДЫ

Использование комбинированных приемных модулей, способных в одной точке пространства

одновременно регистрировать скалярные и векторные характеристики акустических полей, позволяет получать заметно больший объем информации о структуре волнового поля по сравнению с использованием одиночных приемников звукового давления. Теоретические оценки показывают, что использование комбинированных приемных модулей в пассивной томографии позволяет существенно сократить время накопления шумового сигнала, требуемого для достоверной оценки функции Грина.

В результате эксперимента в пассивной схеме, проведенного на полигоне МГУ на Клязьминском водохранилище с использованием двух комбинированных приемных модулей (КПМ), разнесенных последовательно на 40 и 90 м, и последующей обработки результатов получена функция взаимной корреляции, в которой был выделен одиночный корреляционный пик вблизи нулевой задержки, наблюдающийся для обоих расстояний. Второй пик, симметричный первому, не был выделен.

С учетом определенного направления прихода шумового сигнала, а также известной конфигурации каналов векторного приемника сделано предположение, что КПМ регистрируют волну, направление распространения которой не совпадает с прямой, вдоль которой размещены приемные модули. Это и объясняет наличие только одного пика корреляционной функции. Как показала дополнительная обработка экспериментальных данных, интенсивность этой волны значительно превышает интенсивность шумов, приходящих с других направлений (рис. 4а), в результате чего симметричные пики функции взаимной корреляции не наблюдаются.

При известном направлении прихода помехи и информации о взаимной ориентации кана-

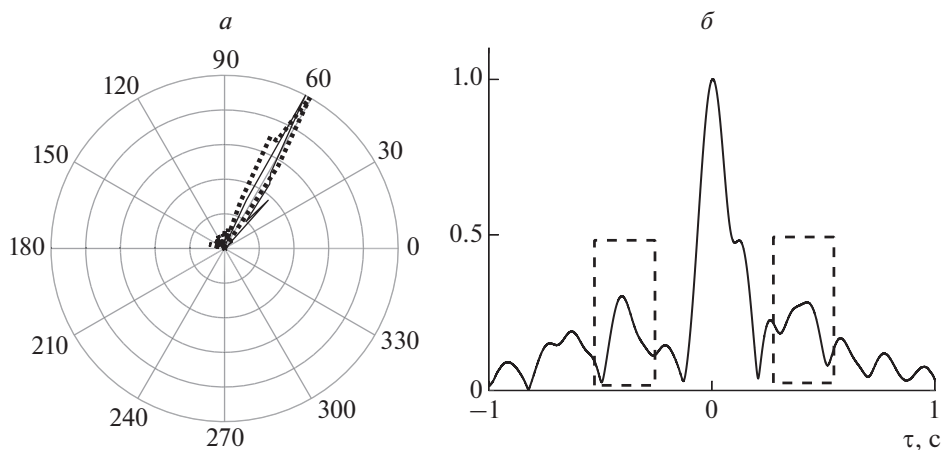


Рис. 4. Угловое распределение интенсивности шумового поля, зарегистрированного комбинированным приемником № 1 (a – сплошная линия) и приемником № 2 (a – линия в виде точек). Огибающая нормированной корреляционной функции (b), рассчитанная с учетом кардиоидного подавления анизотропного шумового поля (пунктиром выделены области локализации информативных пиков).

лов приемных модулей был выполнен переход к построению взаимных корреляционных функций, учитывающих анизотропию шумов. Дополнительно с целью выделения направлений распространения шумовых сигналов, представляющих наибольший интерес, на каждом из КПМ были сформированы кардиоидные характеристики направленности. Подход заключался в таком формировании кардиоиды, при котором влияние помех с заданного направления подавляется за счет поворота минимума кардиоиды в направлении на интенсивную помеху. Для сформированных кардиоидных характеристик были построены функции взаимной корреляции, для которых получены выделяющиеся из шумов симметричные корреляционные максимумы, несмотря на наличие не до конца подавленной шумовой помехи вблизи нулевой задержки (рис. 4б). Таким образом, использование при корреляционной обработке кардиоиды позволило выделить симметричные пики на фоне интенсивной анизотропной помехи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования и поставленных экспериментов авторы приходят к выводу, что мониторинг северных акваторий осуществим в гидроакустической томографической схеме с упрощенными требованиями на реализацию и последующую обработку данных. Перспективной является пассивная схема модовой томографии с данными, принимаемыми одиночными

приемниками, с использованием информации о критических частотах мод и скачках фазы функции корреляции принимаемых полей. Использование функционально-аналитических и векторно-фазовых методов, находящееся на данный момент в стадии начальной постановки, способно приблизить разрабатываемую схему мониторинга мелких морей к практической реализации.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-05-00737).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сергеев С.Н., Шуруп А.С., Годин О.А. и др.* // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 1. С. 73; *Sergeev S.N., Shurup A.S., Godin O.A. et al.* // Acoust. Phys. 2017. V. 63. P. 76.
2. *Веденев А.И., Гончаров В.В., Муханов П.Ю. и др.* // Уч. зап. физ. фак-та МГУ. 2017. № 5. С. 1750107.
3. *Буров В.А., Сергеев С.Н., Шуруп А.С.* // Акуст. журн. 2007. Т. 53. № 6. С. 791; *Burov V.A., Sergeev S.N., Shurup A.S.* // Acoust. Phys. 2007. V. 53. P. 698.
4. *Буров В.А., Сергеев С.Н., Шуруп А.С.* // Акуст. журн. 2011. Т. 57. № 3. С. 348; *Burov V.A., Sergeev S.N., Shurup A.S.* // Acoust. Phys. 2011. V. 57. P. 344.
5. *Буров В.А., Сергеев С.Н., Шуруп А.С. и др.* // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 5. С. 583; *Burov V.A., Sergeev S.N., Shurup A.S. et al.* // Acoust. Phys. 2015. V. 61. P. 534.
6. *Буров В.А., Сергеев С.Н., Шуруп А.С.* // Акуст. журн. 2008. Т. 54. № 1. С. 51; *Burov V.A., Sergeev S.N., Shurup A.S.* // Acoust. Phys. 2008. V. 54. P. 42.
7. *Буров В.А., Сергеев С.Н., Шуруп А.С. и др.* // Сб. тр. науч. конф. "Сессия науч. совета РАН по акустике и XXV сессия Рос. акуст. об-ва. Т. 2. М.: ГЕОС, 2012. С. 22.