

УДК 534.6

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗНЕСЕННЫХ В ПРОСТРАНСТВЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ПРИЕМНЫХ МОДУЛЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СКАЛЯРНО-ВЕКТОРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

© 2020 г. Е. В. Медведева<sup>1, \*</sup>, Б. И. Гончаренко<sup>1</sup>, А. С. Шуруп<sup>1, 2, 3</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, физический факультет, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии имени П.П. Шириова Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: medvedeva.ev15@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 26.08.2019 г.

После доработки 13.09.2019 г.

Принята к публикации 28.10.2019 г.

Выполнен анализ натуральных экспериментов по измерению скалярно-векторной структуры акустического поля на гидроакустическом полигоне МГУ при наличии ледового покрова. Оценена анизотропия шумового поля акватории и построены функции взаимной корреляции шумов с использованием характеристик направленности для двух разнесенных в пространстве комбинированных приемных модулей.

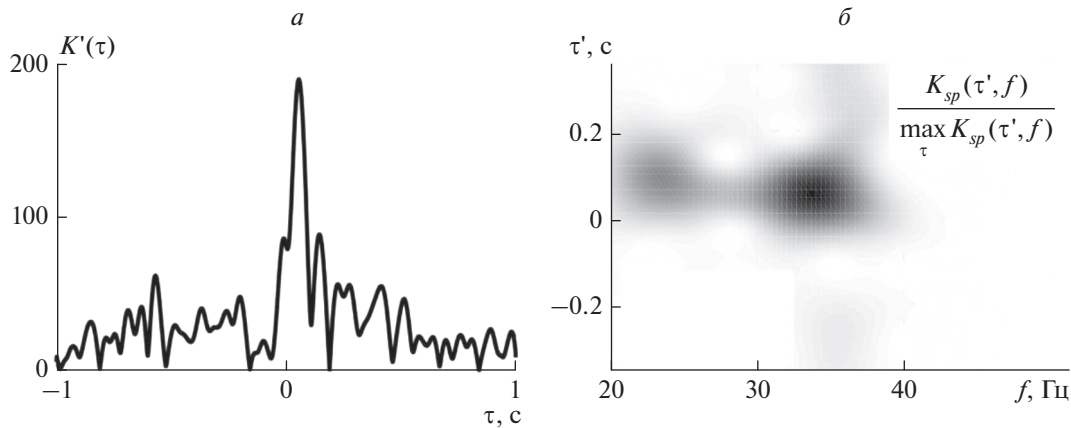
DOI: 10.31857/S036767652002026X

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из важных методов исследования обширных океанических акваторий является пассивная акустическая томография, основанная на теоретически обоснованном способе оценки функции Грина для двух разнесенных в пространстве точек с помощью взаимной корреляции диффузных шумовых полей, принятых в этих точках [1]. Для пассивного мониторинга схема выглядит следующим образом: два гидрофона произвольно расположены на некотором расстоянии в акватории, в которой присутствует изотропный акустический шум, при этом часть шума проходит последовательно через оба гидрофона и представляет собой полезный “сигнал”. Данная ситуация эквивалентна схеме, в которой один гидрофон излучает, а второй принимает этот сигнал. При этом шумы, приходящие с других направлений, рассматриваются в качестве “помехи”. Основным фактором, определяющим эффективность применения пассивной томографии, является время накопления шумового сигнала [1]. По нашему мнению, перспективным направлением развития методов пассивной акустической томографии является использование комбинированных приемных модулей, способных в одной точке пространства регистрировать как скалярные, так и векторные характеристики акустических полей [2].

Такой подход позволяет получать одновременно заметно больший объем информации о структуре волнового поля по сравнению с использованием одиночных приемников давления. Теоретические оценки показывают [3], что использование комбинированных приемных модулей в пассивной томографии позволяет существенно сократить время накопления шумового сигнала, требуемого для достоверной оценки функции Грина.

Настоящая работа посвящена анализу экспериментальных данных [4], полученных в результате измерений зимой 2019 г. в акватории Клязьминского водохранилища на гидроакустическом полигоне МГУ при наличии на поверхности акватории ледового покрова. Для проведения эксперимента вдали от берега был выбран протяженный в горизонтальном направлении ровный участок водного слоя глубиной примерно 8 м, толщина льда составляла порядка 40–50 см. На дно были установлены два комбинированных приемных модуля (КПМ № 1 и № 2), разнесенных в пространстве сначала на 40 м, а затем на 90 м. С их помощью проводилось одновременное измерение звукового давления и трех взаимно-ортогональных составляющих колебательной скорости шумового поля. При этом ориентация каналов X приемных модулей была известной и составляла



**Рис. 1.** Огибающая производной функции взаимной корреляции обеленных шумовых сигналов, принятых на паре гидрофонов, разнесенных в пространстве на 40 м (а); нормированная спектрограмма производной корреляционной функции для 40 м (б).

$\varphi_1 = 250^\circ$  СЗ,  $\varphi_2 = 257^\circ$  СЗ относительно направления на Север.

### ПЕРВИЧНАЯ КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ОБРАБОТКА

Обработка экспериментальных данных осуществлялась с учетом синхронизации сигналов, поступавших с каждого из двух приемных модулей на аналого-цифровые преобразователи. Для этого одновременно с записью акустических измерений на дополнительные каналы обоих АЦП в реальном масштабе времени поступал FM сигнал с одной и той же радиостанции. Для каждого отсчета записи этого сигнала с двух различных АЦП были рассчитаны относительные сдвиги по времени функции взаимной корреляции (1). Далее сигнал с КПМ № 2 был интерполирован на новую временную ось с учетом сдвигов, в результате чего сигналы с радио-каналов были синхронизированы с точностью до отсчета. По этому алгоритму были обработаны сигналы с каналов КПМ № 1 и № 2. Синхронизация позволила приступить к корреляционному анализу шумовых полей акватории, который позволяет выделить полезный сигнал, распространяющийся между приемниками, на фоне “помех”.

Для шумовых полей  $p(\vec{r}_1, t)$  и  $p(\vec{r}_2, t)$ , записанных в двух точках  $\vec{r}_1$  и  $\vec{r}_2$  (где  $\vec{r} = \{x, y, z\}$  – радиус вектор), соответствующих положениям приемников № 1 и № 2 соответственно, рассчитывалась функция взаимной корреляции:

$$K(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T p(\vec{r}_1, t) p(\vec{r}_2, t - \tau) dt, \quad (1)$$

где  $T$  – время накопления шума. Ожидается, что функция  $K(\tau)$  при этом будет иметь два симмет-

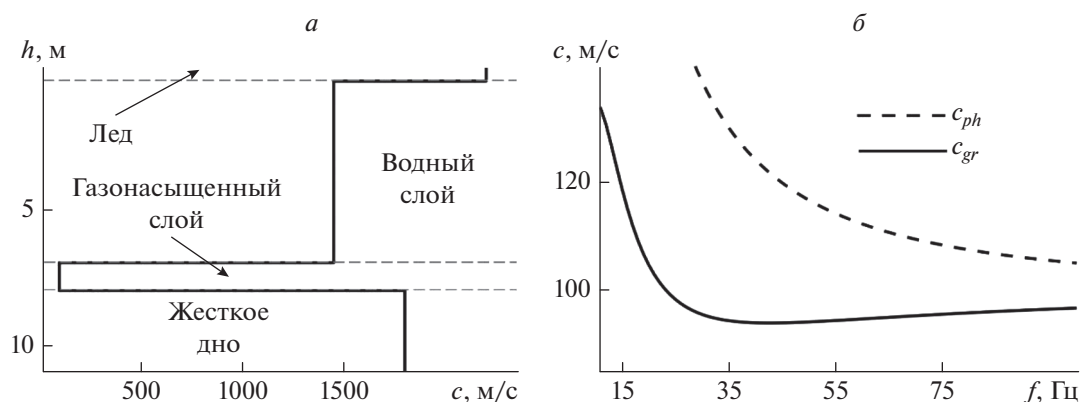
ричных пика. Пики в положительной части шкалы времени  $\tau$  соответствуют регистрации сигналов, распространяющихся от КПМ № 1 к КПМ № 2, пики в отрицательной области, аналогично, в противоположную сторону. Времена задержек  $\tau$ , соответствующие максимумам  $K(\tau)$ , определяются временем распространения сигналов между указанными гидрофонами. Для более точной оценки времен распространений сигналов далее будет анализироваться огибающая производной корреляционной функции (1) по временной задержке  $\tau$ , аналогично [5].

В результате измерений при наличии ледового покрова двумя КПМ, разнесенными в пространстве последовательно на 40 и 90 м, были получены записи сигналов длительностью по 45 мин. После процедуры обеления [5] они оба приблизительно представляют собой стационарный шум, близкий к белому, спектральные составляющие которого распределены равномерно по всему диапазону частот. Все записи были разбиты на реализации по 120 с, для каждой из которых в полосе частот 20–45 Гц была получена функция взаимной корреляции по формуле (1). В результате суммирования и нормирования на максимальное значение был выделен одиночный корреляционный пик вблизи нулевой задержки, наблюдающийся для обоих расстояний (рис. 1а). Второй пик, симметричный первому, не прослеживается.

Для анализа полученных результатов были рассчитаны спектрограммы корреляционных функций  $K(\tau)$ :

$$K_{sp}(\tau', f) = \int_{-\infty}^{+\infty} K(\tau) h(\tau - \tau') \exp(-i2\pi f\tau) dt, \quad (2)$$

где  $h(\tau)$  – прямоугольная оконная функция.



**Рис. 2.** Профиль скорости звука  $c$  в акватории Клязьминского водохранилища в зависимости от глубины  $h$  (а); Зависимость фазовой  $c_{ph}$  и групповой  $c_{gr}$  скоростей от частоты  $f$  – результаты численного моделирования для заданного профиля скорости звука.

На построенной путем оконного преобразования Фурье (2) спектрограмме (рис. 1б) видно, что основная энергия сигнала, регистрируемого двумя КПМ, сосредоточена в области 30–40 Гц, что может соответствовать частоте распространения одной из низших акустических мод. Ранее было показано [6], что основной вклад в формирование корреляционной функции шумов дает точка стационарной фазы, соответствующая локальному минимуму групповой скорости рассматриваемой моды. Однако для условий эксперимента критическая частота первой нормальной волны по нашим оценкам составляет около 80–100 Гц.

Было проведено численное исследование, показавшее, что при наличии на дне акватории промежуточного слоя со скоростью звука порядка 100–300 м/с, возможно формирование волны, локализованной частично в этом низкоскоростном слое, групповая скорость которой как раз и обладает минимумом вблизи 35 Гц. О наличии такого низкоскоростного слоя осадков в акватории Клязьминского водохранилища известно, его присутствие объясняется содержанием пузырьков метана [7], которое приводит к существенному понижению скорости звука. На рис. 2а задан профиль скорости звука в зависимости от глубины для трехслойной модели волновода при наличии ледового покрова, где  $h = 0–0.5$  м соответствует  $c = 2200$  м/с (лед),  $h = 0.5–7$  м –  $c = 1450$  м/с (вода),  $h = 7–8.3$  м –  $c = 100$  м/с (газонасыщенный слой),  $h = 8.3$  м и глубже –  $c = 1800$  м/с (дно в виде жидкого полупространства). Отношение плотностей дна и водного слоя:  $\rho_d/\rho_w = 2.1$ . Результаты численного моделирования для приведенных выше параметров волновода дают оценку групповой скорости волны, минимум которой как раз и приходится на частоты порядка 35–40 Гц. Следует отметить, что ранее подобная волна в эксперименте не наблюдалась.

При использовании пассивных методов исследования излучать ничего не требуется, что является явным преимуществом таких методов. В рассматриваемом случае это позволило приступить к изучению низкочастотного гидроакустического поля, рассмотрение которого в активном режиме представляет сложную задачу ввиду технических ограничений на возможности излучения низкочастотного звука.

Получившаяся в результате обработки шумов корреляционная функция (рис. 1) не содержит симметричных относительно нулевой задержки пиков, что требует отдельного рассмотрения. Это может быть связано с выраженной анизотропией шумового поля – присутствием выделенного направления, с которого приходит основная энергия регистрируемого шумового сигнала.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ АНИЗОТРОПИИ ШУМОВОГО ПОЛЯ

Для исследования причин возникновения одиночного пика вместо двух симметричных относительно нулевой задержки, для обоих КПМ было оценено распределение интенсивности регистрируемого сигнала в зависимости от угла направления [8] в диапазоне 20–45 Гц. Выбранная полоса частот при этом была разбита на  $N = 100$  различных дискретных составляющих  $f_i$ , для каждой из которых рассчитывается значение азимутального угла  $\varphi_i$ , а также значение интенсивности как сумма модулей составляющих вектора потока акустической мощности, усредненные по всему времени записи, по следующим формулам:

$$\operatorname{tg} \varphi_i = \frac{W_{Ry,i}}{W_{Rx,i}}, \quad I(f_i, \varphi_i) = \sqrt{W_{Rx,i}^2 + W_{Ry,i}^2}, \quad (3)$$

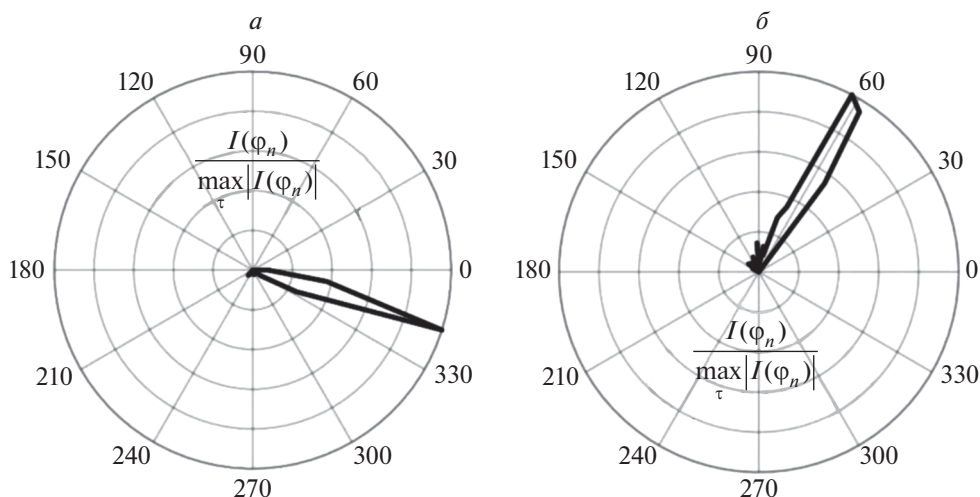


Рис. 3. Угловое распределение интенсивности шума, характеризующее его пространственную анизотропию, для КПМ № 1 (а) и КПМ № 2 (б) в полосе частот 20–45 Гц за 45 мин наблюдений.

где  $W_{R_{x,j}}$ ,  $W_{R_{y,j}}$  – проекции потоков акустической мощности для каждой составляющей  $i$  на направления  $x$  и  $y$ .

Далее весь диапазон углов от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  разбивается на  $M = 100$  секторов шириной  $\Delta\varphi_0 = 3.6^\circ$ , которая определяет разрешение по углу для заданного числа секторов  $M$ . Затем строится гистограмма для суммарных интенсивностей  $I(\varphi_n)$  сигнала, попадающего в каждый из секторов:

$$I(\varphi_n) = \sum_{i=1}^N I(f_i, [n-1]\Delta\varphi_0 \leq \varphi_i < n\Delta\varphi_0), \quad (4)$$

где  $\varphi_n = \Delta\varphi_0 \left( n + \frac{1}{2} \right)$ ,  $n = 1, 2, \dots, M$ . Результат построения  $I(\varphi_n)$  для описанных выше параметров обработки приведен на рис. 3а, 3б. Видно что, шумовое поле обладает ярко выраженной анизотропией. Направление, в котором наблюдается пик интенсивности, составило  $\sim 340^\circ$  для КПМ № 1 и  $\sim 65^\circ$  для КПМ № 2 с точностью определения угла порядка  $3.5^\circ$ . По оцененному направлению прихода шумового сигнала, а также с учетом известной конфигурации расположения каналов векторного приемника, можно выдвинуть предположение, что звукоприемники КПМ регистрируют также волну, направление распространения которой не совпадает с прямой, вдоль которой размещены приемные модули. Это и объясняет наличие только одного пика корреляционной функции. Интенсивность этой волны значительно превышает интенсивность шумов, приходящих с других направлений, в результате чего симметричные пики функции взаимной корреляции не наблюдаются.

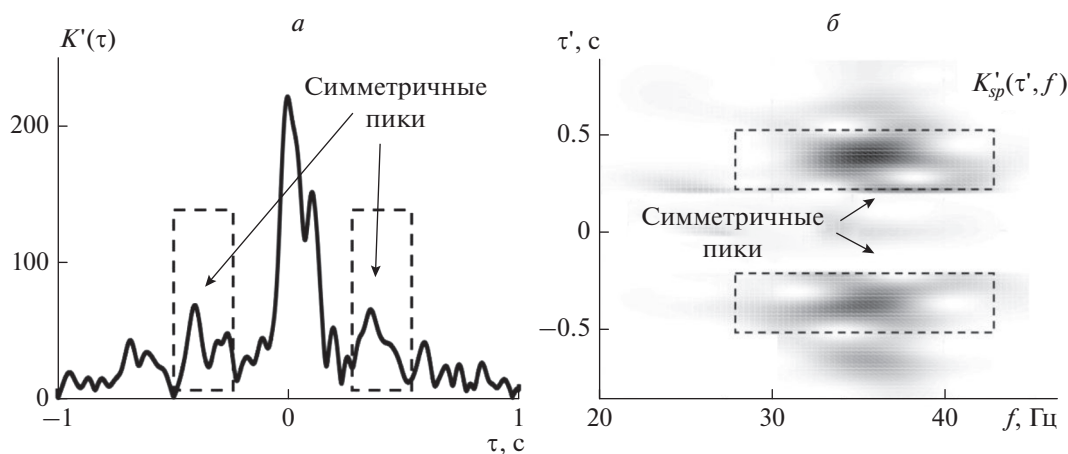
Для самопроверки по описанному выше алгоритму (3) были также построены зависимости пеленга от времени. Значения пеленга составили в среднем  $69^\circ \pm 3.5^\circ$  и  $341^\circ \pm 2.8^\circ$  для КПМ № 1 и № 2 соответственно, что совпадает с выделенным направлением на гистограмме интенсивностей и подтверждает предположение о наличии выраженной пространственной анизотропии шумового поля в акватории. Выявленная особенность регистрируемого шумового поля требует своего учета при построении шумовых корреляций.

#### ПОСТРОЕНИЕ ФУНКЦИЙ ВЗАИМНОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ШУМОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАРДИОИДЫ

При известном направлении прихода помехи и наличием информации о взаимной ориентации каналов  $X$  приемных модулей можно перейти к построению взаимных корреляционных функций, учитывающих анизотропию шумов. Алгоритм корреляционной обработки, примененный в данном случае, был аналогичен стандартной корреляционной обработке (1). Дополнительно, с целью выделения направлений распространения шумовых сигналов, представляющих наибольший интерес, на каждом из КПМ были сформированы кардиоидные характеристики направленности в виде

$$U = P + \rho c (V_x \cos \varphi + V_y \sin \varphi). \quad (5)$$

Альтернативный подход заключается в таком формировании кардиоиды, при котором влияние помех с заданного направления подавляется за счет поворота минимума кардиоиды в направлении на интенсивную помеху. Для сформированных функций  $U$  (5) были построены функции



**Рис. 4.** Огибающая производной функции взаимной корреляции для углов, характеризующих направления на максимумы кардиоид,  $\varphi_1 = \pi$  и  $\varphi_2 = 0$  (а); нормированная спектрограмма производной направленной функции взаимной корреляции на паре гидрофонов, разнесенных в пространстве на 40 м для  $\varphi_1 = \pi$  и  $\varphi_2 = 0$  (б).

взаимной корреляции, которые в дальнейшем будем называть направленными корреляциями. Направления максимумов кардиоиды как азимутальных углов было выбрано двумя способами: в первом случае (рис. 4а), в качестве азимутального угла  $\varphi$  были заданы углы  $\varphi_1 = \pi$  и  $\varphi_2 = 0$ , в результате чего характеристики направленности двух КПМ были сориентированы в направлениях друг на друга. Во втором случае азимутальные углы были выбраны как  $\varphi_1 = \varphi(t) + 180^\circ$  и  $\varphi_2 = \varphi(t) + 180^\circ$ , где  $\varphi(t)$  — значения пеленга как оценка направления на выделенную шумовую помеху, полученная ранее. Таким образом, была осуществлена попытка отстройки от помехи в рассматриваемой полосе частот.

Для направленных корреляций на рис. 4а можно видеть выделяющиеся из шумов симметричные корреляционные максимумы, несмотря на наличие не до конца подавленной шумовой помехи вблизи нулевой задержки. В диапазоне частот 20–45 Гц, как было отмечено ранее, данные пики соответствуют волне, локализованной в придонном слое. Сдвиг пиков относительно нуля составляет порядка 0.4 с, что позволяет оценить скорость волны, бегущей вдоль прямой, соединяющей два КПМ. Приближенная оценка дает значение скорости 100 м/с, что согласуется с предположением о возможности формирования низкоскоростной звуковой волны в газонасыщенном грунтовом придонном слое Клязьминского водохранилища.

По формуле (2) были также построены спектрограммы для производных корреляционных функций для двух различных способов задания углов  $\varphi$ , аналогично предварительным расчетам. Для большей наглядности на центральную полосу

по времени в диапазоне от  $-0.2$  до  $0.2$  с был наложен фильтр, понижающий интенсивность в 20 раз, что дает возможность различения областей концентрации шумов, распространяющихся между КПМ. На рис. 4б видно, что они, как и подавленная фильтром основная помеха, локализованы в области частот 30–40 Гц.

Таким образом, с помощью разнесенных в пространстве комбинированных звукоприемников была зафиксирована волна в газонасыщенном промежуточном слое грунта, распространяющаяся со скоростью звука, существенно меньшей скорости звука в водном слое. В ранее проведенных на акватории Клязьминского водохранилища работах [9] сигналы на частотах вблизи 35 Гц не анализировали.

Использование при корреляционной обработке кардиоиды позволило выделить симметричные пики на фоне интенсивной анизотропной помехи. Применение описанного метода построения направленных функций взаимной корреляции является перспективным для анализа отдельных частотных областей, в которых распространяются волны, несущие информацию о различных характеристиках волновода — характеристик водного слоя в высокочастотном диапазоне, параметров дна в низкочастотном диапазоне.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в ходе проведенных натуральных измерений данные в совокупности с алгоритмами обработки, численно реализованными и апробированными в настоящей работе, являются основой для развития методов пассивной томографии мелкого моря, использующей скалярно-векторные характеристики звукового поля. Перспектив-

ным направлением дальнейших разработок является корреляционная обработка шумов с учетом формирования кардиоиды на каждом комбинированном приемном модуле в различных частотных диапазонах, а также разработка схемы пассивного мониторинга, учитывающей анизотропию шумового поля. Как показывают теоретические оценки и предварительные экспериментальные результаты [1, 4], в этом случае возможно существенное по сравнению с использованием одиночных приемников давления сокращение времени накопления шумов, требуемого для достоверной оценки времен распространений сигналов между приемными станциями.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 18-05-70034, № 18-05-00737).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. № 1. P. 42.
2. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007.
3. Гордиенко В.А., Гончаренко Б.И., Илюшин Я.А. // Акуст. журн. 1993. Т. 39. № 3. С. 455; Gordienko V.A., Goncharenko B.I., Ilyushin Ya.A. // Acoust. Phys. 1993. V. 39. № 3. P. 455.
4. Медведева Е.В. // XXVI Межд. конф. "Ломоносов-2019" (Москва, 2019). С. 22.
5. Bensen G.D., Ritzwoller M.H., Barmin M.P. et al. // Geophys. J. Int. 2007. V. 169. P. 1239.
6. Буров В.А., Гринюк А.В., Кравченко В.Н. и др. // Акуст. журн. 2014. Т. 60. № 6. С. 611; Burov V.A., Grinyuk F.V., Kravchenko V.N. et al. // Acoust. Phys. 2014. V. 60. № 6. P. 647.
7. Рожин Ф.В., Тонаканов О.С. Общая гидроакустика. М.: МГУ, 1988.
8. Гордиенко В.А., Гордиенко Т.В., Краснописцев Н.В. и др. // Вестник МГУ. Сер. 3. Физ., астрон. 2014. № 2. С. 3; Gordienko V.A., Gordienko T.V., Krasnopistzev N.V. et al. // Moscow Univ. Phys. Bull. 2014. V. 69. № 2. P. 105.
9. Гончаренко Б.И., Захаров Л.Н., Иванов В.Е. // Акуст. журн. 1979. Т. 25. № 4. С. 507.