

УДК 534.2:517.4

## КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ОБРАБОТКА АНИЗОТРОПНОГО АКУСТИЧЕСКОГО ШУМА, ПРИСУТСТВУЮЩЕГО В ПОКРЫТОМ ЛЬДОМ ВОДОЕМЕ

© 2022 г. К. В. Дмитриев\*

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

*\*E-mail: kdmiriev@lanat.ru*

Поступила в редакцию 24.08.2021 г.

После доработки 06.09.2021 г.

Принята к публикации 22.09.2021 г.

Обсуждаются результаты натуральных экспериментов, в которых с помощью метода шумовой интерферометрии исследуется акустическое поле в покрытом льдом мелком водоеме. Для приема использовалась система гидрофонов, а источниками сигналов служили как звуки удара по льду, так и шумы, присутствующие в водоеме.

DOI: 10.31857/S0367676522010082

### ВВЕДЕНИЕ

Задача мониторинга акваторий находит свое практическое приложение как в вопросах изучения и прогнозирования изменений климата, так и применительно к геологоразведке. Для арктического региона, покрытого льдом, подход, основанный на контактных методах, например, на использовании автономных глайдеров, оказывается невозможным. В этом случае акустические методы томографического типа являются предпочтительными. Однако “классическая” томография, основанная на активном излучении сигналов и их регистрации, в гидроакустических приложениях оказывается очень дорогой, в основном из-за сложностей с созданием и питанием мощных излучателей. От этого недостатка свободен метод шумовой интерферометрии, который основан на приеме уже присутствующих в водоеме шумов и их корреляционной обработке. В настоящее время этот метод находит свое применение в гидроакустике [1–3], геоакустике [4], а также, с некоторыми модификациями, в ультразвуковой диагностике [5].

В настоящей работе приведены результаты натуральных экспериментов на карьере Сима и на реке Грязеве в Московской области, где исследовалось акустическое поле в покрытом льдом мелком водоеме. Транспортная доступность водоемов позволяет существенно снизить затраты на проведение измерений. Прием сигналов велся как с использованием одиночных гидрофонов (в экспериментах с активным источником), так и на перекрестных

трассах с помощью системы гидрофонов в условиях анизотропной шумовой обстановки. Особенно упомянутых водоемов является их малая глубина, что позволяет исследовать их непосредственно контактными методами. При этом, с одной стороны, сравнение полученных данных с результатами обработки акустических сигналов позволяет делать вывод о работоспособности на практике методов, основанных на корреляционной обработке акустического поля. С другой стороны, выявляются и анализируются некоторые трудности, связанные с анизотропией и нестационарностью регистрируемых сигналов.

### СТРУКТУРА ПОЛЯ, СОЗДАВАЕМОГО АКТИВНЫМ ИСТОЧНИКОМ

В покрытом льдом мелком водоеме создается довольно сложная структура акустического поля. На расстояниях от источника звука, значительно превышающих глубину водоема, можно ожидать разделения вкладов от разных типов волн и мод. В дальнейшем эту информацию можно использовать при анализе поля вблизи источника, где все компоненты интерферируют друг с другом и, кроме того, с нераспространяющимся полем источника.

Распространение волн в покрытом льдом водоеме обсуждалось в [6, 7], где рассматривалась модель льда в виде пластины, плавающей на бесконечно глубокой воде. В более поздней работе [8] дополнительно учитывается влияние воздуха. Многие аспекты распространения звука в водоемах при наличии льда затрагиваются в моногра-

фии [9]. Особенностью водоемов, где проводились измерения, является то, что за счет процессов разложения на дне образуется слой, богатый пузырьками воздуха. В итоге в этих условиях дно ведет себя как акустически мягкая граница [10].

Для получения дисперсионного соотношения используется простая двуслойная модель. Система координат выбирается так, что ось  $x$  направлена горизонтально, а ось  $z$  — вертикально вверх, причем начало отсчета выбирается на дне водоема. Толщины слоев воды и льда равны, соответственно,  $H$  и  $h$ . Плотности воды и льда полагаются равными  $\rho_0$  и  $\rho$ . Скорость звука в воде составляет  $c_0$ , а для льда задаются упругие параметры: модуль Юнга  $E$  и коэффициент Пуассона  $\nu$ . Временная зависимость полей выбирается в виде  $\sim \exp(-i\omega t)$ . Тогда уравнения, описывающие волновой процесс, имеют вид [9]

$$\begin{aligned} D\nabla^4 u(x) - \rho h \omega^2 u(x) + \rho_0 g u(x) &= i\omega \rho_0 \varphi(x, H); \\ \nabla^2 \varphi(x, z) + \frac{\omega^2}{c_0^2} \varphi(x, z) &= 0; \\ \varphi(x, 0) = 0; \quad -i\omega u(x) &= \left. \frac{\partial \varphi(x, z)}{\partial z} \right|_{z=H}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\varphi(x, z)$  — потенциал акустического поля в водном слое;  $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$  и  $u(x)$  — цилиндрическая жесткость и вертикальное смещение ледяного слоя, соответственно;  $g$  — ускорение свободного падения. Первое из уравнений (1) описывает колебания ледяного слоя как целого; второе уравнение — это уравнение Гельмгольца в воде; третье и четвертое уравнения задают условия на дне и на границе между водой и льдом. Решение (1) можно искать в виде  $\varphi(x, z) = \varphi_0 \exp(ik_x x) \sin(k_z z)$ ;  $u(x) = u_0 \exp(ik_x x)$ , где  $k_x$  и  $k_z$  — горизонтальная и вертикальная компоненты волнового вектора в водной среде, соответственно;  $k_x^2 + k_z^2 = \omega^2/c_0^2$ . Это приводит к дисперсионному соотношению в виде

$$\omega^2 = \frac{Dk_x^4 + \rho_0 g}{\rho h + \frac{\rho_0}{k_z} \operatorname{tg}(k_z H)}; \quad k_z = \sqrt{\omega^2/c_0^2 - k_x^2}. \quad (2)$$

Подобные выражения для другого типа дна получены и использовались, например, в [9, 11]. Однако, в них, по-видимому, содержится неточность, поскольку из-за одинаковых обозначений полагается, что вертикальная компонента волнового вектора  $k_z$  равна горизонтальной  $k_x$ . В [12] для вертикальной компоненты выбрано иное обозначение, благодаря чему эта неточность устраняется.

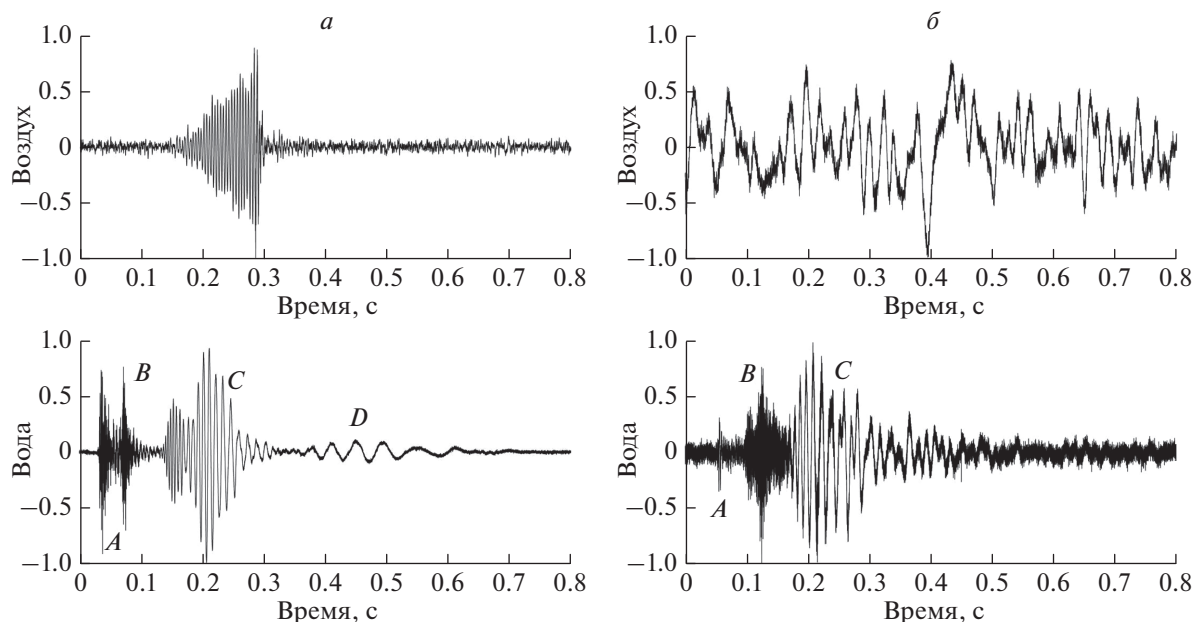
Дисперсионное соотношение (2) имеет много решений. Часть из них, для которых компонента  $k_z$

действительная, можно интерпретировать как моды водного слоя. Если  $k_z$  мнимая, то поле существует лишь вблизи ледового слоя, а значит, соответствующее решение описывает изгибающую волну во льду. Следует отметить также что уравнение (2) представляет собой некоторое приближение, которое не учитывает ни наличие воздуха, ни “тонкую структуру” дна водоема.

В рамках настоящего исследования для того, чтобы получить представление о структуре акустического поля в реальных условиях, вначале были проведены измерения по схеме, близкой к описанной в [11]. Было проведено две серии измерений. В первом случае в качестве водоема был выбран карьер Сима, где до этого на протяжении нескольких лет автором проводились эксперименты [10]. Особенностью карьера Сима является значительная удаленность от источников шума и отсутствие течений, поэтому этот водоем обладает низкими собственными шумами, и использовать его в качестве объекта исследований для задач шумовой интерферометрии не получается. Поэтому была проведена вторая серия измерений на участке реки Грязевы, который представлял собой запруду перед небольшой плотиной. Длина запруды составляла порядка 500 м, а ширина варьировалась от 50 до 100 м. Над плотиной проходила автомобильная дорога, и, таким образом, предполагалось наличие анизотропного шумового поля. Это поле обладает низкой интенсивностью, и поэтому не сказывается на измерениях с активным источником звука. Между измерениями в условиях двух описанных водоемов прошло около 10 дней, что сказалось на погоде и толщине льда.

Эксперимент на карьере Сима осуществлялся при толщине льда  $h = 0.15$  м и глубине водного слоя  $H = 1$  м. Во время эксперимента на реке Грязеве толщина льда составила уже  $h = 0.26$  м, над ним лежал снежный покров толщиной примерно 5 см, а глубина водного слоя была  $H = 1.9$  м. В обоих случаях запись велась синхронно на гидрофон, расположенный в середине водного слоя и на микрофон, находящийся в воздухе. Расстояние от источника до точки приема составляло 100 м. Типичные осциллограммы принятых сигналов приведены на рис. 1.

Источником звука были короткие удары по льду. Сигналы, записанные в водном слое, имеют сложную структуру, отдельные компоненты которой визуальнo разделяются и обозначены на рис. 1 буквами  $A, B, C, D$ . Чтобы установить соответствие каждой компоненты определенному типу волн, выполнялось вейвлет-преобразование, которое, позволяя в данных условиях коротких импульсных сигналов получить лучшее разрешение на низких частотах по сравнению с оконным преобразованием Фурье. Для этого использовался обобщенный вейвлет Морсе с параметрами



**Рис. 1.** Осциллограммы типичных сигналов, полученные в ходе экспериментов на карьере Сима (а) и на реке Грязеве (б). Осциллограммы сверху соответствуют сигналам, зарегистрированным в воздухе, а снизу – в воде. Каждая осциллограмма нормирована на максимум своей амплитуды. Буквами обозначены компоненты сигнала, соответствующие “быстрой” волне (А), волне в водном слое (В), изгибной волне во льду (С, D).

симметрии  $\gamma = 3$  и компактности  $\beta = 20$ . Переход от параметра масштаба вейвлет-преобразования  $a$  к более удобной частоте осуществлялся с помощью соотношения  $f = f_{\psi}/a$ , где  $f_{\psi}$  – центральная частота вейвлета. Указанные параметры используются в функции `swt` пакета Matlab по умолчанию. Число голосов на октаву устанавливалось равным 48. Результат вейвлет-преобразования представлен на рис. 2. Теоретические зависимости групповой скорости изгибной моды, рассчитанные численно согласно (2) для соответствующих толщин льда, хорошо соотносятся с данными экспериментов и позволяют идентифицировать компоненты С и D именно как изгибные колебания.

Для частот, отмеченных пунктирной линией, фазовая скорость изгибной волны во льду совпадает со скоростью звука в воздухе, а групповая скорость превышает это значение. Это приводит к излучению звука в воздух, что видно на рис. 1а. Нарастание амплитуды связано с последовательной регистрацией сигнала от участков льда, расположенных все ближе к источнику.

Для компонент, отмеченных на рис. 1 буквами А и В оценивалась их скорость распространения, которая составила на карьере Сима  $2850$  и  $1350 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ , а на реке Грязеве –  $1800$  и  $950 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ , соответственно. Спектр компоненты А ниже, чем у компоненты В примерно в 3–4 раза. В связи с этим можно предположить, что “быстрая” компонента

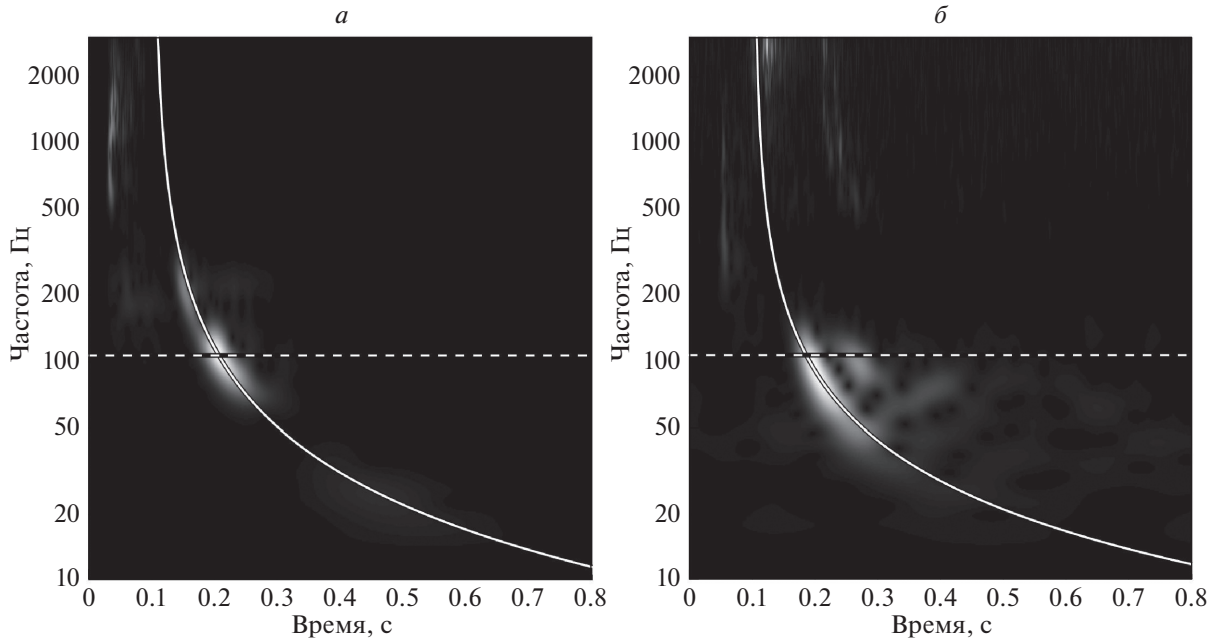
А связана с распространением преимущественно в грунте водоема, а компонента В – в водном слое. В [11] отмечается схожая картина принимаемых сигналов, однако там авторы не обнаружили компоненту В.

Проведенное численное моделирование в среде COMSOL показало, что наиболее ранняя регистрируемая компонента сигнала распространяется со скоростью, совпадающей со скоростью продольной волны в грунте. Однако ее амплитуда может быть небольшой, и это может существенно исказить такую оценку параметров грунта.

Эксперимент на реке Грязеве проходил в ветреную погоду. Кроме того, наличие слоя снега препятствует эффективному излучению звука в воздух. В итоге, запись, сделанная в этом эксперименте в воздухе (рис. 1б, сверху) практически не содержит полезной информации.

## ВОЗМОЖНОСТИ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ШУМОВ

Можно предположить, что собственное акустическое поле в водоеме создается статистически независимыми источниками шума. Пространственное распределение их мощности представимо в виде суммы постоянной величины и некоторой добавки. При этом именно добавка отвечает за анизотропию акустического излучения. В ходе обработки данных вычисляются взаимные



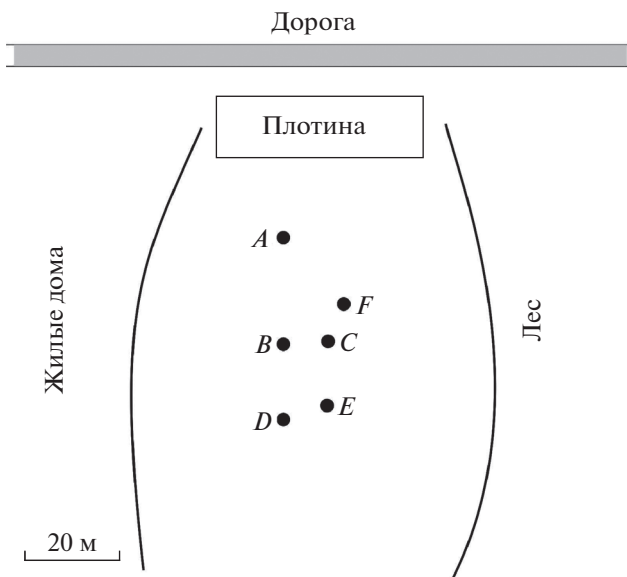
**Рис. 2.** Результат вейвлет-преобразования сигналов, записанных в воде в ходе экспериментов на карьере Сима (*а*) и на реке Грязеве (*б*). Светлые участки обозначают повышенной амплитуде спектральных компонент. Сплошная белая кривая соответствует теоретической зависимости регистрируемой мгновенной частоты от времени. Пунктирная линия обозначает частоту, на которой в каждом из случаев фазовая скорость изгибной волны во льду совпадает со скоростью звука в воздухе.

корреляционные функции  $K_{ij}(\tau)$  сигналов между всеми парами имеющихся гидрофонов  $i$  и  $j$ , расположенными в точках  $\vec{r}_i$  и  $\vec{r}_j$ , соответственно. Если шумовое поле изотропно, то каждая корреляционная функция  $K_{ij}(\tau) \sim G(\vec{r}_i, \vec{r}_j) - G(\vec{r}_j, \vec{r}_i)$  пропорцио-

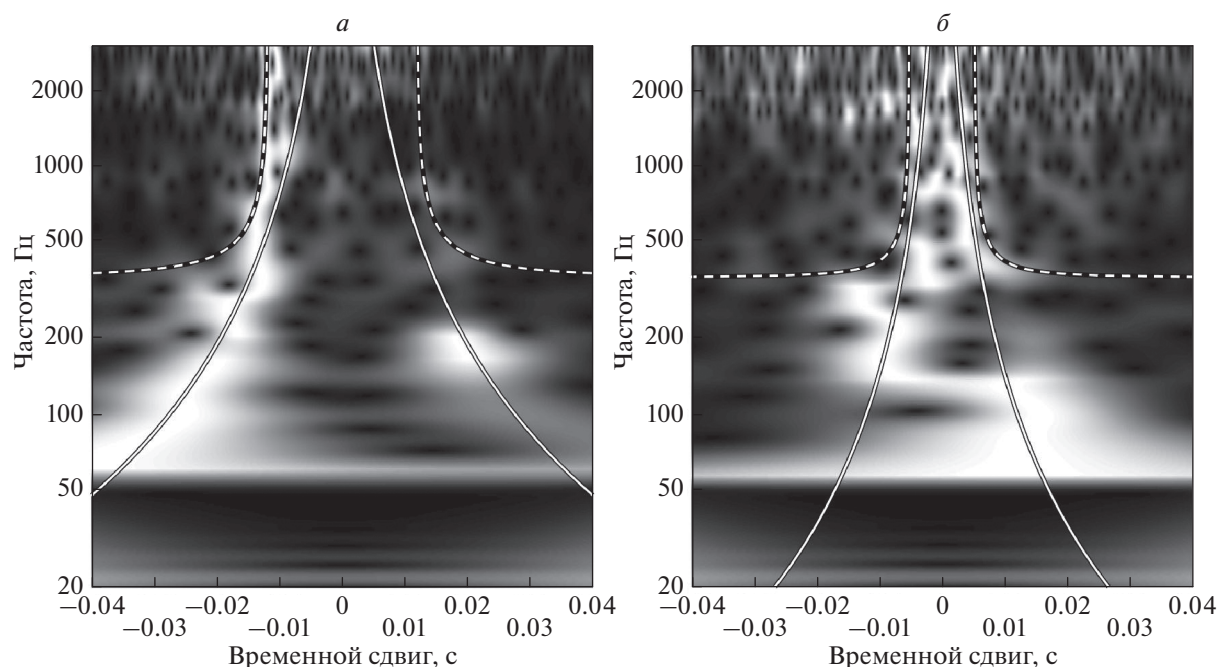
нальна разности функций Грина, соответствующих распространению сигнала из точки  $\vec{r}_i$  в  $\vec{r}_j$  и обратно [1]. Это позволяет использовать корреляции шумов для определения функций Грина, а следовательно, после решения обратной задачи рассеяния, и параметров водоема. Каждый дополнительный источник анизотропного поля, расположенный в точке  $\vec{r}$ , дает вклад в  $K_{ij}(\tau)$  при значениях временного сдвига  $\tau = \tau_n$ ;  $|\vec{r} - \vec{r}_i| - |\vec{r} - \vec{r}_j| = \tau_n c_n$ , где  $c_n$  — скорость распространения сигнала по  $n$ -му каналу. Многоканальное распространение сигнала может быть связано как с возбуждением нескольких мод водного слоя, так и с одновременным распространением звука в воздухе, во льду и в грунте водоема.

Эксперимент с распределенной системой гидрофонов проводился на том же участке реки Грязевы, где до этого осуществлялись измерения с активными источниками звука. Схема постановки гидрофонов приведена на рис. 3. Она включала в себя 6 синхронных приемных гидрофонов, обозначенных буквами  $A-E$ . Предполагалось, что это позволит осуществить прием сигналов на нескольких перекрестных трассах, включая как направление на автомобильную дорогу, так и перпендикулярное направление.

В результате обработки были получены корреляционные функции всех пар гидрофонов  $K_{ij}(\tau)$ . Сами по себе они малоинформативны из-за силь-



**Рис. 3.** Схема эксперимента на реке Грязеве. Гидрофоны располагались в точках  $A-E$ . Вблизи выбранного участка реки находилась плотина и дорога с автомобильным движением.



**Рис. 4.** Результаты вейвлет-преобразования корреляционных функций  $K_{BD}(\tau)$  (а) и  $K_{BC}(\tau)$  (б). Для увеличения контрастности на каждой частоте произведена нормировка на максимум. Светлые участки обозначают повышенной амплитуде спектральных компонент. Теоретически рассчитанная частотная зависимость времени распространения изгибной волны во льду отмечена белыми сплошными линиями, а первой моды водного слоя – пунктирными.

ной дисперсии и широкой полосы частот, в которой принимались сигналы. Поэтому, как и в случае активного источника, для их обработки применялось вейвлет-преобразование. Результаты этой процедуры представлены на рис. 4 для пары гидрофонов  $BD$  (а) и для пары гидрофонов  $BC$  (б). С помощью дисперсионного соотношения (2) численно определялись групповые скорости изгибной волны и первой моды колебаний водного слоя. Поскольку расстояния между гидрофонами известны, это позволяет определить частотные зависимости времени распространения сигнала между гидрофонами для изгибной волны во льду и для первой моды водного слоя. Эти зависимости также представлены на рис. 4. Так как сигнал может распространяться между гидрофонами в обоих направлениях, каждая кривая имеет две ветви, симметричные относительно линии  $\tau = 0$ . Результаты обработки позволяют сделать ряд утверждений.

Во-первых, использованная простая теоретическая модель достаточно точно описывает дисперсионные характеристики регистрируемых полей. Светлые участки на рис. 4, которые означают повышенную амплитуду спектральной компоненты в каждый рассматриваемый момент времени, лежат вблизи теоретических зависимостей. На частотах выше 300–400 Гц шумовое поле ока-

зывается в основном представлено модами водного слоя. На более низких частотах эти волны являются нераспространяющимися, и преобладают изгибные колебания льда. Разрешение по времени падает при снижении частоты, благодаря чему изображение в нижней части становится более размазанным, но его соответствие с теорией в целом сохраняется. Это показывает возможность и обратной процедуры. На основе экспериментальных данных и модельного дисперсионного соотношения (например, заданного с помощью (2), либо более сложного) с помощью нелинейной регрессии определяется толщина водного и ледового слоев, уточняются упругие характеристики льда и граничное условие на дне водоема. Однако, чтобы этот метод был точным, зачастую требуется значительное время накопления сигнала.

Во-вторых, полученные результаты довольно сильно различаются для двух использованных пар гидрофонов. Так, для пары  $BD$  (рис. 4а) можно видеть, что амплитуда сигнала в области  $\tau < 0$  существенно превосходит амплитуду сигнала в области  $\tau > 0$  практически во всем диапазоне частот. Это означает, что сигнал распространяется преимущественно от точки  $B$  к точке  $D$ , и его источником может быть автомобильная дорога. Для пары  $BC$  (рис. 4б) такого явного преобладания не наблюдается. Это соотносится с геометрией экс-

перимента (рис. 3), где линия  $BC$  проходит параллельно дороге. Имеющиеся на ней источники шума в таком случае дают вклад в корреляционную функцию при значениях временного сдвига, лежащих между отмеченными на рис. 4б теоретическими зависимостями, и изображение становится менее “регулярным”.

В-третьих, можно заметить, что, несмотря на изложенную выше “общую” картину, ситуация более сложная. С изменением частоты максимум корреляционного отклика может перемещаться из области  $\tau < 0$  в область  $\tau > 0$  и обратно. Это означает, что помимо неравномерного углового распределения источников акустического поля необходимо учитывать и частотную зависимость этого распределения. Более того, наличие на рис. 4а максимума в области  $\tau > 0$  означает прием сигнала от источника, расположенного с противоположной стороны от дороги. Эти обстоятельства потребовали более детального рассмотрения. В результате оказалось, что принятые акустические сигналы содержат наряду со стационарным шумом короткие и относительно редкие “всплески” достаточно большой амплитуды. Их индивидуальные спектры отличаются, но сосредоточены в диапазоне 800–3500 Гц. Регистрировались как одиночные “всплески”, так и группы, включающие до пяти таких сигналов. Вейвлет-анализ показал, что дисперсионная зависимость для “всплесков” может соответствовать возбуждению одной или двух мод водного слоя. По-видимому, природа таких “всплесков” связана с развитием во льду трещин, вызванных изменением погодных условий.

Импульсный характер “всплесков” позволяет легко выделить их и в дальнейшем осуществлять корреляционную обработку шума и “всплесков” раздельно. Получающиеся при этом результаты для двух таких типов сигналов сильно различаются.

Наличие трещин дает дополнительные возможности для проведения акустических исследований методом шумовой интерферометрии. С одной стороны, если трещин много, то они создают относительно изотропное шумовое поле, причем амплитуда этих сигналов высокая, а значит, можно сократить время накопления сигналов. С другой стороны, если трещины редкие, как было в проведенном эксперименте, то каждую из них можно рассматривать как отдельный источник звука. Тогда на первом этапе решается задача определения координат этого источника, а на втором этапе уточняется дисперсионная характеристика водоема. Это довольно сложная итерационная задача, и она требует отдельного рассмотрения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность исследования модового состава акустического поля мелких водоемов с помощью пассивных методов, опирающихся на корреляционную обработку. Данные методы оказываются работоспособными в сложных условиях, когда наличие ледового покрова и дна оказывает существенное влияние и приводит к возникновению нескольких типов волн, что лежит несколько за пределами той постановки задачи [1], для которой они были изначально выведены.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Москвы (проект № 21-32-70003).

## 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. No. 1. P. 42.
2. Гончаренко Б.И., Дмитриев К.В., Сергеев С.Н., Шуруп А.С. // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 6. С. 777.
3. Тихоцкий С.А., Преснов Д.А., Собищев А.Л., Шуруп А.С. // Акуст. журн. 2021. Т. 67. № 1. С. 107; Tikhotskii S.A., Presnov D.A., Sobisevich A.L., Shurup A.S. // Acoust. Phys. 2021. V. 67. No. 1. P. 91.
4. Жостков Р.А., Преснов Д.А., Шуруп А.С., Собищев А.Л. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 1. С. 72; Zhostkov R.A., Presnov D.A., Shurup A.S., Sobisevich A.L. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 1. P. 64.
5. Буров В.А., Дмитриев К.В., Румянцева О.Д. // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 5. С. 591; Burov V.A., Rummyantseva O.D., Dmitriev K.V. // Acoust. Phys. 2018. V. 64. No. 5. P. 590.
6. Press F., Ewing M. // Trans. Amer. Geophys. Union. 1951. V. 32. No. 5. P. 673.
7. Sato Y. // Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo. 1951. V. 29. P. 223.
8. Press F., Ewing M. // J. Appl. Phys. 1951. V. 22. P. 892.
9. Хейсин Д.Е. Динамика ледового покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1967, 215 с.
10. Дмитриев К.В., Дорофеева А.А., Панков И.А., Сергеев С.Н. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 12. С. 1704; Dmitriev K.V., Dorofeeva A.A., Pankov I.A., Sergeev S.N. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. No. 12. P. 1492.
11. Заславский Ю.М., Заславский В.Ю. // Акуст. журн. 2010. Т. 56. № 4. С. 483; Zaslavskii Y.M., Zaslavskii V.Y. // Acoust. Phys. 2010. V. 56. No. 4. P. 486. 2015.
12. Хейсин Д.Е. // Акуст. журн. 1970. Т. 16. № 4. С. 584.

## **Correlation processing of anisotropic acoustic noise present in an ice-covered reservoir**

**K. V. Dmitriev\***

*Faculty of Physics, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

*\*e-mail: kdmitrie@lanat.ru*

We present the results of experiments, in which the acoustic field in a shallow water reservoir covered with ice is studied using the noise interferometry method. A system of hydrophones was used for reception, and both the sounds of impact on the ice and the noises present in the reservoir were used as signal sources.