

УДК 550.834.04

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПАССИВНОЙ ТОМОГРАФИЧЕСКОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ ПАРАМЕТРОВ МЕЛКОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ЛЬДА

© 2020 г. Д. А. Преснов^{1, *}, А. Л. Собисевич¹, А. С. Шуруп^{1, 2}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, физический факультет, Москва, Россия

*E-mail: presnov@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 16.12.2019 г.

После доработки 20.01.2020 г.

Принята к публикации 26.02.2020 г.

Обсуждаются результаты натурального эксперимента в ледовых условиях по приему наведенных сейсмоакустических волн. В эксперименте использовалась расположенная на поверхности льда площадная измерительная система, отдельные элементы которой представляли собой автономные низкочастотные геоакустические буи. Анализируются данные продолжительных измерений фонового шума с целью исследования возможности применения пассивных сейсмоакустических методов реконструкции параметров мелкого моря.

DOI: 10.31857/S036767652006023X

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к изучению волновых процессов в море, покрытом льдом, неуклонно растет в связи с необходимостью освоения Арктических морей и, в частности, шельфовой зоны. Сегодняшние экспериментальные работы специалистов Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) [1] включают задачи анализа упругих волновых полей в льдине при помощи установки сейсмических приемников на дрейфующих льдах. Важными представляются также исследования, основанные на регистрации на льду продольных и поперечных сейсмических волн, которые генерируются сейсмическими событиями – землетрясениями [2]. В конечном счете, отмеченные проекты направлены на решение задач восстановления характеристик среды на основе регистрации сигналов от мощных источников.

В последние годы и в гидроакустике [3], и в сейсмологии [4] развитие получили пассивные методы анализа волновых полей, позволяющие определять свойства среды на основе регистрации фонового шума. Целью настоящей работы является исследование возможностей применения современных методов анализа случайных шумовых сигналов, записанных в эксперименте

на ледовом покрове, для решения задач сейсмоакустической томографии. При этом, как удалось показать в [5] при помощи специального сейсмического датчика, расположенного на льду, можно в активном режиме регистрировать не только изгибно-гравитационные колебания ледового покрова, но и нормальные гидроакустические моды и донные поверхностные волны рэлеевского типа.

В настоящем исследовании анализируются шумовые данные, которые были получены в 2018 г. в рамках продолжительного натурального эксперимента на ледовом полигоне в северо-западной части Ладожского озера [6], условия эксперимента соответствуют мелкому морю. Показанная ранее возможность разделения интенсивного сейсмоакустического сигнала, зарегистрированного на поверхности льда, на модовые компоненты в рамках рассмотрения модели слоистой среды [7] позволяет перейти к исследованию характеристик фонового шума с целью выделения полезных составляющих, основные параметры которых будут совпадать со свойствами сигналов, принимаемых в активном режиме. Удаленность полигона от промышленных объектов и судоходных линий гарантирует малые акустические и сейсмические помехи на уровне естественных шумов. Измерительные пункты организовывались на поверхности ледового покрова в вершинах правильного пятиугольника (рис. 1),

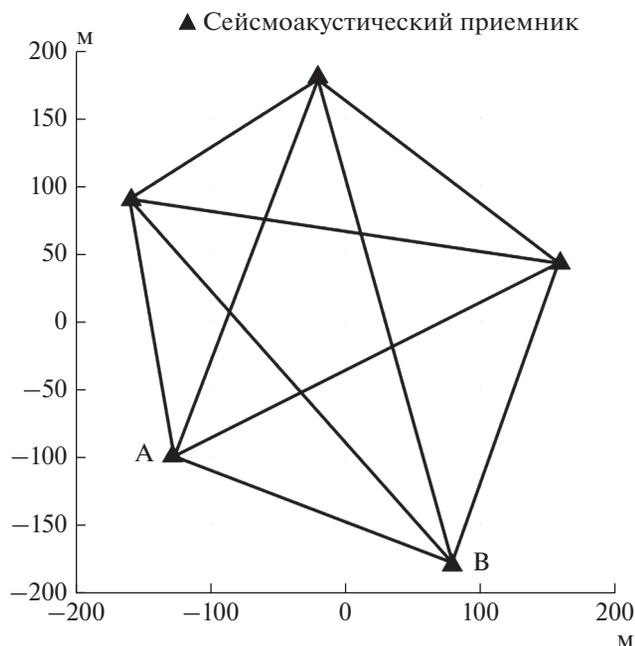


Рис. 1. Схема расположения автономных геоакустических приемников на льду Ладожского озера в эксперименте 2018 года.

формируя антенную группу с малой апертурой. Толщина льда составляла в разных местах от 0.2 до 0.35 м, а глубина озера изменялась в пределах расстановки от 7 до 20 м. Прием сигналов осуществляли при помощи пяти вмороженных в лед автономных геоакустических буев, подробное описание которых представлено в недавней работе [8]. В рамках эксперимента с помощью буев измерялась вертикальная компонента колебательной скорости в широком диапазоне частот от 0.03 до 50 Гц. Приемная система автономно работала в течение пяти дней, обеспечивая непрерывную синхронную запись сигналов с частотой оцифровки 500 Гц. Контроль точности работы приборов был проведен непосредственно перед экспериментом путем сопоставительных измерений в одном месте всеми буями и эталонной сейсмической станцией Guralp 3ESPCD.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для изучения основных особенностей фонового сейсмоакустического шума, регистрируемого на поверхности льда, представляет интерес сопоставительный анализ синхронной ночной записи, выполненной на льду и в подвале здания, расположенного в 600 метрах от берега. На рис. 2 представлены спектральная плотность мощности вертикальной компоненты сейсмического шума, регистрируемого на берегу и сейсмоакустического шума, принимаемого на льду. Оценка спектральной

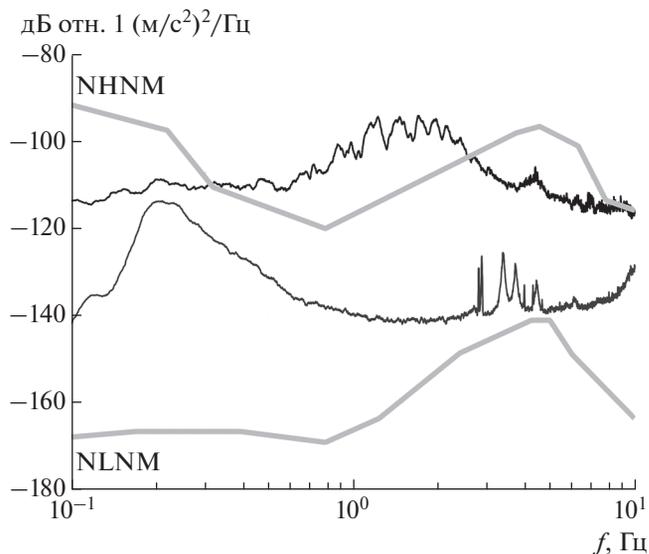


Рис. 2. Спектральная плотность мощности вертикальной компоненты сейсмоакустического шума, регистрируемого на берегу — серый цвет и на поверхности льда — черный цвет.

плотности мощности сейсмоакустического шума вычислялась для 30-ти минутных интервалов времени с 50% перекрытием. При измерениях использовались приборы одного типа. Спектральный состав шума, записанного на льду в различных точках, оказался достаточно близок, поэтому на графике отображен только один из них. На рис. 2 толстыми светлыми кривыми также нанесены модельные оценки низкого (NLNM — new low noise model) и высокого (NNNM — new high noise model) уровней спектральной плотности мощности сейсмического шума, которые были получены в результате усреднения большого количества экспериментальных данных, полученных по всей Земле по Петерсону [9]. Серая тонкая кривая имеет отчетливый максимум в области 0.22 Гц, который соответствует микросейсам второго рода, происхождение которых связано с генерируемыми океаном волнами Рэля [10]. Причем их интенсивность достаточно велика (близка к NNNM), что может быть связано с близким расположением водоема. Узкополосные пики в диапазоне частот от 2.5 до 5 Гц имеют антропогенное происхождение и связаны, по всей видимости, с жизнедеятельностью в доме, где был установлен приемник.

Энергия сейсмоакустического шума, регистрируемого прибором, вмороженным в лед (черная кривая на рис. 2), в сотни раз превышает энергию чисто сейсмических колебаний. Более того, в частотном диапазоне 0.35–2.5 Гц ледовый шум сильнее максимального среднего уровня шума NNNM, что затрудняет выполнение классических сейсмологических исследований с поверхности ледового покрова из-за низкого итогового соотношения сиг-

нал/помеха. С другой стороны, небольшой пик, соответствующий микросейсам, можно различить и на льду. Наибольшая интенсивность шума относится к полосе частот 1–2.5 Гц и связана, по видимому, с изгибно-гравитационными колебаниями ледовой пластины, которые вызваны локальными воздействиями на лед и гравитационными волнами в воде [11]. По сравнению с сейсмическими и акустическими волнами, изгибно-гравитационные почти на порядок медленнее, что в некоторых случаях позволяет применять эффективные алгоритмы фильтрации помехи этого типа на основе спектрально-временного анализа [12].

Подводя итог, еще раз подчеркнем, что интенсивный шум, формирующийся на льду и под льдом существенно ограничивает применение вмерзанных сейсмометров в задачах приема сигналов от землетрясений, в связи с чем на первый план выходит разработка принципиально новых методов анализа сейсмоакустических данных, направленных на использование шума в качестве источника полезной информации.

ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ПАССИВНОМ РЕЖИМЕ

Известные томографические методы реконструкции параметров слоистой среды [13] основаны на сопоставлении экспериментальных и полученных в рамках теоретической модели скоростей распространения. Здесь на первом этапе стоит задача определения времен пробега волн в пассивном режиме вдоль трасс, соединяющих все возможные пары приемников. При обработке экспериментальных данных мы использовали метод оценки функции Грина среды по данным фонового шума [3], который заключается в анализе функции взаимной корреляции различных пар сейсмоакустических станций. Используемые в эксперименте автономные геоакустические буи позволили получить непрерывные ряды шумовых данных за длительный период времени. При построении функций взаимной корреляции для каждого отдельного приемника вся запись длиной пять суток разбивалась на интервалы в один час. Каждый интервал независимо подвергался процедурам амплитудной нормализации и обеления спектра для уменьшения влияния локализованных источников сигналов. После этого были сформированы пары и вычислены функции взаимной корреляции для часовых интервалов времени, которые мы затем усредняли за весь период измерений.

В качестве примера на рис. 3 приведена взаимно-корреляционная функция для пары станций А и В (см. рис. 1), полученная для различных частотных диапазонов. (На рис. 3 τ – временная задержка, соответствующая сдвигу окна вдоль вре-

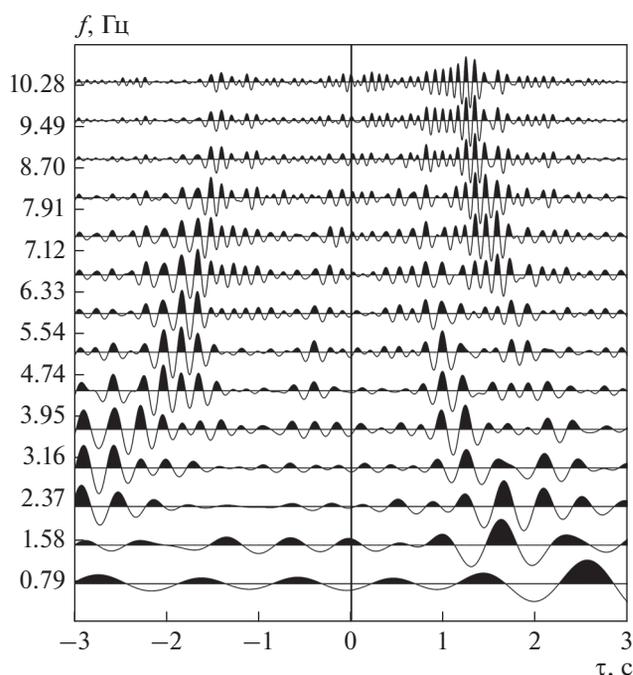


Рис. 3. Усредненная взаимно-корреляционная функция шумового фона, накопленного в течение 5 суток для пары измерительных станций А и В (рис. 1) в различных частотных диапазонах с центральной частотой, указанной на оси ординат.

менной оси, f – частота). Максимумы корреляционной функции, симметричные относительно нулевой временной задержки, указывают на время пробега сейсмоакустического сигнала вдоль прямой, соединяющей два приемника, в противоположных направлениях. Оцененные таким способом времена пробега вдоль различных трасс, изображенных на рис. 1, и для различных частот являются исходными данными для восстановления строения среды томографическими методами [13]. Одним из важных преимуществ пассивного подхода является то, что таким образом охватывается широкий диапазон частот, в том числе и низкочастотная область, в которой возбудить колебания при помощи сейсмического источника не простая задача.

Расстояние между приемниками А и В составляет 220 м, таким образом, оценивая время распространения по максимуму огибающей корреляционной функции, можно определить скорость пробега волны между приемниками. На рис. 3 отчетливо просматривается дисперсия скорости наиболее интенсивной компоненты. В верхней части графика с увеличением частоты время пробега уменьшается, а следовательно, скорость возрастает. Такое поведение как раз характерно для изгибно-гравитационной волны [6, 11]. Можно оценить ее скорость, которая составляет $\approx 140 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ на частоте 6.3 Гц и возрастает до $\approx 184 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ на частоте 10 Гц. Получен-

ные экспериментальные оценки подтверждаются теоретическим расчетом [6] дисперсии скорости изгибно-гравитационной волны при параметрах, соответствующих условиям эксперимента. Заметим также наличие более слабых, по сравнению с основным, локальных максимумов на малых временных задержках. Эти нерегулярные максимумы соответствуют, вероятно, более быстрым модам — гидроакустической и донной поверхностной. Однако их не удалось выделить в условиях эксперимента в широкой полосе частот с достаточной для решения томографических задач точностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный при помощи вмораживаемых в лед автономных гео-гидроакустических буев натурный эксперимент по измерению фонового сейсмоакустического шума позволил проанализировать интенсивность и спектральный состав шума, формирующегося в ледовых условиях. В результате сопоставления уровней спектральной плотности мощности показано, что применение стандартных сейсмологических методов ограничено при измерениях на льду из-за присутствия высокоамплитудной широкополосной изгибно-гравитационной помехи.

Детальный анализ естественного фонового шума, формирующегося в ледовых условиях, за продолжительный интервал времени показал, что на текущем этапе наиболее перспективные для практического применения моды — гидроакустическая и донная поверхностная — могут быть выделены на фоне изгибно-гравитационных колебаний только на качественном уровне. И для решения томографической задачи в рамках используемой расстановки приборов, когда требуется точность определения времени пробега порядка 0.001 с, необходимо развитие дополнительных методов спектрально-временной обработки естественного шума. В то же время использованный в работе алгоритм, позволяющий оценивать времена

пробега изгибно-гравитационной волны в широком диапазоне частот в пассивном режиме, является основой для построения томографических схем оценки параметров ледового покрова, а также выполнения дистанционного мониторинга льда.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №№ 16-29-02046 и 18-05-70034.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корнишин К.А., Павлов В.А., Смирнов В.Н. и др. // Вест. ОАО "НК Роснефть". 2016. № 2. С. 85.
2. Schlindwein V., Müller C., Jokat W. // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. Art. № L18306.
3. 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.
4. Snieder R. // Phys. Rev. 2004. V. 69. Art. № 046610.
5. Преснов Д.А., Жостков Р.А., Собищев А.Л. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 1. С. 76; Presnov D.A., Zhostkov R.A., Sobisevich A.L. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. № 1. P. 68.
6. Преснов Д.А., Собищев А.Л., Груздев П.Д. и др. // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 5. С. 688.
7. Собищев А.Л., Разин А.В. Геоакустика слоистых сред. М.: ИФЗ РАН, 2012. 210 с.
8. Sobisevich A.L., Presnov D.A., Agafonov V.M. et al. // Seism. Instrum. 2018. V. 54. № 6. P. 677.
9. Peterson J.R. Observations and modeling of seismic background noise. U.S. Geological Survey, 1993. 94 p.
10. Ardhuin F., Stutzmann E., Schimmel M. et al. // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. Art. № C05002.
11. Музылев С.В. // Сб. ст., посвященный 100-летию со дня рождения проф. П.С. Линейкина. М.: Триада, 2010. 400 с.
12. Собищев А.Л., Преснов Д.А., Собищев Л.Е. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 5. С. 565; Sobisevich A.L., Presnov D.A., Sobisevich L.E. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. № 5. P. 496.
13. Presnov D.A., Sobisevich A.L., Shurup A.S. // Phys. Wave Phenom. 2016. V. 24. № 3. P. 249.