

Сейсмоакустическая модовая томография осадков, водной толщи и льда мелкого моря

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

¹Институт физики Земли имени О.Ю.Шмидта РАН, Россия,
123242, Москва, Б. Грузинская ул., д.10, стр.1

²Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, физический факультет, кафедра акустики
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр.2

(Статья поступила 14.11.2019; Подписана в печать 25.11.2019)

В работе представлены результаты натурных испытаний в ледовых условиях Ладожского озера морских сейсморазведочных излучателей и площадной измерительной сейсмоакустической системы на основе автономных буёв вмораживаемого типа. Демонстрируется возможность выделения в принимаемом сигнале отдельных нормальных мод, распространяющихся в слоистой системе «ледовый покров — водный слой — осадочный слой — упругое полупространство». Рассматривается схема совместной томографической оценки характеристик дна, водного слоя и ледового покрова.

PACS: 43.30.Ma

УДК: 550.348.432, 550.344.57

Ключевые слова: сейсмоакустика, томография, слоистые среды.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к изучению волновых процессов в море, покрытом льдом, неуклонно растёт в связи с необходимостью освоения арктических морей и, в частности, шельфовой зоны. Основной спецификой шельфа в Арктике является присутствие сплошного ледового покрова, который ограничивает применение надводных судов для выполнения как геофизических, так и океанологических исследований. Перспективным способом изучения физических характеристик среды является томографический метод с расстановкой приёмников на границе или по площади заданного региона. Преимуществом данного подхода является возможность дистанционного изучения даже тех областей среды, где отсутствует возможность размещения оборудования для проведения контактных измерений, но которые являются «прозрачными» для сейсмоакустического сигнала. В последние годы и в гидроакустике, и в сейсмологии развитие получили пассивные методы анализа волновых полей [1, 2], позволяющие определять свойства среды, на основе регистрации фонового шума. Ранее было показано [3], что полное волновое поле в среде, содержащей ледовый покров, водный слой и упругое полупространство, содержит несколько модовых составляющих, которые дают основной вклад в поле, регистрируемое в низкочастотной области — изгибно-гравитационная волна ледового покрова, донная поверхностная волна рэлеевского типа и гидроакустические моды. Важно, что эти волны отличаются друг от друга как по частоте, так и по скорости распространения [3], а также по области их пространственной локализации, то есть могут быть разделены при частотно-временном анализе сейсмоакустического поля, зарегистрированного в достаточно широкой полосе частот с помощью разнесённых в пространстве

сейсмоакустических приёмников. Задачей настоящего исследования является апробация в натурных условиях развиваемого метода сейсмоакустической томографии [4] с учётом особенностей приёма и излучения сигнала, обусловленных наличием ледового покрова.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В настоящем исследовании анализируются данные, которые были получены в 2018 году в рамках продолжительного натурального эксперимента на ледовом испытательном гидроакустическом полигоне Карельского Филиала АО «Концерн «Океанприбор» в северо-западной части Ладожского озера [5]. Измерительные пункты организовывались на поверхности ледового покрова в вершинах правильного пятиугольника (рис. 1), формируя антенную группу с малой апертурой. Условия эксперимента не позволили добиться идеальных расстояний между пунктами, поэтому реальные расстояния изменяются от 165 до 372 м. Толщина льда составляла в разных местах от 0.2 до 0.35 м, а глубина в самой глубокой части залива достигает 20 м, и достаточно резко уменьшается к берегу (рис. 1), который представляет собой скальный массив. Для приёма сейсмоакустического сигнала на поверхности льда использовались автономные вмораживаемые буи [6], разработанные ИФЗ РАН совместно с МФТИ, включающие широкополосный чувствительный элемент, основанный на принципах молекулярной электроники, регистратор с системой точной временной синхронизации и блок аккумуляторов. В рамках эксперимента буями измерялась вертикальная компонента колебательной скорости в широком диапазоне частот от 0.03 до 50 Гц.

Приёмная система автономно работала в течение пяти дней, обеспечивая непрерывную синхронную запись сигналов с частотой оцифровки 500 Гц. Для реализации томографической схемы измерений нами использовалось сейсморужьё, производства компании «Геодевайс». При помощи сейсморужья вблизи каждого изме-

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

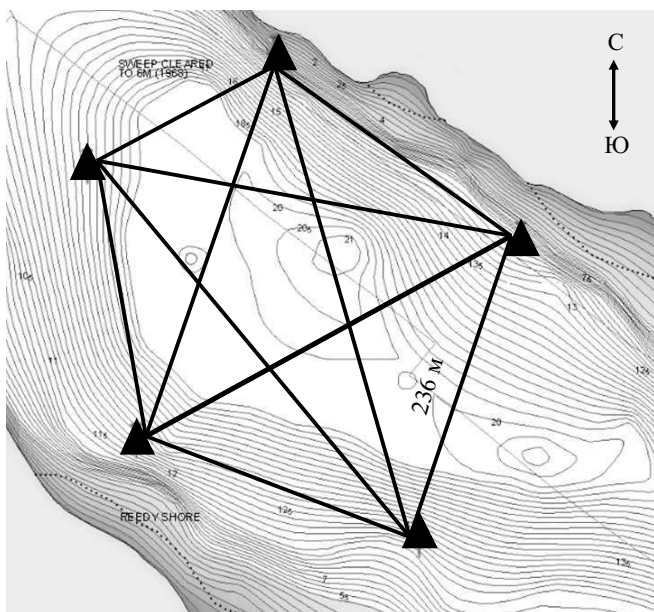


Рис. 1: Схема эксперимента. Треугольниками отмечены сейсмоакустические приёмники на льду озера

рительного пункта на дне последовательно излучалось несколько сигналов строительными патронами мощностью 2.7 кДж. В результате было получено 20 трасс, вдоль которых распространяется волновое возмущение. Регистрация при этом осуществлялась на поверхности ледового покрова, при помощи вмороженных геоакустических буёв.

2. ВЫДЕЛЕНИЕ МОДОВЫХ КОМПОНЕНТ

Для определения времён пробега сигналов вдоль различных трасс вычислялась функция взаимной корреляции между сигналом, записанным в точке излучения и сигналом, принятым на удалённом пункте. Выполняя фильтрацию в различных частотных диапазонах, по положению максимума огибающей взаимно-корреляционной функции, можно определить время пробега различных частотных составляющих излученного сигнала.

Предварительно было выполнено моделирование распространение сейсмоакустического сигнала в слоистой среде типа «упругое полупространство — упругий осадочный слой — жидкий слой — упругий слой льда», которая приближенно удовлетворяет условиям эксперимента и позволяет теоретически рассчитывать ожидаемые кинематические параметры полей. Результаты расчёта, представленные на рис. 2, демонстрируют, что волновое поле в низкочастотной области представляет собой сумму достаточно большого числа модовых составляющих, среди которых и изгибно-гравитационная волна ледового покрова (отмечена на рис. 2 пунктиром). В дальнейшем ограничимся рассмотрением мод

низших номеров, которые в условиях проведенного эксперимента дали основной вклад в регистрируемое низкочастотное волновое поле.

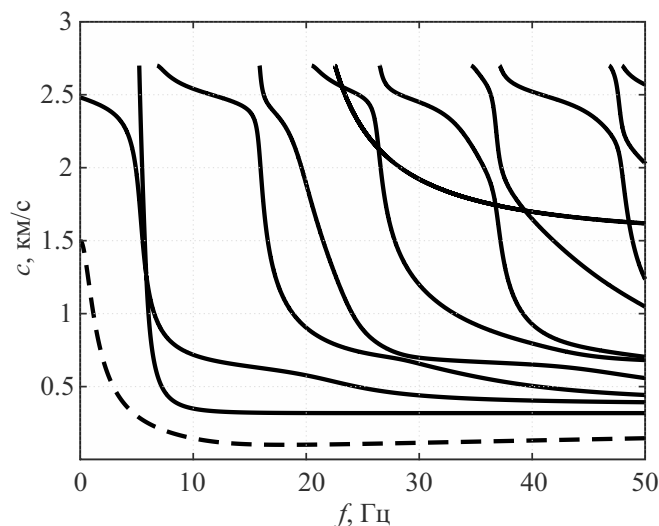


Рис. 2: Дисперсионные кривые фазовой скорости низкочастотных сейсмоакустических мод, формирующихся в модели среды с параметрами, соответствующими условиям эксперимента

Следуя результатам численного расчёта, представленным на рис. 2, заметим, что нетривиальная в общем случае задача разделения мод с помощью одиночных приёмных станций может быть решена в рамках обозначенной модели среды, так как рассматриваемые моды имеют разную скорость распространения в заданном диапазоне частот. Для определения достоверных максимумов огибающей функции взаимной корреляции их поиск выполнялся в заданном доверительном интервале относительно рассчитанных на основе модельных групповых скоростей времён пробега. Это позволило в активном режиме для фиксированных частотных диапазонов определить времена пробега основных трех рассматриваемых мод с приемлемой точностью.

3. ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ

Для решения обратной задачи применяется лучевая томографическая схема, предложенная ранее в [4, 7]. Как и в работе [4] искомое двумерное распределение скорости в среде раскладывалось на базисные функции, формирующие полосчатый базис. Матрица возмущений представляет собой задержки времен распространений модовых сигналов относительно фоновой скоростной модели среды, вызванные последовательным введением в каждую из базисных полос возмущений тех параметров модели, которые требуется восстановить. Предполагая, что наблюдаемые в эксперименте возмущения времен распростра-

нений мод могут быть представлены в виде линейной комбинации временных задержек, вызванных базисными функциями, решение обратной задачи восстановления пространственных распределений параметров среды можно свести к решению системы линейных уравнений относительно неизвестных коэффициентов разложения этих параметров по полосчатому базису. Для уточнения полученных оценок привлекаются итерационные процедуры.

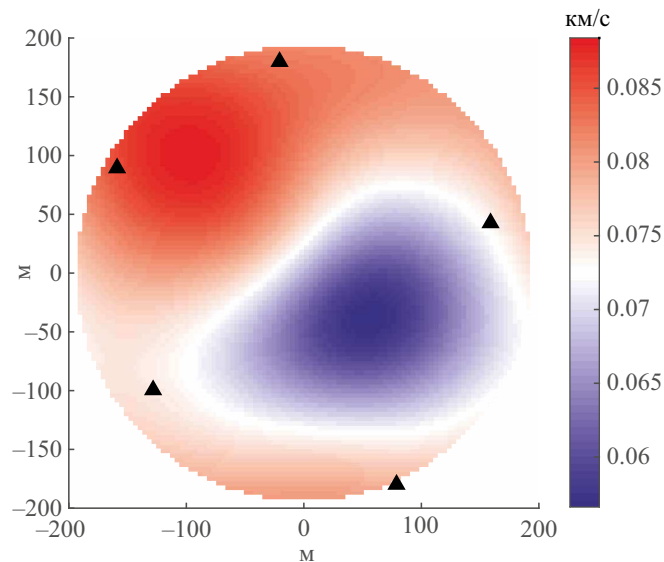


Рис. 3: Результат восстановления распределения групповой скорости изгибно-гравитационной волны

Объем настоящей работы не позволяет представить здесь результаты восстановления для всех мод, поэтому в качестве примера рассмотрим только медленную

изгибно-гравитационную моду, энергия которой сосредоточена вблизи ледового покрова. На рис. 3 приведен результат восстановления распределения групповой скорости изгибной волны вблизи частоты 9.5 Гц после трёх итераций, невязка составила $\eta_T = 0.06$. Скорость этой волны в основном определяется толщиной ледового покрова, причём пониженные скорости (синие тона) соответствуют более тонкому льду. Значения скоростей на цветовой шкале рис. 3 можно условно перевести в шкалу толщины льда с пределами 5–40 см (в общем случае необходимо учитывать упругие свойства ледового покрова).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный при помощи вмораживаемых в лёд автономных гео-гидроакустических буев натурный эксперимент по измерению сейсмоакустических сигналов подтверждает перспективность томографических методов совместной оценки параметров ледового покрова, водного слоя и донных осадков. В результате обработки данных проведенных натурных измерений удалось выделить различные моды волнового поля, формирующегося в ледовых условиях рассматриваемого эксперимента. Для модовых сигналов, дающих основной вклад в регистрируемое поле, в различных частотных диапазонах были восстановлены карты групповых скоростей в исследуемой области, по периметру которой располагались приёмники. Полученные данные дают оценки характеристик исследуемой области, соответствующие реальным условиям проведенного эксперимента.

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-70034.

- [1] Буров В. А., Сергеев С. Н., Шуруп А. С. // Акуст. журн. 2008. **54**, № 1. С. 51.
 [2] Королева Т. Ю., Яновская Т. Б., Петрушева С. С. // Физика Земли. 2009. № 5. С. 3.
 [3] Преснов Д. А., Жостков Р. А., Гусев В. А., Шуруп А. С. Дисперсионные зависимости упругих волн в покрытом льдом мелком море // Акуст. журн. 2014. **60**, № 4. С. 426.
 [4] Presnov D. A., Sobisevich A. L., Shurup A. S. // Phys. wave phenom. 2016. **24**, № 3. P. 249.

- [5] Преснов Д. А., Собисевич А. Л., Груздев П. Д., Игнатьев В. И., Коньков А. И., Мореев А. Ю., Тарасов А. В., Шувалов А. А., Шуруп А. С. // Акуст. журн. 2019. **65**, № 5. С. 688.
 [6] Sobisevich A. L., Presnov D. A., Agafonov V. M., Sobisevich L. E. // Seism. Instr. 2018. **54**, № 6. P. 677.
 [7] Буров В. А., Сергеев С. Н., Шуруп А. С. // Акуст. журн. 2007. **53**, № 6. С. 791.

Seismoacoustic modes tomography of sediments, water column and ice of the shallow sea

D. A. Presnov^{1,a}, A. L. Sobisevich¹, A. S. Shurup^{1,2}

¹*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. Moscow 123242, Russia*

²*Department of Acoustics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*
E-mail: ^apresnov@physics.msu.ru

Paper presents the results of full-scale tests in ice conditions of Ladoga Lake of marine seismic survey sources and the area measuring seismic-acoustic system based on autonomous buoys of frozen type. The possibility of normal modes separation in the received signal, spreading in the layered system "ice cover — water layer — sedimentary layer — elastic half-space" is demonstrated. Based on the analysis of the solution of the direct problem, effective numerical algorithms of tomographic evaluation of the characteristics of the bottom, water layer and ice cover are constructed.

PACS: 43.30.Ma

Keywords: seismoacoustics, tomography, layered medium

Received 14 November 2019.

Сведения об авторах

1. Преснов Дмитрий Александрович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (499) 254-90-80, e-mail: presnov@physics.msu.ru.
2. Собисевич Алексей Леонидович — доктор физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник; тел.: (499) 254-90-80, e-mail: alex@ifz.ru.
3. Шуруп Андрей Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, доцент физфака МГУ имени М.В.Ломоносова, вед. инженер ИФЗ РАН; тел.: (499) 254-90-80, e-mail: andrey.shurup@gmail.com.