ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2020, том 84, № 1, с. 114–118

УДК 534.143,550.34.01

ДИСТАНЦИОННОЕ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ДНА ПОКРЫТОГО ЛЬДОМ МОРЯ

© 2020 г. Р. А. Жостков*

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

**E-mail: shageraxcom@yandex.ru*

Поступила в редакцию 29.07.2019 г.
После доработки 30.08.2019 г.
Принята к публикации 27.09.2019 г.

Численно промоделировано распространение поверхностных и объемных акустических волн в системе “атмосфера–ледовый покров–водный слой–морское дно с включением”. Показано, что данные о фундаментальной поверхностной волне, зарегистрированные на льду, могут использоваться для диагностирования неоднородной структуры морского дна. Установлено, что использование акустической волны в атмосфере, порожденной фундаментальной поверхностной волной, позволяет повысить отношение сигнал/шум.

DOI: 10.31857/S0367676520010342

ВВЕДЕНИЕ

Сейсморазведка на акваториях обычно сводится к использованию буксируемых гидроакустических антенн, регистрирующих сигналы от активного источника, либо сейсмических станций, устанавливаемых на морское дно [1]. При наличии ледового покрова эти технологии практически неприменимы. Поэтому необходима разработка методов зондирования покрытых льдом акваторий.

Аналитически показано [2] и экспериментально подтверждено [3–8], что в системе “ледовый покров–водный слой–морское дно” могут существовать два типа поверхностных волн: фундаментальная мода, несущая информацию о структуре дна, и изгибная, влияние на которую в большей степени оказывают параметры ледового покрова.

В последнее время все большую популярность приобретают методы, основанные на использовании данных о поверхностных акустических волнах, поскольку они распространяются только в горизонтальных направлениях, что приводит к их преобладанию в сейсмоакустическом сигнале из-за меньшего затухания. Эти технологии [9, 10] хорошо зарекомендовали себя при геофизических исследованиях на суше [11–16]. Поэтому в настоящей работе проводится исследование именно поверхностных волн, нацеленное на развитие и адаптацию метода микросейсмического зондирования [9] для проведения исследования морского дна, измеряя сейсмоакустические поля только на поверхности ледового покрова. Суть метода микросейсмического зондирования [9] заключается в определении пространственного распределения относительной интенсивности I/I_0 микросейсмического фона (естественных колебаний земной поверхности): повышенные значения соответствуют мягким включениям и наоборот. Этот эффект можно объяснить тем, что при прохождении волны вблизи контрастного включения ее скорость изменяется, что влечет изменение ее амплитуды в соответствии с принципом сохранения потока энергии [17]. Поскольку рэлеевские волны локализованы в приповерхностном слое мощностью (толщиной?) около одной длины волны, для зондирования разных глубин достаточно использовать волны разных частот.

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

Численное моделирование методом конечных элементов произведено при использовании специального программного обеспечения [18], созданного на базе пакета COMSOL Multiphysics 5.4 (лицензия № 9600341). В этой программе реализован двумерный расчет распространения поверхностных волн в слоистой системе “воздушный слой–ледовый слой–водный слой–гранитный слой с контрастным вертикальным включением”, моделирующей покрытое льдом море (рис. 1), физические параметры сред представлены в таблице. Толщина ледового слоя составляла 0.4 м, а водного – 30 м (специальные граничные условия позволяют считать воздушный и гранитный слои полупространствами).

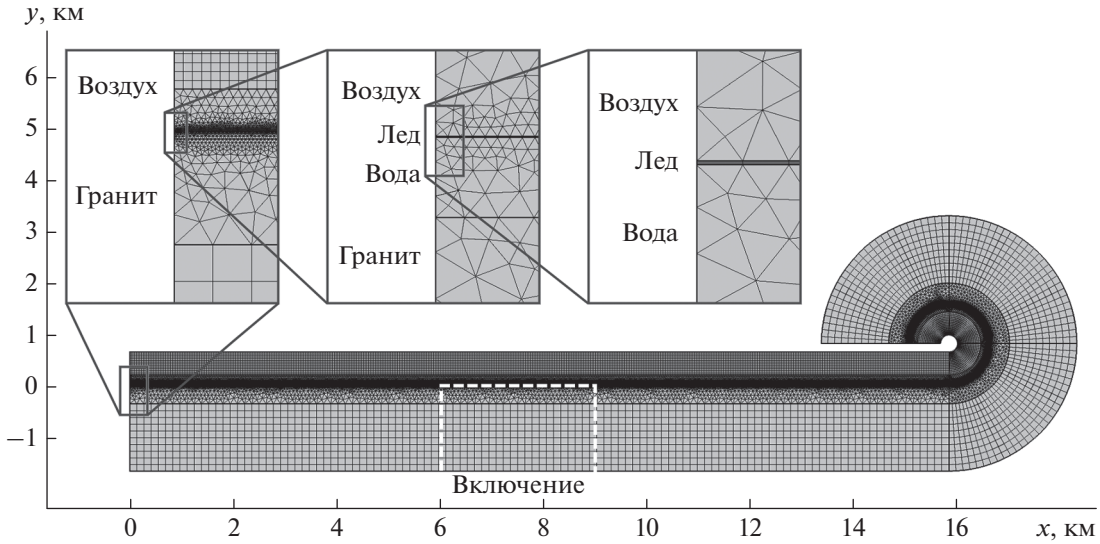

Рис. 1. Геометрия численной модели и используемая сетка конечных элементов. Положение контрастного включения в морском дне отмечено пунктиром. Отметка $y = 0$ соответствует верхней границе гранитного слоя.

Размеры конечных элементов подобраны таким образом, чтобы обеспечивать высокую точность (ошибка составляет менее 0.5%) моделирования при минимальной нагрузке на вычислительную станцию. Этого удалось добиться благодаря использованию структурных сеток со своим шагом пространственной дискретизации в каждой зоне и их соединению с помощью треугольных элементов (рис. 1). Расчеты производились во времени, а шаг по времени определялся критерием Куранта–Фридрихса–Леви с запасом прочности равным двум [19].

Граничные условия соответствуют стандартным для подобных задач: слева симметричное условие, позволяющее моделировать только половину среды; все остальные границы отражают слабо, что позволяет рассматривать верхний и нижний слои как полупространства, поскольку отражение от подобных границ практически отсутствует; между слоями действует условие непрерывности нормальных смещений и напряжений; оно действует также на границы контрастного включения и вмещающей его твердой среды.

Для возбуждения изгибной и фундаментальной поверхностных волн использовалось условие вертикального смещения на левой границе модели в точках, расположенных на верхних границах твердых слоев. Это смещение задается импульсом, представляющим собой модулированный окном Ханнинга [19] гармонический сигнал – таким образом моделируется микросейсмический цуг. Для проведения исследования требовалось использовать набор из нескольких несущих частот (24 частоты) в диапазоне 0.1–10 Гц. Сравнение регистрируемых сигналов при различных расположениях источника показало, что наиболее эффективно возбуждает фундаментальную волну источник вблизи дна, поэтому при проведении реальных полевых работ, подразумевающих активный источник, рекомендуется его располагать на дне, тем не менее, при отсутствии такой возможности приемлемым будет и вариант источника на льду или вблизи него. Придонное

Таблица 1. Физические параметры исследуемых сред

	Плотность, кг · м$^{-3}$	Скорость продольных волн, м · с$^{-1}$	Скорость поперечных волн, м · с$^{-1}$
Воздух	1.29	330	–
Лед	900	2200	1270
Вода	1000	1500	–
Осадки	2600	4707	2718
Включение			
Гранит		5260	3038

расположение источника приводит к тому, что амплитуда возбуждаемой изгибной волны гораздо меньше, чем при расположении источника у льда, что является положительным эффектом, так как в нашем случае изгибная волна не несет информации о структуре дна и является помехой.

Результат численного моделирования представляет собой временные зависимости вертикальной компоненты смещения, записанные двумястами виртуальными сейсмометрами, эквидистантно расположенными на верхних границах твердых слоев вдоль исследуемого профиля длиной 15 км, а также акустограммы, зарегистрированные виртуальными микрофонами в воздухе на высоте 30 м от поверхности льда (с теми же горизонтальными координатами, что и сейсмометры).

Длительность вычислений выбиралась так, чтобы каждый сейсмометр полностью зарегистрировал и падающую фундаментальную волну, и изгибную. Из-за большой разницы в скоростях распространения этих двух волн (характерная скорость фундаментальной волны – около 1800 м $\cdot$ с$^{-1}$, изгибной – 140 м $\cdot$ с$^{-1}$) за время, необходимое изгибной волне, чтобы пройти весь исследуемый профиль, фундаментальная волна распространится на значительное расстояние, несколько раз отразившись от правой и левой границы модели, поскольку слабоотражающие граничные условия недостаточно эффективно поглощают поверхностные волны в отличие от объемных. Избежать этих паразитных отражений возможно либо на порядок увеличив размер модели, что требует существенных вычислительных ресурсов, либо каким-то образом уменьшить отражение фундаментальной волны от границы. Мы пошли по второму пути, использовав нестандартную геометрию с поворотом (рис. 1). Для такой геометрии модели после прохождения исследуемого профиля фундаментальная волна начинает распространяться вдоль криволинейной вогнутой границы, что приводит к излучению ее энергии в объем в виде краевой волны [20]. После отражения от границы модели фундаментальная волна проходит область с поворотом еще раз, но в обратном направлении. Такое решение вкупе с введением медленно нарастающего с расстоянием поглощения в среде приводит к тому, что амплитуда однократно отраженной фундаментальной волны уменьшается на три порядка.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Обработка синтетических сейсмо- и акустограмм производилась с использованием специально разработанного программного обеспечения [21], реализующего алгоритм микросейсмического зондирования [9], заключающийся в определении и сглаживании спектров сигналов, выделении компонент I, соответствующих несущим частотам, их нормировки на соответствующие значения I_0, рассчитанные для среды без включения и пространственной фильтрации. Для того чтобы микросейсмический фон можно было считать диффузным, проводилось усреднение поля относительной интенсивности фундаментальной волны по бегущим с разных сторон волнам, для чего в силу симметрии было достаточно усреднить данные для каждого пункта наблюдения с данными симметрично расположенного относительно центра профиля пункта. Сравнение геофизических профилей, получаемых при интерпретации данных сейсмометров на дне и на льду, представлено на рис. 2*а*, 2*б*.

Как видно на рис. 2*а*, 2*б*, во всех случаях уверенно локализуется вертикальное включение, отличающееся от вмещающей среды на 20% меньшим модулем Юнга, что открывает широкие перспективы для амплитудных методов зондирования морского дна с помощью датчиков на льду. Для исследования малозаглубленных неоднородностей необходимо использовать более высокие частоты, которые обычно отсутствуют в естественном микросейсмическом шуме.

Для реальных акваторий свойственно наличие слоя мягких осадков, покрывающих морское дно, поэтому для доказательства работоспособности развиваемой технологии была рассмотрена пятислойная среда (между водным и гранитным слоем добавлен слой мягких осадков), содержащая то же самое локальное контрастное включение (рис. 2*в*). При этом модуль Юнга слоя осадков толщиной 200 м был на 20% меньше, чем у гранитного слоя.

Рассмотрим акустическое поле в атмосфере, ассоциируемое с вытекающей объемной волной, порожденной быстрой фундаментальной поверхностной волной. Изгибная волна в рассматриваемом низкочастотном диапазоне (характерном для микросейсмического шума) не излучает акустическую вытекающую волну в атмосферу, поскольку скорость ее распространения меньше скорости звука в воздухе. Поэтому несмотря на то, что амплитуда изгибной волны может быть больше амплитуды фундаментальной моды, регистрируемой на поверхности льда (как показывает анализ фона при полевых экспериментах, различие может быть в 10–20 раз), воздействия на атмосферу она не оказывает. Однако при частотах больше 10 Гц и большой мощности ледового покрова вытекающая волна изгибной моды может образоваться, что требует дополнительного исследования.

Такое свойство вытекающей волны позволяет сделать предположение о возможности получения информации о глубинном строении морского дна по данным акустического поля вытекаю-

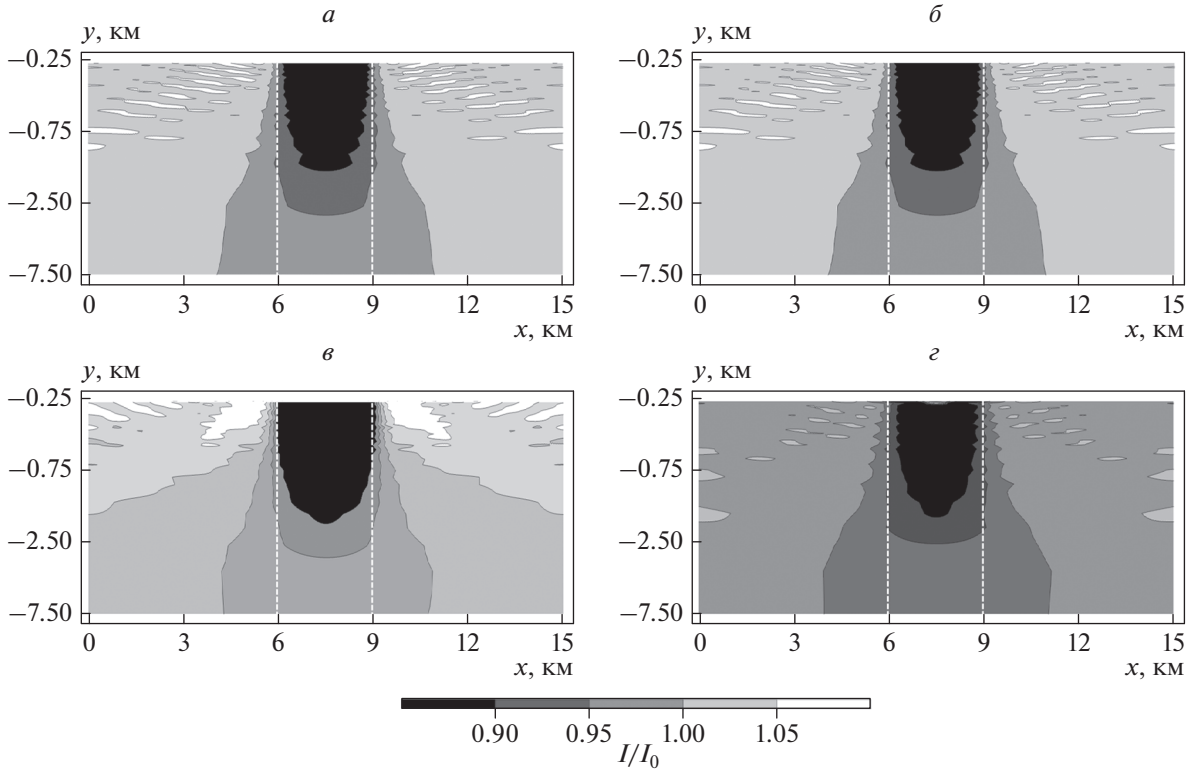

Рис. 2. Результат восстановления вертикальной неоднородности шириной 3 км (границы отмечены пунктиром) с модулем Юнга на 20% меньшим, чем во вмещающей среде: *а* – по данным донных датчиков; *б*, *в* – по данным ледовых датчиков (*в* – при наличии слоя осадков), *г* – по данным микрофонов. Шкала относительной интенсивности микросейсмического фона для всех вариантов общая.

щей волны, подтвержденное результатами численного моделирования (рис. 2*г*).

Ожидаемым преимуществом оценки структуры морского дна по данным акустического поля в атмосфере является то, что на льду приходится бороться с помехами, вызванными изгибной модой, в то время как поле в атмосфере в основном сформировано фундаментальной волной, но есть, конечно, и иные источники помехи.

Важным вопросом является необходимое время накопления фонового сигнала на льду. При использовании технологии микросейсмического зондирования на суше за многолетнюю практику показано, что получения результатов достаточно двух часов. В ледовых условиях это время значительно больше. Полевые работы на Умбозере и Ладожском озерах [4, 5] показали, что это время может превышать десять часов, и, строго говоря, для каждого района исследований и погодных условий оно может быть свое, что необходимо учитывать при проведении полевых работ. К счастью, можно определить необходимое время накопления сигнала с помощью обработки части получаемых экспериментальных данных – для этого необходимо определить временной интервал, за который систематическая ошибка регистрируемых данных снижается до допустимого уровня.

Таким образом, результаты зондирования морского дна по данным ледовых, атмосферных и донных датчиков практически не различаются (при условии, что длины зондирующих сигналов превышают глубину исследуемой акватории). Это доказывает возможность использования информации, получаемой только со льда или даже в воздухе для восстановления неоднородной структуры морского дна с помощью методов, анализирующих амплитудные характеристики поля поверхностных волн.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (проект № 18-05-70034) и гранта Президента РФ для поддержки научных школ № НШ-5545.2018.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Антонов А.Н., Авдюхина С.Ю., Егоров И.В. и др.* // Матер. науч.-практич. конф. Сейсмические технологии-2017. (Москва, 2017). С. 64.
2. *Преснов Д.А., Жостков Р.А., Гусев В.А. и др.* // Акуст. журн. 2014. Т. 6. № 4. С. 426; *Presnov D.A., Zhostkov R.A., Gusev V.A. et al.* // Acoust. Phys. V. 60. № 4. P. 455.

3. *Преснов Д.А., Жостков Р.А., Шуруп А.С. и др.* // Учен. зап. физ. фак-та МГУ. 2016. № 6. С. 166704.
4. *Преснов Д.А., Жостков Р.А., Собисевич А.Л., Шуруп А.С.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 1. С. 76; *Presnov D.A., Zhostkov R.A., Shurup A.S., Sobisevich A.L.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. № 1. P. 68.
5. *Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Жостков Р.А. и др.* // НТР. 2017. Т. 96. № 3. С. 31.
6. *Луньков А.А., Петников В.Г.* // Учен. зап. физ. факта МГУ. 2017. № 5. С. 1750122.
7. *Ewing M., Crary A.P.* // Physics. 1934. V. 5. P. 165.
8. *Press F., Ewing M.* // Eos Trans. AGU. 1951. № 32. P. 673.
9. *Горбатиков А.В.* Способ сейсморазведки. Пат. РФ № 2271554, кл. G01V1/00. 2006.
10. *Яновская Т.Б.* Поверхностно-волновая томография в сейсмологических исследованиях. СПб: Наука, 2015. 167 с.
11. *Лиходеев Д.В., Дударов З.И., Жостков Р.А. и др.* // Вулк. и сейсм. 2017. Т. 11. № 6. С. 28; *Likhodeev D.V., Dudarov Z.I., Zhostkov R.A. et al.* // J. Volcan. Seismol. V. 11. № 6. С. 413.
12. *Преснов Д.А., Белобородов Д.Е., Долов С.М. и др.* // Тезисы докл. науч. конф. молодых уч. и аспирантов ИФЗ РАН. (Москва, 2016). С. 54.
13. *Собисевич А.Л., Жостков Р.А.* // Геофиз. исслед. 2013. Т. 14. № 4. С. 47.
14. *Преснов Д.А., Жостков Р.А., Котов А.Н.* // Сб. науч. матер. 20-й молодеж. науч. школы по геофиз. (Пермь, 2019). С. 157.
15. *Собисевич А.Л., Тверитинова Т.Ю., Лиходеев Д.В. и др.* // Вопр. инж. сейсм. 2015. Т. 42. № 2. С. 73.
16. *Французова В.И., Данилов К.Б.* // Вулк. и сейсм. 2016. № 5. С. 71; *Frantsuzova V.I., Danilov K.B.* // J. Volc. Seismol. 2016. V. 10. № 5. P. 339.
17. *Жостков Р.А., Преснов Д.А., Собисевич А.Л.* // Вест. КРАУНЦ. Сер. науки о Земле. 2015. Т. 2. № 26. С. 11.
18. *Жостков Р.А.* Свидетельство о регистрации прав на ПО № 2018665671. 2018.
19. *Цуканов А.А, Калабухов Д.И., Романов А.И. и др.* Моделирование волн Рэлея в неоднородной среде с использованием вычисл. систем с параллельной архитектурой. Уч. пособие. Препринт № 1. М.: Физ. фак. МГУ, 2010. 62 с.
20. *Викторов И.А.* // Акуст. журн. 1961. Т. 7. № 1. С. 21.
21. *Жостков Р.А.* Свид. о рег. прав на ПО № 2018662815. 2018.