

УДК 534.143; 550.34.01

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛУБИННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПОКРЫТОГО ЛЬДОМ МОРЯ

Жостков Р.А.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, РФ, Москва, shageraxcom@yandex.ru

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 [10] и экспериментально подтверждено [8, 12, 13, 15, 20], 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 [3, 19] хорошо зарекомендовали себя при геофизических исследованиях на суше [7, 9, 11, 14, 16, 17]. Поэтому в настоящей работе проводится исследование именно поверхностных волн, нацеленное на развитие и адаптацию метода микросейсмического зондирования [3, 6] для проведения исследования морского дна, измеряя сейсмоакустические поля только на поверхности ледового покрова.

Численная модель

Численное моделирование методом конечных элементов произведено при использовании специального программного обеспечения [5]. 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. Мощность ледового слоя составляла 0.4 м, а водного – 30 м.

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 временной области, а шаг по времени определялся критерием Куранта – Фридрихса – Леви с запасом прочности равным двум [18].

Таблица 1. Физические параметры исследуемых сред.

	Плотность, кг/м ³	Скорость продольных волн, м/с	Скорость поперечных волн, м/с
Воздух	1.29	330	-
Лед	900	2200	1270
Вода	1000	1500	-
Осадки	2600	4707	2718
Включение			
Гранит		5260	3038

Граничные условия соответствуют стандартным для подобных задач: слева симметричное условие, позволяющее моделировать только половину среды; все остальные границы слабоотражающие, 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; также условие непрерывности смещений и напряжений действует на границы контрастного включения и вмещающей его твердой среды.

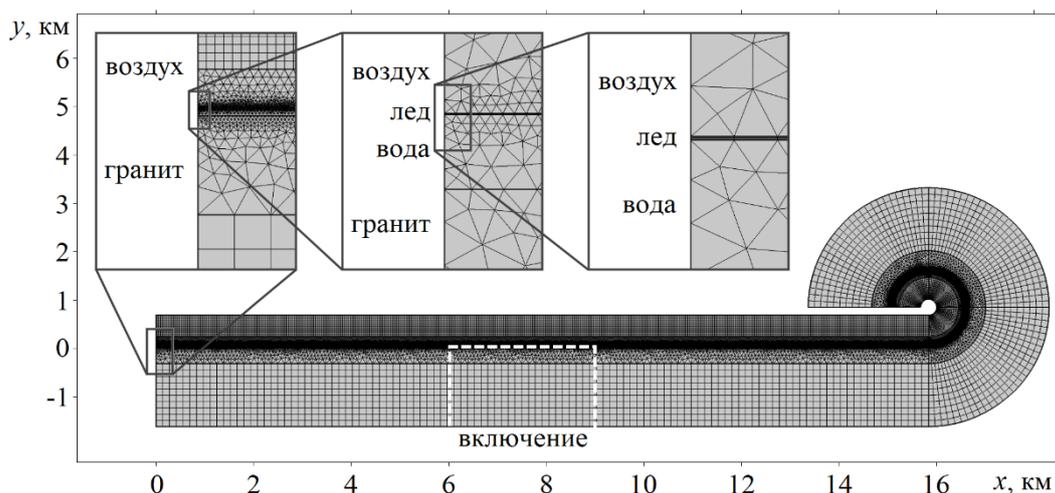


Рис. 1. Геометрия численной модели и используемая сетка конечных элементов. Положение контрастного включения в морском дне отмечено пунктиром. Отметка $y=0$ соответствует верхней границе гранитного слоя.

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 [18] гармонический сигнал. Для проведения исследования требовалось использовать набор из нескольких несущих частот в диапазоне $0.1 \div 10$ Гц.

Результат численного моделирования представляет собой временные зависимости вертикальной компоненты смещения, записанные двумя 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 метров от поверхности льда (с теми же горизонтальными координатами, что и сейсмометры).

Длительность вычислений выбиралась так, чтобы каждый сейсмометр полностью зарегистрировал как падающую фундаментальную волну, так и изгибную. Из-за большой разницы в скоростях распространения этих двух волн (характерная скорость фундаментальной волны – около 1800 м/с, изгибной – 140 м/с) 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, используя нестандартную геометрию с заворотом (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 [2]. После отражения от границы модели фундаментальная волна проходит область с заворотом еще раз, но в обратном направлении. Такое решение вкпе 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 [4], реализующего алгоритм микросейсмического зондирования [3], 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 возможно 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 для симметрично расположенного относительно центра профиля

пункта. Сравнение геофизических профилей, получаемых при интерпретации данных сейсмометров на дне и на льду, представлено на рис. 2а, б.

Как видно на рис. 2а, 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.

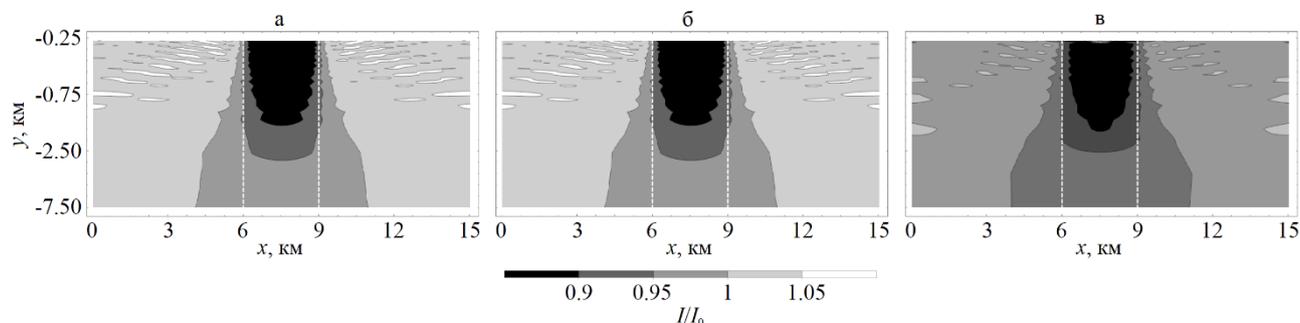


Рис. 2. Результат восстановления вертикальной неоднородности шириной 3 км (границы отмечены пунктиром) с модулем Юнга на 20% меньшим, чем во вмещающей среде: а – по данным донных датчиков, б, в – по данным микрофонов. Шкала относительной интенсивности микросейсмического фона и вертикальная ось для всех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

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 высоких частотах (больше 10 Гц) и большой мощности ледового покрова вытекающая волна изгибной моды может образовываться, что требует дополнительного исследования.

Такое свойство вытекающей волны позволяет сделать предположение о возможности получения информации о глубинном строении морского дна по данным акустического поля вытекающей волны, подтвержденное результатами численного моделирования (рис. 2в).

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. В случае использования технологии микросейсмического зондирования на суше за многолетнюю практику показано, что достаточно двух часов. В ледовых условиях это время значительно больше. Полевые работы на Умбозере и Ладожском озерах [12, 15] 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, возможно 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 отличаются (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. Широкополосная сейсмическая станция для сейморазведки на морском дне и в транзитной зоне на основе молекулярно-электронных датчиков // Материалы научно-практической конференции Сейсмические технологии-2017. 2017. С. 64–67.
2. Викторов И.А. О затухании поверхностных волн на цилиндрических поверхностях // Акуст. журн. 1961. Т. 7. №1. С. 21–25.
3. Горбатилов А.В. Пат. РФ № 2271554. Бюллетень изобретений. 2006. № 7.
4. Жостков Р.А. Свидетельство о регистрации прав на ПО. 2018. № 2018662815. 13.12.2018 Бюл. № 12.
5. Жостков Р.А. Свидетельство о регистрации прав на ПО. 2018. № 2018665671. 06.12.2018 Бюл. № 12.
6. Жостков Р.А., Преснов Д.А., Собисевич А.Л. Развитие метода микросейсмического зондирования // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле. 2015. Т. 2. № 26. С. 11–19.
7. Лиходеев Д.В., Дударов З.И., Жостков Р.А., Преснов Д.А., Долов С.М., Данилов К.Б. Исследование глубинного строения вулкана Эльбрус методом микросейсмического зондирования // Вулк. и сейсм. 2017. Т. 11. № 6. С. 28–32.
8. Луньков А.А., Петников В.Г. Распространение звука в мелководном арктическом волноводе с ледовым покровом // УЗФФ. 2017. № 5. 1750122.
9. Преснов Д.А., Белобородов Д.Е., Долов С.М. и др. Трехмерное строение грязевого вулкана Джау-Тепе по данным микросейсмического зондирования // Тезисы докладов научной конференции молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН, 25-26 апреля 2016 г. 2016. С. 54.
10. Преснов Д.А., Жостков Р.А., Гусев В.А., Шуруп А.С. Дисперсионные зависимости упругих волн в покрытом льдом мелком море // Акуст. журн. 2014. Т. 6. № 4. С. 426–436.
11. Преснов Д.А., Жостков Р.А., Котов А.Н. Исследование связи амплитуды фонового сейсмического шума с параметрами среды (на примере грязевого вулкана Джау-Тепе) // Сборник научных материалов двадцатой молодежной научной школы по геофизике, 2019, г. Пермь. Ги УрО РАН, 2019. С. 157–161.
12. Преснов Д.А., Жостков Р.А., Собисевич А.Л., Шуруп А.С. Натурные наблюдения сейсмоакустических волн в условиях покрытого льдом водоема // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 1. С. 76–80.
13. Преснов Д.А., Жостков Р.А., Шуруп А.С. и др. Экспериментальное исследование гео-гидроакустических волн в условиях мелкого моря, покрытого льдом // УЗФФ. 2016. № 6. С. 166704-1-166704-4.
14. Собисевич А.Л., Жостков Р.А. О движении флюидонасыщенной грязебрекчии в выводящих структурах грязевых вулканов // Геофизические исследования. 2013. Т. 14. № 4. С. 47-58.
15. Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Жостков Р.А. и др. Геогидроакустический шумовой мониторинг подледных акваторий северных морей // НТР. 2017. Т. 96. № 3. С. 31–46.
16. Собисевич А.Л., Тверитинова Т.Ю., Лиходеев Д.В. и др. Глубинное строение грязевого вулкана Джарджава в пределах Южно-Керченской антиклинальной структуры // Вопросы инженерной сейсмологии. 2015. Т. 42. № 2. С. 73–80.
17. Французова В.И., Данилов К.Б. Структура трубки взрыва пимени М.В. Ломоносова Архангельской алмазоносной провинции по аномалиям микросейсмического поля // Вулк. и сейсм. 2016. № 5. С. 71–78.
18. Цуканов А.А., Калабухов Д.И., Романов А.И., и др. Моделирование волн Рэлея в неоднородной среде с использованием вычислительных систем с параллельной архитектурой. Учебное пособие МГУ им. М.В. Ломоносова физический факультет. Препринт №1/2010. Физ. фак. МГУ. Москва. 62 с.
19. Яновская Т.Б. Поверхностно-волновая томография в сейсмологических исследованиях. СПб: Наука, 2015. 167 с.
20. Ewing M., Crary A.P. Propagation of elastic waves in ice // Physics. 1934. V. 5. P. 165.