# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН В СРЕДАХ С ФИЗИЧЕСКИМИ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ

# Жостков Р.А.

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

### Введение

Геофизические методы исследования литосферы, основанные на использовании поверхностных волн, в настоящее время активно развиваются [9, 10, 13, 14]. В числе таких методов отметим метод микросейсмического зондирования [2], разработанный в ИФЗ РАН [2, 3, 16].

Следует признать, что задача восстановления скоростной структуры геофизической среды по результатам измерений спектральных амплитуд микросейсм её поверхности всё ещё остается до конца нерешённой. В работе [17] приведены теоретические основы метода микросейсмического зондирования применительно к геофизическим средам с горизонтальной слоистостью и показано, что в этом случае метод позволяет оценить лишь среднюю глубину залегания неоднородности [17].

В то же время, необходимо отметить, что наилучшие результаты метод микросейсмического зондирования позволяет получить для геофизических сред с протяжёнными субвертикальными неоднородностями, обладающими высокой контрастностью по импедансу в сравнении с вмещающими породами. Это могут быть близвертикальные элементы магматических питающих систем активных вулканов [11], сосредоточенные зоны разгрузки глубинных флюидов, в том числе выводящие каналы грязевых вулканов [12, 15], интрузивные тела, зоны активных разломов, а также импактные структуры [4].

Однако вопросам учёта влияния рельефа в данном методе до сих пор не уделено должного внимания. В настоящей работе исследуются условия распространения упругих волн в полупространстве с вертикальным контрастным включением и геометрической неоднородностью границы, моделирующей рельеф.

Отметим, что отдельные вопросы теории распространения поверхностных акустических волн в упругой среде с периодическими малыми или крупными неровностями на границе, включая и асимптотические решения, представлены в работах [1, 18].

# Численная модель

Двумерное численное моделирование во временной области проведено методом конечных элементов с помощью специально разработанного программного обеспечения [7].

В рамках линейной теории упругости с использованием уравнения движения Ламэ и закона Гука смоделировано распространение плоской волны Рэлея вдоль криволинейной границы идеального неоднородного твердого полупространства и вакуума, описываемой формулой  $y = 2N\sigma \exp(-x^2/2\sigma^2)$ , где х, у – горизонтальная и вертикальная координаты;  $\sigma$  и  $2N\sigma$  – характерные горизонтальный и вертикальный размеры рельефа. Подбирая различные значения  $\sigma$  и *N* возможно аппроксимировать форму многих объектов, как выпуклых (горы, вулканы), так и вогнутых (овраги, долины), подробное исследование влияние этого параметра приведено в работе [6].

Материалом полупространства выбран гранит со следующими характеристиками: плотность  $\rho_0 = 2600 \text{ кг/m}^3$ , модуль Юнга  $E_0 = 60 \text{ ГПа}$ , коэффициент Пуассона  $v_0 = 0.25$ . При этих параметрах скорости продольной, поперечной и рэлеевской волн соответственно равны 5262 м/с, 3038 м/с, 2793 м/с.

Вертикальное контрастное включение (рис. 1) представляло собой область шириной расположенную симметрично вдоль оси x = 0 и отличающуюся от вмещающей среды модулем Юнга  $E_{\text{вкл}}$ , измененного в *C* раз:  $E_{\text{вкл}} = CE_0$  (равенство коэффициента *C* единице соответствует однородной среде). Для удобства в настоящем исследовании все результаты получены для фиксированного значения характерного размера $\sigma$ , выбранного равным длине рэлеевской волны на частоте 1 Гц, т.е. 2793 м. Ключевым параметром настоящего исследования является величина  $K = \sigma/\lambda$ , характеризующая отношение характерного размера  $\sigma$  к длине зондирующей волны  $\lambda$ . Такая нормировка пространственных величин позволяет делать выводы для случаев подобной геометрии по данным исследования для единственного значения  $\sigma$ . Параметр *K* оказывает существенное влияние

на построение сетки. Дело в том, что размер конечных элементов должен быть много меньше как  $\sigma$ , так и  $\lambda$ . В случае длинных волн особо мелкий пространственный шаг необходим только в области с особенностью рельефа (размер элементов  $\Delta x$  в приповерхностном слое не превышал  $\sigma/12 \approx 230$  м, а вдали от особенности рельефа  $\lambda/10 \approx 3360$  м при K = 0.083), а для коротких волн – во всем приповерхностном слое ( $\Delta x < \lambda/10 \approx 24$  м при K = 12.057). Использование такого же мелкого шага во всей модели не приводит к существенному повышению точности, однако требования к вычислительной мощности значительно возрастают. Поэтому применялось построение разных типов сеток в различных областях модели (рис. 1), позволяющее автоматически подбирать оптимальную сетку конечных элементов для разных параметров модели с сохранением высокой точности без излишней нагрузки на рабочую станцию.

Шаг по времени  $\Delta t$  определялся критерием Куранта – Фридрихса – Леви с запасом прочности равным двум [17] ( $\Delta t \approx 14$  мс при N = 0.083 и  $\Delta t \approx 1.2$  мс при N = 12.057).



Рис. 1. Сравнение сеток конечных элементов для разных отношений характерного размера особенности рельефа к длине падающей волны при *N*=1: слева – *K*=3; справа – *K*=0.3. Положение контрастного включения отмечено пунктиром.

Граничные условия выбраны следующим образом: свободная верхняя криволинейная граница; правая и нижняя границы модели – слабоотражающие, почти полностью поглощающие падающие на них излучение; левая – источник плоского импульса поверхностной волны продолжительностью 8 периодов, представляющего собой аналитическое решение для волны Рэлея, модулированное окном Ханнинга [16] – так моделируется реальный цуг микросейсмического шума. На границе включения и вмещающей среды заданы условия непрерывности смещения и напряжений.

Целью численного моделирования было получение синтетических сейсмограмм с двухсот виртуальных датчиков, эквидистантно расположенных на дневной поверхности вблизи особенности рельефа (расстояние между датчиками 0.05 $\sigma$ ). Для этого было проведено множество реализаций для разных параметров С, N и K. Для автоматического анализа получаемых сейсмограмм в среде Wolfram Mathematica 11 разработаны специальные алгоритмы [8], реализующие обработку данных в соответствии с методом микросейсмического зондирования [2].

### Результаты

Рассмотрим модельную геофизическую среду, представляемую в виде полупространства с вертикальной неоднородностью (рис. 2а). При обработке использовался метод микросейсмического зондирования [2] для определения параметров неоднородности по данным регистрации относительной интенсивности микросейсмического шума. Снижение относительной (нормировка производится на результаты расчетов для однородной среды с плоской границей) интенсивности соответствуют более плотным (высокоскоростным) неоднородностям и наоборот. Обработка данных численных экспериментов осуществлялась в программном пакете Wolfram Mathematica 10 и заключалась в определении и сглаживании спектров синтетических сейсмограмм, выделении компонент, соответствующих несущим частотам, пространственной фильтрации и нормировки на соответствующие значения, рассчитанные для однородного полупространства без рельефа.

Результаты численного эксперимента для однородного полупространства с полубесконечным вертикальным включением шириной и модулем Юнга, превышающим на 20% таковой во вмещающей среде, показаны на рис. 2а. По вертикальной оси отложены величины отношения K характерного размера неоднородности рельефа (см. ниже) к длине зондирующей волны  $\lambda$ . Видно, что



локализовать неоднородность возможно, если её размеры превышают длину зондирующей волны



Рис. 2. Обнаружение заглубленной неоднородности методом микросейсмического зондирования в полупространстве. Относительная интенсивность микросейсмического шума в зависимости от расстояния вдоль плоской границы среды (в единицах  $\sigma$ ) и lgK при наличии включения, ограниченного пунктиром (a), при наличии только рельефа без включения (б), при наличии и рельефа и включения (в), при наличии и рельефа и включения с учетом поправки на рельеф (г).

Рассмотрим теперь постановку задачи с неплоским рельефом. Пространственное распределение относительной интенсивности волн Рэлея. vсредненной по волнам. распространяющимся слева направо и наоборот при наличии только рельефа (без вертикальной неоднородности), в зависимости от приведено на рис. 26.

Действие рельефа отчасти проявляется в том, что вертикальная компонента колебательной скорости поверхностной волны перестает совпадать с нормалью к поверхности. Использование соответствующих проекций для коррекции этого эффекта допустимо лишь для предельных случаев, соответствующих либо очень коротким волнам (K > 10), распространяющихся вдоль поверхности без искажений, либо длинным волнам (К < 0.05), не взаимодействующим с неровностью.

По сути, рис. 26. представляет собой результат интерпретации данных геофизического профиля по методу микросейсмического зондирования [2] без учёта влияния рельефа. Таким образом, ошибочно можно сделать вывод о наличии разуплотненных (низкоскоростных) включений в заведомо однородном полупространстве с неровностью на границе.

Если теперь поместить неоднородность в модельную среду с неровной границей, то получим следующую картину (рис. 2в).

Сравнение результатов численного эксперимента (рис. 2) показывает, что рельеф приводит не только к существенным искажениям результатов микросейсмического зондирования в части формы и размеров неоднородности, но и к принципиальным ошибкам в определении типа включения, поскольку в данном случае вместо более плотной (высокоскоростной) неоднородности детектируется низкоскоростное включение. Этим можно отчасти объяснить неоднозначность интерпретации результатов исследования глубинного строения лакколита Бештау, где в верхней части геофизического разреза была оконтурена разуплотненная структура [14].

Кроме того, ошибки могут возникать и в определении значений контрастности глубинных структур по импедансу. Так, например, если для среды без рельефа контраст составляет около 15%, то при наличии рельефа он увеличивается до 70%, что не соответствует действительности.

Жостков Р.А.

Решить эту проблему представляется возможным с помощью дополнительной нормировки результатов для среды с вертикальным включением и рельефом (рис. 3) на данные для однородной среды с рельефом (рис. 26). В этом случае качество восстановления глубинной неоднородности повышается (рис. 2г).

Несмотря на артефакты восстановления геофизического разреза, связанные с нелинейным характером рассеяния поверхностных волн, учёт поправки за рельеф позволяет корректно определить тип неоднородности, её форму (в рамках условий применимости метода микросейсмического зондирования [3, 16]), а также абсолютные значения контрастов. Аналогичные результаты наблюдаются и в случае других типов неоднородностей, отличающихся как контрастом, так и формой, а также для различной степени выраженности рельефа.

Таким образом, вклад неровностей рельефа, соизмеримых с длинами рэлевских волн, используемых в качестве зондирующего сигнала в методе микросейсмического зондирования, необходимо учитывать при интерпретации данных, в то время как игнорирование поправки за рельеф может приводить к принципиальным ошибкам.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект № 17-77-10162.

#### Список литературы

1. Бирюков С. В., Гуляев Ю. В., Крылов В. В., Плесский В. П. Поверхностные Акустические Волны в Неоднородных Средах. М: Наука, 1991. 414 с.

2. Горбатиков А.В. Пат. РФ № 2271554. Бюллетень изобретений. 2006. № 7.

3. Горбатиков А.В., Цуканов А.А. Моделирование волн Рэлея вблизи рассеивающих скоростных неоднородностей. Исследование возможностей метода микросейсмического зондирования // Физика Земли. 2011. № 4. С. 96–112.

4. Горбенко В.И., Жостков Р.А., Лиходеев Д.В. и др. Вопросы применимости молекулярно-электронных сейсмоприемников в пассивной сейсморазведке на примере изучения глубинного строения Калужской кольцевой структуры по данным анализа поверхностных волн // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52. № 3. С. 5–19.

5. *Гуляев Ю.В., Плесский В.П.* Распространение поверхностных акустических волн в периодических структурах // УФН. 1989. Т. 157. № 1. С. 85–127.

6. Жостков Р.А. Восстановление неоднородностей среды при микросейсмическом зондировании вдоль криволинейной поверхности // Акустический журнал. 2019.Т. 5. №6. С. 708-720.

7. Жостков Р.А. Программа для моделирования рассеяния волн Рэлея на одиночной особенности рельефа. Номер регистрации 2018665159. 03.12.2018 Бюл. № 12.

8. Жостков Р.А. Программа для обработки синтетических и экспериментальных сейсмограмм в соответствии с методом микросейсмического зондирования. Номер регистрации 2018662815. 13.12.2018 Бюл. № 12.

9. 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.

10. Жостков Р.А., Преснов Д.А., Шуруп А.С., Собисевич А.Л. Сравнение микросейсмического зондирования и томографического подхода при изучении глубинного строения Земли // Известия РАН. Серия физическая. 2017. Т. 81. № 1. С. 72–75.

11. Лиходеев Д.В., Дударов З.И., Жостков Р.А. и др. Исследование глубинного строения вулкана Эльбрус методом микросейсмического зондирования // Вулканология и сейсмология. 2017. № 6. С. 28–32.

12. Овсюченко А.Н., Собисевич А.Л., Сысолин А.И. О взаимосвязи современных тектонических процессов и грязевого вулканизма на примере горы Карабетова (Таманский п-ов) // Физика Земли. 2017. № 4. С. 118–129.

13. Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Жостков Р.А. и др. Геогидроакустический шумовой мониторинг подледных акваторий северных морей // Наука и технологические разработки. 2017. Т. 96. № 3. С. 31–46.

14. Собисевич А.Л., Разин А.В. Геоакустика слоистых сред. М.: ИФЗ РАН, 2012. 210 с.

15. Собисевич А.Л., Тверитинова Т.Ю., Лиходеев Д.В., Белобородов Д.Е., Дударов З.И., Долов С.М., Преснов Д.А., Пузич И.Н. Глубинное строение грязевого вулкана Джарджава в пределах Южно-Керченской антиклинальной структуры // Вопросы инженерной сейсмологии. 2015. Т. 42. № 2. С. 73-80.

16. *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, 2010.

17. *Яновская Т.Б.* К теории метода микросейсмического зондирования // Физика Земли. 2017. № 6. С. 18–23.

18. Adams S.D.M., Craster R.V., Williams D.P. Rayleigh waves guided by topography // Proc. R. Soc. A. 2007. V. 463. P. 531–550.