

УДК: 550.34.01 699.842 534:621

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ БАРЬЕРОВ

Жостков Р.А.

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

Введение

Глобальное вибропросвечивание Земли с использованием мощных контролируемых источников сейсмических волн представляет собой сложную и амбициозную задачу, требующую повышения эффективности последних помимо увеличения абсолютной мощности.

Известно [1], что около 70% энергии сейсмических вибраторов излучается в виде поверхностных волн, что полезно для многих геофизических задач, особенно при инженерных исследованиях. Однако для глобального зондирования Земли это представляется нерациональным, поскольку в этом случае используются объемные волны. Заманчивой идеей выглядит перераспределение излучаемой сейсмическим вибратором энергии от поверхностных волн к объемным.

Это возможно реализовать с помощью сейсмических барьеров, под которыми обычно понимают либо открытые, либо заполненные материалом траншеи прямоугольной формы [6]. Реже рассматривают иную форму траншей либо просто неровную границу, на которой происходит рассеяние поверхностных акустических волн (ПАВ) [12, 14]. Одним из частных случаев заполненных траншей можно считать свайные поля [2, 10], которые проще в изготовлении и имеют схожие характеристики. Помимо траншей эффективное экранирование ПАВ возможно с применением естественных склонов [4] или насыпей [3, 7].

Многие работы, в которых приведены результаты теоретических расчетов [10], физических экспериментов [8, 12] и численного моделирования [2, 5, 8, 10, 12, 13] сводятся к исследованию рассеяния ПАВ от излучателя типа вертикального штампа, расположенного вне сейсмического барьера. Обобщенную цель этих исследований можно сформулировать как поиск физических и геометрических параметров, при которых происходит наиболее эффективное рассеяние ПАВ для защиты объектов инфраструктуры от разрушающего воздействия землетрясений [13]. Однако экранирующий эффект можно использовать и противоположным способом – вместо того, чтобы не допустить проникновение поверхностных волн внутрь защищаемой зоны, можно ограничить ее излучение вне этой зоны сейсмическим вибратором, расположенном внутри нее. Поэтому цель нашего исследования заключается в поиске условий, при которых максимизируется излучение объемных волн в заданном направлении при этом ослабление ПАВ является побочным результатом. И в этом случае не всегда наиболее подходящее решение для достижения упомянутой цели является наилучшим для экранирования поверхностных акустических волн.

В научной литературе в основном уделяется внимание рассмотрению вертикальных сейсмических барьеров, гораздо слабее изучены горизонтальные барьеры. В настоящей же работе исследован широкий диапазон соотношений ширины и глубины барьера, включая переходные варианты.

Численная модель

Геометрия модели, а именно концентрическое расположение кольцевого сейсмического барьера шириной L и глубиной H вокруг круглого излучателя радиуса $r = 2.5$ м на расстоянии D от его края, позволила использовать ось симметрии (при нулевой горизонтальной координате) и решать трехмерную задачу в плоской постановке (рис. 1). Области, в которых рассчитывается усредненный поток волновой энергии, находятся в дальней зоне и соответствуют шаровым секторам с вертикальной осью для набора центральных углов α . В настоящей работе приведены результаты (рис. 2) для $\alpha/2 = 13.8^\circ$, поскольку под этим углом выходит продольная упругая волна, касающаяся внешней границы земного ядра в соответствии с моделью PREM [9], таким образом, волновая энергия, излучаемая под меньшими углами будет проходить через ядро Земли, позволяя осуществить его зондирование.

С внешней стороны модель окружена идеально согласованным поглощающим слоем, что практически полностью исключает отражения от ее границы. Дневная поверхность свободная за

исключением области приложения вертикальной гармонической силы, соответствующей сейсмическому вибратору. Размер конечных элементов обеспечивает ошибку не более 0.5%, причем не превышает 1/8 длины волны Рэлея, а в области вблизи вибратора и барьера меньше их характерных размеров в 10 раз (рис. 1б).

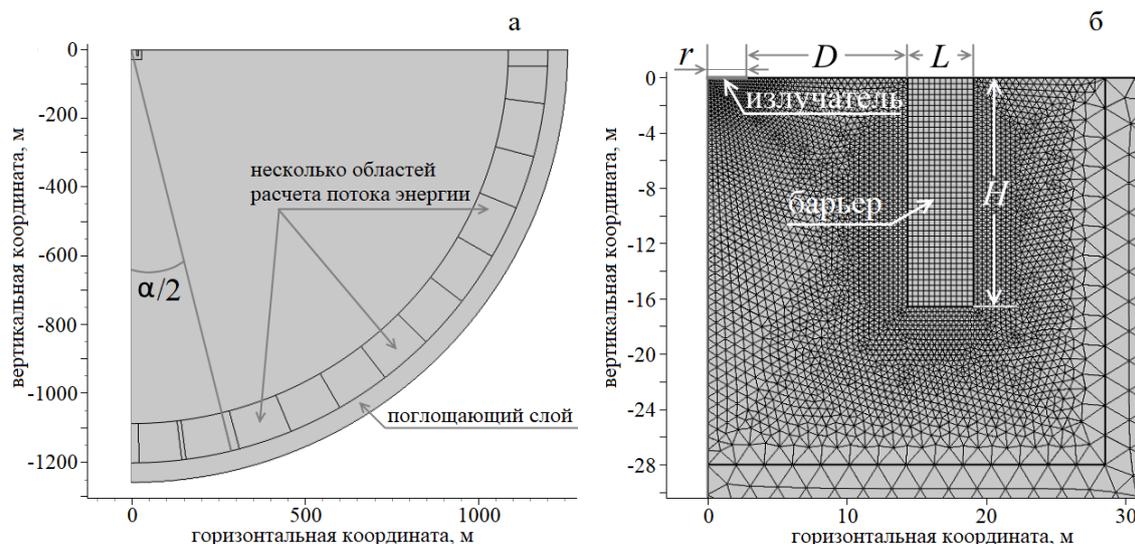


Рис. 1. Геометрия модели: общий вид (а) и область вблизи источника (б).

Таблица 1. Параметры барьера (бетон) и вмещающей среды (почва).

	плотность, кг/м ³	скорость продольной волны, м/с	скорость поперечной волны, м/с
вмещающая среда	1600	400	180
барьер	2400	4000	2450

Линейные размеры в исследуемой модели нормированы на длину волны Рэлея λ_R с частотой 7 Гц, которая для используемых параметров (таблица 1) составляет 23.6 м.

Параметрическое решение данной задачи проводилось для различных линейных размеров D , L и H в пространстве частот. Для наиболее распространенной частоты вынуждающей силы сейсмических вибраторов в 7 Гц [1] были рассчитаны показатели эффективности фокусировки объемных волн и экранирования поверхностных.

Результаты

Пример результата для $D = 1.3\lambda_R$ и $\alpha = 27.6^\circ$, приведенный на рис. 2, показывает, что рассмотренный барьер может повысить эффективность излучения сейсмического вибратора на два порядка. Примечательно, что даже относительно тонкие (толщиной всего 2% от длины поверхностной волны) могут быть эффективными, и если ограничиться барьером с технически реализуемыми параметрами, то можно ожидать усиление излучения в 20 раз при ослаблении поверхностных волн в 3 раза (по энергии).

Подобные результаты свидетельствуют не только о перспективном использовании барьеров для задач геофизического зондирования, а также для повышения эффективности вибросейсмического воздействия на нефтяные залежи с целью увеличения добычи.

Подтверждены прежние результаты, что наиболее эффективно экранируют поверхностными волнами барьеры с характерным размером около одной длины волны Рэлея [13]. Новым же является то, что использование горизонтальных барьеров может быть более выгодным, чем вертикальных, во-первых, из-за того, что их изготовление проще технологически, а, во-вторых, что для достижения того же уровня защиты в ряде случаев, требуется меньший по размеру барьер, тем не менее необходимо учитывать, что при одинаковом сечении LH горизонтальный барьер имеет больший объем.

Полученные результаты демонстрируют существенно нелинейный характер зависимости эффективности барьера от его параметров, поэтому необходимо проведение крупного параметрического исследования с варьированием как геометрических, так и физических параметров модели, в том числе и использование композитных материалов.

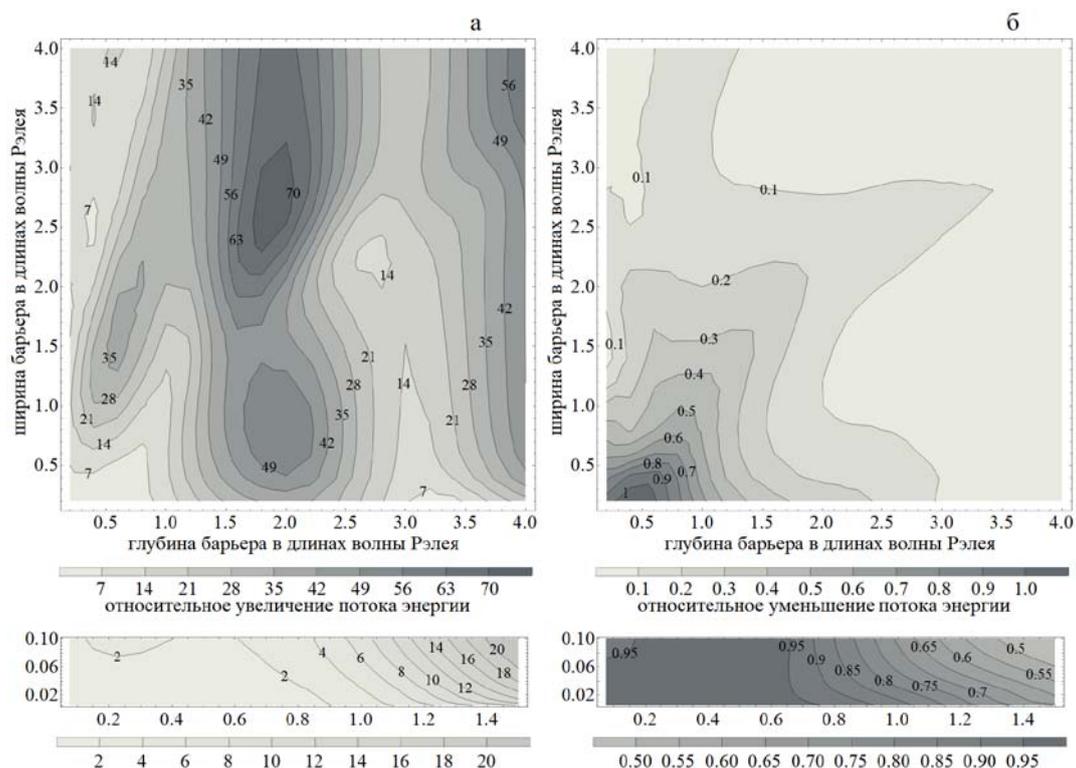


Рис. 2. Зависимость относительного изменения потока энергии от геометрических размеров сейсмического барьера при $D = 1.3\lambda R$: (а) – для объемных волн, распространяющихся в шаровом секторе с вертикальной осью и центральным углом 27.6° (б) для поверхностной волны Рэлея. В нижней части показаны технологически интересные области в увеличенном масштабе. Данные нормированы на соответствующие величины для случая без использования барьера.

Исследование выполнено при поддержке РФФ, проект № 17–77–10162.

Список литературы

1. Алексеев А.С., Геца Н.И., Еманов А.Ф. и др. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками. ИВМиМГ СО РАН, 2004. 387 с.
2. Дудченко А.В. Анализ взаимодействия поверхностных сейсмических волн с вертикальными барьерами и свайными полями // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2017. № 5. С. 47–51.
3. Жостков Р.А. Совершенствование некоторых методов сейморазведки с помощью данных о рассеянии волн Рэлея на рельефе // Изв. РАН Сер. физическая. 2018. Т. 82. № 11. С. 1555–1559.
4. Ляпин А.А., Селезнёв Н.М., Шуляева О.В. Динамическая контактная задача для полуплоскости, жестко сцепленной с пакетом из двух полуслоев // Экологический вестник науч. Центров ЧЭС. 2008. №2. С. 45-50.
5. Орехов В.В., Негахдар Х. Некоторые аспекты изучения применения траншейных барьеров для уменьшения энергии поверхностных волн в грунте // Вестник МГСУ. 2013. № 3. С. 98–104.
6. Сапарлиев Х.М. Территориальные методы сейсмической защиты // Наука и современность. Сб. материалов ЛП Международной научно-практической конференции. 2017. С. 118–127.
7. Собисевич А.Л., Жостков Р.А. Об учете влияния рельефа в методе микросейсмического зондирования // ДАН. 2018. Т. 4. № 481. С. 1–4.
8. Coulier P., Cuéllar V., Degrande G., Lombaert G. Experimental and numerical evaluation of the effectiveness of a stiff wave barrier in the soil // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2015. V. 77. P. 238–253.
9. Dziewonski A.M., Anderson D.L. Preliminary reference Earth mode // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1981. V. 25 № 4. P. 297–356.
10. Gao G., Li Z.Y., Qiu Ch. Yue Z. Three-dimensional analysis of rows of piles as passive barriers for ground vibration isolation // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2006. V. 26. P. 1015-1027.
11. Hildebrand R. Asymptotic analysis of hard wave barriers in soil // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2003. V. 23. P. 143-158.
12. Klein R., Antes H., Le Houédec D. Efficient 3D modelling of vibration isolation by open trenches // Comput. Struct. 1997. V. 64 P. 809–817.
13. Kuznetsov S.V. Seismic Waves and Seismic Barriers // Acoustical Physics. 2011. V. 57, № 3. P. 420-426.
14. Shen J., Maradudin A.A. Multiple scattering of waves from random rough surfaces // Phys. Rev. 1980. B 22. P. 4234.