УДК 550.34.01699.842.534:621

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОЩНЫХ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ

Член-корреспондент РАН А. Л. Собисевич, Р. А. Жостков*

Поступило 08.05.2019 г.

Выполнено численное параметрическое исследование особенностей рассеяния рэлеевских волн, возникающих при работе вибросейсмического источника, на близповерхностных неоднородностях (сейсмических барьерах). Для изыскания новых подходов к проблеме глобального зондирования Земли с мощными вибросейсмическими источниками проанализированы условия повышения эффективности излучения объёмных волн, обусловленные конструктивными особенностями сейсмических барьеров.

Ключевые слова: активная сейсмология, сейсмические барьеры, сейсмические вибраторы, численное моделирование, глубинное зондирование Земли.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652489180-83>

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 объёмные волны. Заманчивой идеей выглядит перераспределение излучаемой сейсмическим вибратором энергии от поверхностных волн к объёмным.

Это возможно реализовать с помощью сейсмических барьеров, под которыми обычно понимают либо открытые, либо заполненные материалом траншеи прямоугольной формы [2]. Реже рассматривают иную форму траншей или просто неровную границу, на которой происходит рассеяние поверхностных акустических волн (ПАВ) [3, 4]. Одним из частных случаев заполненных траншей можно считать свайные поля [5, 6], которые проще в изготовлении и имеют схожие характеристики. Помимо траншей эффективное экранирование ПАВ возможно с применением естественных склонов [7] или насыпей [8, 9].

Многие работы, в которых приведены результаты теоретических расчётов [10], физических экспери-

ментов [3, 11] и численного моделирования [3, 5, 6, 11–13], сводятся к исследованию рассеяния ПАВ от излучателя типа вертикального штампа, расположенного вне сейсмического барьера. Обобщённую 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 её излучение вне этой зоны сейсмическим вибратором, расположенным внутри неё. Поэтому цель нашего исследования заключается в поиске условий, при которых максимизируется излучение объёмных 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.

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 го-

Институт физики Земли

Российской Академии наук, Москва

*E-mail: shageraxcom@yandex.ru

ризонтальной координате) и решать трёхмерную задачу в плоской постановке (рис. 1). Области, в которых рассчитывается усреднённый 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 [14], 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 её границы. Дневная поверхность — свободная, за исключением области приложения вертикальной гармонической силы, соответствующей сейсмическому вибратору. Размер конечных элементов обеспечивает ошибку не более 0,5%, причём не превышает $1/8$ длины волны Рэлея, а в области вблизи вибратора и барьера меньше их характерных размеров в 10 раз (рис. 1б).

Линейные размеры в исследуемой модели нормированы на длину волны Рэлея λ_R с частотой 7 Гц, которая для используемых параметров (табл. 1) составляет 23,6 м.

Параметрическое решение данной задачи проводилось для различных линейных размеров D , L и H в пространстве частот. Для наиболее распространённой частоты вынуждающей силы сейсмических вибраторов в 7 Гц [1] были рассчитаны показа-

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

тели эффективности фокусировки объёмных волн и экранирования поверхностных.

Пример результата для $D = 1,3\lambda_R$ и $\alpha = 27,6^\circ$, приведённый 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 поверхностные волны барьеры с характерным размером около одной длины волны Рэлея [13]. Новым же является то, что использование горизонтальных барьеров может быть более выгодным, чем вертикальных, из-за того, что,

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

Рис. 2. Зависимость относительного изменения потока энергии от геометрических размеров сейсмического барьера при $D = 1,3\lambda_R$: а — для объёмных волн, распространяющихся в шаровом секторе с вертикальной осью и центральным углом $27,6^\circ$; 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.

во-первых, их изготовление проще технологически, а во-вторых, 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 объём.

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.

Источник финансирования. Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 17–77–10162).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев А.С., Геза Н.И., Еманов А.Ф., Кашун В.Н., Ковалевский В.В., Маништейн А.К., Михайленко Б.Г.,

Селезнев В.С., Сердюков С.В., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Соловьев В.М., Хайретдинов М.С., Чичинин И.С., Юшин В.И. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками. ИВМиМГ СО РАН, 2004. 387 с.

2. Сапарлиев Х.М. Территориальные методы сейсмической защиты // Наука и современность. Сб. мат. ЛП Межд. науч.-практич. конф. 2017. С. 118–127.
3. Klein R., Antes H., Le Houédec D. Efficient 3D Modeling of Vibration Isolation by Open Trenches // Comput. Struct. 1997. V. 64. P. 809–817.
4. Shen J., Maradudin A.A. Multiple Scattering of Waves from Random Rough Surfaces // Phys. Rev. 1980. B22. 4234.
5. Дудченко А.В. Анализ взаимодействия поверхностных сейсмических волн с вертикальными барьерами и свайными полями // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2017. № 5. С. 47–51.
6. 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.
7. *Ляпин А.А., Селезнев Н.М., Шилыева О.В.* Динамическая контактная задача для полуплоскости, жестко сцепленной с пакетом из двух полуслоев // Эколог. вестн. науч. центров ЧЭС. 2008. № 2. С. 45–50.
 8. *Собисевич А.Л., Жостков Р.А.* Об учете влияния рельефа в методе микросейсмического зондирования // ДАН. 2018. Т. 4. № 481. С. 438–441.
 9. *Жостков Р.А.* Совершенствование некоторых методов сейсморазведки с помощью данных о рассеянии волн Рэлея на рельефе // Изв. РАН Сер. физ. 2018. Т. 82. № 11. С. 1555–1559.
 10. *Hildebrand R.* Asymptotic Analysis of Hard Wave Barriers in Soil // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2003. V. 23. P. 143–158.
 11. *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.
 12. *Орехов В.В., Негяхдар Х.* Некоторые аспекты изучения применения траншейных барьеров для уменьшения энергии поверхностных волн в грунте // Вестник МГСУ. 2013. № 3. С. 98–104.
 13. *Kuznetsov S.V.* Seismic Waves and Seismic Barriers // Acoustical Physics. 2011. V. 57. № 3. P. 420–426.
 14. *Dziewonski A.M., Anderson D.L.* Preliminary Reference Earth Mode // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1981. V. 25. № 4. P. 297–356.

TO THE POSSIBILITY OF INCREASING THE EFFICIENCY OF POWERFUL VIBROSEISMIC SOURCES

Corresponding Member of the RAS **A. L. Sobisevich, R. A. Zhostkov**

O. Yu. Shmidt Institute of the Earth Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Received May 8, 2019

A numerical parametric study of the scattering features of arising from the operation of a vibroseis source Rayleigh waves on near-surface inhomogeneities (seismic barriers) has been performed. In order to find new approaches to the problem of global sensing of the Earth with powerful vibro-seismic sources, the conditions for increasing the efficiency of the emission of volumetric waves due to the design features of seismic barriers were analyzed.

Keywords: active seismology, seismic barriers, seismic vibrators, numerical simulation, deep sounding of the Earth.