

А. В. Азаров^{1}, А. С. Сердюков¹, В. В. Сказка¹*

Исследование возможности использования туннельных волн для обнаружения низкоскоростных включений вблизи горных выработок

¹ Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация
*e-mail: antonazv@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрена задача обнаружения низкоскоростных включений, расположенных вблизи горных выработок, на основе использования туннельных волн. С этой целью построена трехмерная математическая модель и проведены численные исследования. В рамках данной работы, моделирование распространения сейсмических волн выполнялось на основе упругой модели, уравнения которой решались с помощью метода спектральных элементов. На основе численных экспериментов было показано, что на результирующее волновое поле от источника расположенного на поверхности туннеля оказывает сильное влияние частота сигнала в источнике, расстояние между туннелем и включением, а также скоростные параметры включения. В частности показано, что при близком расположении низкоскоростного включения к туннелю, на сейсмограммах явно наблюдаются рассеянные волны, которые распространяются в прямом и обратном направлении. Дополнительно был рассмотрен пример, когда в качестве включения выступает полость. Показаны особенности распространения волнового поля в данном случае.

Ключевые слова: туннельные волны, поверхностные волны, сейсмический мониторинг, горные выработки, математическое моделирование сейсмических волн

A. V. Azarov^{1}, A. S. Serdyukov¹, V. V. Skazka¹*

Study of the possibility of using tunnel waves to detect low-velocity inclusions near mine workings

¹ Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk,
Russian Federation
* e-mail: antonazv@mail.ru

Abstract. The paper considers the problem of detecting low-velocity inclusions located near mine workings based on the use of tunnel waves. A three-dimensional mathematical model was created and numerical studies were carried out. Within the framework of this article, the simulation of seismic wave propagation was carried out on the basis of an elastic model, the equations of which were solved using the method of spectral elements. Based on numerical experiments, it was shown that the resulting wave field from a source located on the tunnel surface is strongly influenced by the signal frequency in the source, the distance between the tunnel and the inclusion, as well as the velocity parameters of the inclusion. In particular, it is shown that when a low-velocity inclusion is located close to the tunnel, scattered waves are clearly observed on the seismograms, which propagate in the forward and backward directions. Additionally, an example was considered when a cavity acts as an inclusion. The features of wave field propagation in this case are shown.

Keywords: tunnel waves, surface waves, seismic monitoring, mine workings, mathematical modeling of seismic waves

Введение

Одной из важнейших задач возникающих при подземной разработке полезных ископаемых является мониторинг состояния подземных сооружений. Часто для решения данной проблемы применяются геофизические методы, основанные на регистрации и обработки сейсмического/акустического излучения. При этом во многих работах для этих целей используются объемные волны [1-5]. Поверхностные волны (туннельные волны), которые распространяются вдоль поверхностей выработок, как правило относят к помехам, хотя они переносят до 75% общей энергии волнового пакета [6]. К преимуществам сейсмических наблюдений с использованием поверхностных волн относятся высокая амплитуда сигнала и ее малое затухание в процессе распространения, а также возможность установки сейсмоприемников без бурения глубоких шпуров.

В представленной работе изучается возможность использования туннельных волн для обнаружения опасных зон, возникающих вблизи горных выработок. Перспективность данного направления показана в ряде исследований. Например, в работе [7] с использованием поверхностных волн выполнялся мониторинг состояния грунтов вокруг участка тоннеля петербургского метрополитена. В [8] на основе многоканальной обработки волн Релея решалась задача контроля толщины железобетона в оболочке тоннеля. Также есть работы, где туннельные волны, а в туннельные волны использовались для мониторинга состояния горной породы вблизи выработки [9], а в работах [10,11] для поиска разломов перед туннелем.

Данная работа посвящена изучению возможности использования туннельных волн для обнаружения низкоскоростных включений вблизи горных выработок. С этой целью была разработана математическая модель, на основе которой проведены численные исследования.

Постановка задачи и параметры модели

В данной работе моделирование распространения волнового поля от сейсмического источника будем проводить на основе решения упругой модели. В качестве численного метода будем использовать метод спектральных элементов.

Рассмотрим трехмерную область размерами 50x80x50 метров, которая содержит полость прямоугольной формы и низкоскоростное включение. На рисунке 1 в плоскостях xz и yz изображены основные параметры модели. Низкоскоростное включение имеет размеры 4x6x1 метров ($s=4$, $l=6$, $h=1$) и находится на расстоянии d от полости. Полость имеет размеры 4x80x4 метра, т.е. $a=4$, $b=4$ и проходит через всю расчетную область в направлении y .

Моделирование распространения сейсмических волн в описанной модели будем проводить на основе решения динамической системы упругости. В качестве численного метода будем использовать метод спектральных элементов, реализованный в пакете SpecFEM3d[12, 13].

В качестве типа источника выберем направленную сила (на рис. 1б обозначена буквой F), которая действует перпендикулярно поверхности полости. Ис-

точник располагался в 25 метров от центра области. Форма сигнала в источнике – импульс Риккера с центральной частотой f . На внешних границах расчетной области зададим условие поглощения для устранения отраженных волн. Границы полости являлись свободными. Упругие параметры вмещающей среды выбирались следующими: скорости продольных волн 3000 м/с, поперечных 2000 м/с, плотность 2500 кг/м³. Параметры низкоскоростного включения изменялись при расчетах. Приемники располагались вдоль полости (изображены на рис. 1 в виде треугольников), на той же стенке полости, где источник.

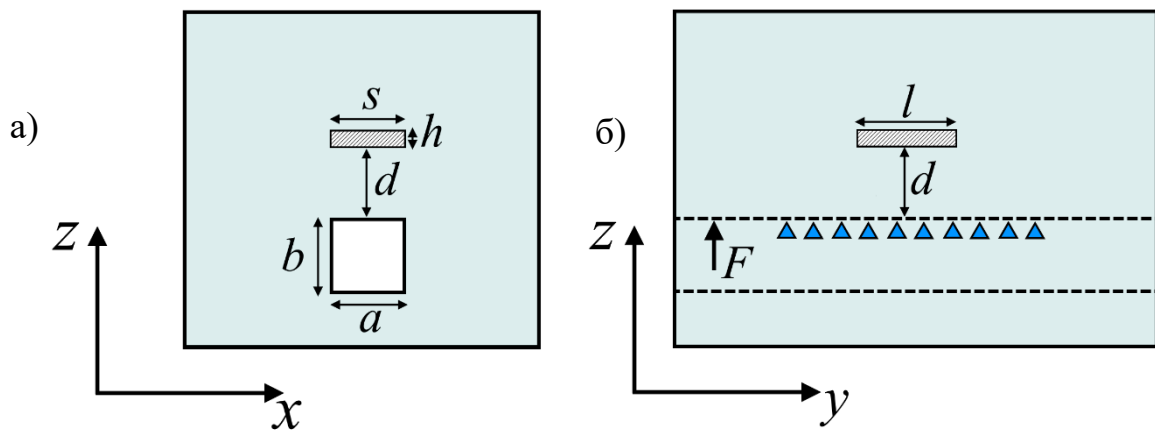


Рис. 1. Схематичное изображение расчетной модели в плоскости xz (а) и в плоскости yz (б) вместе с полостью, низкоскоростным включением, положением источника и приемников.

Результаты численных экспериментов

На рисунке 1 изображены сейсмограммы, полученные для источника с центральной частотой 75, 150 и 300 Гц соответственно. Низкоскоростное включение располагалось на расстоянии 2 метра от полости ($d=2$) и имело следующие параметры: скорости продольных волн 1000 м/с, поперечных 650 м/с, плотность 2000 кг/м³. При частотах 75 и 150 Гц особенностей в сейсмограммах не возникает (рис. 2а и 2б). Это связано в первую очередь с тем, что длина волны при таких частотах получается намного больше размеров включения. При частоте 300 Гц наблюдаются особенности распространения волнового поля. Как видно на сейсмограмме присутствуют рассеянные поверхностные волны, которые распространяются в прямом и обратном направлении. Центр неоднородности располагался над приемником с номером 25. Как было показано в работе [Курленя, 2022], при установленных параметрах полости и частоте около 300 Гц будут образовываться туннельные волны, которые в данном случае взаимодействуют с включением.

В следующем примере изменять расстояние d между полостью и низкоскоростным включением от полости. На рисунке 3 приведены сейсмограммы, когда d равно 1, 3 и 6 метров. Отметим, что при заданных параметрах модели, длина поверхностной волны составляла около 6.3 метра (построение дисперсионной

кривой показало, что фазовая скорость волны на частоте 300 Гц составляла 1890 м/с). Как видно, при удалении включения на расстояние длины волны, особенностей на сейсмограмме практически не наблюдаются (рис. 3в).

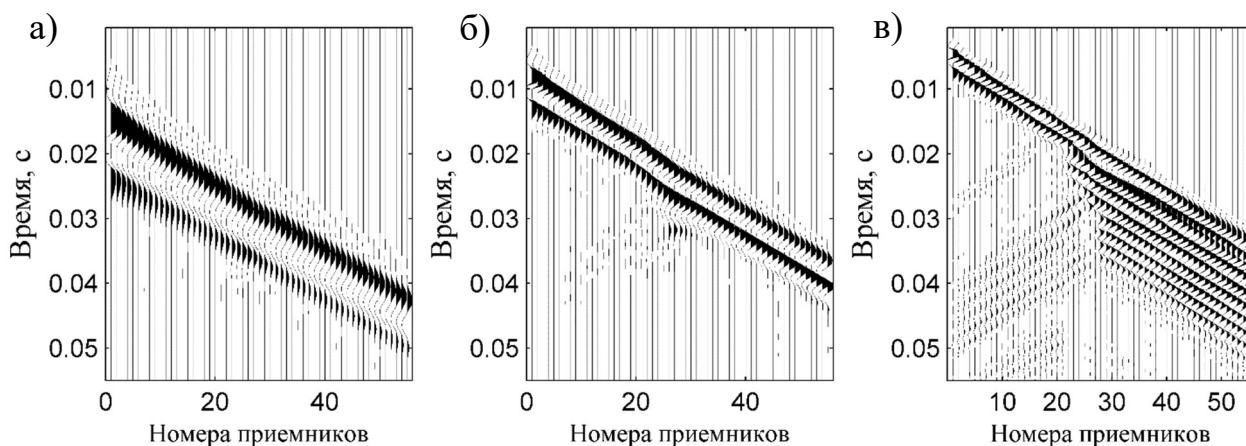


Рисунок 2. Сейсмограммы, полученные для низкоскоростного включения, расположенного на расстоянии 2 метров от полости при различной частоте источника: а) частота в источнике 75 Гц, б) 150 Гц, в) 300 Гц.

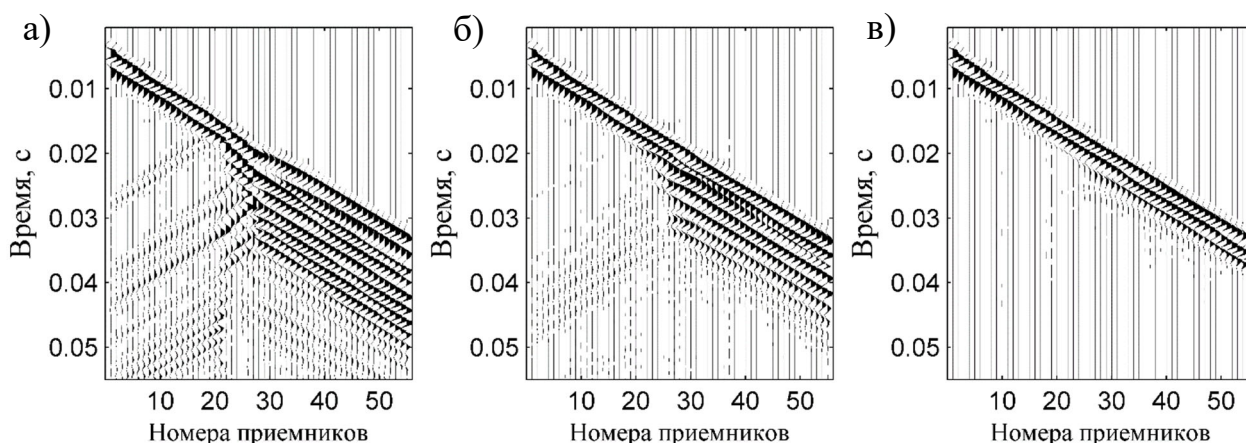


Рисунок 3. Сейсмограммы, полученные для источника 300 Гц при различном расстоянии между низкоскоростным включением и полостью: а) 1 метр, б) 3 метра, в) 6 метров.

Далее рассмотрим случай, когда включение имеет различные параметры и удалено от полости на расстояние 2 метра. На рисунке 4а включение имеет параметры как в предыдущих примерах. На рисунке 4б скоростные характеристики были увеличены: скорости продольных волн 2000 м/с, поперечных 1300 м/с, плотность 2000 кг/м³. На рисунке 4в скоростные характеристики включения были выше, чем во вмещающей среде: скорости продольных волн 5000 м/с, поперечных 3500 м/с, плотность 2500 кг/м³. Как видно, с увеличением скоростных характеристик включения, явные особенности на сейсмограммах становятся ме-

нее заметными, хотя слабые по амплитуде рассеянные волны, распространяющиеся в обратном направлении, наблюдаются.

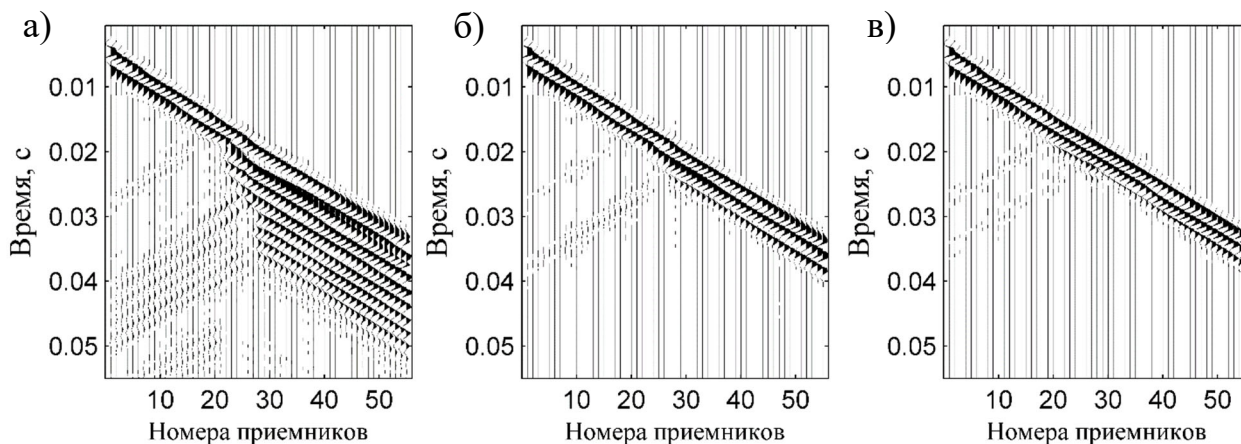


Рисунок 4. Сейсмограммы, полученные для источника 300 Гц, расстояния между низкоскоростным включением и полостью 2 метра и разных упругих параметрах включения: а) $V_p=1000$ м/с, $V_s=650$ м/с, $\rho=2000$ кг/м³; б) $V_p=2000$ м/с, $V_s=1300$ м/с, $\rho=2000$ кг/м³, в) $V_p=5000$ м/с, $V_s=3500$ м/с, $\rho=2500$ кг/м³.

В последнем примере рассмотрим, когда в качестве включения выступает небольшая полость. Также как и для основной полости, на её поверхности задавалось условие свободной поверхности. На рисунке изображены сейсмограммы для включения (полости) удаленной от основной полости на расстояние 1 и 3 и 6 метров. Здесь картина несколько отличается от случая низкоскоростного включения. В данном случае наблюдаются в основном только рассеянные волны, распространяющиеся в обратном направлении. Причем их амплитуда по сравнению в основной поверхностной волной достаточно быстро падает с увеличением расстояния d .

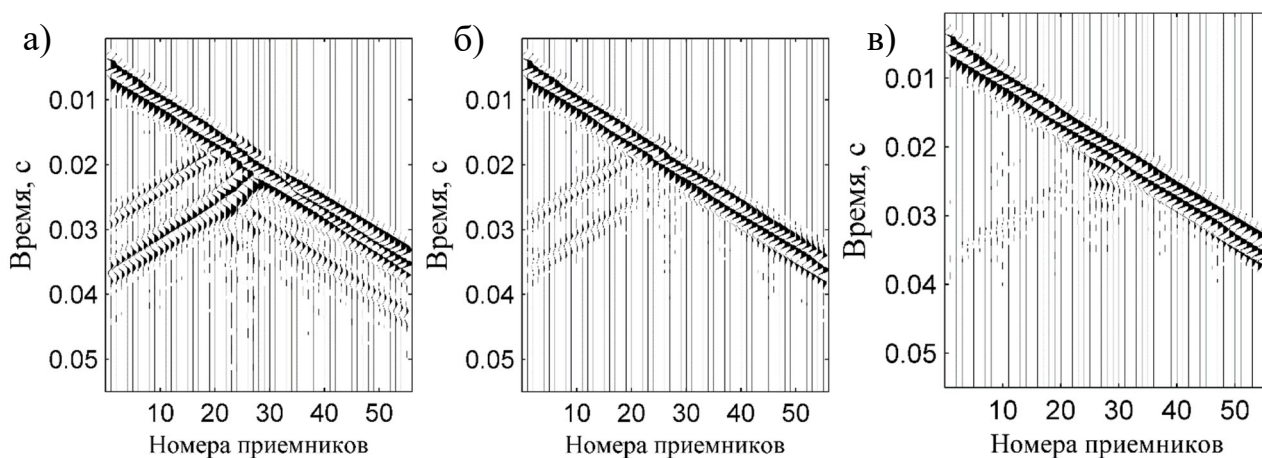


Рисунок 5. Сейсмограммы, полученные для источника 300 Гц при различном расстоянии между полым включением и основной полостью: а) 1 метр, б) 3 метра, в) 6 метров.

Выводы

В работе была рассмотрена задача обнаружения низкоскоростных включений на основе использования туннельных волн, которые распространяются вдоль поверхностей горных выработок. Построена трехмерная математическая модель и проведены численные исследования. Показано, что особенности в распространении туннельных волн достаточно сильно проявляются при расстоянии между полостью и включением, не превышающим половины длины волны. В примерах из работы это расстояние составляло около трех метров. На расстояние одной длины волны (6 метров), особенности в распространении волнового поля практически не наблюдаются. Показано, что с увеличением скоростных параметров включений, результат взаимодействия туннельных волн и включений на сейсмограммах становится менее выражен. Продемонстрировано, что если рассмотреть в качестве включения полость, то возникают достаточно сильные рассеянные волны, распространяющиеся в обратном направлении.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках Госзадания, номер государственной регистрации 121052500138-4 (FWNZ-2021-0001).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гладырь А. В., Курсакин Г. А., Рассказов М. И., Константинов А. В. Разработка метода выделения опасных участков в массиве горных пород по данным сейсмоакустических наблюдений // ГИАБ. – 2019. – №. 8. – С. 21-32.
2. Jiao Y. Y. et al. Prediction of tunneling hazardous geological zones using the active seismic approach // Near Surface Geophysics. – 2015. – V. 13. – №. 4. – P. 333-342.
3. Xu X. et al. A case study of seismic forward prospecting based on the tunnel seismic while drilling and active seismic methods // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2021. – V. 80. – №. 5. – P. 3553-3567.
4. Курленя М.В., Сердюков А.С., Дучков А.А., Патутин А.В., Яскевич С.В. Технология микросейсмического и геомеханического мониторинга геодинамических процессов в массиве горных пород // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2015. Т. 2. № 2. С. 257-260.
5. Соколов С.В., Колмакова А.А. Оценка влияния направленного гидроразрыва на изменение объема порово-трещинного пространства кровли выемочного столба массива на основе применения сейсмического просвечивания // В сборнике: Россия молодая. Сборник материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Редакция: К.С. Костиков (отв. ред.) [и др.]. Кемерово, 2021. С. 10903.1-10903.6.
6. Tzavaras J. et al. Three-dimensional seismic imaging of tunnels // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2012. – V. 49. – P. 12-20.
7. Дорохин К.А. Обоснование и разработка метода оценки геодинамического состояния массива горных пород на основе дисперсионных параметров сейсмических волн. – дис. ... канд. техн. наук: 25.00.20. - Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва, 2017
8. Chen K., Zhang Z., Zhou Y. Application of surface wave in reinforced concrete invert detection // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2021. – Т. 660. – №. 1. – С. 012069.
9. Czarny R. et al. Dispersive seismic waves in a coal seam around the roadway in the presence of excavation damaged zone // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2021. – V. 148. – P. 104937.

10. Bohlen T., Lorang U., Rabbel W., Muller G., Giese R., Luth S. and Jetschny S. 2007. Rayleigh-to-shear wave conversion at the tunnel face - from 3D-FD modeling to ahead-of-drill exploration. *Geo-physics* 72, T67–T79.

11. Jetschny S., Bohlen T., De Nil D. On the propagation characteristics of tunnel surface-waves for seismic prediction // *Geophysical Prospecting*. – 2010. – Т. 58. – №. 2. – С. 245-256.

12. Tromp J., Komatitsch D., Liu Q. Spectral-element and adjoint methods in seismology // *Communications in Computational Physics*. – 2008. – Т. 3. – №. 1. – С. 1-32.

13. Peter D. et al. Forward and adjoint simulations of seismic wave propagation on fully unstructured hexahedral meshes // *Geophysical Journal International*. – 2011. – Т. 186. – №. 2. – С. 721-739.

14. Курленя М.В., Сказка В.В., Азаров А.В., Сердюков А.С., Патутин А.В. Использование поверхностных волн для мониторинга состояния пород вокруг горных выработок и сооружений // *ФТПРПИ*. – 2022. – № 6. – С. 3–14.

© А. В. Азаров, А. С. Сердюков, В. В. Сказка, 2023