

А. С. Сердюков¹✉, А. В. Азаров², А. В. Яблоков¹, М. Н. Корми³, К. Б. Акулов³

Применение многоканального анализа поверхностных сейсмических волн для исследования железнодорожного тоннеля

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

³ООО НИЦ «Бамтоннель», г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: aleksanderserdyukov@ya.ru

Аннотация. За последнее десятилетие широкое распространение получил метод малоглубинной сейсморазведки на основе наблюдения и обработки данных поверхностных сейсмических волн, известный под аббревиатурой MASW (multichannel analysis of surface waves). MASW применяется, как правило, для исследования строения и свойств грунтов при решении инженерных задач, связанных с проектированием и эксплуатацией различных сооружений. В настоящей работе мы применяем MASW для решения новой задачи – для исследования свойств горных пород в окрестности железнодорожного тоннеля. Проведенные эксперименты показывают, что удастся устойчиво выделить дисперсионные кривые поверхностных волн, распространяющихся вдоль тоннеля. В результате анализа полученных результатов удастся выделить зоны пониженных скоростей, связанных, по-видимому, с разуплотнением пород, а также участки, на которых не наблюдается волны, распространяющейся за бетонной обсадкой тоннеля, вследствие плохого контакта с прилегающими породами (возможно из-за наличия пустот).

Ключевые слова: поверхностные сейсмических волны, многоканальный анализ, железнодорожные тоннели

A. S. Serdyukov¹✉, A. V. Azarov², A. V. Yablokov¹, M. N. Kormin³, K. B. Akulov³

Application of multi-channel analysis of surface seismic waves for railway tunnel research

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation

²Chinakal Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

³LLC Research Center "Bamtonnel" Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: aleksanderserdyukov@ya.ru

Abstract. Over the past decade, the method of shallow seismic exploration based on the observation and processing of surface seismic waves data, known by the abbreviation MASW (multichannel analysis of surface waves), has become widespread. MASW is used, as a rule, to study the structure and properties of soils in solving engineering problems related to the design and operation of various structures. In this paper, we use MASW to solve a new problem – to study the properties of rocks in the vicinity of a railway tunnel. The experiments show that it is possible to consistently identify the dispersion curves of surface waves propagating along the tunnel. As a result of the analysis of the obtained results, it is possible to identify areas of reduced velocities, apparently associated with de-

compression of rocks, as well as areas where there is no wave spreading beyond the concrete lining of the tunnel due to poor contact with adjacent rocks (possibly due to the presence of voids).

Keywords: seismic surface waves, finite difference method, Releigh wave ellipticity

Введение

Геофизические исследования горного массива в окрестности подземных сооружений имеют большое прикладное значение. Важной задачей при эксплуатации тоннелей, выработок и других подземных сооружений является обеспечение безопасности. Проектирование подземных объектов основывается на результатах петрофизического и геофизического исследования скважин, пробуренных в пределах площади строительства. Пространственного разрешения таких данных может быть недостаточно для полного анализа геологической среды с целью выявления определения потенциально аварийных областей массива горных пород: с трещиноватостью и повышенной обводненностью и т.п. Так, одной из проблем является определение точного расстояния тоннелепроходческого комплекса до опасных для проходки участков. Диагностика состояния обсадки туннелей и горного массива за этой обсадкой целесообразна, например, при планировании гидроизоляционных и других ремонтных работ. За последнее десятилетие широкое распространение получил метод малоглубиной сейсморазведки на основе наблюдения и обработки данных поверхностных сейсмических волн, известный под аббревиатурой MASW (multichannel analysis of surface waves) [1]. MASW применяется, как правило, для исследования строения и свойств грунтов при решении инженерных задач, связанных с проектированием и эксплуатацией различных строений. В настоящей работе мы применяем MASW для решения новой задачи – для исследования свойств горных пород в окрестности железнодорожного тоннеля. Проведенные эксперименты показывают, что удастся устойчиво выделить дисперсионные кривые поверхностных волн, распространяющихся вдоль тоннеля. В результате анализа полученных результатов удастся выделить зоны пониженных скоростей, связанных, по-видимому, с разуплотнением пород, а также участки, на которых не наблюдается волны, распространяющейся за бетонной обсадкой тоннеля, вследствие плохого контакта с прилегающими породами (возможно из-за наличия пустот).

Методы и материалы

Полевые работы по наблюдению сейсмических волн проводились в тоннеле 105 – 106 км участка Артыша-Томусинская Западно-Сибирской железной дороги (Кемеровская область, Новокузнецкий район), построенном в 1967 г. Тоннель залегает в переслаивающихся слоях песчаников, алевролитов, аргиллитов и углей. Ввиду проблем с обводнением в настоящее время объект не эксплуатируется и находится на консервации. На расстоянии 30 м от старого тоннеля расположен новый действующий тоннель.

Общая протяженность тоннеля 1160 м. Сейсморазведочные работы производились со стороны западного портала. В начале, первые 250 м, профиль наблюдений проходил по участку тоннеля круглого сечения с чугунной тубинговой

обделкой, часто использовавшейся ранее при строительстве метрополитена (рис. 1а). Толщина тубинга с учетом рёбер жесткости около 0,3 м, основание залито бетоном, высота тоннеля 5,5 м. Далее, ввиду того что тоннель уходит глубже в массив более плотных пород, профиль становится подковообразным (рис.1б). Используется бетонная обделка толщиной около 0,5 м; высота тоннеля здесь 7,5 м. Длина профиля наблюдений на участке с бетонной обсадкой также 250м.

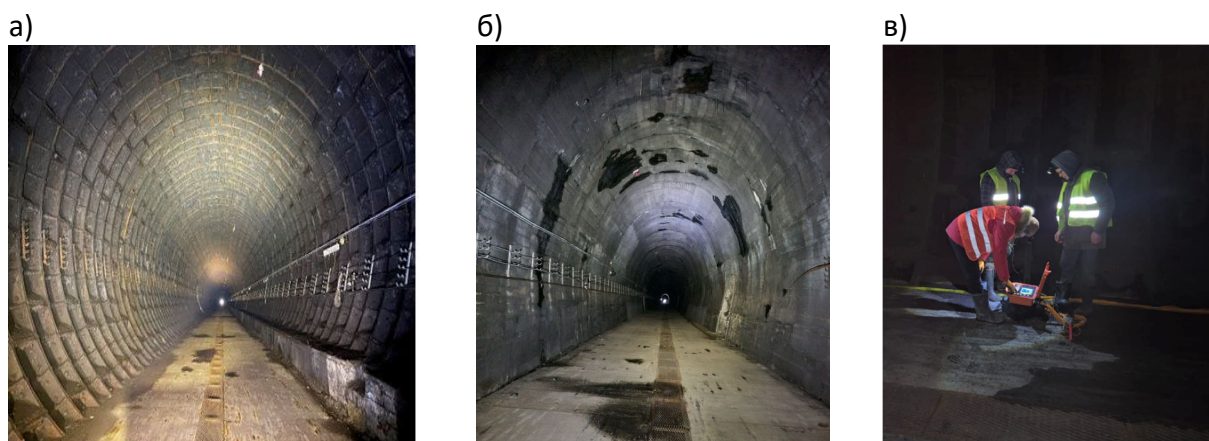


Рис. 1. Зброшнны железнодорожный тоннель: а) участок с чугуным тубингом; б) участок с бетонной обделкой; в) процесс настройки сеймостанцией для регистрации данных

Обработка полученных данных осуществлялась методом многоканального анализа поверхностных волн (MASW). В качестве источников колебаний использовался вибрационный источник на основе двух низкочастотных акустических трансдюсеров ButtKicker LFE [2] генерировался свип сигнал 5-500Гц. Далее получалась и обрабатывалась коррелограмма. Для каждого набора данных общего ПВ с помощью спектрального f-k анализа были получены дисперсионные кривые скоростей волн, распространяющихся вдоль тоннеля. Применялся метод наклонного f-k преобразования – *slant f-k transform* (SFK) [3], демонстрирующий хорошие результаты при обработке многоканальных данных поверхностных сейсмических волн

Результаты

На рис. 2 представлены спектры, получившиеся в результате применения SFK преобразования. Для всех сейсмограмм первой половины профиля с чугунным тубингом в широком диапазоне частот прослеживается дисперсионная кривая, соответствующая волне, распространяющейся в массиве пород вдоль тоннеля. Спектральное дисперсионное изображение для одного из ПВ рассматриваемого участка профиля представлено на рис. 2а. В случае бетонной обсадки, для большинства ПВ, в нижней части спектра (приблизительно до 100 Гц) наблюдается дисперсионная кривая, схожая с наблюдаемой в случае чугунного тубинга – см. область, отмеченную на рис. 2б. Мы считаем, что, именно, эта волна рас-

пространяется за обсадкой и позволяет судить о свойствах вмещающегося горного массива. Для двух ПВ (на расстоянии 450 и 480 м вдоль профиля) волны не наблюдается (рис. 2в), что может служить признаком отсутствия плотного контакта бетонной обсадкой с горным массивом в следствие наличия пустот или зон разуплотнения.

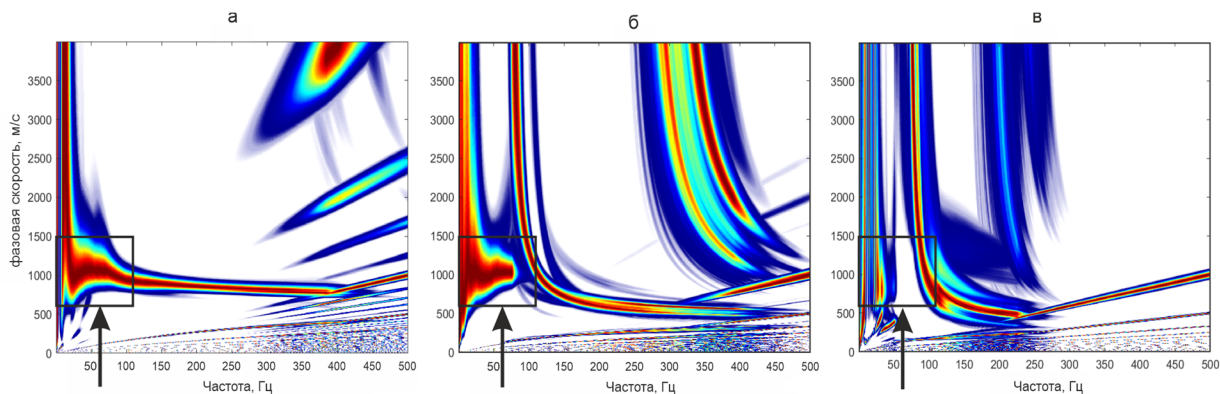


Рис. 2. Спектральные дисперсионные изображения, полученные в результате обработки данных. ПВ находится на участке профиля с чугунным тубингом – наблюдается дисперсионная кривая (а); ПВ части профиля с бетонной обсадкой (б), на части изображения, отмеченной стрелкой, наблюдается волна за обсадкой; волны за бетонной обсадкой не наблюдается (в)

В целях дальнейшей интерпретации результатов на спектрах были пропикированы дисперсионные кривые, характеризующие зависимость фазовой скорости наблюдаемой поверхностной волны от частоты. На основе полученных кривых был построен скоростной разрез поверхностных волн, приведенный на рис. 3. Вдоль всего профиля наблюдений при малых длинах волн до 8-10м. наблюдаются меньшие значения скорости, что говорит о разуплотнении массива пород вблизи тоннеля. Значения скоростей в начале профиля, первые 70 м, так же низкие и для больших длин волн. Так проявляется зона выветривания и переход от скальных пород к грунтам близи портала. Так же можно отметить, что во второй половине профиля, там, где бетонная обсадка, наблюдаются большие значения скорости по сравнению с первой половиной тоннеля с чугунным тубингом. В нескольких местах профиля, отмеченных на рис. 3А, вблизи тоннеля наблюдаются anomalously низкие значения скорости. Причиной предположительно является разуплотнение пород, возможно из-за наличия трещин. В таких зонах может происходить просачивание воды. Тоннель законсервирован и не эксплуатируется в первую очередь именно из-за проблем, вызванных обводнением. Как упоминалось ранее, для пары ПВ на участке профиля с бетонной обсадкой, в нижней части спектра не наблюдалось дисперсионной кривой, соответствующей волне, распространяющееся в породе за обсадкой (рис. 3). В этих местах, обозначенных на рис. 3В, по-видимому, ослаблен контакт между обсадкой и породой, это связано с наличием пустот и/или сильным ослаблением пород за обсадкой.

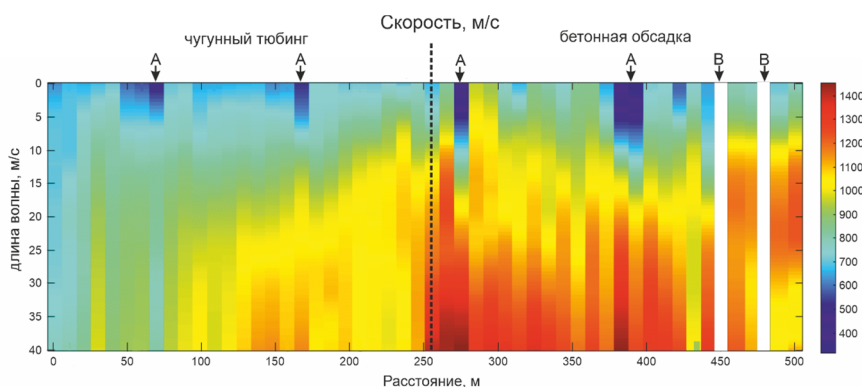


Рис. 3. Скоростной разрез поверхностных волн для всего профиля наблюдений, отмечены зоны пониженной скорости вблизи тоннеля (А), участки профиля в которых не наблюдается волна, распространяющаяся горном массиве за бетонной обсадкой (В)

Заключение

Проведены полевые опытно-методические исследования метода многоканального анализа поверхностных сейсмических волн для исследования структуры горного массива в окрестности железнодорожного тоннеля. Полученные результаты показали применимость аппаратуры, методик наблюдения и обработки данных, используемых в наземной инженерной сейсморазведке. Наиболее успешные результаты – четкое прослеживание дисперсионных кривых поверхностных волн в широком диапазоне частот, удалось получить на участке тоннеля с чугунным тубингом. Судя по полученным данным, при условии достаточного контакта с породой, такая оболочка практически не затрудняет наблюдение волн, распространяющихся в горном массиве. В случае бетонной обсадки толщиной около 0,5 м волны, распространяющиеся в массиве пород, наблюдаются ниже 100 Гц. В следствии отсутствия достаточного контакта между породой и обсадкой (предположительно) на отдельных сейсмограммах волны за обсадкой не наблюдалось.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00192, <https://rscf.ru/project/24-27-00192/>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Park C. MASW for geotechnical site investigation // The Leading Edge. – 2013. – Vol. 32. – № 6. – P. 656-662.
2. Yablokov A. V., Dergach P. A., Serdyukov A. S., Polozov S. S. Development and Application of a Portable Vibroseis Source for Acquisition and Analysis of Seismic Surface Wave Data // Seismic Instruments. – 2022. – Vol. 58. – № 2. – P. S195-S203.
3. Serdyukov A. S., Yablokov A. V., Duchkov A. A., Azarov A. V., Baranov V. D. Slant f-k transform of multichannel seismic surface wave data // Geophysics. – 2019. – Vol. 84. – № 1. – P. A19-A24.

© А. С. Сердюков, А. В. Азаров, А. В. Яблоков, М. Н. Кормин, К. Б. Акулов, 2025