

УДК 622.01+550.344.5

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПОРОДНОГО МАССИВА В ОКРЕСТНОСТИ ТОННЕЛЯ
ПО ФАЗОВЫМ СКОРОСТЯМ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН**

**А. С. Сердюков^{1,2}, Р. А. Ефремов^{1,2}, А. В. Яблоков^{1,2},
М. Н. Кормин³, К. Б. Акулов³**

¹*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
E-mail: aleksanderserdyukov@yandex.ru, просп. Акад. Коптюга, 3, 630090, г. Новосибирск, Россия*

²*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

³*ООО НИЦ “БАМТОННЕЛЬ”, Комсомольский проспект, 1, корп. 3, 630132, г. Новосибирск, Россия*

Проведены натурные исследования геомеханического состояния массива горных пород в окрестности законсервированного железнодорожного тоннеля методом многоканального анализа поверхностных сейсмических волн. Для интерпретации полученных данных выделены и проанализированы спектральные дисперсионные изображения волн, распространяющихся вдоль тоннеля. Это позволило установить распределение скоростей волн во вмещающих породах и выявить низкоскоростные участки. Результаты исследований подтверждают применимость метода определения структуры и диагностики состояния приконтурного массива подземных сооружений.

Массив горных пород, подземные сооружения, натурные наблюдения, малоглубинная сейсморазведка, тоннель, мониторинг состояния, поверхностные волны

DOI: 10.15372/FTPRPI20240602

EDN: URKFEG

Контроль состояния массива горных пород в окрестности подземных сооружений имеет большое значение для обеспечения безопасности строительства и эксплуатации тоннелей, шахтных стволов и других подземных сооружений. Проектирование таких объектов основано на результатах геологической съемки, изучения геофизических параметров скважин, пробуренных в пределах участка строительства, петрофизических и геомеханических исследований извлеченного кернового материала. Плотность сетки скважин может быть недостаточной для выявления потенциально опасных зон повышенной трещиноватости, обводненности. На стадии строительства тоннелей проблемой становится определение расстояния проходческого комплекса до опасного участка. При эксплуатации существующих тоннелей возникает необходимость оценки состояния грунтового массива, вмещающего сооружение, и контакта на границе взаимодействия грунта и конструкции.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 24-27-00192).

В ряде исследований для контроля состояния массива горных пород, примыкающих к подземным сооружениям, применяются сейсмоакустические методы. В [1, 2] решается задача по выявлению участков шахт с повышенным расслоением породы кровли. Предлагается подход на основе совместного использования электропрофилирования и акустических измерений. В [2] рассматривается возможность применения акустической резонансной дефектоскопии: расслоение пород значительно влияет на параметры акустических колебаний. В [3 – 6] анализируется геологическое строение массива горных пород в окрестности выработок с помощью шахтной сейсморазведки. Подобные технологии предназначены также для обнаружения разломов горной породы впереди забоя в ходе строительства тоннелей [7]. Как правило, реализуются сейсмические методы на основе отраженных волн, главным недостатком которых является низкое соотношение сигнал/шум вследствие высокоамплитудных поверхностных волн и других помех.

В горной геофизике применяются и пассивные наблюдения сейсмичности, возникающей при геодинамических процессах. Такими методами решаются задачи прогнозирования горных ударов [8], определения зон развития сильных деформаций [9] и характеристик развивающихся трещин [10], поиска разломов в массиве горных пород [11]. К недостаткам этих методов относится следующий факт: наблюдаемое излучение генерируется горной породой в момент протекания геодинамического процесса, например трещинообразования. Если процесс уже завершился, то оценить его последствия невозможно. Кроме того, не все процессы в массиве сопровождаются достаточно сильной сейсмической эмиссией (на фоне других источников сейсмических сигналов, в том числе и техногенных). Энергия событий невелика по сравнению с помехами, что затрудняет их обнаружение.

Настоящая статья посвящена использованию поверхностных сейсмических волн для контроля состояния массива горных пород вблизи подземных сооружений. Поверхностные волны имеют меньший коэффициент затухания, связанный с геометрическим расхождением волнового фронта. Они обладают большей энергией в низкочастотном диапазоне по сравнению с объемными волнами, поэтому их легче достоверно выделить в данных малоглубинной сейсморазведки. Этим обуславливается популярность многоканального анализа поверхностных волн типа Рэлея и Лява (MASW) в наземной инженерной сейсморазведке [12]. Известно несколько работ по использованию метода поверхностных сейсмических волн для определения состояния горной породы вблизи шахт и тоннелей. В [13] предлагается искать аномальные зоны вокруг выработок на основе частотно-временного анализа спектральной энергии регистрируемых поверхностных волн. Показано, что в местах скоростных аномалий наблюдается смещение максимумов сейсмической энергии на определенных частотах и изменение наблюдаемых значений групповой скорости. В [14] методом поверхностных волн решается задача контроля толщины железобетона в оболочке тоннеля. В [15] проводился сейсмоакустический контроль водонасыщенности грунтов вокруг тоннеля.

В целом метод поверхностных волн применительно к мониторингу состояния обделки и/или вмещающего массива горных пород в окрестности подземных сооружений развит слабо. В частности, авторы [15] игнорируют тот факт, что законы распространения поверхностных волн вдоль тоннелей и выработок отличаются от волн Рэлея и Лява, распространяющихся вдоль свободной границы горизонтально-слоистого полупространства. Важным направлением являются аналитические исследования и численное моделирование процессов распространения волн в упругом теле вдоль протяженных полостей, например цилиндрической формы (простейшая модель тоннеля), на предмет их использования при оценке структур и свойств вмеща-

ющего массива пород [16]. Помимо теоретических работ, необходимо проведение масштабных опытно-полевых работ с целью подбора оптимальных характеристик аппаратуры, систем наблюдения, методик обработки полевых данных для получения устойчивых и достоверных результатов.

В апреле 2024 г. выполнены опытные сейсморазведочные работы в законсервированном железнодорожном тоннеле (Кемеровская область, Новокузнецкий район). Основная цель экспериментов — исследование возможности наблюдения и определения характеристик поверхностных волн, распространяющихся вдоль стен тоннеля при наличии высокоскоростной обделки: бетонной или чугунной (тюбинг). При планировании полевых работ использовались методические разработки, полученные в ходе изучения метода многоканального анализа поверхностных волн методом MASW. Применялись фланговая система наблюдений на основе геофонов 5 Гц и многоканальной регистрирующей станции, источник колебаний на базе низкочастотного акустического измерительного преобразователя Butt kicker LFE [17]. В результате спектральной обработки данных при помощи наклонного $f-k$ преобразования (SFK) [18] удалось устойчиво выделить и проанализировать спектральные дисперсионные изображения поверхностных “тоннельных” волн.

СЕЙСМИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Эксперименты по наблюдению сейсмических волн проводились в неэксплуатируемом тоннеле 105–106 км участка Артышта-Томусинская Западно-Сибирской железной дороги (Кемеровская область, Новокузнецкий район), построенном в 1967 г. Тоннель залегает в переслаивающихся пластах песчаников, алевролитов, аргиллитов и углей. В настоящее время он находится на консервации и не эксплуатируется ввиду неудовлетворительного технического состояния, связанного с постоянными водопроявлениями на поверхности обделки. Отметим, что на расстоянии 30 м от старого тоннеля расположен новый действующий тоннель.

Общая протяженность исследуемого тоннеля 1160 м. Сейсморазведочные работы проводились со стороны западного портала. Положение профиля наблюдения показано на рис. 1. Первые 250 м профиль проходил по участку тоннеля круглого сечения с чугунной тюбинговой обделкой. Толщина тюбинга с учетом ребер жесткости составляет около 0.3 м, основание залито бетоном, высота тоннеля 7.1 м. Далее тоннель уходит вглубь массива более плотных пород и его профиль становится подковообразным. При его создании использована бетонная обделка толщиной около 0.5 м; высота тоннеля здесь 7.25 м. Длина профиля наблюдений на участке с бетонной обделкой также равна 250 м.



Рис. 1. Фланговая линейная система наблюдений: положение профиля наблюдения, источников и приемников вдоль стенки тоннеля, схема смещения пунктов возбуждения (ПВ) вдоль профиля

Сейсмические датчики — геофоны GS-One с собственной частотой 5 Гц — располагались вдоль тоннеля на его основании рядом со стеной. В целях удобства переноса и расстановки 12 датчиков закреплялись на стропе на расстоянии 2 м друг от друга. Для возбуждения колебаний применялись резиновый молоток массой 1 кг и вибрационный источник, состоящий из двух низкочастотных акустических трансдюсеров ButtKicker LFE. В качестве входного импульса на вибрационный источник передавался свип-сигнал с гиперболической частотной модуляцией — развертка частоты от 5 до 500 Гц. При использовании импульсного источника обеспечивалось накопление по 10 ударов. Пункт возбуждения (ПВ) располагался на удалении 2 м от ближайшего приемника (рис. 1). Осуществлялась линейная система наблюдений: ПВ и 12 приемников, перемещалась вдоль профиля наблюдений с шагом 10 м. Для каждого ПВ с помощью многоканальной сейсмической станции (регистратора) записывалась сейсмограмма общего пункта возбуждения с частотой дискретизации 0.001 с.

Полученные данные обрабатывали методом многоканального анализа поверхностных волн (MASW). В случае сигнала частотной модуляции применялась коррелограмма. Для каждого набора данных общего ПВ с помощью спектрального $f-k$ анализа получены дисперсионные кривые скоростей волн, распространяющихся вдоль тоннеля. Использован метод наклонного $f-k$ преобразования — *slant $f-k$ transform* (SFK), показывающий хорошие результаты при обработке поверхностных сейсмических волн. В соответствии с этим методом к записям геофонов применяется модифицированное частотно-временное преобразование Стоквелла:

$$S(\tau, f) = \int h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2\sigma^2}} e^{-i2\pi f t} dt, \quad (1)$$

$h(t)$ — исследуемый сигнал; f — частота; τ — временная переменная в частотно-временной области. Параметр σ используется для оптимизации разрешения преобразования в зависимости от частоты исследуемого сигнала. При обработке полученных сейсмических данных $g(x, t)$, где t — время, x — расстояние вдоль линии наблюдений от источника, путем подбора выбрано значение $\sigma = 0.5$.

После перехода в частотно-временную область с помощью S -преобразования (1) получаем образ данных — функцию трех переменных: $G(x, \tau, f)$. Далее при фиксированной частоте f на плоскости (x, τ) перебираем прямые: $x = ut$, где u — групповая скорость распространения плоско-волновых пакетов. Рассматривая изменения образа данных вдоль каждой такой прямой, применяем преобразование Фурье по переменной x . Последовательно повторив подобные действия для различных значений групповой скорости u в рассматриваемом диапазоне частот f , получаем функцию

$$\Omega(u, f, k) = \left| \int G\left(x, \frac{x}{u}, f\right) e^{-2\pi i x k} dx \right|. \quad (2)$$

Здесь k — волновое число. Для каждой фиксированной пары “частота — волновое число $f-k$ ” находим максимум функции Ω относительно переменной u . Отсюда имеем окончательный результат SFK преобразования — спектральное распределение в $f-k$ области:

$$P(f, k) = \min_u |\Omega(u, f, k)|. \quad (3)$$

Анализируя полученное распределение, получаем дисперсионные кривые — взаимосвязь частоты и волнового числа $k(f)$. Далее переходим к новым величинам:

$$v(f) = \frac{f}{k(f)}, \quad \lambda(f) = \frac{1}{k(f)} = \frac{v(f)}{f}, \quad (4)$$

$v(f)$ — фазовая скорость поверхностной волны; $\lambda(f)$ — длина волны. На основе соотношений (4) устанавливаем зависимость фазовой скорости от длины волны $v(\lambda)$. Прделав, согласно (1)–(4), подобные действия для всех сейсмограмм, определяем скоростной разрез поверхностных волн: $v(x, \lambda)$, где x — расстояние вдоль профиля наблюдений (положение соответствующего ПВ), а длина волны λ характеризует удаление от профиля наблюдения вглубь массива пород.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

В качестве источника колебаний во время проведения малоглубинных сейсмических исследований в тоннеле применялись кувалда (резиновый молоток весом около 1 кг) и вибрационный источник на основе двух акустических трансдюсеров ButtKicker LFE. Результаты обработки данных обоих типов источников имеют близкое качество и пригодны для дальнейшей интерпретации. Тем не менее использование вибрационного источника позволило более отчетливо проследить дисперсионные кривые фазовой скорости волны, распространяющейся вдоль тоннеля, в нижней части наблюдаемого спектра. На рис. 3 приводятся результаты обработки данных вибрационного источника: представлены спектры, полученные с помощью SFK преобразования. Для всех сейсмограмм профиля вдоль участка с чугунной обделкой 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. 3а. В случае бетонной обделки для большинства ПВ в нижней части спектра (приблизительно до 100 Гц) можно увидеть дисперсионную кривую, схожую с участком чугунной обделки (рис. 3б). Полагаем, что именно эта волна распространяется за обделкой и позволяет судить о свойствах вмещающегося горного массива. Для двух ПВ (на расстоянии 450 и 480 м вдоль профиля) волны не отмечается (рис. 3в), что является признаком отсутствия плотного контакта бетонной обделки с горным массивом, наличия пустот или зон разуплотнения.

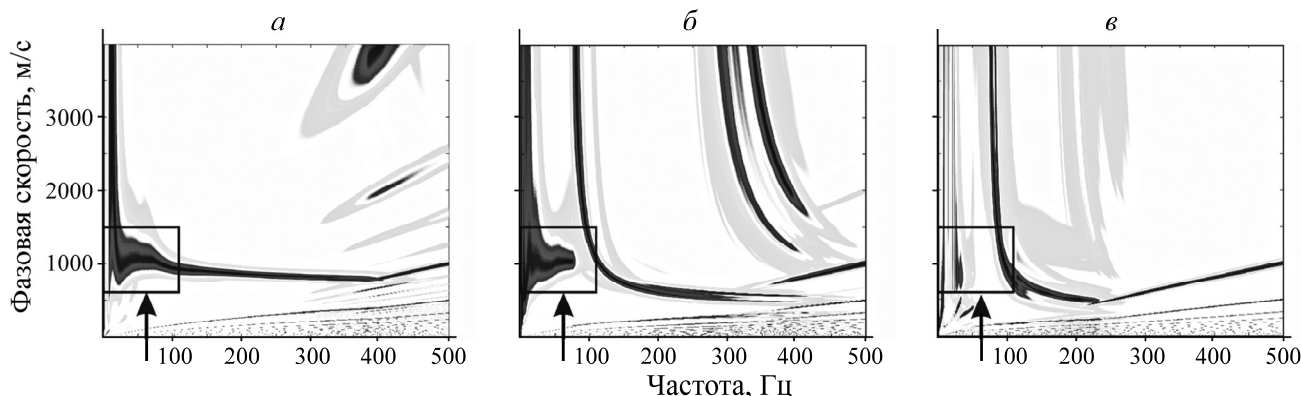


Рис. 2. Спектральные дисперсионные изображения после обработки данных: а — участок профиля с чугунной обделкой; б, в — участок профиля с бетонной обделкой; область дисперсионной кривой за обделкой отмечена стрелкой

В результате пикирования дисперсионных кривых получены результаты, характеризующие зависимость фазовой скорости исследуемой поверхностной волны от частоты. На рис. 3а продемонстрирован процесс поточечного пикирования дисперсионной кривой для одного из ПВ

первой половины профиля с чугунной обделкой. Результат пикирования одной из дисперсионных кривых для участка профиля с бетонной обделкой представлен на рис. 3б. На этом участке кривые прослеживаются в более узком частотном диапазоне.

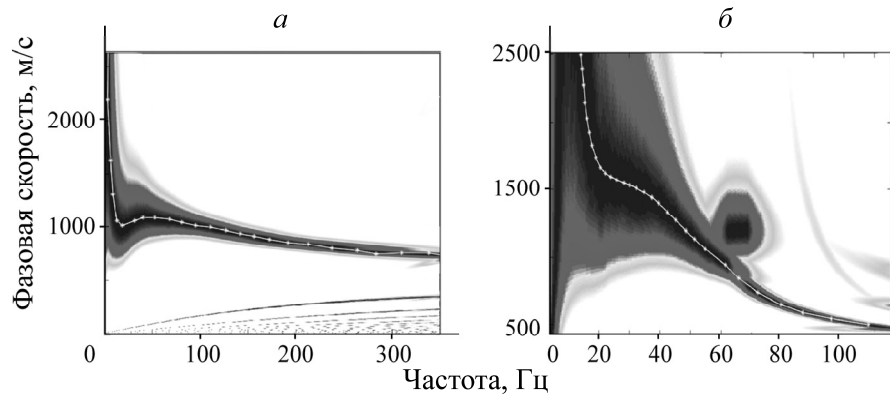


Рис. 3. Пикирование дисперсионных кривых: данные с одного из ПВ участка профиля наблюдений с чугунной обделкой (а); данные участка с бетонной обделкой при более узком диапазоне частот (б)

На основе полученных дисперсионных кривых можно проследить изменение скорости распространения волны вдоль профиля наблюдения. Максимальные скорости достигали 3000 м/с при частоте менее 15 Гц. Этим значениям соответствует длина волны более 200 м. Мониторинг волн такой длины превышает возможности относительно маломощного источника колебаний приемной косы (12 м). Кроме того, скорость поверхностных волн более 3000 м/с не согласуется с типами пород в окрестности тоннеля. Такие завышенные значения скорости и длины волны вызваны размыванием пространственного Фурье спектра (spectral leakage) в нижней части рассматриваемого спектра из-за ограниченной базы (длины) линейной системы наблюдений. При построении разрезов для последующей интерпретации ограничимся значениями скорости 1300–1500 м/с и длиной волны до 40 м. Это соответствует типичной глубинности метода MASW, широко применяемого в инженерной сейсморазведке. С учетом этих ограничений построено распределение скоростей в зависимости от частоты (рис. 4а). Далее, используя соотношения (4), получаем итоговый разрез — скорость поверхностной волны в зависимости от расстояния вдоль профиля и длины волны (рис. 4б).

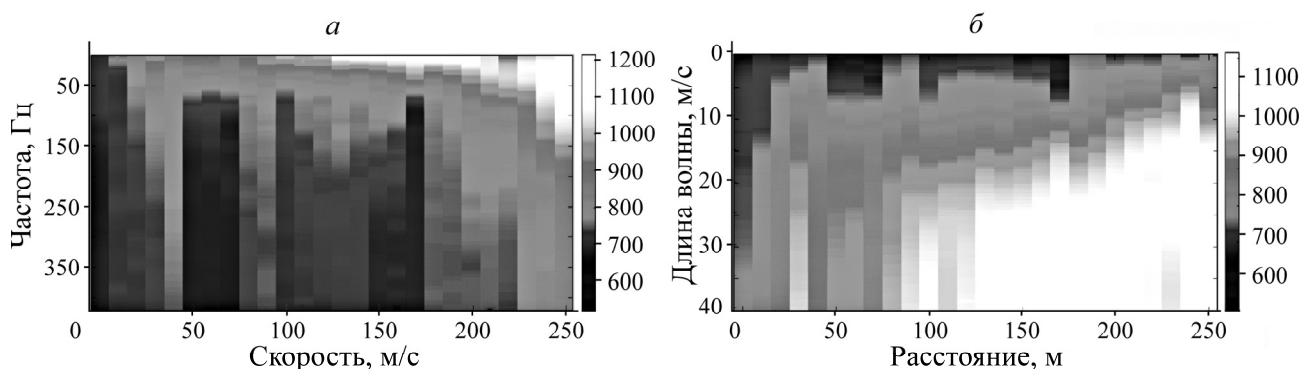


Рис. 4. Переход от дисперсионных кривых к построению скоростного разреза участка профиля с чугунной обделкой: множество дисперсионных кривых с разных ПВ (а) и итоговый скоростной разрез (б)

Проделав те же действия с данными второй половины профиля (участок тоннеля с бетонной обделкой), получаем разрез для всего профиля наблюдений (рис. 5). Пунктирной линией отмечена граница между участками с чугунной и бетонной обделкой. При построении разреза для участка с бетонной обделкой дисперсионные кривые пикированы в более узком диапазоне частот, поскольку кривые на дисперсионных изображениях прослеживались значительно хуже, чем для участка с тубингами. Этим объясняется больший разброс и менее плавный характер распределения скоростей второй половины разреза по сравнению с первой. Можно применить сглаживающую интерполяцию, как часто делается в малоглубинной сейсморазведке, но для большей объективности приведен результат без дополнительной обработки.

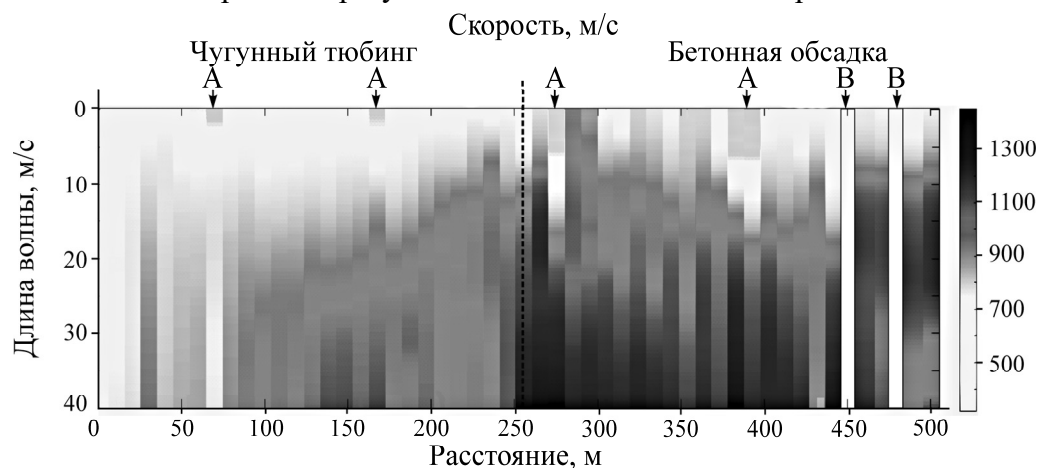


Рис. 5. Скоростной разрез поверхностных волн для всего профиля наблюдений

Проанализируем полученный скоростной разрез. Вдоль всего профиля наблюдений при малых длинах волн до 8–10 м можно увидеть меньшие значения скорости, что свидетельствует о разуплотнении массива пород вблизи тоннеля. Низкие значения скоростей в первые 70 м профиля установлены и для больших длин волн, что соответствует рассматриваемой зоне выветривания и перехода от скальных пород к грунтам вблизи портала.

Во второй половине профиля — на участке тоннеля с бетонной обделкой — фиксируются более высокие значения скорости по сравнению с первой половиной тоннеля. В нескольких местах профиля отмеченные на рис. 5 буквой А породы, примыкающие к тоннелю, имеют аномально низкие значения сейсмической скорости, что характерно для зон разуплотнения и развития трещин. В них могут наблюдаться интенсивные проявления подземных вод. Отметим, что тоннель законсервирован и не эксплуатируется из-за проблем, вызванных притоком воды.

Как упоминалось ранее, для двух ПВ на участке профиля с бетонной обделкой не наблюдалось дисперсионной кривой, соответствующей распространяющейся в породе за обделкой волне (см. рис. 2). В этих местах, обозначенных на рис. 5 буквами В, отсутствует контакт между обделкой и породой, возможно, из-за пустот или сильного разуплотнения пород за обделкой.

ВЫВОДЫ

Наиболее успешные результаты удалось получить на участке тоннеля с обделкой из чугунных тубингов. Такая конструкция при условии достаточного контакта с породой практически не затрудняет наблюдение волн, распространяющихся в горном массиве. На участке с бетонной

обделкой толщиной около 0.5 м волны, распространяющиеся в массиве пород, фиксируются на частотах ниже 100 Гц. На отдельных сейсмограммах волна за обделкой не обнаруживалась, что указывает на отсутствие достаточного контакта между обделкой и породой.

Итоговый скоростной разрез поверхностных сейсмических волн вдоль всего профиля наблюдений длиной 500 м достаточно хорошо согласуется с ожиданиями и представлениями о массиве: вблизи тоннеля скорости понижены из-за разуплотнения породы, со стороны западного портала заметен переход к зоне выветривания и грунтам, на участке с бетонной обделкой значения скоростей выше, чем на участке с чугунной обделкой.

В нескольких местах вдоль профиля вблизи тоннеля определены аномально низкие скорости. На эти зоны, а также и на те, где волна за обделкой не наблюдается, следует обратить внимание при планировании работ по гидроизоляции, ремонту и укреплению обделки тоннеля. Полученные результаты демонстрируют перспективы применения метода поверхностных сейсмических волн для решения практических задач, связанных с эксплуатацией тоннелей и подкрепленных горных выработок.

Авторы выражают благодарность за помощь в организации полевых работ руководству и специалистам компании ООО НИЦ “БАМТОННЕЛЬ”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матвеев В. А., Молев М. Д. Оценка состояния углепородного массива на выемочном участке с помощью методов шахтной геофизики // ГИАБ. — 2005. — № 3. — С. 92–95.
2. Молев М. Д., Меркулов А. В. Информационное обеспечение проведения горных выработок на основе геофизических измерений // ГИАБ. — 2012. — № 6. — С. 55–58.
3. Жуков А. А., Пригара А. М., Царев Р. И., Шусткина И. Ю. Способ шахтной сейсморазведки для изучения особенностей геологического строения ВКМС // ГИАБ. — 2019. — № 4. — С. 121–136.
4. Вагин В. Б. Шахтные сейсмические методы изучения строения массивов соляных пород. — Минск: БелНИЦ “Экология”, 2010. — 188 с.
5. Пригара А. М. Особенности применения способа шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений // Науки о Земле и недропользование. — 2019. — Т. 42. — № 2 (67). — С. 176–184.
6. Сапфиров И. А., Бабкин А. И. Горно-геологические приложения сейсморазведочных исследований во внутренних точках среды // ГИАБ. — 2003. — № 10. — С. 214–218.
7. Tzavaras J., Buske S., Gross K., and Shapiro S. Three-dimensional seismic imaging of tunnels, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2012, Vol. 49. — P. 12–20.
8. Рассказов М. И., Гладырь А. В., Терешкин А. А., Цой Д. И. Сейсмоакустическая система контроля горного давления на подземном руднике “Мир” // Проблемы недропользования. — 2019. — № 2 (21). — С. 56–61.
9. 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.
10. Li L., Tan J., Wood D. A., Zhao Z., Becker D., Lyu Q., and Chen H. A review of the current status of induced seismicity monitoring for hydraulic fracturing in unconventional tight oil and gas reservoirs, Fuel, 2019, Vol. 242. — P. 195–210.
11. Шарапов И. Р., Феофилов С. А. Наземные пассивные микросейсмические мониторинги при изучении, разработке и эксплуатации недр в нефтегазовой и горнодобывающей отраслях // Приборы и системы разведочной геофизики. — 2021. — № 3. — С. 10–19.

12. **Park C.** MASW for geotechnical site investigation, *The Leading Edge*, 2013, Vol. 32, No. 6. — P. 656–662.
13. **Czarny R., Malinowski M., Ćwiękała M., Olechowski S., Isakow Z. and Sierodzki P.** Characterisation of the tunnel-channel wave around a coal mine roadway based on synthetic and real data, 3rd Conf. Geophysics for Mineral Exploration and Mining, European Association of Geoscientists & Engineers, 2020, Vol. 2020, No. 1. — C. 1–5.
14. **Chen K., Zhang Z., and Zhou Y.** Application of surface wave in reinforced concrete invert detection, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing, 2021, Vol. 660, No. 1. — P. 012069.
15. **Дорохин К. А.** Обоснование и разработка метода оценки геодинамического состояния массива горных пород на основе дисперсионных параметров сейсмических волн: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — Москва: ИПКОН РАН, 2017. — 25 с.
16. **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.
17. **Yablokov A. V., Dergach P. A., Serdyukov A. S., and 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, Suppl. 2. — P. S197–S205.
18. **Serdyukov A. S., Yablokov A. V., Duchkov A. A., Azarov A. V., and Baranov V. D.** Slant f-k transform of multichannel seismic surface wave data, *Geophysics*, 2019, Vol. 84, No. 1. — P. A19–A24.

Поступила в редакцию 18/X 2024

После доработки 06/XI 2024

Принята к публикации 08/XI 2024