

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТУННЕЛЬНЫХ ВОЛН ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ВБЛИЗИ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

А.В. Азаров¹, А.С. Сердюков¹, В.В. Сказка¹

¹ Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения РАН,
Новосибирск, Россия, e-mail: antonazv@mail.ru

Аннотация: Рассмотрена проблема контроля состояния подземных сооружений, возникающая при разработке твердых полезных ископаемых. Для ее решения предлагается использовать поверхностные/туннельные волны, которые распространяются вдоль поверхностей горных выработок. С целью оценки перспективности предлагаемого подхода нами были проведены исследования на основе применения методов математического моделирования и численных экспериментов. Рассматривается процесс распространения сейсмических волн в среде, содержащей протяженную полость (горная выработка, туннель) и неоднородное включение (область со скоростными параметрами, отличными от вмещающей среды). Решение уравнений упругости проводилось на основе численного метода конечных спектральных элементов (SEM – Spectral element method). При использовании активного источника, действующего на поверхности полости, на сейсмограммах возникают рассеянные и отраженные волны. Нами разработан численный алгоритм, основанный на суммировании энергии этих волн, с помощью которого возможно обнаруживать особенности в строении среды вблизи полостей. Показано, что возможность определять аномальную зону в горной породе резко снижается с увеличением расстояния между ней и полостью. При расстоянии более 0,6 длины волны возникают сложности при обнаружении рассматриваемого включения. Дополнительно нами исследовался подход, основанный на анализе скоростных характеристик поверхностных волн. Показано, что при вычислении фазовых скоростей поверхностных волн вдоль полости в месте расположения неоднородности возникают особенности. В частности, если включение имеет более низкие скоростные параметры, чем основная вмещающая среда, то будет наблюдаться снижение фазовой скорости.

Ключевые слова: туннельные волны, поверхностные волны, сейсмический мониторинг, контроль состояния подземных сооружений, контроль состояния горных пород, горные выработки, математическое моделирование, обработка данных.

Благодарность: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-20126, <https://rscf.ru/project/22-27-20126/>, и финансовой поддержки Правительства Новосибирской области.

Для цитирования: Азаров А. В., Сердюков А. С., Сказка В. В. Теоретические исследования возможности использования туннельных волн для мониторинга состояния массива горных пород вблизи подземных сооружений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 4. – С. 155–167. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_155.

Theoretical investigation of usability of tunnel waves in rock mass monitoring near underground structures

A.V. Azarov¹, A.S. Serdyukov¹, V.V. Skazka¹

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

Abstract: The article addresses the problem connected with the control of underground structures in solid mineral mining. For the problem solving, it is proposed to use the surface/tunnel waves which propagate along the surfaces of underground openings. The investigation of the proposed approach efficiency used the methods of mathematical modeling and numerical experimentation. The scope of the analysis embraced propagation of seismic waves in a medium containing a long void (underground roadway, tunnel) and a nonuniform inclusion (domain with different velocity characteristics than in the enclosing medium). The elasticity equations were solved using the Spectral Element Method (SEM). When an active source is present on the surface of the void, the scattered and reflected waves appear in the seismograms. The developed numerical algorithm uses summing up of the energies of these waves. The algorithm enables detection of structural features of media near voids. It is shown that the detectability of an abnormal zone in rocks drops with the growing distance between the zone and the void. At the distance greater than 0.6 of the wave length, it becomes difficult to detect an inclusion. Another approach includes the analysis of the velocity characteristics of the surface waves. In calculation of the phase velocities of the surface waves propagating along a void, some peculiarities arise at the location of the inhomogeneity. In particular, if the inhomogeneity features the lower velocity parameters than the enclosing medium has, the decrease is observed in the phase velocity.

Key words: tunnel waves, surface waves, seismic monitoring, underground structure control, rock mass control, underground openings, mathematical modeling, data processing.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 22-27-20126, <https://rscf.ru/project/22-27-20126/>, and by the Government of the Novosibirsk Region.

For citation: Azarov A. V., Serdyukov A. S., Skazka V. V. Theoretical investigation of usability of tunnel waves in rock mass monitoring near underground structures. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(4):155-167. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_155.

Введение

Мониторинг состояния массива горных пород в окрестности подземных сооружений является важной задачей, направленной на повышение безопасности и эффективности разработки твердых полезных ископаемых. Применяются различные методы, среди которых широкое распространение получили геофизические, основанные на регистрации и обработке сейсмических волн. На основе

сейсмических методов в горном деле решаются задачи определения областей неустойчивости породного массива [1], прогнозирования горных ударов [2, 3], проводится поиск разломов [4], оценка параметров развивающихся трещин [5] и т.д. При этом используются, как правило, только объемные сейсмические волны, на регистрации и обработке которых основана, например, технология микросейсмического мониторинга [6–10]. По-

верхностные волны (также известные как туннельные), распространяющиеся вдоль поверхностей горных выработок, часто относят к шуму. По этой причине не применяются различные подходы для борьбы с ними. Например, приемники устанавливаются в неглубокие шпурь/скважины, чтобы отойти от поверхности выработки [2]. Амплитуда поверхностных волн затухает экспоненциально с увеличением расстояния от поверхности, поэтому такие подходы являются эффективными. Тем не менее поверхностные/туннельные волны могут переносить до 75% энергии всего волнового пакета и слабо затухают при распространении вдоль полостей [11]. Их использование может позволить решать прикладные задачи контроля состояния массива горных пород вблизи подземных сооружений.

Перспективность использования поверхностных/туннельных волн показана в ряде работ. Например, в исследовании [12] приводятся результаты сейсмического мониторинга степени разжижения грунтов вокруг тоннеля. В рамках работы было обнаружено снижение скоростных характеристик поверхностных волн, что указывает на изменение механических свойств вмещающих грунтов. В исследованиях [13, 14] предложен метод обнаружения областей разрушения, которые формируются вблизи горных выработок, на основе наблюдения за по-

верхностными волнами. В работе [15] решалась задача оценки толщины железобетона в обшивке тоннеля на основе регистрации и обработки волн Релея. Более сложный метод разрабатывался в исследованиях [16–18], где с помощью поверхностных волн производился поиск разломов горной породы впереди тоннелепроходческого комплекса.

Нами рассматривается вопрос возможности использования поверхностных волн для решения задачи контроля состояния горных выработок. Исследования выполняются на основе численных экспериментов, для чего был применен метод математического моделирования распространения сейсмических волн в среде, содержащей полость и близкорасположенное к ней неоднородное включение. Для решения уравнений упругости используется метод конечных спектральных элементов.

Математическое моделирование распространения сейсмических волн

Для исследования особенностей распространения поверхностных волн вдоль горных выработок была создана трехмерная модель, изображенная на рис. 1.

Расчетная область представляла собой прямоугольный параллелепипед (см. рис. 1, а), который содержал сквозную полость с поперечными размерами axb

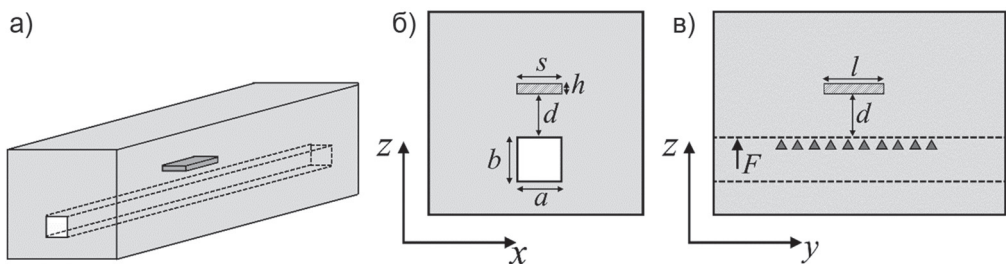


Рис. 1. Трехмерная модель, содержащая сквозную полость и неоднородное включение: трехмерный вид (а); модель в плоскости xz (б); модель в плоскости yz , вместе с системой наблюдения (в)

Fig. 1. Three-dimensional model containing a through cavity and an inhomogeneous inclusion: three-dimensional view (a); model in the xz plane (b); model in the yz plane, together with the observation system (v)

(рис. 1, б). На расстояние d от этой полости устанавливалось включение с размерами $l \times h \times s$, имеющее отличные от основной среды скоростные характеристики. Наблюдение за волновым полем осуществлялось приемниками, расставленными в линию вдоль полости в направлении y (рис. 1, в).

В качестве сейсмического источника рассматривалась точечная модель направленной силы, действующая перпендикулярно поверхности полости (обозначена на рис. 1, в буквой F). Моделирование распространения волн в среде проводилось на основе решения системы уравнений упругости. На поверхности полости задавалось условие свободных перемещений. Для подавления отраженных волн на границах расчетной области используются поглощающие слои.

В качестве базовых параметров модели выбирались следующие значения. Размеры расчетной области $50 \times 80 \times 50$ (вдоль направления x и z по 50 м, вдоль y 80 м), размеры полости $4 \times 80 \times 4$ м (т.е. $a = 4$, $b = 4$ и проходит через всю расчетную область в направлении y), размеры включения $4 \times 6 \times 1$ м ($s = 4$, $h = 1$, $l = 6$). Упругие параметры основной среды: скорости продольных волн 3000 м/с, поперечных 2000 м/с, плотность 2500 кг/м³. Скоростные параметры включения изменялись в ходе численных экспериментов. В качестве формы сигнала в источнике выбирался импульс Риккера с частотой f , которая также изменялась при расчетах.

Для численного моделирования распространения сейсмических волн в рассматриваемой модели применяется метод спектральных элементов (SEM — Spectral element method) [19–21]. SEM является модификацией классического метода конечных элементов (МКЭ). Отличие от МКЭ заключается в том, что в качестве базисных функций при численной реализации используются поли-

номы высоких порядков, например 5-й степени. За счет этого удается получать достаточно точные решения на относительно грубых сетках, что делает возможным использование SEM для решения динамических задач теории упругости. Но главное достоинство и причина, по которой был выбран SEM, состоит в возможности моделировать распространения сейсмических волн в средах с криволинейными свободными поверхностями/полостями. В рамках SEM условие свободной поверхности выполняется автоматически, нет необходимости разрабатывать отдельные численные алгоритмы, как это делается, например, при использовании метода конечных разностей.

Численные эксперименты и результаты обработки

На первом этапе исследований рассчитывались и анализировались синтетические сейсмограммы. На рис. 2 приведены некоторые из них, демонстрирующие основные особенности волнового поля в построенной модели. Приведены скорости смещения точек среды в направлении, нормальном к стенке полости. Сейсмограммы нормированы на максимум амплитуды на трассе.

На рис. 2, а–в включение в среде имело скоростные параметры ниже, чем в основной вмещающей среде: скорости продольных волн 1000 м/с, поперечных 650 м/с, плотность 2000 кг/м³. Центральная частота источника составляла 300 Гц. В работе [22] показано, что при заданных размерах полости и скоростных параметрах основной среды вдоль полости возникают поверхностные/туннельные волны. На первом рисунке (см. рис. 2, а) расстояние d между полостью и включением составляло 1 м. На сейсмограмме четко видны рассеянные волны, которые распространяются в прямом и обратном направлении.

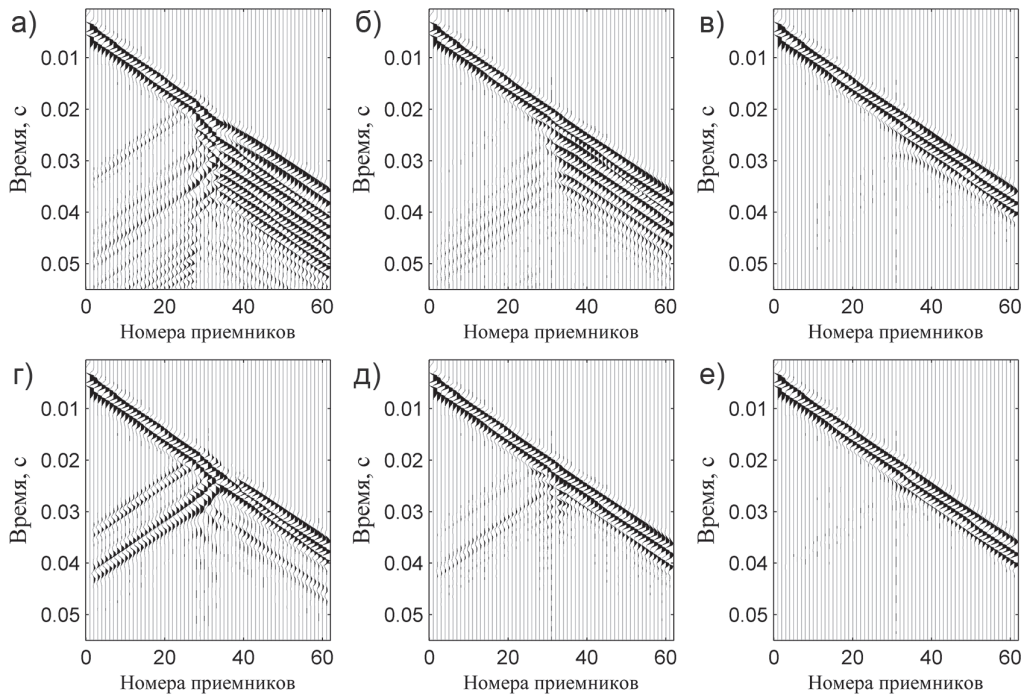


Рис. 2. Сейсмограммы, полученные для источника 300 Гц при различном расстоянии d между низкоскоростным включением и полостью: 1 м (а), 3 м (б), 6 м (в). Нижний ряд рисунков — для случая, когда включение представляет собой малую полость при различных расстояниях d : 1 м (г), 3 м (д), 6 м (е)
 Fig. 2. Seismograms obtained for a source of 300 Hz at different distances d between the low-velocity inclusion and the cavity: 1 meter (a), 3 meters (b), 6 meters (v). The lower figures are for the case when the inclusion is a small cavity at various distances d : 1 meter (g), 3 meters (d), 6 meters (e)

Включение располагалось в окрестности приемника с номером 30. По мере увеличения расстояния между полостью и включением, энергия рассеянных волн уменьшается (рис. 2, б). При $d = 6$ м рассеянных волн визуально не наблюдается или, возможно, их энергии намного меньше прямой поверхностной волны. Здесь отметим, что при заданных параметрах длина поверхностной волны как раз составляла порядка 6 м.

В следующем примере в качестве включения выступала малая полость, расположенная от основной полости на расстоянии 1, 3 и 6 м (рис. 2, г–е). В этом случае при $d = 1$ м явно видны рассеянные/отраженные волны, позиция возникновения которых на сейсмограмме соответствует краям включения. По ме-

ре увеличения расстояния между полостью и включением амплитуды этих волн резко уменьшаются. Как и в первом примере, на расстоянии 6 м они визуально не наблюдаются.

Далее рассмотрим методы обработки данных, позволяющие обнаруживать включения, расположенные вблизи полостей. Один из способов заключается в суммировании обратнорассеянных волн. Для этого был разработан следующий алгоритм.

Пусть $u_1(t) \dots u_N(t)$ — данные, записанные приемниками. Выберем приемник с номером $n \leq N$ и найдем время вступления на него прямой туннельной волны t_n . В приемники u_i , для которых $i \leq n$, внесем временные поправки τ_i , соответствующие временам пробега

туннельной волны от i до n приемника $\tilde{u}_i(t) = u(t - \tau_i)$.

За счет этого в данных $\tilde{u}_i(t)$ сигнал от обратнорассеянной волны будет приходиться на все приемники в один и тот же момент времени t_n . Далее выбирается интервал данных $[t_n, t_a]$, в котором производится суммирование. t_a — зависит от частоты импульса и параметров среды и выбирается так, чтобы длина сигнала рассеянной волны была меньше или равна длине $[t_n, t_a]$. Суммирование производится по формуле

$$S(n) = \sum_{j=t_n}^{t_a} \sum_{\substack{i=1 \\ r(u_{i-1}, u_i) > b}}^n u_i^2(j),$$

где $r(u_{i-1}, u_i)$ — коэффициент кросс-корреляции между сигналами u_{i-1} и u_i ; b — некоторое пороговое значение. Таким образом, суммируются только те трассы, которые достаточно хорошо корре-

лируют с соседними. Это позволяет не накапливать значение S при отсутствии сигнала. Пороговое значение b выбирается эмпирически и зависит от параметров среды, качества данных, степени зашумленности. Коэффициент кросс-корреляции записей двух приемников вычисляется по формуле

$$r(u_i, u_j) = \frac{1}{T-1} \sum_{k=1}^K \left(\frac{u_i(k) - \mu_{u_i}}{\sigma_{u_i}} \right) \left(\frac{u_j(k) - \mu_{u_j}}{\sigma_{u_j}} \right)$$

где $\mu_u = \frac{1}{K} \left(\sum_{k=1}^K u(k) \right)$ — среднее значение сигнала u ,

$\sigma_u = \sqrt{\frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K (u(k) - \mu_u)^2}$ — среднеквадратичное отклонение.

На рис. 3 приведены результаты обработки данных с помощью описанно-

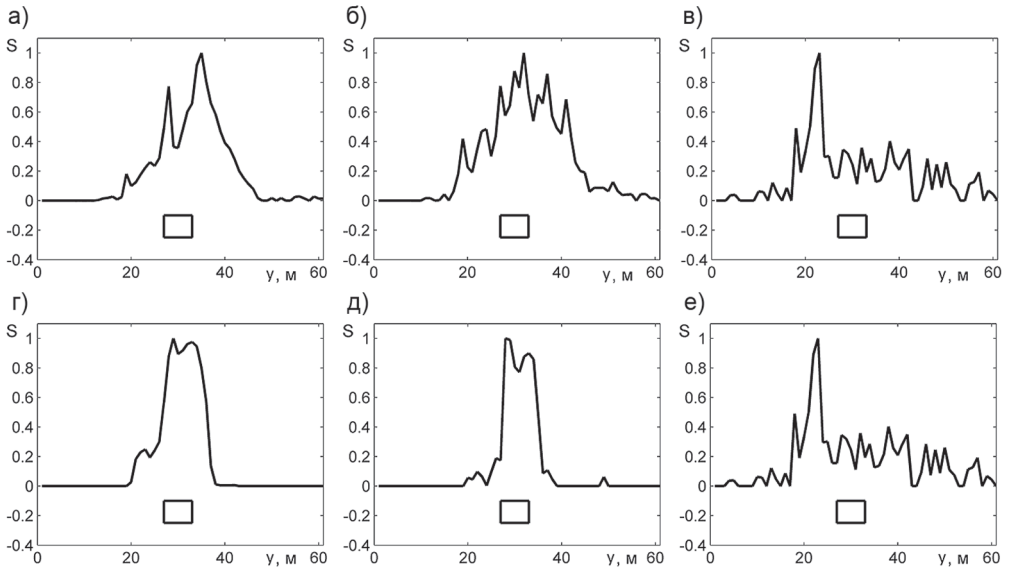


Рис. 3. Результаты обработки данных для источника 300 Гц при различном расстоянии d между низкоскоростным включением и полостью: 1 м (а); 3 м (б); 6 м (в). На нижних рисунках — результат обработки для данных, когда включение представляет собой малую полость при различном расстоянии d : 1 м (г); 3 м (д); 6 м (е)

Fig. 3. Results of data processing for a 300 Hz source at different distances d between the low-velocity inclusion and the cavity: 1 meter (a); 3 meters (b); 6 meters (v). In the lower figures, the result of processing for data when the inclusion is a small cavity at different distances d : 1 meter (g); 3 meters (d); 6 meters (e)

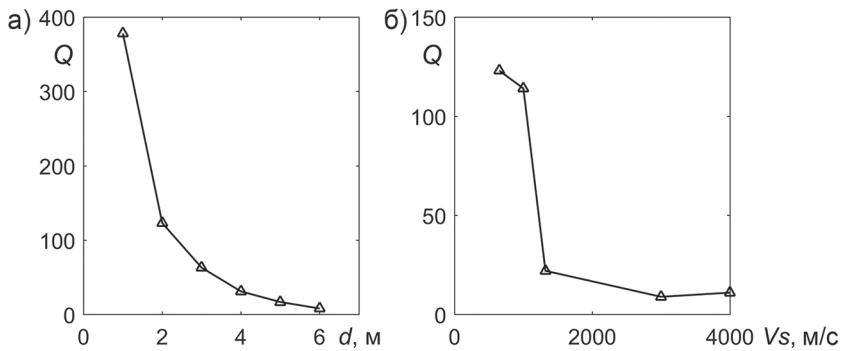


Рис. 4. Суммарное значение меры S при различном расстоянии между полостью и неоднородным включением со скоростью поперечной волны равной 650 м/с (а); различных скоростных параметрах неоднородного включения (б)

Fig. 4. The total value of the measur. S at different distances between the cavity and the inhomogeneous inclusion with a transverse wave velocity equal to 650 m/s (a); different speed parameters of inhomogeneous inclusion (b)

го выше алгоритма. Прямоугольником указана позиция включения вдоль оси u . На рис. 3, а–в использовались данные, приведенные на рис. 2, а–в, с добавлением белого шума. Хорошо видно, что для $d = 1$ и $d = 3$ м в окрестности включения наблюдается возрастание значений меры S . При $d = 6$ м явных пиков, указывающих на наличие какой-либо неоднородности, не наблюдается. Похожая ситуация возникает и в случае, когда в качестве включения выступает небольшая полость (рис. 3, г–е).

На рис. 4 приведены результаты численных экспериментов, на которых проводилось суммирование энергии обратнорассеянных/отраженных волн без добавления шума. В первой серии экспериментов изменялось расстояние d между полостью и включением. Из графика видно, что интенсивность S достаточно быстро падает с увеличением d . При $d = 6$ м характер изменения S уже не позволяет определять положение неоднородности. Во второй серии экспериментов изменялись скоростные параметры включения. Проводилось пять экспериментов: скорость поперечных волн была 650, 1000, 1320, 3000 и 4000 м/с, т.е. в первых трех случаях была меньше

скорости основной вмещающей среды в 3, 2 и 1,5 раза, во вторых двух — в 1,5 и 2 раза больше. При 650 и 1000 м/с значение меры S сохранялось достаточно большим. При $V_s = 1320$ м/с наблюдается резкое ее падение, хотя при низком уровне шума обнаружить включение с помощью рассматриваемого алгоритма еще возможно. В случае, когда скоростные характеристики включения были больше, чем у вмещающей породы, значение меры S становилось настолько низким, что обнаруживать неоднородность не получалось. На рис. 4 приведено суммарное значение меры интенсивности отраженных туннельных волн в зависимости от расстояния d (рис. 4, а) и скорости поперечной волны в неоднородности. По графикам, приведенным на рис. 4, можно также судить о возможности определения включения — так, значения Q , близкие к нулю (здесь также необходимо учитывать, что на практике в данных будут присутствовать помехи), указывают на невозможность определения включения.

Далее рассмотрим пример, когда приемники размещены не только на стенке полости со стороны неоднородности, но и на противоположной и боковой ее по-

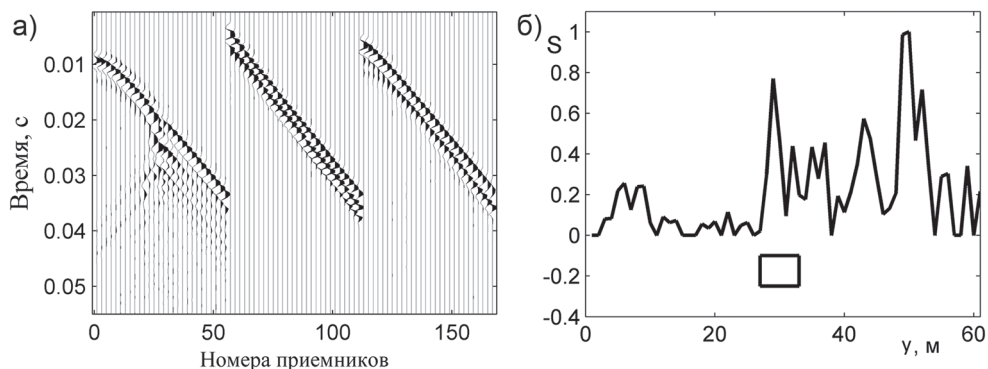


Рис. 5. Синтетическая сейсмограмма для случая, когда приемники расположены на различных поверхностях полости, а источник расположен на противоположной стороне от той, где размещена неоднородность. Первые 61 приемник — на стенке со стороны неоднородности, вторые 61 приемник — на противоположной стороне, последние 61 приемник — на боковой стенке; синтетическая сейсмограмма для различных линий наблюдения (а); результат суммирования рассеянных волн на обратной стороне полости (использовался второй набор из 61 приемника) (б)

Fig. 5. Synthetic seismogram for the case when the receivers are located on different surfaces of the cavity, and the source is located on the opposite side from the one where the inhomogeneity is located. The first 61 receivers are on the wall on the side of the inhomogeneity, the second 61 receivers are on the opposite side, the last 61 receivers are on the side wall; synthetic seismogram for various observation lines (a); the result of the summation of scattered waves on the reverse side of the cavity (the second set of 61 receivers was used) (b)

верхности. При этом источник тоже установим на противоположную поверхность полости. На рис. 5, а приведена синтетическая сейсмограмма для различных линий наблюдения. На первых 61 трассах — данные с приемников, размещенных на стенке рядом с неоднородностью. Как видно, в этом случае рассеянные волны возбуждаются, хотя визуально их энергия значительно ниже,

чем если бы источник размещался на этой же поверхности (можно сравнить с рис. 2, а). На следующих 61 трассах приемники располагались на противоположной стороне вместе с источником, и на последних 61 трассах — на боковой стенке. В двух последних случаях особенностей не наблюдалось. Дополнительная обработка данных с помощью разработанного алгоритма также не при-

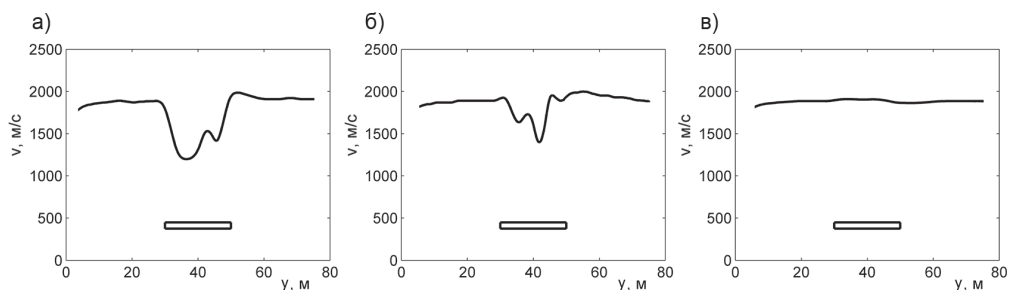


Рис. 6. Фазовая скорость вдоль профиля на частоте 300 Гц при неоднородном включении, расположенном на глубине 1 м (а); 3 м (б); 6 м (в). Длина включения вдоль направления y составляла 20 м, скорость поперечных волн 650 м/с

Fig. 6. Phase velocity along the profile at a frequency of 300 Hz with an inhomogeneous inclusion located at a depth of 1 meter (a); 3 meters (b); 6 meters (v). The inclusion length along the y direction was 20 meters, the speed of transverse waves was 650 m/s

водила к выявлению неоднородности (рис. 5, б).

Таким образом, при использовании поверхностных волн для полноценного поиска аномальных зон в горной породе приемники необходимо располагать на различных поверхностях горной выработки.

Помимо суммирования энергии рассеянных волн для обнаружения неоднородностей возможно также использовать подходы, основанные на анализе скоростных или спектральных характеристик поверхностных волн. Например, на рис. 6 приведены результаты восстановления фазовых скоростей поверхностных волн на частоте 300 Гц. В данном случае использовался алгоритм, основанный на построении и обработки f - k спектра по группе приемников, которые смещались вдоль полости. Для увеличения уровня сигнала и подавления шума дополнительно использовался метод, предложенный в работе [23].

Как видно, при $d = 1$ м над неоднородностью наблюдается снижение фазовой скорости на 37% (рис. 6, а), при 3 м — на 26% (рис. 6, б). В последнем случае при $d = 6$ м особенностей не наблюдалось (рис. 6, в). Подобный метод для поиска аномальных зон вблизи горных выработок возможно выполнять на основе анализа групповых скоростей пробега поверхностных волн, как это, например, предлагается делать в работе [Czarny, 2021]. Кроме этого, авторы дополнительно показывают, что вблизи неоднородностей наблюдаются и изменения в спектральных характеристиках сигналов, что также может быть использовано.

В заключение можно сказать, что методы, приведенные в данной работе, основаны на использовании поверхностных волн, генерируемых активными источниками. Такие подходы аналогичны тем, что используются в наземной ма-

логлубинной сейсморазведке [24–26]. Альтернативным направлением развития может являться развитие методов обнаружения аномальных зон в горной породе, ориентированных на использование поверхностных волн от пассивных сейсмических источников. В этом случае можно также ожидать возникновения рассеянных, отраженных волн, особенностей в сейсмическом поле в областях горных выработок рядом с опасными зонами.

Выводы

В работе была проанализирована возможность использования поверхностных волн для контроля состояния горных пород вблизи подземных сооружений. Построена математическая модель распространения волн в среде, которая содержала полость с близкорасположенной к ней неоднородным включением. На основе данной модели проведены численные эксперименты. Показано, что при наличии особенностей в строении горной породы вблизи поверхности выработки на сейсмограммах наблюдаются рассеянные и отраженные поверхностные волны. Энергия этих волн достаточно быстро уменьшается с увеличением расстояния от неоднородного включения до полости и увеличением скоростных характеристик неоднородности. Предложен алгоритм суммирования энергии рассеянных волн. Показано, что обнаруживать неоднородность возможно в том случае, если она расположена не более чем на 0,6 длины волн от выработки. Также продемонстрировано, что мониторинг состояния горной породы вблизи полости возможно проводить на основе анализа скоростных характеристик поверхностных волн. На синтетических данных показано, что если включение имеет более низкие скоростные параметры, чем основная вмещающая среда, то будет наблюдаться снижение фазовой скорости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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 // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 8. — С. 21–32. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-21-32.
2. 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. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.02.056.
3. Zhang C., Jin G., Liu C., Li S., Xue J., Cheng R., Xinglong W., Zeng X. Prediction of rockbursts in a typical island working face of a coal mine through microseismic monitoring technology // Tunneling and Underground Space Technology. 2021, vol. 113, article 103972. DOI: 10.1016/j.tust.2021.103972.
4. 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.
5. Li L., Tan J., Wood D. A., Zhao Z., Becker D., Lyu Q., 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, pp. 195–210. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.01.026.
6. Разумов Е. Е., Рукавишников Г. Д., Мулев С. Н., Простов С. М. Анализ сейсмической активности массива при ведении горных работ на шахте «Комсомольская» АО «Воркутауголь» // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 1. — С. 104–114. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_104.
7. Азаров А. В., Сердюков А. С. Комплекс программ обработки данных микросейсмического мониторинга разработки месторождений полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 2. — С. 58–71. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_2_0_58.
8. Jiang Z., Li Q., Hu Q., Chen J., Li X., Wang X., Xu Y. Underground microseismic monitoring of a hydraulic fracturing operation for CBM reservoirs in a coal mine // Energy Science Engineering. 2019, vol. 7, no. 3, pp. 986–999. DOI: 10.1002/ese3.329.
10. Злобина Т. В. Влияние ширины и высоты выработки на проявления микросейсмической активности в калийных рудниках // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 8. — С. 136–145. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-136-145.
11. Tzavaras J., Buske S., Groß K., Shapiro S. Three-dimensional seismic imaging of tunnels // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2012, vol. 49, pp. 12–20. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2011.11.010.
12. Дорохин К. А. Обоснование и разработка метода оценки геодинамического состояния массива горных пород на основе дисперсионных параметров сейсмических волн. Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.20. — М.: ИПКОН РАН, 2017. — 24 с.
13. Czarny R., Malinowski M., Chamarczuk M., Ćwiękała M., Olechowski S., Isakow Z., Sierodzki P. 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, vol. 148, article 104937. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.104937.
14. Czarny R., Malinowski M., Ćwiękała M., Olechowski S., Isakow Z., Sierodzki P. Characterisation of the tunnel-channel wave around a coal mine roadway based on synthetic and real data // NSG2020 3rd Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining. 2020, vol. 2020, no. 1, pp. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.202020024.
15. Chen K., Zhang Z., Zhou Y. Application of surface wave in reinforced concrete invert detection // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, vol. 660, no. 1, article 012069. DOI: 10.1088/1755-1315/660/1/012069.
16. Bohlen T., Lorang U., Rabbel W., Müller C., Giese R., Lüth S., Jetschny S. Rayleigh-to-shear wave conversion at the tunnel face – From 3D-FD modeling to ahead-of-drill exploration // Geophysics. 2007, vol. 72, no. 6, pp. T67–T79. DOI: 10.1190/1.2785978.
17. Jetschny S., Bohlen T., De Nil D. On the propagation characteristics of tunnel surface waves for seismic prediction // Geophysical Prospecting. 2010, vol. 58, no. 2, pp. 245–256. DOI: 10.1111/j.1365-2478.2009.00823.x.

18. Jetchny S., Bohlen T., Kurzmann A. Seismic prediction of geological structures ahead of the tunnel using tunnel surface waves // *Geophysical Prospecting*. 2011, vol. 59, no. 5, pp. 934–946. DOI: 10.1111/j.1365-2478.2011.00958.x.
19. Tromp J., Komatitsch D., Liu Q. Spectral-element and adjoint methods in seismology // *Communications in Computational Physics*. 2008, vol. 3, no. 1, pp. 1–32.
20. Peter D., Komatitsch D., Luo Y., Martin R., Le Goff N. Forward and adjoint simulations of seismic wave propagation on fully unstructured hexahedral meshes // *Geophysical Journal International*. 2011, vol. 186, no. 2, pp. 721–739. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2011.05044.x.
21. Hafeez M. B., Krawczuk M. A review: Applications of the spectral finite element method // *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2023, vol. 30, no. 5, pp. 3453–3465. DOI: 10.1007/s11831-023-09911-2.
22. 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 // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. — 2022. — № 6. — С. 3–14. DOI: 10.15372/FTPRPI20220601.
23. Serdyukov A. S., Yablokov A. V., Duchkov A. A., Azarov A. A., Baranov V. D. Slant f-k transform of multichannel seismic surface wave data // *Geophysics*. 2019, vol. 84, no. 1, pp. A19–A24. DOI: 10.1190/geo2018-0430.1.
24. Long M., Trafford A., McGrath T., O'Connor P. Multichannel analysis of surface waves (MASW) for offshore geotechnical investigations // *Engineering Geology*. 2020, vol. 272, article 105649. DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105649.
25. Левин И. С., Пономаренко А. В., Половков В. В., Попов Д. А. О методе поверхностно-волновой томографии и перспективах его применения в инженерной сейсморазведке // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*. — 2022. — Т. 67. — № 2. — С. 202–226. DOI: 10.21638/spbu07.2022.01.
26. Чугаев А. В. Результаты мониторинга потенциально-опасного участка верхнекамского месторождения калийных солей методом многоканального анализа поверхностных волн // *Горное эхо*. — 2021. — № 3. — С. 68–73. DOI:10.7242/echo.2021.3.13. **МАБ**

REFERENCES

1. Gladyr A. V., Kursakin G. A., Rasskazov M. I., Konstantinov A. V. Method to detect hazardous areas in rock mass from seismoacoustic observations. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 8, pp. 21–32. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-21-32.
2. Rasskazov M. I., Gladyr A. V., Tereshkin A. A., Tsoi D. I. Seismoacoustic rock pressure control system at the Mir underground mine. *Problems of Subsoil Use*. 2019, no. 2 (21), pp. 56–61. [In Russ]. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.02.056.
3. Zhang C., Jin G., Liu C., Li S., Xue J., Cheng R., Xinglong W., Zeng X. Prediction of rockbursts in a typical island working face of a coal mine through microseismic monitoring technology. *Tunneling and Underground Space Technology*. 2021, vol. 113, article 103972. DOI: 10.1016/j.tust.2021.103972.
4. Sharapov I. R., Feofilov S. A. Ground passive microseismic monitoring in the study, development and operation of subsoil in the oil and gas and mining industries. *Pribory i sistemy razvedochnoy geofiziki*. 2021, no. 3, pp. 10–19. [In Russ].
5. Li L., Tan J., Wood D. A., Zhao Z., Becker D., Lyu Q., 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, pp. 195–210. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.01.026.
6. Razumov E. E., Rukavishnikov G. D., Mulev S. N., Prostov S. M. Seismic activity in rock mass during mining operations in Vorkutaugol's Komsomolskaya Mine. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 1, pp. 104–114. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_104.
7. Azarov A. V., Serdyukov A. S. Software package for data processing in microseismic monitoring in mineral mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 2, pp. 58–71. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_2_0_58.
8. Jiang Z., Li Q., Hu Q., Chen J., Li X., Wang X., Xu Y. Underground microseismic monitoring of a hydraulic fracturing operation for CBM reservoirs in a coal mine. *Energy Science Engineering*. 2019, vol. 7, no. 3, pp. 986–999. DOI: 10.1002/ese3.329.

10. Zlobina T. V. Influence of width and height of rooms on microseismic activity in potash mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 8, pp. 136 – 145. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-136-145.

11. Tzavaras J., Buske S., Groß K., Shapiro S. Three-dimensional seismic imaging of tunnels. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2012, vol. 49, pp. 12 – 20. DOI: 10.1016/j.ijrmps.2011.11.010.

12. Dorokhin K. A. *Obosnovanie i razrabotka metoda otsenki geodinamicheskogo sostoyaniya mas-siva gornyykh porod na osnove dispersionnykh parametrov seysmicheskikh voln* [Substantiation and development of a method for assessing the geodynamic state of a rock mass based on the dispersion parameters of seismic waves], Candidate's thesis, Moscow, IPKON RAN, 2017, 24 p.

13. Czarny R., Malinowski M., Chamarczuk M., Cwiękała M., Olechowski S., Isakow Z., Sierodzki P. 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, vol. 148, article 104937. DOI: 10.1016/j.ijrmps.2021.104937.

14. Czarny R., Malinowski M., Cwiękała M., Olechowski S., Isakow Z., Sierodzki P. Characterisation of the tunnel-channel wave around a coal mine roadway based on synthetic and real data. *NSG2020 3rd Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining*. 2020, vol. 2020, no. 1, pp. 1 – 5. DOI: 10.3997/2214-4609.202020024.

15. Chen K., Zhang S., Zhou Y. Application of surface wave in reinforced concrete invert detection. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 660, no. 1, article 012069. DOI: 10.1088/1755-1315/660/1/012069.

16. Bohlen T., Lorang U., Rabbel W., Müller C., Giese R., Lüth S., Jetschny S. Rayleigh-to-shear wave conversion at the tunnel face – From 3D-FD modeling to ahead-of-drill exploration. *Geophysics*. 2007, vol. 72, no. 6, pp. T67 – T79. DOI: 10.1190/1.2785978.

17. Jetschny S., Bohlen T., De Nil D. On the propagation characteristics of tunnel surface waves for seismic prediction. *Geophysical Prospecting*. 2010, vol. 58, no. 2, pp. 245 – 256. DOI: 10.1111/j.1365-2478.2009.00823.x.

18. Jetschny S., Bohlen T., Kurzman A. Seismic prediction of geological structures ahead of the tunnel using tunnel surface waves. *Geophysical Prospecting*. 2011, vol. 59, no. 5, pp. 934 – 946. DOI: 10.1111/j.1365-2478.2011.00958.x.

19. Tromp J., Komatitsch D., Liu Q. Spectral-element and adjoint methods in seismology. *Communications in Computational Physics*. 2008, vol. 3, no. 1, pp. 1 – 32.

20. Peter D., Komatitsch D., Luo Y., Martin R., Le Goff N. Forward and adjoint simulations of seismic wave propagation on fully unstructured hexahedral meshes. *Geophysical Journal International*. 2011, vol. 186, no. 2, pp. 721 – 739. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2011.05044.x.

21. Hafeez M. B., Krawczuk M. A review: Applications of the spectral finite element method. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2023, vol. 30, no. 5, pp. 3453 – 3465. DOI: 10.1007/s11831-023-09911-2.

22. Kurlenya M. V., Skazka V. V., Azarov A. V., Serdyukov A. S., Patutin A. V. Using surface waves for monitoring rock mass condition around underground openings and structures. *Fiziko-tekhnicheskiiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2022, no. 6, pp. 3 – 14. [In Russ]. DOI: 10.15372/FT-PRP120220601.

23. Serdyukov A. S., Yablokov A. V., Duchkov A. A., Azarov A. A., Baranov V. D. Slant f-k transform of multichannel seismic surface wave data. *Geophysics*. 2019, vol. 84, no. 1, pp. A19 – A24. DOI: 10.1190/geo2018-0430.1.

24. Long M., Trafford A., McGrath T., O'Connor P. Multichannel analysis of surface waves (MASW) for offshore geotechnical investigations. *Engineering Geology*. 2020, vol. 272, article 105649. DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105649.

25. Levin I. S., Ponomarenko A. V., Polovkov V. V., Popov D. A. On the method of surface-wave tomography and perspectives for its application in engineering seismic exploration. *Vestnik of Saint-Petersburg University. Earth Sciences*. 2022, vol. 67, no. 2, pp. 202 – 226. [In Russ]. DOI: 10.21638/spbu07.2022.201.

26. Chugaev A. V. Results of monitoring of a potentially hazardous area of the Verkhnekamsk potassium salt deposit using the method of multichannel analysis of surface waves. *Gornoe ekho*. 2021, no. 3, pp. 68 – 73. [In Russ]. DOI: 10.7242/echo.2021.3.13.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Азаров Антон Витальевич¹ — научный сотрудник,

e-mail: antonazv@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0001-6967-4239,

Сердюков Александр Сергеевич¹ — канд. физ.-мат. наук,

старший научный сотрудник,

e-mail: aleksanderserdyukov@ya.ru,

ORCID ID: 0000-0035-8563-5708,

Сказка Валерий Всеволодович¹ — д-р физ.-мат. наук,

ведущий научный сотрудник,

e-mail: vskazka@gmail.com,

¹ Институт горного дела им. Н.А. Чинакала

Сибирского отделения РАН.

Для контактов: Азаров А.В., e-mail: antonazv@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A. V. Azarov¹, Researcher,

e-mail: antonazv@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0001-6967-4239,

A.S. Serdyukov¹, Cand. Sci. (Phys. Mathem.),

Senior Researcher,

e-mail: aleksanderserdyukov@ya.ru,

ORCID ID: 0000-0035-8563-5708,

V.V. Skazka¹, Dr. Sci. (Phys. Mathem.),

Leading Researcher,

e-mail: vskazka@gmail.com,

¹ Chinakal Institute of Mining

of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,

630091, Novosibirsk, Russia.

Corresponding author: A.V. Azarov, e-mail: antonazv@mail.ru.

Получена редакцией 10.08.2023; получена после рецензии 05.10.2023; принята к печати 10.03.2024.

Received by the editors 10.08.2023; received after the review 05.10.2023; accepted for printing 10.03.2024.



ОТ РЕДАКЦИИ

В Горном информационно-аналитическом бюллетене № 11-1, 2023 на с. 292 в названии статьи допущена техническая ошибка:

№ стр.	Опубликовано	Должно быть
292	К вопросу мониторинга трещинообразования в природно-технических системах при сдвигении земной поверхности	К вопросу мониторинга трещинообразования в природно-технических системах при сдвигении земной поверхности