

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.01 + 550.344.5

ЛОКАЦИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ОКРЕСТНОСТИ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ ПО ФАЗОВОЙ СКОРОСТИ ПОВЕРХНОСТНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ

В. В. Сказка, М. В. Курлена, А. В. Азаров, А. С. Сердюков

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: vskazka@gmail.com, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Представлен один из методов обнаружения и контроля параметров низкоскоростных породных включений в окрестностях туннелей и выработок, использующий рассчитанные фазовые скорости поверхностных волн. В качестве исходных данных взяты синтетические сейсмограммы, полученные путем численного моделирования распространения сейсмических волн вдоль горной выработки в радиально-симметричной постановке. Показано, что перекрытие низкоскоростного включения слоем пород с повышенной скоростью сейсмических волн не препятствует его локализации предложенным способом. На основе наблюдения фазовых скоростей распространения поверхностных сейсмических волн возможно оценивать состояние массива горных пород в окрестности подземных сооружений, что является значимым результатом с практической точки зрения.

Породный массив, сейсмический мониторинг, горная выработка, туннель, контроль состояния горных пород, поверхностные волны, фазовые скорости распространения

DOI: 10.15372/FTPRPI20240501

EDN: ZJUIGC

В [1] рассмотрены вопросы математического моделирования распространения поверхностных волн вдоль протяженных горных выработок, показана возможность восстановления упругих свойств однородной среды по дисперсионным кривым фазовых скоростей поверхностных волн вдоль выработок круглого и квадратного сечений.

Практический интерес представляет поиск и контроль скоростных аномалий в неоднородном породном массиве [2, 3], особенно когда они не выходят на свободную поверхность выработки и не могут быть обнаружены геологической съемкой [4–6]. Это встречается при использовании искусственных оболочек в туннелях, при наличии слоя частично разрушенных проходкой пород, маскирующих место пересечения выработкой дизъюнктивных нарушений, при формировании вокруг выработки в условиях высокого горного давления кольцеобразных зон дезинтеграции [7].

В настоящей работе приведены результаты численных исследований для установления возможности поисков различных видов скоростных породных аномалий по фазовым скоростям поверхностных волн, регистрируемых линейной системой сейсмических наблюдений.

В основе математического моделирования распространения поверхностных волн вне цилиндрической полости лежат классические работы о колебаниях длинных стержней, колебание стенок скважины рассматривалось Био [8, 9]. В дальнейшем различные аспекты распространения поверхностных волн в скважинах и цилиндрических полостях представлены в [10–18].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Возьмем область радиально симметричной среды $\{r > r_0, 0 \leq \varphi < 2\pi, -\infty < z < \infty\}$, где z — ось цилиндрической системы координат (r, φ, z) , направленная вдоль оси цилиндрической полости радиусом $r_0 = 2.5$ м. Рассмотрим систему уравнений теории упругости в радиально симметричной постановке [8]:

$$\frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2} = V_p^2 \frac{\partial \Delta}{\partial r} + V_s^2 \frac{\partial \omega_\varphi}{\partial z}, \quad \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = V_p^2 \frac{\partial \Delta}{\partial z} - \frac{V_s^2}{r} \frac{\partial(r\omega_\varphi)}{\partial r}, \quad (1)$$

где u_r, u_z — компоненты вектора смещений $\vec{u} = (u_r, u_\varphi, u_z)$; t — время;

$$\begin{aligned} \Delta &= \operatorname{div} \vec{u} = \frac{1}{r} \frac{\partial(ru_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial u_z}{\partial z}; \\ \omega &= \operatorname{rot} \vec{u} = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial u_\varphi}{\partial z}, \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial r}, \frac{1}{r} \frac{\partial(ru_\varphi)}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \varphi} \right); \\ \Delta &= \frac{1}{r} \frac{\partial(ru_r)}{\partial r} + \frac{\partial u_z}{\partial z}, \quad \omega_\varphi = \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial r}; \end{aligned} \quad (2)$$

V_p, V_s — скорости распространения продольных и поперечных волн.

Рассмотрим распространение поверхностных волн Рэлея в радиально слоистой среде, свойства которой не зависят от переменной z . Параметры среды постоянны внутри слоев $r_{i-1} < r < r_i$, $i = 1, \dots, n$, $r > r_n$ (n — количество слоев). На границах $r = r_i$ непрерывны смещения u_r, u_z и нормальные напряжения

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \rho(V_p^2 - 2V_s^2)\Delta + 2V_s^2 \frac{\partial u_r}{\partial r}, \\ \tau_{rz} &= \rho V_s^2 \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Поверхностные волны в такой среде будем искать в виде

$$u_r = U(r) \cos(kz - \omega t), \quad u_z = W(r) \sin(kz - \omega t). \quad (4)$$

Подставив (4) в (1)–(3), получим систему двух обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка с кусочно-постоянными коэффициентами. На границах r_i ($i = 1, \dots, n$) требуется выполнение условий непрерывности U, W , а также σ_r, τ_{rz} . При $r = r_0$ на границе цилиндрической полости задаются краевые условия. Найдем такие U, W , что

$$\int_{r_0}^{\infty} U^2(r) + W^2(r) dr < \infty. \quad (5)$$

Известно, что при любых частотах ω , начиная с $\omega_0 > 0$, имеется конечное количество чисел $k = k^1(\omega), \dots, k^{m(\omega)}(\omega)$, $k^1 > k^2 > \dots > k^m$, при которых существует нетривиальное решение системы дифференциальных уравнений, удовлетворяющее всем ограничениям. После подстановки решения U, W в (4) получим искомые выражения для поверхностных волн. Решение при $k = k^1$ называется главной (основной) модой поверхностных волн. На практике замеряют именно скорость этой моды. Соответствующее число

$$V_f(\omega) = \frac{\omega}{k^1(\omega)} \quad (6)$$

является ее фазовой скоростью на частоте ω .

Определение фазовых скоростей по сейсмограммам заключается в следующем. Пусть импульсный источник, возбуждающий поверхностные волны, располагается в точке с координатами (r_0, z_0) , а приемники — в точках с (r_0, z_i) , $i = 1, \dots, n$. Причем $z_{i+1} > z_i$, $i = 0, \dots, n$ и $z_{i+1} - z_i = \Delta z$, $i = 1, \dots, n$. Считаем, что регистрируется компонента $u_r(r_0, z_j, t) \equiv f_j(t)$ волнового поля. Обозначим через $\hat{f}_j(\omega)$ — преобразование Фурье функций $f_j(t)$. Если волновое поле представляет собой плоскую поверхностную волну типа (4), то $\hat{f}_j(\omega) / \hat{f}_{j+1}(\omega) = \exp(ik(\omega)\Delta z)$. Тем самым получаем волновое число

$$k(\omega) = k_j(\omega) \equiv \ln \left(\frac{\hat{f}_j(\omega)}{\hat{f}_{j+1}(\omega)} \right) \frac{1}{i\Delta z}. \quad (7)$$

Заметим, что в среде, неоднородной вдоль оси z , плоских волн нет. Сейсмограмма будет далека от той, которая была бы при прохождении плоской волны. При наличии цуга плоских волн с волновыми числами $k = k^i$, их можно было бы разделить, например, методом Прони [19]. Однако в среде с локальными скоростными аномалиями вдоль выработки плоских волн нет и этот метод неприменим.

Цель состоит не в том, чтобы точно определить фазовую скорость проходящей поверхностной волны типа Рэлея, которая к тому же еще полностью не сформировалась, а фазовую скорость некоторой гипотетической поверхностной волны, которая могла бы проходить через точку наблюдения в однородной по z среде и ее строение совпадало со скоростным разрезом по r под конкретной точкой наблюдения. Нужно понять, насколько эта процедура чувствительна к неоднородностям среды вдоль оси z .

Исходим из того, что $k_j(\omega)$ формируются под влиянием среды в небольшой окрестности точки наблюдения. Остальную часть можно рассматривать как помехи определения $\hat{f}_j(\omega)$, чувствительные к предыстории прохождения волнового поля. Для нахождения фазовой скорости гипотетической поверхностной волны зададим ее в виде сплайна, используя процедуру минимизации:

$$\sum_{m=-m_0}^{m_0} \sum_{l=1}^L P \left(\frac{\omega_l}{k_j(\omega_l)}, \omega_l \right) \left(\frac{\omega_l}{k_{j+m}(\omega_l)} - Q(\omega_l) \right)^2 \rightarrow \min, \quad (8)$$

где $P(V, \omega)$ — весовая функция; $Q(\omega)$ — кубический сплайн, коэффициенты которого подлежат определению при минимизации данного функционала; ω_l — некоторый набор частот;

m_0 — число приемников влево и вправо от заданной точки приема, по которым выполняется усреднение (отрезок по z равен $(2m_0 + 1)\Delta z$). Функции k_j определены в (7). Интерес представляют средние фазовые скорости, полученные при усреднении и минимизации $Q(\omega)$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Пусть расстояние между приемниками 0.2 м, плотность среды постоянна, отличаются только скорости продольных V_p и поперечных V_s объемных волн (их значения указываются на схематических изображениях рассматриваемых моделей среды). Тип источника — направленная сила, приложенная к точке в направлении нормальном к поверхности цилиндрической полости. Сигнал в источнике имеет форму импульса Риккера с несущей частотой 400 Гц. Динамическая задача теории упругости решалась с использованием программного пакета SPECFEM2D. Для нахождения фазовой скорости с помощью (8) выбраны такие параметры. Рассматривались частоты с 200 по 600 Гц с шагом 1 Гц. Весовая функция $P(V, \omega)$ строилась следующим образом. На соответствующих частотах вычислялись фазовые скорости в однородных средах со скоростями $V_s = 300$ и 3000 м/с, $V_p = \sqrt{3}V_s$. Если фазовая скорость, найденная по (7), (6), попадает в интервал рассчитанных скоростей при соответствующих частотах, то полагалось $P(V, \omega) = 1$. Иначе $P(V, \omega) = 0$.

Модель среды с одним низкоскоростным породным включением (модель I). На рис. 1 представлена модель среды с одним низкоскоростным включением, в которой рассчитывалось полное волновое поле и синтетическая сейсмограмма.

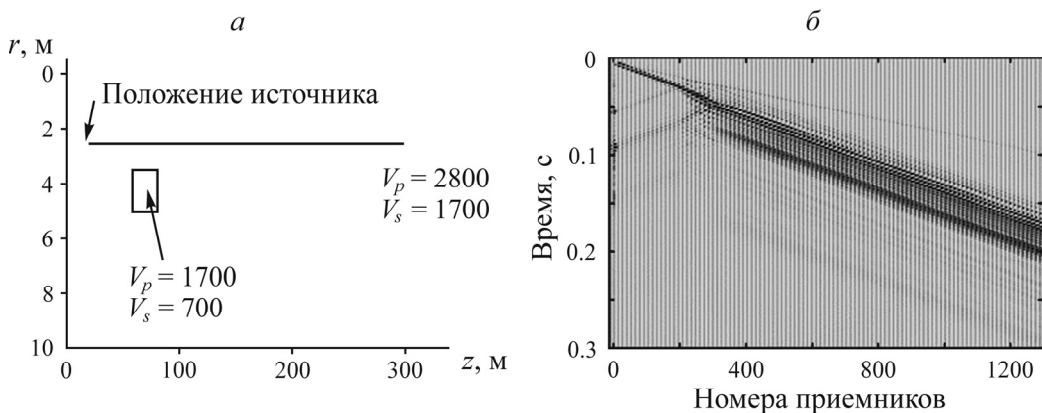


Рис. 1. Модель среды с одним низкоскоростным включением (а) и синтетическая сейсмограмма (б)

Результаты обработки сейсмограммы представлены на рис. 2. На них и для других рассматриваемых моделей под модельной скоростью понималось следующее. В каждой точке наблюдений z_j брался разрез среды вдоль r и вычислялась фазовая скорость V_f плоской поверхности волн на заданной частоте, которая распространяется в однородной по z среде, строение которой соответствует этому разрезу. Величина m_0 показывает сколько точек для усреднения по оси z берется в (8). При $m_0 = 0$ усреднение отсутствует, при $m_0 = 5$ происходит усреднение по отрезку длиной 2.2 м, при $m_0 = 25$ — 11.0 м. На рис. 2в приведены криевые без усреднения вблизи низкоскоростного включения. Видно, что имеется занижение фазовой скорости перед включением со стороны источника. Оно обусловлено отраженными от включения волнами (рис. 1б). Границы включения по оси z определяются четко.

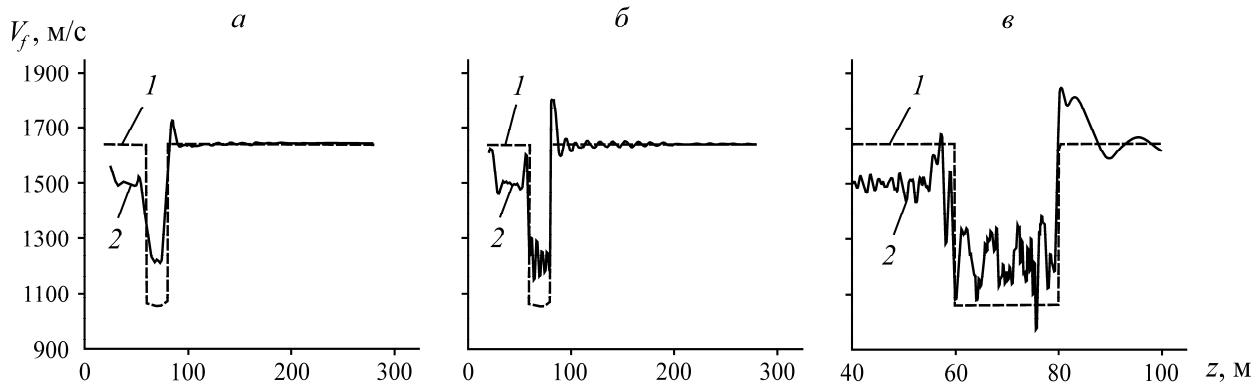


Рис. 2. Фазовые скорости распространения поверхностных волн вдоль выработки на частоте 400 Гц при одном низкоскоростном включении — модельная (1) и полученная при обработке синтетической сейсмограммы (2) с усреднением $m_0 = 25$ (а), $m_0 = 5$ (б) и без него (в)

Над включением фазовая скорость определяется достаточно точно (погрешность 10 %) несмотря на то, что заведомо поверхностных плоских волн там нет. Низкоскоростное включение выступает в роли волновой ловушки и вторичного, достаточно мощного излучателя.

Модель среды с тремя низкоскоростными включениями (модель 2). На рис. 3 представлена модель среды с тремя близкорасположенными низкоскоростными включениями и рассчитанная для нее синтетическая сейсмограмма.

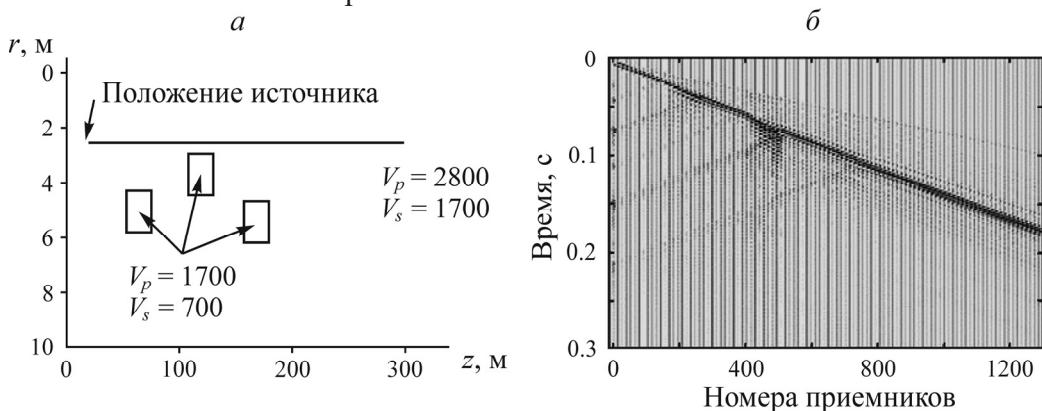


Рис. 3. Модель среды с тремя низкоскоростными включениями (а) и синтетическая сейсмограмма (б)

На рис. 4 приведены результаты обработки сейсмограммы, показанной на рис. 3б.

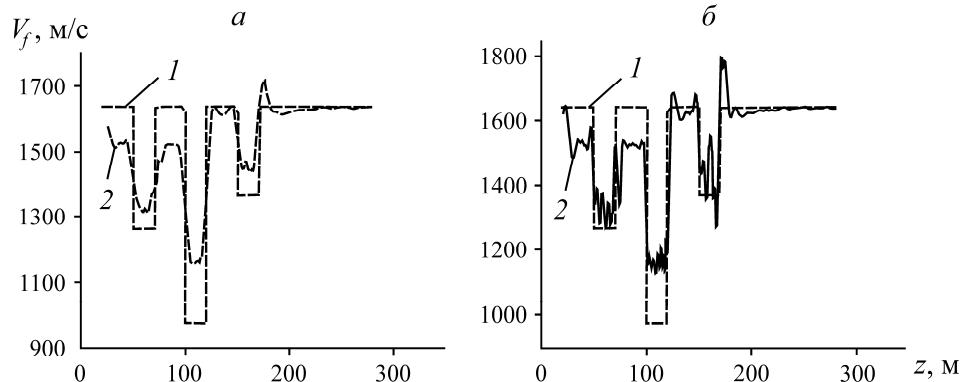


Рис. 4. Фазовые скорости распространения поверхностных волн вдоль выработки на частоте 400 Гц при трех низкоскоростных включениях — модельная (1) и полученная при обработке синтетической сейсмограммы (2) с усреднением $m_0 = 25$ (а) и $m_0 = 5$ (б)

Несмотря на то, что в модели 2 результаты получились несколько хуже, что естественно, так как поверхностным волнам типа Рэлея негде сформироваться, границы включений восстановились достаточно точно. На рис. 5 приведены фазовые скорости на коротких участках профиля в окрестности крайних включений модели 2 (правое и левое включение на рис. 3а) без усреднения по z . Видно, что с приближением включения к выработке разница между скоростью поверхности волны и скоростью поперечных волн в аномалии уменьшается, при этом погрешность определения скорости поверхности волны возрастает.

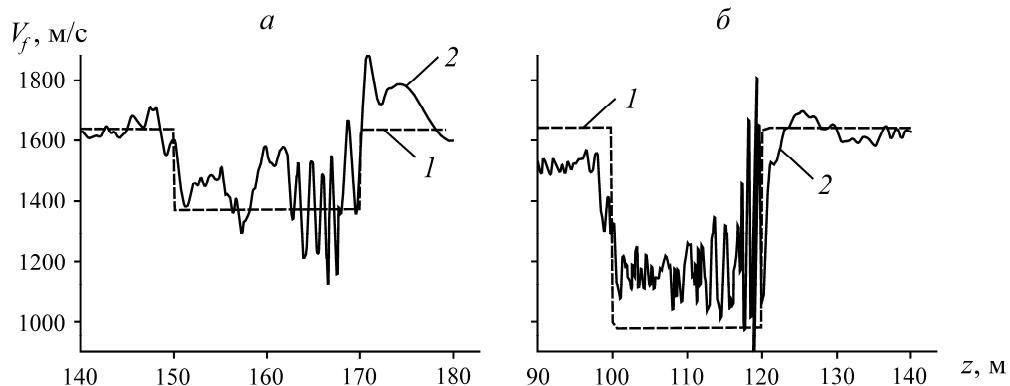


Рис. 5. Фазовые скорости распространения поверхностных волн на частоте 400 Гц в окрестности крайнего правового (а) и крайнего левого (б) из трех низкоскоростных включений модели 2 — модельная (1) и полученная при обработке сейсмограммы (2) без усреднения

Модель среды с низкоскоростным клиновидным расширением низкоскоростного слоя (модель 3). Рассматриваемое низкоскоростное включение имеет гладкие границы, менее контрастно по упругим свойствам со средой, чем в предыдущих моделях. Его форма показана на рис. 6а. Оно соответствует участку нарушенных проходкой пород в месте пересечения выработкой непрочного слоя, дизъюнктивного нарушения.

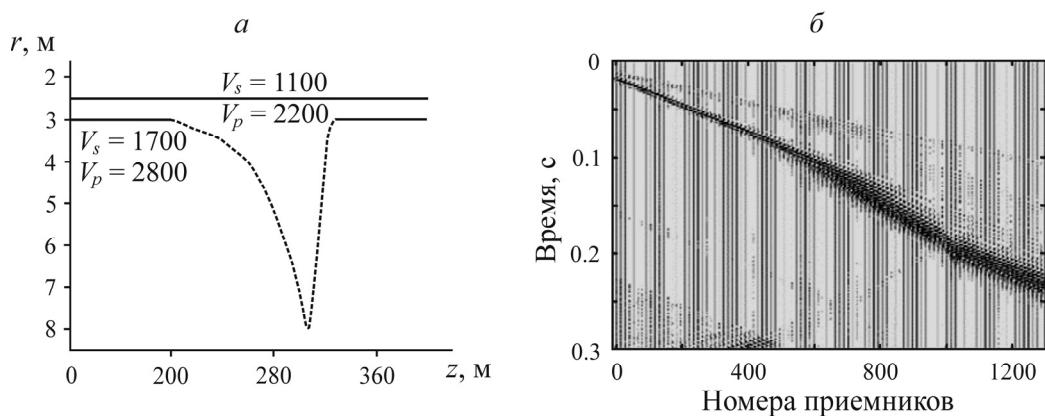


Рис. 6. Модель среды с клиновидным расширением низкоскоростного слоя вокруг выработки в месте ее проходки через ослабленные породы (а) и синтетическая сейсмограмма (б)

На рис. 7а, б приведены результаты обработки сейсмограммы, показанной на рис. 6б при разном усреднении по z . Несмотря на клиновидную форму включения и обусловленное ею изменение мощности аномалии вдоль профиля z , конфигурация включения и фазовые скорости восстанавливаются достаточно точно. На рис. 7в показаны результаты восстановления скорости поверхностных волн без усреднения по оси z .

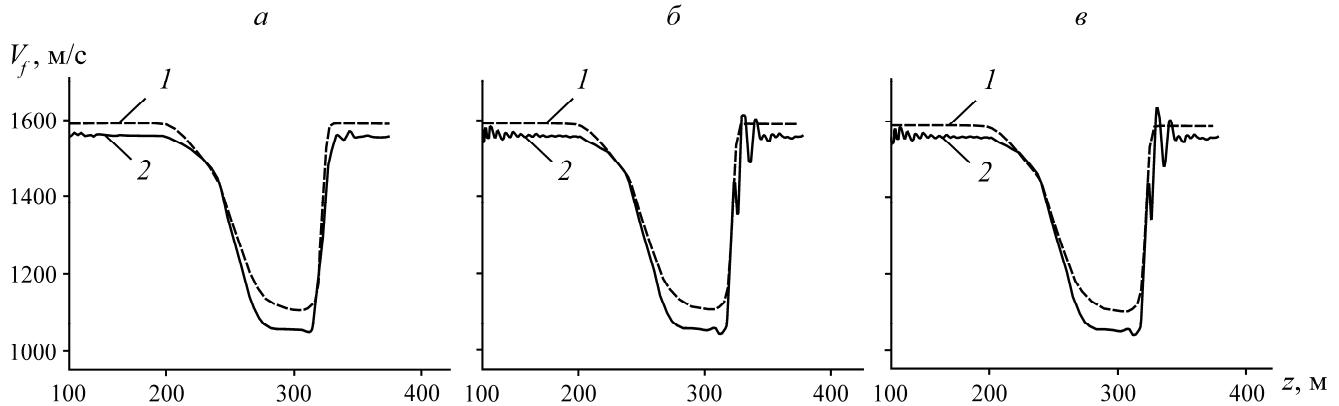


Рис. 7. Фазовые скорости распространения поверхностных волн вдоль выработки на частоте 400 Гц при локальном клиновидном расширении низкоскоростного слоя — модельная (1) и полученная при обработке синтетической сейсмограммы (2) с усреднением $m_0 = 25$ (а), $m_0 = 5$ (б) и без него (в)

Полученные значения немного меньше скорости поперечных волн в материале включения. В рассматриваемой модели эту скорость можно оценить по результатам наблюдений. В отличие от моделей 1, 2, влияние параметра усреднения m_0 менее заметно.

Модель среды с низкоскоростным клиновидным включением без выхода на поверхность выработки (модель 4). Данная модель аналогична модели 3, но низкоскоростное включение не имеет выхода на поверхность выработки, т. е. перекрыто высокоскоростным слоем (рис. 8а). Расчетная сейсмограмма приведена на рис. 8б.

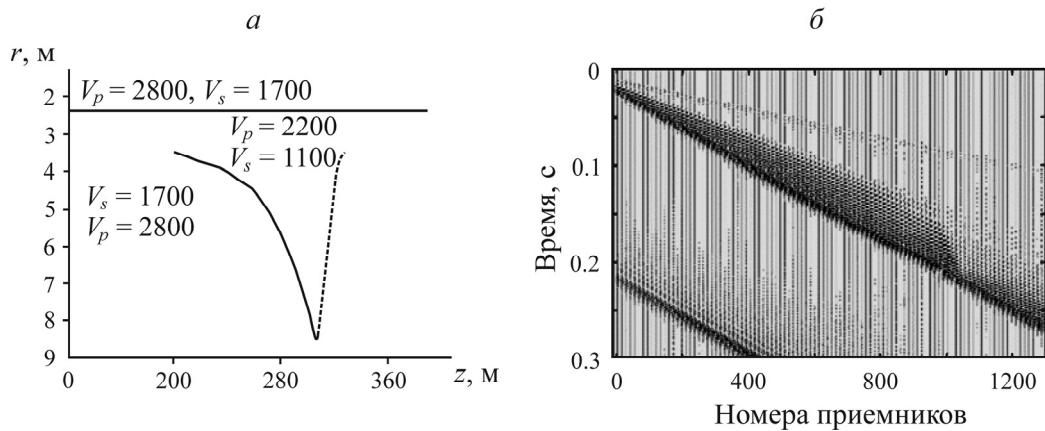


Рис. 8. Модель среды с клиновидным низкоскоростным включением, перекрытым высокоскоростным слоем (а), и синтетическая сейсмограмма (б)

На рис. 9 приведены результаты обработки сейсмограммы, показанной на рис. 8б, при разном усреднении по z . Несмотря на перекрытие низкоскоростного включения породы слоем с более высокой скоростью, получаемые результаты близки к модели 3. Перекрытие слоем с повышенной скоростью распространения сейсмических волн не повлияло на качественный вид результата.

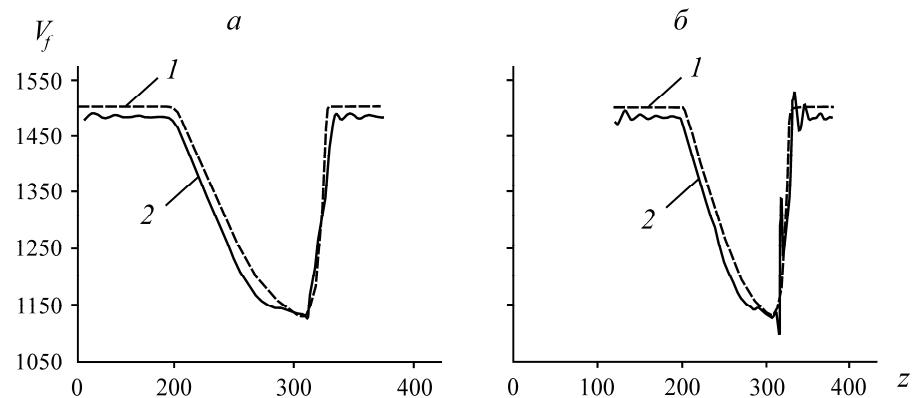


Рис. 9. Фазовые скорости распространения поверхностных волн вдоль выработки на частоте 400 Гц при локальном клиновидном низкоскоростном включении, перекрытом высокоскоростным слоем, — модельная (1) и полученная при обработке синтетической сейсмограммы (2) с усреднением $m_0 = 25$ (а) и $m_0 = 5$ (б)

В итоге можно сделать вывод, что вычисление фазовых характеристик гипотетических поверхностных волн по наблюдаемым сейсмограммам является вполне устойчивой процедурой. Она достаточно чувствительна к определению конфигурации скоростных аномалий (включений) вдоль выработки, туннеля. Можно предположить, что использование сейсмограмм с различным местоположением источника позволит повысить точность определения низкоскоростных породных включений и их свойств.

ВЫВОДЫ

Обоснована возможность использования наблюдений за фазовыми скоростями поверхностных волн, распространяющихся вдоль горных выработок, для обнаружения в их окрестностях низкоскоростных включений породы, контроля свойств скоростных аномалий. Показано, что перекрытие низкоскоростного включения слоем пород с повышенной скоростью распространения волн не препятствует его локализации предложенным способом. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности наблюдений за фазовыми скоростями распространением поверхностных волн для контроля состояния породного массива вокруг горных выработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. 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.
3. Yu Yong Jiao, Hunan Tian, Yun-Zhen Liu, Ru-Wu Mei, and Hai-Bo Li. Prediction of tunneling hazardous geological zones using the active seismic approach, Near Surface Geoph., 2015, Vol. 13, No. 4. — P. 333–342.

4. **Xinji Xu, Panlong Zhang, Xu Guo, and Bin Liu.** A case study of seismic forward prospecting based on the tunnel seismic while drilling and active seismic methods, *Bul. Eng. Geol. Env.*, 2021, Vol. 80, No. 5. — P. 3553–3567.
5. **Курлена 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.
6. **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.
7. **Открытие № 400 СССР.** Явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок / Е. И. Шемякин, М. В. Курлена, В. Н. Опарин, В. Н. Рева, Ф. П. Глушкин, М. А. Розенбаум // Опубл. в БИ. — 1992. — № 1.
8. **Сneddon I., Бэрри Д.** Классическая теория упругости. — М.: Физматгиз, 1961. — 220 с.
9. **Maurice A.** Biot. Propagation of elastic waves in a cylindrical bore containing a fluid, *J. Appl. Physics*, American Institute of Physics, 1952, Vol. 23, No. 9. — P. 997–1005.
10. **Ellefse K. J., Cheng C. H., and Toksöz M. N.** Elastic wave propagation along a borehole in an anisotropic medium, *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, Soc. Expl. Geoph., 1990. — P. 14–17.
11. **Boström A. and Burden A.** Propagation of elastic surface waves along a cylindrical cavity and their excitation by a point force, *J. Acoustical Soc. Am.*, 1982, Vol. 72, No. 3. — P. 998–1004.
12. **Петрашень Г. И., Молотков Л. А., Крауклис П. В.** Волны в слоисто-однородных изотропных упругих средах. — Л.: Наука, 1985. — 303 с.
13. **Kaufman A. A., Levshin A., and Larner K. N.** Acoustic and elastic wave fields in geophysics, 2002. — 663 p.
14. **Kaufman A. and Levshin A. L.** Acoustic and elastic wave fields in geophysics, Elsevier, Amsterdam, 2005. — 652 p.
15. **White J. E.** Methods in geochemistry and geophysics (V18) underground sound: application of seismic waves, Elsevier, 1983. — 253 p.
16. **Кузнецов О. Л., Крутин В. Н., Кит К. И.** Физические основы акустического импедансного каротажа, основанного на возбуждении изгибных волн в скважине // Геология и геофизика. — 1989. — № 9. — С. 112–117.
17. **Stilke G.** On elastic surface waves at a cylindrical hole in an infinite solid, *Geoph. Prospecting*, 1959, Vol. 7, No. 3. — P. 273–286.
18. **Essen K., Bohlen T., Friederich W., and Meier T.** Modelling of Rayleigh-type seam waves in disturbed coal seams and around a coal mine roadway, *Geoph. J. Int.*, 2007, Vol. 170, No. 2. — P. 511–526.
19. **Марпл-мл. С. Л.** Цифровой спектральный анализ и его приложения. — М.: Мир, 1990. — 584 с.

*Поступила в редакцию 23/VII 2024
После доработки 16/IX 2024
Принята к публикации 24/IX 2024*