РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

2022 № 6

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.01 + 550.344.5

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ПОРОД ВОКРУГ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК И СООРУЖЕНИЙ

М. В. Курленя[1], В. В. Сказка[1,2,3], А. В. Азаров[1], А. С. Сердюков[1,4], А. В. Патутин[1]

[1]*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,*
E-mail: vskazka@gmail.com, *Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*
[2]*Институт математики им. С. Л. Соболева,*
просп. Академика Коптюга, 4, 630090, г. Новосибирск, Россия
[3]*Новосибирский государственный университет,*
ул. Пирогова, 2, 630090, г. Новосибирск, Россия
[4]*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,*
просп. Академика Коптюга, 3, 630090, г. Новосибирск, Россия

Рассмотрена возможность использования фазовых характеристик поверхностных волн для мониторинга состояния подземных выработок и тоннелей. Приведена математическая модель распространения поверхностных волн вдоль протяженных полостей. Проанализированы свойства получаемых на ее основе численных решений, включая частотные и амплитудные характеристики, фазовые и групповые скорости волн. Показана возможность восстановления упругих свойств среды по дисперсионным кривым фазовых скоростей. Представлены результаты численного моделирования поверхностных волн вдоль полостей различной геометрической формы с помощью метода конечных спектральных элементов. Изучены результаты расчетов осесимметричной и трехмерной задач распространения поверхностных волн вдоль полостей.

Сейсмический мониторинг, подземные сооружения, тоннели, поверхностные волны, контроль состояния горных пород, фазовые характеристики поверхностных волн

DOI: 10.15372/FTPRPI20220601

Одна из важнейших задач при проходке подземных выработок и тоннелей — обеспечение безопасности горных работ. Проектирование таких объектов основано на результатах инженерно-геологической съемки, данных геолого-геофизических исследований разведочных скважин, пробуренных в пределах участка строительства. Зачастую пространственного разрешения этих данных недостаточно для восстановления строения геологической среды, определения в ней областей с повышенной трещиноватостью, разломами, высокой вероятно-

Исследование выполнено в рамках госзадания (проект № 0256-2021-0001, шифр темы FWNZ-2021-0001).

сти интенсивных водопроявлений. Другая актуальная задача — определение расстояния до опасных для проходки участков. Для их локации используются различные геофизические методы, в частности основанные на возбуждении и регистрации сейсмических колебаний.

Несмотря на то, что в большинстве предлагаемых подходов применяются объемные сейсмические волны [1 – 5], определенный интерес вызывают поверхностные волны, распространяющиеся вблизи границ с большой разницей упругих свойств, например вдоль стенок выработки или тоннеля. Чаще всего они рассматриваются в качестве волн-помех, хотя переносят до 75 % общей энергии волнового пакета [6]. При ошибках в планировании буровзрывных работ эти волны могут вызвать разрушение подземных сооружений [7]. К преимуществам сейсмических наблюдений с использованием поверхностных волн относятся высокая амплитуда сигнала и ее малое затухание в процессе распространения, а также возможность установки сейсмоприемников без бурения глубоких шпуров.

Известны исследования, в которых показана перспективность указанного подхода. В [8] описаны результаты сейсмоакустического контроля степени разжижения грунтов вокруг участка тоннеля петербургского метрополитена. На протяжении шести лет с полугодовым интервалом измерялись средние скорости поверхностных волн. Выявлено их снижение в окрестности тоннеля на 12.8 %, что говорит об изменении физико-механических характеристик вмещающих грунтов. В [9] на основе многоканальной обработки волн Рэлея решалась задача контроля толщины железобетона в оболочке тоннеля. Предлагаемый метод позволяет восстанавливать скорости поперечных волн в каждом слое оболочки и оценивать их толщину. В [10, 11] предложен и апробирован способ локации опасных участков впереди фронта проходческих работ, основанный на генерации объемных волн на торце тоннеля при отражении от него поверхностной волны и использовании возникших объемных волн для изучения среды перед тоннелем. В [12, 13] подчеркивается важность учета состояния пород вокруг выработки, поскольку при ее проходке формируется зона техногенных нарушений. В [13] для мониторинга этой зоны предлагается использовать поверхностные волны (поверхностные волны, распространяющиеся вдоль тоннеля). По результатам численных и полевых экспериментов установлено, что изменение состоянии массива горных пород вблизи выработок влияет на групповую скорость и спектральный состав регистрируемых упругих колебаний.

При теоретических исследованиях характеристик поверхностных волн, распространяющихся вдоль полостей, в бóльшей части рассматривается цилиндрическая полость, расположенная в упругой среде. Математическое моделирование распространения волн по поверхности полости основано на работах, изучающих радиально-симметричные колебания длинных стержней и стенок скважин, заполненных жидкостью [14, 15]. В [16] показана возможность существования различных типов поверхностных волн в случае полости, заполненной жидкостью (трубная волна, псевдорэлеевская волна, изгибная волна, винтовая волна). В [17] построены дисперсионные кривые для колебаний цилиндрической полости, возбуждаемых точечной силой, расположенной вблизи полости.

В целом известные теоретические исследования показывают, что фазовые и групповые скорости поверхностных волн зависят от соотношения между длиной волны и радиусом цилиндрической полости. Возможно существование многочисленных мод различных типов волн, но большинство быстро затухают из-за высокочастотного характера колебаний, и их нельзя использовать для мониторинга.

Вопросы распространения различных типов волн в скважинах и интерпретации их наблюдений описаны в [18–21]. В [22] для выполнения акустического каротажа используются изгибные волны. В [23] изучено влияние поверхностных волн вдоль цилиндрической полости на результаты сейсмических наблюдений в шахте.

В более поздних исследованиях для изучения распространения таких волн применяются численные методы [24–26]. В [24] расчеты проводились для варианта раздвоенной выработки и выработки, пересекающей разлом. Наряду с канальными волнами, образующимися преимущественно в пласте, свойства которого значительно отличаются от вмещающих пород (например, в угольном), происходит возбуждение интенсивных поверхностных волн. Отмечается, что канальные волны поляризованы в вертикальной плоскости, поверхностные — в поперечной. В случае выхода такого пласта в горную выработку для успешного разделения волн необходимо использовать трехкомпонентные сейсмоприемники. Свойства волны (скорость распространения, траектории смещения частиц), распространяющейся вдоль поверхности, зависит от отношения ее длины к диаметру тоннеля. При увеличении этого отношения волна больше похожа на поперечную объемную волну, при уменьшении — на волну Рэлея. В [26] даны рекомендации по выбору источника для возбуждения поверхностных волн в тоннелях: при диаметре тоннеля 10 м и скорости распространения поперечных волн $V_S = 800$ м/с частота источника должна быть > 120 Гц, в твердых породах, где $V_S = 3100$ м/с, частота генерируемых источником колебаний должна превышать 450 Гц.

В настоящей работе рассматриваются возможности использования фазовых характеристик поверхностных волн для мониторинга состояния подземных выработок и тоннелей. Приводится математическая модель распространения поверхностных волн вдоль полости, на ее основе показана возможность существования таких волн, анализируются их свойства. Даны результаты численного моделирования поверхностных волн вдоль полости в осесимметричной и трехмерной постановках задачи на основе спектрального метода конечных элементов.

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИЗУЧЕНИЮ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН ВДОЛЬ СТЕНОК ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Некоторые подземные сооружения (тоннели, горные выработки) вытянуты вдоль одного пространственного направления. В качестве их модели обычно выступает цилиндрическая полость. Для описания распространения поверхностных волн вдоль нее могут использоваться линейные уравнения упругости в цилиндрической системе координат, имеющие следующий вид [14, 19, 21]):

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2} &= V_P^2 \frac{\partial \Delta}{\partial r} - \frac{V_S^2}{r}\frac{\partial \Omega_z}{\partial \varphi} + V_S^2 \frac{\partial \Omega_\varphi}{\partial z}, \\
\frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial t^2} &= \frac{V_P^2}{r}\frac{\partial \Delta}{\partial \varphi} - V_S^2 \frac{\partial \Omega_r}{\partial z} + V_S^2 \frac{\partial \Omega_z}{\partial r}, \\
\frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} &= V_P^2 \frac{\partial \Delta}{\partial z} - \frac{V_S^2}{r}\frac{\partial (r\Omega_\varphi)}{\partial r} + \frac{V_S^2}{r}\frac{\partial \Omega_r}{\partial \varphi},
\end{aligned} \tag{1}$$

где V_P, V_S — скорость продольных и поперечных волн; (r, φ, z) — цилиндрические координаты; $\vec{u} = (u_r, u_\varphi, u_z)$ — вектор смещения в цилиндрических координатах;

$$\Delta = \operatorname{div}\vec{u} = \frac{1}{r}\frac{\partial (r u_r)}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial u_z}{\partial z}, \quad \Omega = \operatorname{rot}\vec{u} = \left(\frac{1}{r}\frac{\partial u_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial u_\varphi}{\partial z}, \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial r}, \frac{1}{r}\frac{\partial (r u_\varphi)}{\partial r} - \frac{1}{r}\frac{\partial u_r}{\partial \varphi}\right).$$

Задачу (1) рассмотрим в цилиндрической области $\{r > r_0, 0 \le \varphi < 2\pi, -\infty < z < \infty\}$ однородной среды. Считаем, что поверхность $r = r_0$ свободна от напряжений, поэтому соответствующие элементы тензора напряжений на ней равны нулю: $\sigma_r = \tau_{r\varphi} = \tau_{rz} = 0$. Это приводит к равенствам на границе [14]:

$$(V_P^2 - 2V_S^2)\Delta + 2V_S^2 \frac{\partial u_r}{\partial r} = 0, \quad \frac{1}{r}\frac{\partial u_r}{\partial \varphi} + \frac{\partial u_\varphi}{\partial r} - \frac{u_\varphi}{r} = 0, \quad \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} = 0. \tag{2}$$

Согласно [13], поверхностные волны можно записать следующим образом:

$$\vec{u}(r, \varphi, z, t) = \exp[i(\omega t + kz)][U(r)\cos(n\varphi), V(r)\sin(n\varphi), W(r)\cos(n\varphi)], \tag{3}$$

n — целое число.

Случай $n = 0$ стоит особняком. Если искать решение, не зависящее от φ, то $u_\varphi = 0$ и система (1) редуцируется к виду:

$$\frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2} = V_P^2 \frac{\partial \Delta}{\partial r} + V_S^2 \frac{\partial \Omega_\varphi}{\partial z}, \quad \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = V_P^2 \frac{\partial \Delta}{\partial z} - \frac{V_S^2}{r}\frac{\partial (r\Omega_\varphi)}{\partial r}. \tag{4}$$

Следовательно, в краевых условиях (2) остается только первое и третье равенства, причем в определении Δ исчезает член с u_φ.

Интересны решения, убывающие достаточно быстро (экспоненциально) при $r \to \infty$. Этого можно добиться разными путями. Не затрудняя изложение математическими выкладками, приведем ход рассуждений и полученные результаты. Подставив представление (3) в (1) (или (4) при $n = 0$), для нахождения искомых функций U, V, W получим систему дифференциальных уравнений второго порядка. Все решения полученных уравнений представим в виде суммы выражений:

$$P_n\left(\frac{1}{r}\right) J(k_{PS} r). \tag{5}$$

Здесь J — одна из функций Бесселя с индексами 0 и 1; P_n — многочлен степени n (в случае $n = 0$ — первой); k_{PS} — одно из выражений: $\sqrt{\left|k^2 - \omega^2 / V_S^2\right|}$ или $\sqrt{\left|k^2 - \omega^2 / V_P^2\right|}$. Так как интерес представляют решения быстро убывающие при $r \to \infty$, очевидно, что J — одна из модифицированных функций Бесселя K_0, K_1.

Общий вид решения для наиболее интересного случая $n = 1$ запишется как

$$\begin{pmatrix} U \\ V \\ W \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_0(k_P r) + \dfrac{V_P^2 k_P K_1(k_P r)}{(V_P^2 k^2 - \omega^2) r} \\ \dfrac{k_P V_P^2 K_1(k_P r)}{(V_P^2 k^2 - \omega^2) r} \\ -i\,\dfrac{k_P V_P^2 K_1(k_P r)}{(V_P^2 k^2 - \omega^2)} \end{pmatrix} x_1 + \begin{pmatrix} -K_0(k_S r) \\ K_0(k_S r) \\ i\,\dfrac{k_S K_1(k_S r)}{k} \end{pmatrix} x_2 + \begin{pmatrix} k_S K_0(k_S r) + \dfrac{K_1(k_S r)}{r} \\ \dfrac{K_1(k_S r)}{r} \\ i\,\dfrac{(\omega^2 - k^2 V_S^2) K_1(k_S r)}{V_S^2 k} \end{pmatrix} x_3, \tag{6}$$

$$k_P = \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{V_P^2}}, \quad k_S = \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{V_S^2}}, \tag{7}$$

x_m — произвольные постоянные.

Подставив (6) в (2), получим однородную линейную систем из трех уравнений относительно x_i, которая имеет нетривиальное решение только когда ее определитель равен нулю. Таким образом имеем дисперсионное уравнение, связывающее ω и k при заданных параметрах среды, обеспечивающее существование поверхностных волн (для $n=1$):

$$
\begin{gathered}
D_1(k,\omega) \equiv -\frac{K_1(k_S r_0)^2 K_1(k_P r_0)\, V_S^2 k_S \omega^2 (\omega^2 r_0^2 - 8V_S^2)}{8} + \frac{K_1(k_S r_0)^2 K_0(k_P r_0)\, V_S^4 r_0 k_P k_S \omega^2}{4} + \\
+\frac{K_0(k_P r_0) K_1(k_S r_0)^2 V_S^4 r_0 k_P k_S k^2 ((k^2 r_0^2 + 4)V_S^2 - \omega^2 r_0^2)}{2} - K_1(k_S r_0) K_0(k_S r_0) K_1(k_P r_0) \times \\
\times \frac{V_S^2 \left((k^6 r_0^2 + 4k^4)\, V_S^4 - 2k^2\omega^2 \left(k^2 r_0^2 + \frac{11}{4} \right) V_S^2 + \frac{5\omega^2 (k^2 r_0^2 + 2)}{4} \right) r_0}{2} + \\
+\frac{K_0(k_S r_0) K_1(k_S r_0) K_1(k_P r_0) r_0^3 \omega^6}{8} - K_1(k_P r_0) K_0(k_S r_0)^2 V_S^2 \left(k^2 V_S^2 - \frac{\omega^2}{2} \right)^2 r_0^2 k_S + \\
+\frac{K_0(k_S r_0) K_1(k_S r_0) K_0(k_P r_0) V_S^2 k_P r_0^2 (4k^4 V_S^4 - 3k^2\omega^2 V_S^2 - \omega^4)}{4} = 0.
\end{gathered} \tag{8}
$$

При нулевом определителе можно найти решение упомянутой системы и подставить его в (6), тем самым получить аналитическое представление поверхностной волны. Ввиду его громоздкости здесь оно не приводится.

Для осесимметричного случая $(n=0)$ тем же способом находим дисперсионное соотношение:

$$
\begin{gathered}
D_0(k,\omega) \equiv V_P^2 K_1(k_s r_0) \left(k^2 V_S^2 - \frac{\omega^2}{2} \right)^2 r_0 K_0(k_p r_0) k_p - \\
-\left(k_s K_0(k_s r_0) V_S^2 k^2 r + \frac{K_1(k_s r_0)\omega^2}{2} \right) (V_P^2 k - \omega^2) K_1(k_p r_0) V_S^2 = 0.
\end{gathered} \tag{9}
$$

Известно, что в отличие от волн Рэлея в рассматриваемом случае не для каждой ω существуют k, при которых справедливо (8), (9). Найдем границы таких частот ω. Обозначим их через ω_l^* ($l = 0, 1, 2$ — соответствует типу поверхностной волны). Однако не каждая волна может рассматриваться как аналог поверхностной волны. Проиллюстрируем это на следующем примере.

Рассмотрим среду с параметрами $V_S = 1700$ м/с, $V_P = 2800$ м/с, $r_0 = 0.05$ м. Будем искать при каких ω существует k — решение уравнения (8), такое что $k > \omega / V_S (1+10^{-15})$. Ближайшее с избытком целочисленное значение $\omega = 12847$, при этом найденное $k = 7.557058823529419$. Фазовая скорость $\omega / k = 1699.999999999998$. По сути она отличается от скорости распространения поперечных объемных волн только в шестнадцатом знаке.

На рис. 1*а* показано убывание амплитуды поверхностной волны ($\|U(r)\|$) по r на глубину до трех длин поперечной волны на данной частоте. Такое поведение, отличное от характера убывания волны Рэлея, обусловлено следующей причиной. При заданных параметрах задачи $k_s \approx 3 \cdot 10^{-7}$. Если рассмотреть решение (6), видно, что основной вклад в решение при таких параметрах задачи приносит вовсе не экспоненциальное убывание на бесконечности, а поведение модифицированных функций Бесселя K_i около нуля. Отношение $\|U(r)\| / \|U(r_0)\|$ ведет себя как рациональная функция от r при $r < 10^6$. Являются ли эти поверхностные волны с математической точки зрения поверхностными волнами с физической — вопрос спорный. Представляется, что нет.

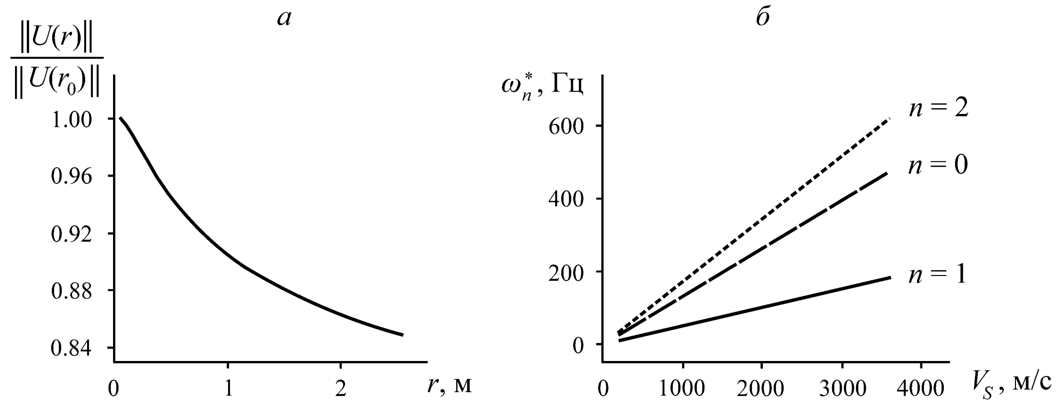

Рис. 1. Уменьшение амплитуды поверхностной волны по r на расстояние до трех длин поперечных волн при ω близком к ω_1^* (*а*) и зависимость нижних границ ω_i^* от скорости поперечных волн (*б*)

Представим численные результаты приблизительной оценки такой нижней границы ω_i^*, что при $\omega > \omega_i^*$ существует такое $k > \omega / V_S(1+10^{-5})$, при котором $D_i(\omega, k) = 0$, $V_S = 1700$ м/с, $V_P = 2800$ м/с и $r_0 = 2.5$ м: $\omega_0^* \approx 1382$, $\omega_1^* \approx 533$, $\omega_2^* \approx 1771$. Заметим, что $\omega_3^* = 3429$ значительно больше, чем ω_2^*, а $\omega_4^* = 5031$ больше, чем ω_3^*, и т. д. Так как более высокочастотные поверхностные волны меньше проникают вглубь породы, остановимся на рассмотрении случаев $n = 0, 1, 2$.

Интересно то, как нижние границы частот ω_i^*, при которых возникают поверхностные волны, зависят от скорости поперечных волн (рис. 1*б*). В расчетах полагалось, что $V_P = \sqrt{3} V_S$. Видно, что самая слабая зависимость наблюдается при $n = 1$, самая сильная — при $n = 2$.

На рис. 2 показаны расчетные графики фазовых и групповых скоростей. Для удобства по оси абсцисс показана не ω, а частота, выраженная в герцах. В однородной среде радиально-симметричные волны, распространяющиеся вдоль цилиндрической полости, обладают дисперсией.

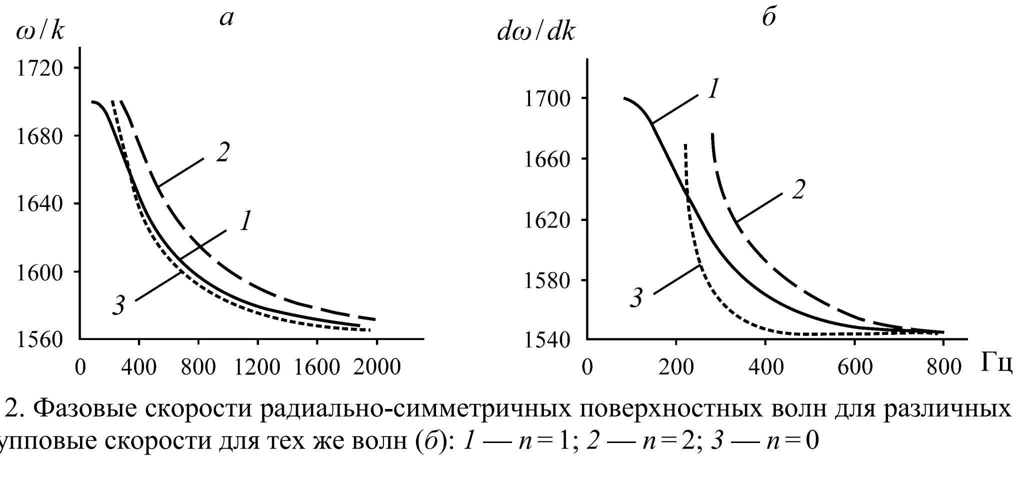

Рис. 2. Фазовые скорости радиально-симметричных поверхностных волн для различных n (*а*) и групповые скорости для тех же волн (*б*): *1* — $n = 1$; *2* — $n = 2$; *3* — $n = 0$

Чтобы понять, о какой глубине фазовые характеристики поверхностных волн могут нести информацию, рассчитаем уменьшение амплитуды волны (отношение амплитуды в выбранной точке к амплитуде на поверхности) на различных радиальных расстояниях. На рис. 3 приведены кривые, характеризующие уменьшение амплитуды на разных частотах в точке, удаленной от поверхности полости на расстояние $L(\omega)$, $L(\omega)/2$ ($L(\omega)$ — длина поперечной волны на заданной частоте ω). При увеличении частоты амплитуда колебаний падает. На частоте $200-400$ Гц и глубине $L(\omega)/2$ амплитуда немного больше половины от значений на поверхности (рис. 3*б*). Длина волны в указанном диапазоне частот при скорости поперечных волн 1700 м/с равна $4.3-8.5$ м. По фазовым характеристикам поверхностных волн можно получать информацию о состоянии пород вблизи полости на глубине $2.15-4.25$ м или в отношении к радиусу полости $0.86-1.70$.

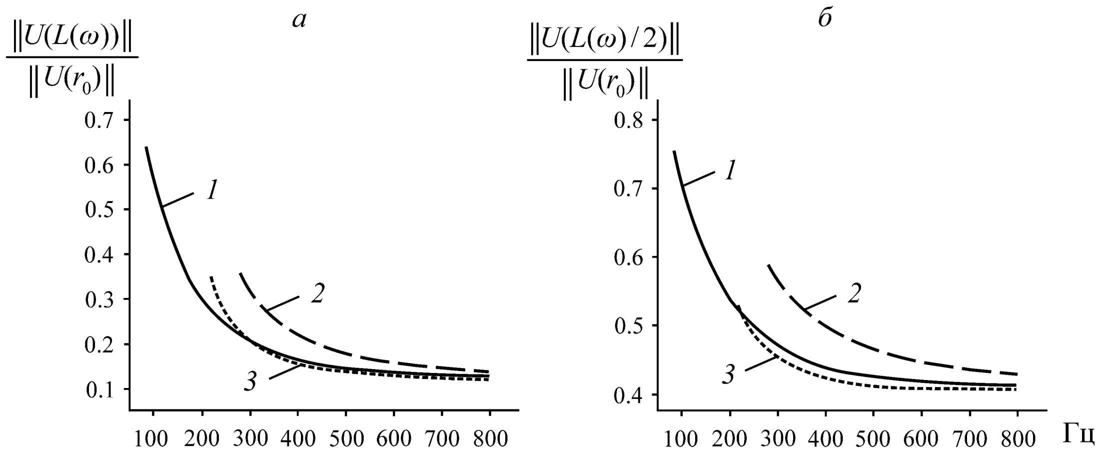

Рис. 3. Отношение амплитуды волны в выбранной точке к амплитуде на поверхности: *а* — в точке $L(\omega)$; *б* — в точке $L(\omega)/2$; *1* — $n=1$; *2* — $n=2$; *3* — $n=0$

Исследуем возможность восстановления скорости поперечных волн по данным о фазовых скоростях. В открытой литературе не нашлось данных по энергетическим спектрам волн рассматриваемого типа. Считаем, что в идеальном (без зашумления) случае можно замерить среднюю фазовую скорость. Возьмем среднее гармоническое (рис. 4*а*), где фазовые скорости волн совпадают с представленными на рис. 2*а*. Полученные данные были зашумлены (рис. 4*б*).

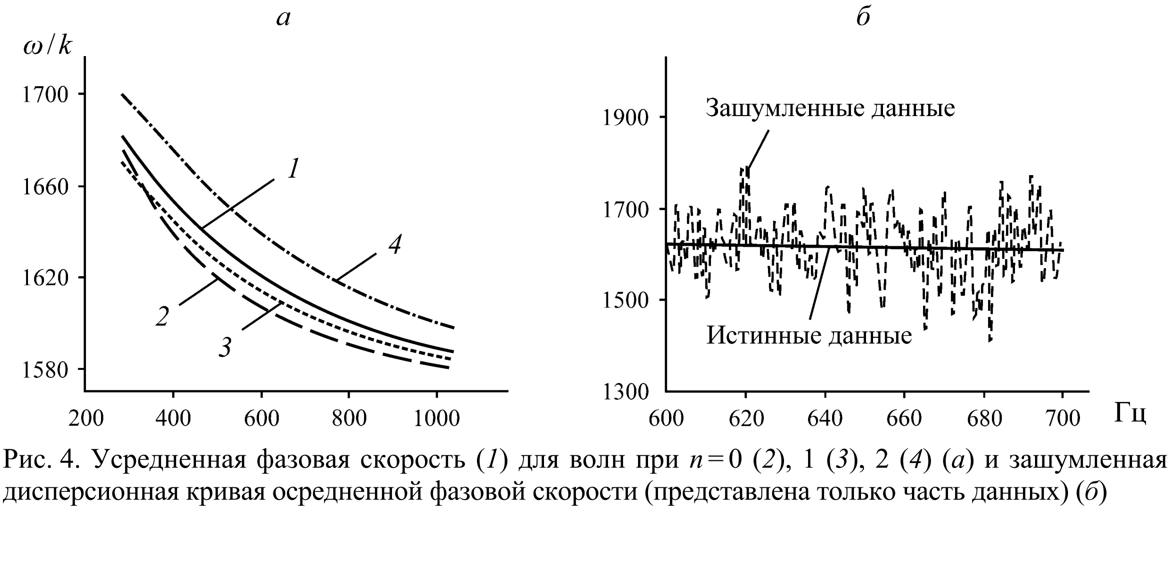

Рис. 4. Усредненная фазовая скорость (*1*) для волн при $n=0$ (*2*), 1 (*3*), 2 (*4*) (*а*) и зашумленная дисперсионная кривая осредненной фазовой скорости (представлена только часть данных) (*б*)

Восстановление V_S по фазовым скоростям выполнялось путем минимизации целевого функционала:

$$\sum_{i=1}^{N}[PHV_{dat}(\omega_i) - PHV_{calc}(\omega_i)]^2 . \qquad (10)$$

Здесь $PHV_{dat}(\omega_i)$ — зашумленные фазовые скорости на частоте ω_i; $PHV_{calc}(\omega_i)$ — вычисленные фазовые скорости на частоте ω_i, соответствующие случаю $n=1$, при заданной скорости V_S. При расчетах считалось, что $V_P = \sqrt{3}V_S$. Аналогично волнам Рэлея полученная фазовая скорость мало зависит от скорости продольных объемных волн. Рассматривался диапазон частот $270-1040$ Гц, уровень шума 10 %. При найденном минимуме функционала (10) получено $V_S = 1692.833$ м/с, если данные не зашумлять, то $V_S = 1696.084$ м/с, если уровень шума увеличить в 2 раза, то $V_S = 1689.596$ м/с.

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

При разработке методов контроля подземных сооружений по поверхностным волнам рассмотренного аналитического метода может быть недостаточно, так как он имеет ограничения. Например, нельзя получить соотношения для неоднородных сред или полостей со сложной геометрической формой. В этом случае можно использовать только численные методы.

В [11, 25] для моделирования поверхностных волн вдоль тоннелей применяется метод конечных разностей, с помощью которого решается система уравнений упругости. К его преимуществам относится точность, относительная простота реализации, к недостаткам — сложности реализации условий свободной поверхности. Поэтому при решении задач моделирования волн в средах с полостями или криволинейными поверхностями (например, задачи распространения поверхностных волн вдоль криволинейной поверхности Земли) получил распространение метод конечных элементов (МКЭ) или его модификация — метод спектральных элементов (МКСЭ), в котором условие свободной поверхности выполняется автоматически. Отличие МКСЭ от классического МКЭ заключается в использовании в качестве базисных функций полиномов высокой степени. За счет этого удается находить решения с высокой точностью на грубых сетках, что позволяет экономить вычислительные ресурсы и рассчитывать трехмерные задачи для полостей любой формы.

Для решения задачи распространения поверхностных волн вдоль полости выбран программный пакет SPECFEM, в котором реализован МКСЭ. В работе использовались две версии пакета: SPECFEM2d — для расчета задач в осесимметричной постановке, SPECFEM3d — для расчета трехмерных задач. На рис. 5 приведены двумерная и трехмерная модели. В первом случае рассматривалась осесимметричная задача (рис. 5*а*), в которой полость представлена цилиндром радиусом $R = 2.5$ м (та же модель, что и в аналитических расчетах), во втором — в форме прямоугольного параллелепипеда с квадратным основанием со сторонами $a = b = 7.6$ м. На внешних границах расчетной области заданы поглощающие слои для подавления отраженных от них волн. Границы полости считались свободными. В качестве источника использовалась направленная точечная сила $F(t)$, действующая на поверхности полости (рис. 5*б*). Форма волны в источнике — импульс Риккера с несущей частотой 240 Гц. Среда однородная с параметрами $V_P = 2800$ м/с, $V_S = 1700$ м/с, плотность 2200 кг/м^3. При моделировании применялась сетка с прямоугольными элементами (в трехмерном случае с гексаэдральными). Расстояние между приемниками 5 м, частота дискретизации 0.001 с.

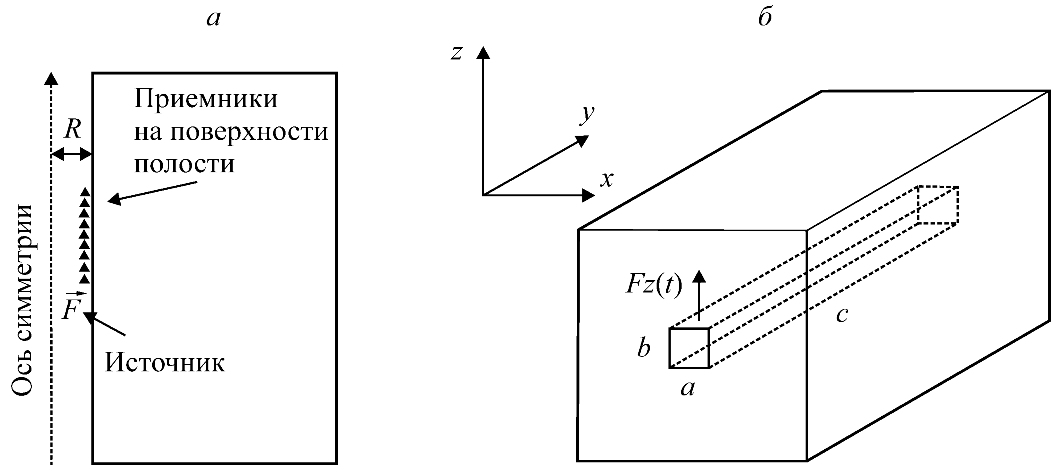

Рис. 5. Двумерная модель вместе с положениями приемников и источника (*а*) и трехмерная, содержащая полость и источник (*б*)

На рис. 6*а* представлена сейсмограмма, полученная для осесимметричной задачи. Видно, что поверхностная волна имеет дисперсию (импульс по мере увеличения номера приемника “размазывается”). На рис. 6*б* показано сравнение дисперсионной кривой фазовой скорости, вычисленной на основе построения $f-k$-спектра для численных данных, и кривой, полученной в аналитических расчетах. Относительная погрешность составляет ~ 1.25 %.

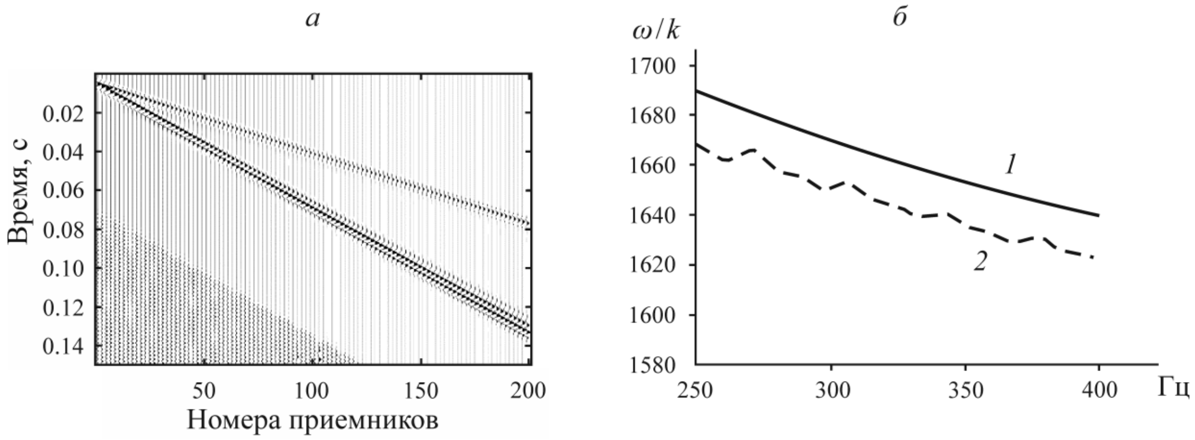

Рис. 6. Сейсмограмма осесимметричной модели (*а*) и дисперсионные кривые фазовых скоростей поверхностных волн, вычисленных на основе расчетных сейсмограмм и аналитического метода (*б*): *1* — фазовая скорость модели; *2* — фазовая скорость численного эксперимента

Рассмотрим трехмерную задачу. На рис. 7*а* показана сейсмограмма, полученная приемниками, расположенными на одной стенке полости с источником (верхняя стенка на рис. 5*б*). Приведена вертикальная компонента поля смещения. Использовался источник с центральной частотой 74 Гц. Дисперсионная кривая для этих данных дана на рис. 7*б*. Отчетливо видна дисперсия скорости распространения волны. При использовании источников с более высокими и более низкими частотами дисперсия снижалась. Дополнительно проанализировано изменение амплитуды поверхностной волны с удалением от источника вдоль полости и вглубь ее поверхности. Вычислялись отношения $A = A_c / A_r$ (A_r — амплитуда волны в опорной точке на поверхности полости, A_c — амплитуда волны в точке на удалении от опорной).

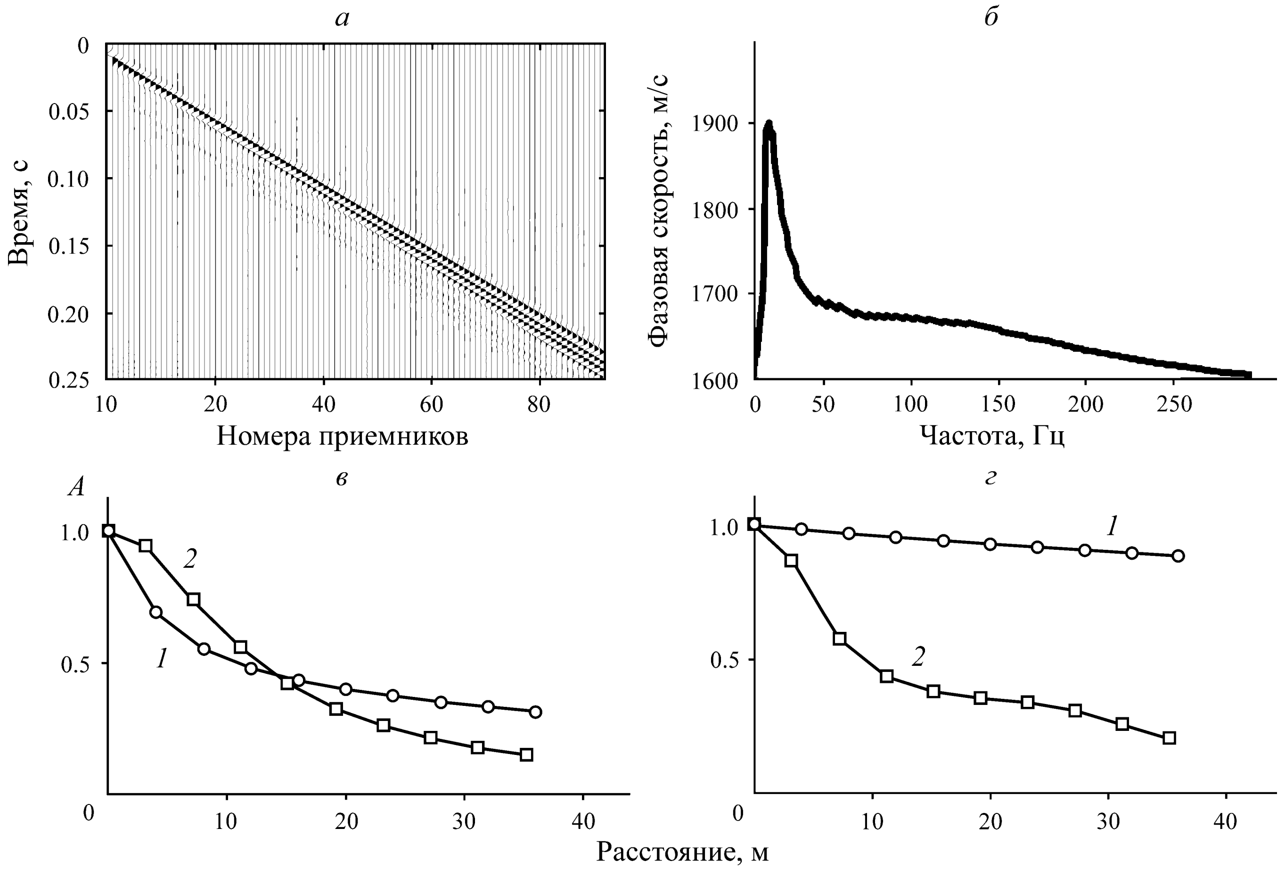

Рис. 7. Данные с приемников на верхней границе полости: *а* — расстояние между приемниками 4 м, центральная частота излучения 74 Гц; *б* — дисперсионная кривая, построенная по приведенным данным; *в*, *г* — изменение амплитуды волны вдоль поверхности полости (*1*) и в глубину полости (*2*) в ближней (*в*) и дальней зонах (*г*)

На рис. 7*в* показаны изменения амплитуды A в ближней зоне к источнику (расстояние от опорной точки до источника 4 м). Кривой *1* обозначено изменение A вдоль полости, кривой *2* — в глубину. На рис. 7*г* то же самое, но опорная точка расположена в дальней зоне (~8 длин волн). Видно, что в дальней и ближней зоне при увеличении глубины до 10 м амплитуда колебаний падает примерно в 2 раза. При этом в дальней зоне при распространении волны вдоль полости амплитуда уменьшалась на ~8 % на длину волны (длина волны ~22 м).

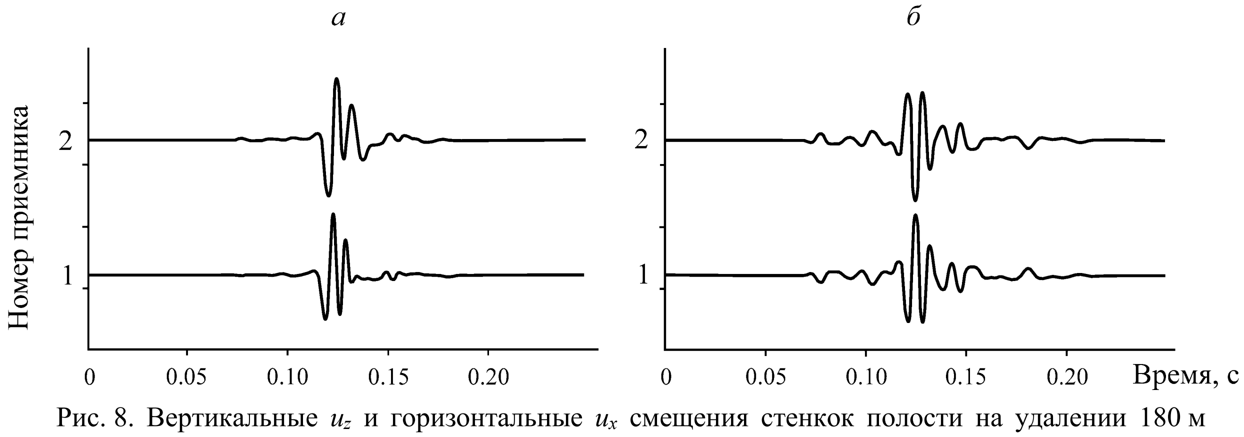

Рис. 8. Вертикальные u_z и горизонтальные u_x смещения стенок полости на удалении 180 м от источника: *а* — u_z на верхней (приемник 1) и нижней (приемник 2) стенках полости; *б* — u_x на левой (приемник 1) и правой (приемник 2) стенках полости

Интерес представляют фазовые характеристики колебаний разных стенок полости. На рис. 8 показаны вертикальные смещения u_z верхней и нижней стенок полости (рис. 8*а*) и горизонтальные смещения u_x правой и левой стенок полости (рис. 8*б*) на удалении вдоль полости 180 м от источника. Видно, что боковые стенки движутся в противофазе, верхняя и нижняя — в одной фазе.

ВЫВОДЫ

Рассмотрены возможности использования фазовых характеристик поверхностных волн для решения задач контроля состояния горных пород вблизи подземных сооружений и математическая модель распространения поверхностных волн вдоль полости. Показано, что в однородной среде поверхностные волны обладают дисперсией. По фазовым характеристикам поверхностных волн можно контролировать состояние вмещающих пород в окрестности полости. На основе дисперсионных кривых возможно восстанавливать упругие параметры среды.

Апробирован численный метод, позволяющий моделировать распространения поверхностных волн вдоль полостей произвольной геометрической формы в неоднородных средах. Приведены результаты расчетов осесимметричной и трехмерной задачи. Выбранный численный метод в осесимметричной задаче дает ошибку ~ 1.25 % по сравнению с аналитическим решением. На примере решения трехмерной задачи с полостью в форме прямоугольного параллелепипеда продемонстрированы особенности распространения поверхностной волны. Противоположные стенки полости, на одной из которых действует источник, двигаются в одной фазе, а две другие стенки — в противофазе.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования поверхностных волн для мониторинга состояния пород вокруг горных выработок и сооружений.

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 // ГИАБ. — 2019. — № 8. — С. 21 – 32.
2. **Jiao Y. Y., Tian H. N., Liu Y. Z., Mei R. W., and Li H. B.** Prediction of tunneling hazardous geological zones using the active seismic approach, Near Surface Geophys., 2015, Vol. 13, No. 4. — P. 333 – 342.
3. **Xinji Xu, Panlong Zhang, Xu Guo, Bin Liu, Lei Chen, Qingsong Zhang, Lichao Nie, and Yi Zhang.** 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.
4. **Курленя М. В., Сердюков А. С., Дучков А. А., Патутин А. В., Яскевич С. В.** Технология микросейсмического и геомеханического мониторинга геодинамических процессов в массиве горных пород // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2015. — Т. 2. — № 2. — С. 257 – 260.
5. **Соколов С. В., Колмакова А. А.** Оценка влияния направленного гидроразрыва на изменение объема порово-трещинного пространства кровли выемочного столба массива на основе применения сейсмического просвечивания // Россия молодая: сб. материалов XIII Всерос. науч.-практ. конф. — Кемерово, 2021. — С. 10903.1 – 10903.6.
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. **Yang J., Cai J., Yao C., Li P., Jiang Q., and Zhou C.** Comparative study of tunnel blast-induced vibration on tunnel surfaces and inside surrounding rock, Rock Mech. Rock Eng., 2019, Vol. 52, No. 11. — P. 4747 – 4761.

8. **Дорохин К. А.** Обоснование и разработка метода оценки геодинамического состояния массива горных пород на основе дисперсионных параметров сейсмических волн: дис. ... канд. техн. наук. — М.: ИПКОН РАН, 2017. — 196 с.
9. **Chen K., Zhang Z., and Zhou Y.** Application of surface wave in reinforced concrete invert detection, IOP Conf. Series: Earth and Env. Sci., 2021, Vol. 660, No. 1. — P. 012069.
10. **Bohlen T., Lorang U., Rabbel W., Muller G., Giese R., Luth S., and Jetschny S.** Rayleigh-to-shear wave conversion at the tunnel face — from 3D-FD modeling to ahead-of-drill exploration, Geophysics, 2007, Vol. 72. — P. T67 – T79.
11. **Jetschny S., Bohlen T., and De Nil D.** On the propagation characteristics of tunnel surface-waves for seismic prediction, Geoph. Prospecting, 2010, Vol. 58, No. 2. — P. 245 – 256.
12. **Nguyen L. T. and Nestorović T.** Reconstructing disturbance zones ahead of the tunnel face by elastic waveform inversion supported by a parametric level-set representation, Soil Dynamics Earthquake Eng., 2018, Vol. 115. — P. 606 – 621.
13. **Czarny R. et al.** Dispersive seismic waves in a coal seam around the roadway in the presence of excavation damaged zone, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2021, Vol. 148. — P. 104937.
14. **Снеддон И., Бэрри Д.** Классическая теория упругости. — М.: Физматгиз, 1961. — 220 с.
15. **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.
16. **Ellefsen K. J., Cheng C. H., and Toksöz M. N.** Elastic wave propagation along a borehole in an anisotropic medium, SEG Technical Program Expanded Abstracts 1990, Society Exploration Geoph., 1990. — P. 14 – 17.
17. **Boström A. and Burden A.** Propagation of elastic surface waves along a cylindrical cavity and their excitation by a point force, J. Acoustical Society of America, 1982, Vol. 72, No. 3. — P. 998 – 1004.
18. **Петрашень Г. И., Молотков Л. А., Крауклис П. В.** Волны в слоисто-однородных изотропных упругих средах. — Л.: Наука, 1985. — 303 с.
19. **Kaufman A. A., Levshin A., and Larner K. N.** Acoustic and elastic wave fields in geophysics, Amsterdam, 2002. — 663 p.
20. **Kaufman A. and Levshin A. L.** Acoustic and elastic wave fields in geophysics, Elsevier, Amsterdam, 2005. — 652 p.
21. **White J. E.** Methods in geochemistry and geophysics (V18) underground sound: application of seismic waves, Elsevier, 1983. — 253 p.
22. **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.
23. **Stilke G.** On elastic surface waves at a cylindrical hole in an infinite solid, Geophys. Prospecting, 1959, Vol. 7, No. 3. — P. 273 – 286.
24. **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, Geophys. J. Int., 2007, Vol. 170, No. 2. — P. 511 – 526.
25. **Kneib G. and Leykam A.** Finite-difference modelling for tunnel seismology, Near Surface Geophysics, 2004, Vol. 2, No. 2. — P. 71 – 93.
26. **Jetschny S.** Seismic prediction and imaging of geological structures ahead of a tunnel using surface waves, 2010. — 92 p.

Поступила в редакцию 15/XI 2022
После доработки 22/XI 2022
Принята к публикации 24/XI 2022