РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

2022 № 5

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 550.348.425.4

РАЗВИТИЕ МОНИТОРИНГА ФИЗИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ МОДЫ ВОЛНЫ РЭЛЕЯ

А. С. Сердюков^{1,2}, М. В. Курленя¹, А. В. Яблоков^{1,2}, Т. В. Шилова^{1,2}, Р. А. Ефремов^{1,2}

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: aleksanderserdyukov@yandex.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия ²Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, просп. Академика Коптюга, 3, 630090, г. Новосибирск, Россия

Предложен новый подход к обработке многоканальных данных поверхностных волн, повышающий помехоустойчивость определения дисперсионных кривых фазовых скоростей волн Рэлея за счет анализа траектории движения частиц в частотно-временной области на основе применения преобразования Стоквелла к двукомпонентным сейсмическим записям. Работоспособность подхода продемонстрирована на примерах обработки синтетических и полевых данных малоглубинной сейсморазведки.

Горная геофизика, инженерная сейсморазведка, физико-механические свойства горных пород, сейсмоустойчивость, мониторинг, многоканальный анализ поверхностных волн, частотно-временной представление, поляризационный анализ

DOI: 10.15372/FTPRPI20220501

Применение сейсмоакустических методов — важное направление развития мониторинга состояния массива горных пород. Динамические физико-механические свойства горных пород связаны со скоростями сейсмических волн корреляционными соотношениями, т. е. на основе сейсмоакустических исследований можно дистанционно (неинвазивным способом) определять зоны повышенной трещиноватости, участки потенциального оползнеобразования и т. п. Данные исследования актуальны для предотвращения аварий в горных выработках неглубокого подземного заложения [1]. Методы малоглубинной сейсморазведки применяются для мониторинга состояния хранилищ хвостов отвальных отходов обогащения полезных ископаемых [2].

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

В настоящей работе рассматривается многоканальный анализ поверхностных волн (MASW) — метод малоглубинной сейсморазведки, позволяющий исследовать строение верхней части геологического разреза на глубине до нескольких десятков метров на основе наблюдаемой дисперсии фазовых скоростей поверхностных сейсмических волн [3]. При исследованиях методом MASW более достоверно восстанавливаются скорости поперечных сейсмических волн, а также глубины границ между слоями горных пород с резко меняющимися свойствами, например между грунтами и скальными породами. С учетом поверхностных волн можно изучить поглощающие свойства среды, оценить степень и определить положение неоднородностей путем наблюдения рассеяния волн. Зачастую метод MASW — единственно возможный подход для оценки скоростей поперечных сейсмических волн. Регистрация и возбуждение объемных поперечных волн, в том числе обменных PSP-типа, в отличие от продольных, не всегда осуществимы. В [1] отмечается, что такие сложности возникают при наличии высокоскоростной обделки горной выработки.

В ряде работ скорости поперечных волн, определяемые методом MASW, в дополнение к скоростям продольных волн, рассчитанных методом преломленных волн, используются для оценки физико-механических свойств грунтов и горных пород [3, 4]. Подобные исследования динамического модуля упругости (модуля Юнга) позволяют осуществлять мониторинг образования оползней [1]. Совместное исследование продольных и поперечных сейсмических волн применяется при исследовании уровня грунтовых вод [5].

Еще одно приложение метода MASW — оценка сейсмостойкости грунтов. В западных странах с этой целью рассматривается усредненное значение скоростей поперечных сейсмических волн на глубине 30 м ($V_{s,30}$) [3]. Меньшие значения параметра $V_{s,30}$ служат индикатором более разрушительного воздействия при землетрясениях. В нашей стране существует похожий метод сейсмических жесткостей, используемый в ходе сейсмического микрорайонирования [6]. Данные исследования актуальны не только в районах повышенной природной сейсмичности. Так, метод MASW активно применялся в ходе инженерных исследований под строительство ветряных электростанций для оценки возможного воздействия постоянной вибрации, вызванной вращением лопастей, на грунт под основанием [7]. Аналогичные задачи могут возникать при проектировании и строительстве инженерных сооружений, связанных с добычей и переработкой твердых полезных ископаемых. Исследования сейсмостой-кости с применением MASW целесообразны при планировании и контроле взрывных работ. Таким образом, многоканальный анализ поверхностных волн — перспективный метод горной геофизики.

Несмотря на то, что при использовании активных ударных источников (типа кувалды) не менее 70% энергии колебаний относится к поверхностным волнам, применение методов фильтрации с целью выделения полезного сигнала, а также специальных способов построения двумерных пространственно-временных спектральных изображений позволяет значительно повысить точность и достоверность определения дисперсионных кривых скоростей поверхностных волн [8–10]. В большинстве исследований, посвященных методу MASW, рассматриваются однокомпонентные сейсмические данные, когда регистрируются только вертикальные колебания. При этом наблюдения горизонтальных компонент смещения позволяют не только фиксировать волны Лява, но и анализировать траекторию движения частиц среды.

При распространении основной фундаментальной моды волны Рэлея (вдоль оси *х*, слева направо), которую используют в методе MASW, смещение происходит по эллипсам против часовой стрелки. Эта характерная особенность необходима для выделения фундаментальной моды волны Рэлея из данных [11]. В нашем исследовании предлагается осуществлять подобную фильтрацию не с помощью стандартного поляризационного анализа, применяемого напрямую к двухкомпонентным сейсмическим записям, а проводить анализ траекторий смещения в частотно-временной области. Такой подход позволяет учесть дисперсию поверхностных волн. Используется способ анализа траектории движения на основе применения преобразования Стоквелла к комплекснозначному сигналу, вещественная часть которого представляет собой запись вертикальной компоненты смещения, а мнимая — горизонтальной [12]. Описывается предлагаемая методика фильтрации двухкомпонентных сейсмических записей линейных систем наблюдения, приводятся примеры ее применения при обработке синтетических и полевых данных.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим стандартную линейную систему наблюдения, применяемую при многоканальном анализе поверхностных волн. В каждом пункте наблюдения регистрируются вертикальные и горизонтальные компоненты волнового поля вдоль линии наблюдения. Источник колебаний располагается на той же прямой, что и приемники, но на некотором удалении.

Следуя [13], для каждого пункта наблюдений составим из двух компонент сейсмических записей вертикальной u(t) и горизонтальной v(t) (смещения вдоль линии наблюдения) комплексный сигнал:

$$U(t) = u(t) + iv(t)$$
.

Применим частотно-временное преобразование Стоквелла (S-преобразование):

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\tau - t)f^2}{2\sigma^2}} U(t) e^{-i2\pi ft} dt, \qquad (1)$$

где τ — время (в частотно-временной области); f — частота; σ — параметр, дополнительно характеризующий ширину оконной функции, которая меняется на каждой частоте [14].

Преобразование Стоквелла — разновидность оконного преобразования Фурье, эффективная ширина окна которого меняется от частоты, обеспечивая оптимальное частотновременное разрешение, т. е. более точное определение частоты длиннопериодных сигналов и определение времени высокочастотных короткопериодных. Для эффективного вычисления *S*-преобразования можно использовать быстрое преобразование Фурье [14].

В стандартном случае, когда S-преобразование применяется к вещественным сигналам, имеет смысл рассматривать только неотрицательные значения f, при фиксированном τ и переменной частоте f спектр обладает теми же свойствами симметрии, что и преобразование Фурье. В случае комплексного сигнала, составленного из вертикальной и горизонтальной компонент смещения, анализируя разницу амплитуд

$$R(\tau, f) = |S(\tau, f)| - |S(\tau, -f)|, \tag{2}$$

где f>0, можно наблюдать движение частиц среды в зависимости от времени и частоты: $R(\tau,f)=0$ — движение по линейной траектории; $R(\tau,f)>0$ — по часовой стрелке, причем, если $S(\tau,-f)=0$, то по кругу; $R(\tau,f)<0$ — против часовой стрелки, если $S(\tau,f)=0$, то по кругу [12].

Движение частиц при распространении основной моды волны Рэлея (вдоль оси x, слева направо) происходит против часовой стрелки, и это свойство можно использовать для ее фильтрации [11]. Для этого построим следующую функцию:

$$F(\tau, f) = \begin{cases} R(\tau, \big| f \big|), & \text{если } R(\tau, \big| f \big|) < 0, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Затем нормируем ее:

$$\widetilde{F}(\tau, f) = \frac{F(\tau, f)}{\max_{f} F(\tau, f)}.$$

Полученную функцию используем в качестве окна фильтрации в частотно-временной области, умножим образ сигнала (1) на $\widetilde{F}(\tau, f)$ и применим обратное S-преобразование [15, 16]:

$$\widetilde{U}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sqrt{2\pi}}{|f|} S(t, f) \widetilde{F}(t, f) e^{+i2\pi f t} df.$$
(3)

У сигнала $\widetilde{U}(t)$ берем реальную и мнимую части, тогда получим отфильтрованные записи вертикальных и горизонтальных компонент смещения для дальнейшей обработки. Применим стандартный способ f-k анализа отфильтрованных данных — двумерное преобразование Фурье по времени и пространству (координате приемника вдоль линии наблюдения). Полученные спектральные изображения необходимы для извлечения дисперсионных кривых фазовых скоростей поверхностной волны Рэлея и определения скоростного разреза поперечных сейсмических волн [17].

ОБРАБОТКА СИНТЕТИЧЕСКИХ И ПОЛЕВЫХ ДАННЫХ МАЛОГЛУБИННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Для тестирования предлагаемого метода фильтрации проведены численные эксперименты по обработке синтетических сейсмических данных. В таблице приведены параметры слоистой скоростной модели верхней части геологического разреза: мощность h четырех слоев (слой 4 — полупространство); продольные V_p и поперечные V_s сейсмические скорости; плотность ρ .

Параметры слоистой скоростной модели верхней части геологического разреза

Номер слоя (сверху вниз)	Параметр			
	<i>h</i> , м	V_p , м/с	<i>V_s</i> , м/с	$ ho$, kg/m 3
1	5	500	200	1790
2	5	600	300	1930
3	20	1200	600	2030
4	∞	3000	2500	2500

Рассматривалась линейная система наблюдения, состоящая из 30 двухкомпонентных приемников, расположенных на расстоянии 5 м друг от друга. Пункт возбуждения находился на удалении 5 м от первого в линии наблюдения приемника. Для возбуждения волнового поля использовался импульс Рикера с центральной частотой 20 Γ ц, тип источника — вертикальная сила. Численное моделирование волнового поля выполнялось методом матричных пропагаторов (метод коэффициентов отражения-преломления). К синтетическим записям добавлялся случайный нормально распределенный шум с отношением "сигнал—помеха" 10.2 дБ. Записи вертикальной компоненты смещения вдоль оси z показаны на рис. 1a, горизонтальной вдоль оси x — на рис. 1a. Сейсмограммы, полученные после применения предлагаемого алгоритма фильтрации, приведены на рис. 16, z. Видно, что удалось подавить значительную часть помех.

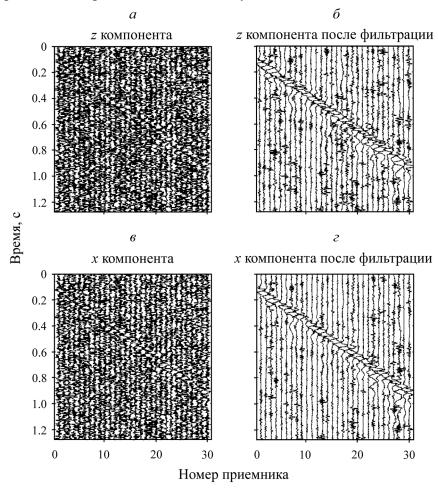


Рис. 1. Зашумленные синтетические данные и результаты их фильтрации: записи вертикальной компоненты смещения с шумом (a) и после фильтрации (δ) , горизонтальной компоненты с шумом (s) и после фильтрации (c)

Предлагаемый алгоритм фильтрации приведен на рис. 2. На рис. 2a, δ показаны абсолютные значения комплекснозначных частотно-временных образов вертикальной и горизонтальной зашумленных записей десятого (вдоль линии наблюдения) приемника, полученных путем применения преобразования Стоквелла. Частотно-временные представления нормированы путем деления на максимальное значение на каждой отдельной фиксированной частоте. Отметим, что из-за присутствия помех в данных на спектрограммах невозможно наблюдать поверхностную волну.

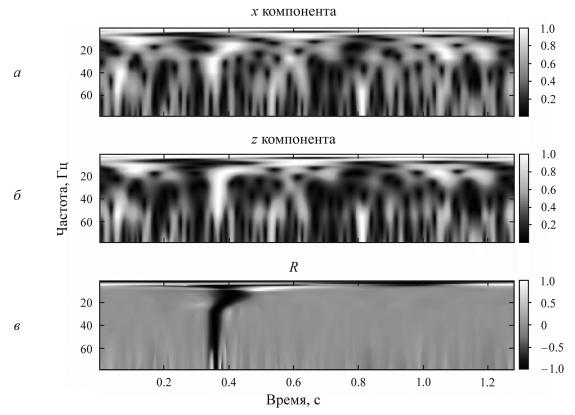


Рис. 2. Частотно-временное представление данных: модуль S-преобразования записи горизонтальной компоненты десятого приемника (a) и после фильтрации (δ), горизонтальная компонента с шумом и после фильтрации (s) значения $R(\tau, f)$

На рис. $2\mathfrak{s}$ приведена величина $R(\tau,f)$, найденная по формуле (2). Хорошо видна область с отрицательными значениями (показаны темным цветом), соответствующими основной моде поверхностной волны Рэлея. После умножения частотно-временных образов компонент записей всех приемников на оконную функцию $\widetilde{F}(\tau,f)$ и применения обратного преобразования (3) получены отфильтрованные сейсмограммы (рис. $1\mathfrak{o}, \mathfrak{o}$).

Построим двумерные частотные-временные спектры зашумленных и отфильтрованных синтетических данных с помощью двойного преобразования Фурье по времени и расстоянию вдоль линии наблюдения. Полученные f-k спектры (f— частота, k — волновое число) преобразуются в f-v изображения (v=f/k — фазовая скорость). Итоговые спектры представлены на рис. 3. На спектрах зашумленных данных (рис. 3a, a) дисперсионные кривые прослеживаются с трудом. Благодаря применению предлагаемого метода фильтрации, дисперсионные кривые фундаментальной моды волны Рэлея удается проследить в широкой полосе частот (рис. 36, a).

Проиллюстрируем метод фильтрации на примере обработки полевых данных инженерной малоглубинной сейсморазведки, полученных в ходе исследований окрестностей г. Новосибирска. Использовались 30 двухкомпонентных геофонов, расстояние между пунктами наблюдения 5 м, вертикальные удары осуществлялись кувалдой. Необработанные и отфильтрованные данные приведены на рис. 4.

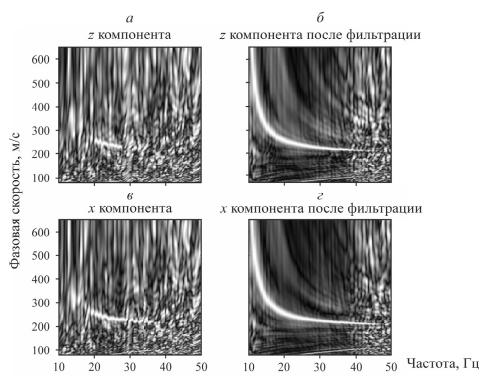


Рис. 3. Спектральные v-f изображения зашумленных и отфильтрованных синтетических данных: спектр зашумленных записей вертикальных компонент (a) и спектр вертикальных компонент после фильтрации (δ); спектр зашумленных записей горизонтальных компонент (a) и спектр горизонтальных компонент после фильтрации (a)

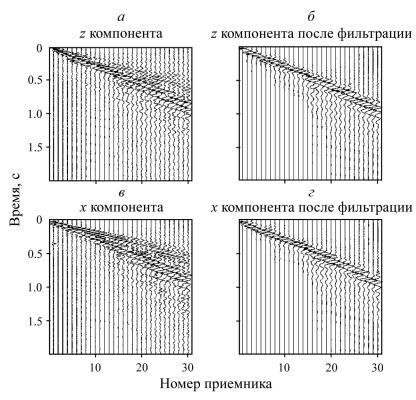


Рис. 4. Зашумленные полевые данные и результаты их фильтрации: записи вертикальной (a) и горизонтальной (a) компонент смещения и они же после фильтрации (δ , ϵ)

Итоговые частотно-временные v-f спектры приведены на рис. 5. Видно, что хотя на спектрах необработанных данных поверхностные волны прослеживаются, применение предлагаемого метода фильтрации все же значительно улучшает качество изображений дисперсионной кривой основной моды.

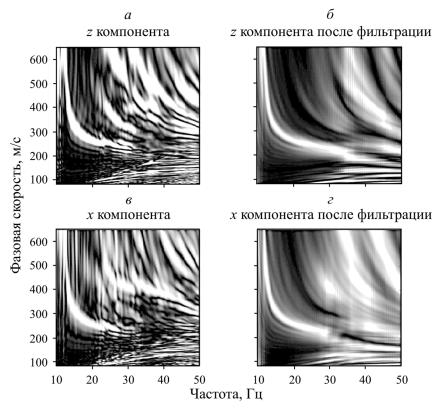


Рис. 5. Спектральные v-f изображения полевых данных: спектр зашумленных записей вертикальных (a) и горизонтальных (δ) компонент; спектр вертикальных (ϵ) и горизонтальных (ϵ) компонент после фильтрации

выводы

Многоканальный анализ поверхностных волн применяется в горном деле для неинвазивных исследований физико-механических свойств грунтов и горных пород верхней части геологического разреза, определения глубины залегания грунтовых вод, оценки сейсмической устойчивости и др. На практике его использование осложнено присутствием помех в сейсмических записях, которые вносят искажения в наблюдаемые дисперсионные кривые поверхностных волн и приводят к недостоверным результатам их обработки.

Предложен новый метод подавления помех за счет выделения полезного сигнала — фундаментальной моды поверхностной волны Рэлея на основе анализа движения частиц среды в частотно-временной области. Эффективность подхода продемонстрирована на примере обработки синтетических и полевых данных. Метод фильтрации можно использовать не только в случае использования линейных систем наблюдения и активных источников, но и при пассивных наблюдениях поверхностных волн.

Перспективное направление дальнейших исследований — анализ траектории движения частиц в частотно-временной области при исследованиях сейсмоустойчивости грунтов методом Накамуры, основанном на анализе отношения спектральных амплитуд вертикальных и горизонтальных компонент естественных микросейсмических шумов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Дорохин К. А. Оценка устойчивости горных массивов методом анализа дисперсии поверхностных волн // Инж. геология. 2016. № 4. С. 22 28.
- 2. Cracknell M. J., Nascimento S. C., Heng W. X., Parbhakar-Fox A., and Schaap T. A. Geophysical investigation of mine waste in the King River Delta, Macquarie Harbour, Tasmania, ASEG Extended Abstracts, 2019, Vol. 2019, No. 1. P. 1–4.
- 3. Park C. MASW for geotechnical site investigation, The Leading Edge, 2013, Vol. 32, No. 6. P. 656–666.
- **4.** Kurlenya M. V., Serdyukov A. S., Chernyshov G. S., Yablokov A. V., Dergach P. A., and Duchkov A. A. Procedure and evidence of seismic research into physical properties of cohesive soils, J. Min. Sci., 2016, Vol. 52, No. 3. P. 417–423.
- 5. Serdyukov A. S., Yablokov A. V., Chernyshov G. S., and Azarov A. V. The surface waves-based seismic exploration of soil and ground water, IOP Conf. Series: Earth and Env. Sci., IOP Publish., 2017, Vol. 53, No. 1. 012010.
- **6. Алешин А. С.** Апология метода сейсмических жесткостей // Сейсмостойкое стр-во. Безопасность сооружений. 2016. № 3. С. 13 21.
- 7. Park C. B. and Miller R. D. Seismic characterization of wind turbine sites near Lawton, Oklahoma, by the MASW method: Kansas Geological Survey Open-file Report, 2005.
- **8.** Luo Y., Xia J., Miller R. D., Xu Y., Liu J., and Liu Q. Rayleigh-wave dispersive energy imaging using a high-resolution linear Radon transform, Pure Appl. Geoph., 2008, Vol. 165, No. 5. P. 903 922.
- **9. Askari R. and Ferguson R. J.** Dispersion and the dissipative characteristics of surface waves in the generalized *S*-transform domain, Geophysics, 2012, Vol. 77, No. 1. P. V11–V20.
- 10. Serdyukov A. S., Yablokov A. V., Duchkov A. A., Azarov A. A., and Baranov V. D. Slant f-k transform of multichannel seismic surface wave data, Geophysics, 2019, Vol. 84, No. 1. P. A19 A24.
- 11. Gribler G., Liberty L. M., Mikesell T. D., and Michaels P. Isolating retrograde and prograde Rayleigh-wave modes using a polarity mute, Geophysics, 2016, Vol. 81, No. 5. P. V379 V385.
- 12. Stockwell R. G., Large W. G., and Milliff R. F. Resonant inertial oscillations in moored buoy ocean surface winds, Tellus A: Dynamic Meteorol. Oceanography, 2004, Vol. 56, No. 5. P. 536–547.
- **13. Hayashi Y.** Space-time spectral analysis of rotary vector series, J. Atmosph. Sci., 1979, Vol. 36, No. 5. P. 757 766.
- **14.** Stockwell R. G., Mansinha L., and Lowe R. P. Localization of the complex spectrum: the *S* transform, IEEE Transact. Signal Proc., 1996, Vol. 44, No. 4. P. 998–1001.
- **15. Schimmel M. and Gallart J.** The inverse *S*-transform in filters with time-frequency localization, IEEE Transact. Signal Proc., 2005, Vol. 53, No. 11. P. 4417 4422.
- **16. Serdyukov A. S., Azarov A. V., Yablokov A. V., Shilova T. V., and Baranov V. D.** Research note: Reconstruction of seismic signals using *S*-transform ridges, Geoph. Prospect., 2021, Vol. 69, No. 4. P. 891–900.
- **17.** Yablokov A. V., Serdyukov A. S., Loginov G. N., and Baranov V. D. An artificial neural network approach for the inversion of surface wave dispersion curves, Geoph. Prospect., 2021, Vol. 69, No. 7. P. 1405–1432.

Поступила в редакцию 10/IX 2022 После доработки 13/IX 2022 Принята к публикации 21/IX 2022