

А. С. Сердюков^{1,2}, А. В. Яблоков^{1,2,3}, Р. А. Ефремов^{1,2,3}*

Интерпретация дисперсионных изображений многоканальных записей поверхностных волн в зимний период: эффекты присутствия мерзлого и низкоскоростного слоев дисперсных грунтов

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

²Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

³Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация
*e-mail: SerdyukovAS@ipgg.sbras.ru

Анотация. Работа посвящена результатам метода многоканального анализа поверхностных волн (MASW) в зимний период в условиях сезонного промерзания верхнего слоя грунтов. Исследуются данные, полученные в пригороде г. Новосибирска. Наличие тонкого высокоскоростного мерзлого слоя приводит к сложной интерференции мод поверхностной волны Релея. Традиционный подход MASW пикирования и инверсии дисперсионных кривых малоприменим в подобной ситуации. В целях интерпретации получаемых спектральных изображений и подбора параметров слоистой модели разреза мы проводим численное моделирование данных методом матричных пропэгаторов.

Ключевые слова: метод многоканального анализа поверхностных волн, сезонно-мерзлые грунты, численное моделирование сейсмических волн

A. S. Serdyukov^{1,2}, A. V. Yablokov^{1,2,3}, R. A. Efremov^{1,2,3}*

Interpretation of Dispersive Images of Multichannel Records of Surface Waves in Winter: Effects of the presence of frozen and low-velocity layers

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk,
Russian Federation

²Chinakal Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

³Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
*e-mail: SerdyukovAS@ipgg.sbras.ru

Abstract. The work is devoted to the results of the method of multichannel analysis of surface waves (MASW) in winter under conditions of seasonal freezing of the top layer of soils. The data obtained in the suburbs of Novosibirsk are investigated. The presence of a thin high-speed frozen layer leads to a complex interference of the surface Rayleigh wave modes. The traditional MASW approach of diving and inversion of dispersion curves is of little use in such a situation. In order to interpret the obtained spectral images and select the parameters of the layered model of the medium, we conduct numerical data modeling using the matrix propgtor method.

Keywords: method of multichannel analysis of surface waves, seasonally frozen soils, numerical propagation of seismic waves

Введение

Метод многоканального анализа поверхностных волн (MASW) [1] широко используется для исследований массива грунтов и других пород верхней части разреза в инженерных целях. В частотности, согласно правилам СП 283.1325800.2016 [2], MASW рекомендуется применять при сейсмическом микро-районировании под строительство объектов повышенной ответственности. Стандартной ситуацией, наблюдаемой при исследованиях верхней части разреза, в том числе методом MASW, является увеличение скоростей сейсмических волн с глубиной. В этом случае, после применения $f-k$ преобразования к многоканальным записям вертикальной компоненты скоростей смещений среды, наблюдаемые спектральные максимумы соответствуют, как правило, фундаментальной моде волны Релея. Помехи в данных, связанные в том числе с рассеянием поверхностных волн на неоднородностях, вносят искажения в дисперсионные изображения. Для подавления помех и получения более достоверных результатов мы используем наклонное $f-k$ преобразование – SFK (slant $f-k$ transform) [3]. В случае наличия записей, как вертикальных, так и горизонтальных колебаний можно использовать метод фильтрации, предложенный в работе [4], позволяющий выделять волны с движением частиц против часовой стрелки (фундаментальная мода волны Релея в наблюдаемом сейсмическом диапазоне 10-100 Гц чаще всего обладает этим свойством). После получения дисперсионной кривой фундаментальной моды волны Релея решается обратная задача определения параметров горизонтально-слоистой модели верхней части разреза. С нашей точки зрения, наиболее эффективным подходом инверсии является применение искусственных нейронных сетей [5]. Помимо достоверности и быстродействия такой подход позволяет оценивать неоднозначность решения обратной задачи – получать «облака» возможных решений [6].

В случае понижения скорости с глубиной определение дисперсионной кривой фундаментальной моды затруднено в силу интерференции различных мод. На практике подобные инверсные разрезы встречаются в присутствии мерзлого слоя грунтов в верхней части разреза. В статье [7] метод MASW применяется в условиях вечной мерзлоты в окрестности мыса Барроу (США, Аляска). Вместо методов инверсии на основе дисперсионных кривых, [7] предлагается применять метод полно-волнового обращения с целью получения одномерных скоростных профилей (таких же как в стандартном MASW). Отметим, что несмотря на использование такого универсального метода инверсии, в работе [7] рассматриваются простые модели: примеры обработки синтетических данных для трехслойных сред и двухслойные модели в результате обработки полевых данных.

В нашей работе мы рассматриваем пример применения метода MASW в условиях сезонного промерзания верхнего слоя грунтов – анализируются полевые данные, полученные в зимний период в пригороде г. Новосибирска. На полученных после предварительной обработки дисперсионных изображениях хорошо прослеживаются максимумы спектральных амплитуд, которые, как показали численные эксперименты, не связаны напрямую с дисперсионными кри-

выми. На основе численного моделирования удалось выяснить, что распределение спектральной энергии указывает не только на наличие тонкого ~ 1 м. толщиной высокоскоростного слоя мерзлых грунтов, но и на тонкий ~ 1.5 м. слой дисперсных грунтов под ним, скорость в котором значительно ниже не только по сравнению с мерзлым слоем, но и с нижележащей частью массива грунтов.

Обработка полевых данных

Малоглубинные сейсмические исследования проводились зимой 2023 г. в пригороде г. Новосибирска, в окрестности поселка Ключи. Длина линейного профиля наблюдения составляет 30 м., в качестве приемников использовались трехкомпонентные 10 Гц геофоны, удары кувалдой в качестве источника. На рис. 1а и рис. 1б представлены записи радиальной (т.е. в горизонтальном вдоль оси наблюдения направлении) и вертикальной компонент скоростей смещений. На рис. 1в представлен фазовый спектр записей вертикальной компоненты, полученный с использованием наклонного $f-k$ (SFK) преобразования [2]. Следуя работе [3], к данным была применена фильтрация на основе анализа траекторий движения частиц в частотно-временной области. Оказалось, что большая часть энергии наблюдаемого волнового поля соответствует движению против часовой стрелки (считаем, что волна распространяется вдоль линейного профиля слева направо), её и оставляем после фильтрации. Фазовый спектр, обработанных таким образом записей, приведен на рис. 1г.

Численное моделирование и подбор параметров скоростного разреза

Сложное распределение энергии, наблюдаемое на фазовом спектре, приведенном на рис. 1г, свидетельствует о сложной интерференции мод поверхностной волны Релея. С целью интерпретации полученного распределения и подбора подходящей скоростной модели верхней части разреза нами была проведена серия численных экспериментов по расчету синтетических данных для различных моделей среды. Синтетические сейсмограммы рассчитываются методом матричных препараторов. В качестве исходной была выбрана двухслойная модель 1, параметры которой указаны в таблице 1. Верхний слой – грунт, нижний – скальные породы. Значения скоростей и мощность верхнего слоя были приняты с учетом результатов исследований MASW, выполненных в этом же районе летом. Полученное спектральное изображение показано на рис. 2а. Видно, что наблюдаемые спектральные максимумы близки к дисперсионной кривой фундаментальной моды (присутствуют некоторые смещения, связанные с влиянием первой высшей моды). В следующей модели 2 (см. таблицу 1) был добавлен высокоскоростной слой толщиной 1 м., что примерно соответствует средней глубине промерзания в окрестности г. Новосибирска. Как видно, на частоте 100 Гц значения фазовой скорости стали близки к наблюдаемым на этой же частоте в случае полевых данных. Это свидетельствует об адекватном выборе скоростей в мерзлом слое. После множества попыток нами была подобрана модель 3 фазовый спектр которой имеет сходство с полевыми данными (сравните рис. 1г и рис. 2в). Наблюдаемое разделение спектральных пиков на две части достигается за счет добав-

ления тонкого 1.5м. низкоскоростного слоя. Причем при незначительном, относительно всей толщии грунтов, изменении толщины этого слоя наблюдается уже другой характер распределения энергии. Например, при увеличении толщины низкоскоростного слоя до 2.5м. в модели 4 (см таблицу 1) наблюдается уже три кривые, которые на самом деле не являются дисперсионными кривыми, что видно на рис.2г на котором дисперсионные кривые показаны белым цветом.

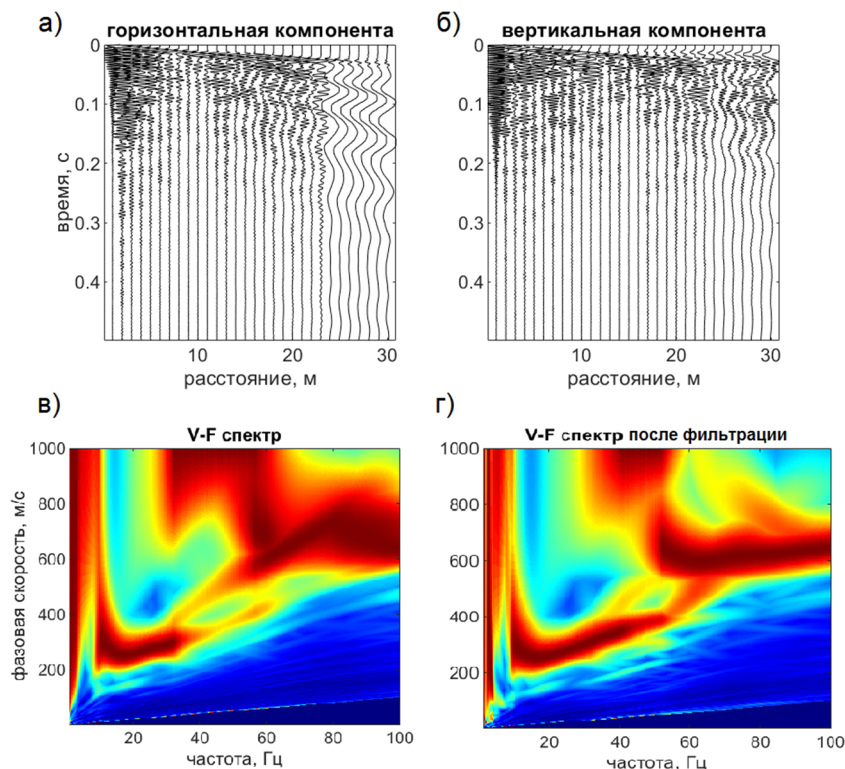


Рис.1 полевые данные и их спектры: а) записи горизонтальной компоненты скоростей смещения б) вертикальные компоненты в) V-F спектр записей вертикальных компонент, полученный методом SFK г) V-F спектр, полученный методом SFK с применением дополнительной фильтрации на основе частотно-временного анализа траекторий движений частиц среды

Таблица 1

Скоростные модели

	модель 1				модель 2			
$h, м$	19.5		∞		1	18.5		∞
$V_p, м/с$	770		3300		3300	770		3300
$V_s, м/с$	385		1650		1650	385		1650
$\rho, кг/м^3$	1800		2000		2000	1800		2000
	модель 3				модель 4			
$h, м$	1	1.5	17	∞	1	2.5	17	∞
$V_p, м/с$	3300	330	770	3300	3300	330	770	3300
$V_s, м/с$	1650	165	385	1650	1650	165	385	1650
$\rho, кг/м^3$	2000	1700	1800	2000	2000	1700	1800	2000

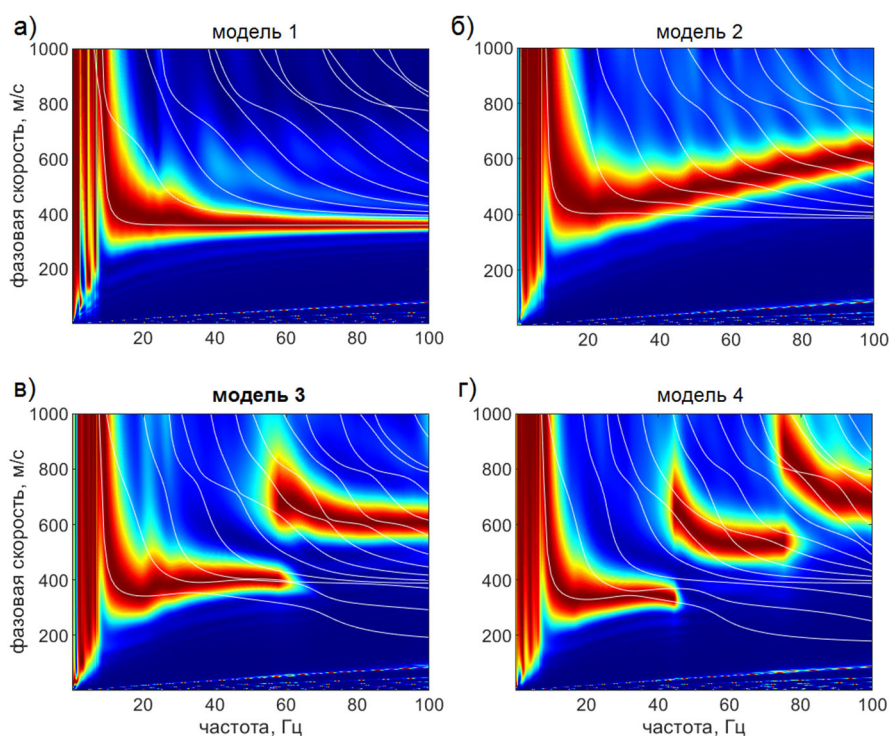


Рис.2 Фазовые V-F спектры синтетических данных (вертикальные компоненты) и дисперсионные кривые волн Релея: а) модель, б) модель 2, в) модель 3, г) модель 4.

Заключение

Приведенные результаты обработки полевых многоканальных данных поверхностных волн и численных экспериментов демонстрируют необходимость анализа дисперсионных изображений путем моделирования полных волновых полей, а не только дисперсионных кривых, в случае верхней части разреза с уменьшением скоростей с глубиной. Низкоскоростной слой под мерзлыми грунтами возникает возможно из-за уменьшения влажности – в зимний период вода от осадков не поступает и постепенно уходит из верхних (не мерзлых) слоев вниз. Как известно, скорости сейсмических волн в дисперсных грунтах сильно зависят от их водонасыщенности.

Благодарности

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Park C. B., Miller R. D., Xia J. Multichannel analysis of surface waves //Geophysics. – 1999. – Т. 64. – №. 3. – С. 800-808.
2. СП 283.1325800.2016 Объекты строительные повышенной ответственности. Правила сейсмического микрорайонирования" - Минстрой России, 2016 - 24 с.
3. 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. – Т. 84. – №. 1. – С. A19-A24.

4. А.С. Сердюков, М.В. Курленя, А.В. Яблоков, Т.В. Шилова, Р.А. Ефремов. Развитие мониторинга физического состояния массива горных пород на основе использования фундаментальной моды волны Рэлея // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2022. – №. 5. – С. 3-11.
5. Yablokov, A. V., Serdyukov, A. S., Loginov, G. N., & Baranov, V. D. An artificial neural network approach for the inversion of surface wave dispersion curves //Geophysical Prospecting. – 2021. – Т. 69. – №. 7. – С. 1405-1432.
6. Yablokov A., Lugovtsova Y., Serdyukov A. Uncertainty quantification of multimodal surface wave inversion using artificial neural networks //Geophysics. – 2023. – Т. 88. – №. 2. – С. KS1-KS11.
7. Dou S., Ajo-Franklin J. B. Full-wavefield inversion of surface waves for mapping embedded low-velocity zones in permafrost //Geophysics. – 2014. – Т. 79. – №. 6. – С. EN107-EN124.

© А. С. Сердюков, А. В. Яблоков, Р. А. Ефремов, 2023