

T 01

Development of Engineering Seismic Methods Based on Surface Waves

A.V. Yablokov* (IPGG SB RAS), A.S. Serdyukov (IPGG SB RAS), A.A. Duchkov (IPGG SB RAS) & P.A. Dergach (IPGG SB RAS)

SUMMARY

For the solution of many applied problems it is critical to know the distribution of elastic parameters of the upper part of geological structure (UPS).

Surface waves can be easily picked from seismograms using spectral analysis, due to their high energy level. This leads to accuracy of the methods, based on the usage of surface waves.

The object of our research is the method of multi-channel analysis of surface waves (MASW). MASW consists from the following stages: data recording, dispersion analysis, evaluating the shear wave velocities.

The goal of our research is the improvement of the considered algorithms. We are focused on the development of the MASW method: improvement its efficiency and reliability. Series of tests on synthetic and real data, exploring the dependence on the initial approximation, have been performed. We propose a method of constructing a start model, providing a convergence of the solution. Other important result is the improvement of the spectral analysis. Spectrum denoising algorithm, based on the usage of smooth window transforms, is proposed.

Our MASW algorithm has been tested a number of times, while processing field data. The inversion results are consistent with the results, obtained by other methods.

Развитие методов инженерной сейсморазведки на основе данных поверхностных волн

А.В. Яблоков* (ИНГГ СО РАН), А.С. Сердюков (ИНГГ СО РАН), А.А. Дучков (ИНГГ СО РАН), П.А. Дергач (ИНГГ СО РАН)

Введение

В работе рассматривается задача исследования скоростного строения верхней части геологического разреза (ВЧР) глубиной порядка несколько десятков метров методами сейсморазведки. Подобные исследования ВЧР широко применяются при решении многих инженерных задач связанных, например, со строительством. В частности, эта задача особенно актуальна для восточной Сибири из-за наличия резких контрастов в ВЧР в зонах многолетнемерзлых пород.

Методы, основанные на обработке поверхностных волн, отличаются достоверностью результатов. Это связано с тем, что, как правило, не менее $2/3$ части энергии при возбуждении колебаний затрачивается на образование волн данного типа. При этом достигается высокое соотношение сигнал/помеха и поверхностные волны могут быть легко выделены путем спектрального анализа сейсмограмм. В работе рассматривается метод многоканального анализа поверхностных волн (MASW), предназначенный для построения горизонтально-слоистой модели ВЧР по наблюдаемым дисперсионным кривым фазовых скоростей волн Релея. Данный подход получил широкое распространение в инженерной геофизике. Тем не менее, существует достаточно мало работ, в которых бы рассматривались и обобщались результаты тестирования метода на синтетических и реальных данных в широких диапазонах изменения параметров восстанавливаемой скоростной среды. Метод MASW реализован во многих коммерческих программных пакетах. В типичном графе обработки, присутствуют неоднозначные операции по выделению дисперсионных кривых поверхностных волн, зависящие от опыта пользователя в интерпретации спектров сейсмограмм. Как правило, отсутствует возможность оценки достоверности результатов восстановления скоростного разреза.

Целью работы является развитие методов, основанных на анализе поверхностных волн, на предмет повышения их эффективности и достоверности результатов. Была предложена новая реализация метода многоканального анализа поверхностных волн. Особенности новой реализации включают в себя:

- Ускорение вычисления решения обратной задачи, путем применения алгоритма распараллеливания Open MP на отдельные физические ядра процессора.
- Тестирование метода на ряде синтетических данных и исследование влияния начального приближения на сходимость итерационного процесса решения обратной задачи и оригинальный метод построения стартовой модели.
- Обработка реальных данных и исследование путей улучшения перехода к их спектрам путем применения системы оконных преобразований.

Теория метода

Основными этапами метода многоканального анализа поверхностных волн являются (рисунок 1):

- Регистрация волнового поля и запись сейсмограмм
- Спектральный анализ сейсмограмм
- Восстановление распределения параметров среды

Запись сейсмограмм производится профильной системой наблюдений с использованием активных сейсмических источников. В качестве приемников рекомендуется использовать

низкочастотные (4.5 Гц) вертикальные сейсмоприемники, допускается использование более высокочастотных (10 Гц). Глубинность и разрешающая способность метода зависят от параметров системы наблюдений. В зависимости от целей работ для инженерных задач длина приемной линии выбирается в интервале: 10-500 метров, шаг между приёмниками 0,1-5 метров шаг между пунктами взрыва 0,5-10 метров.

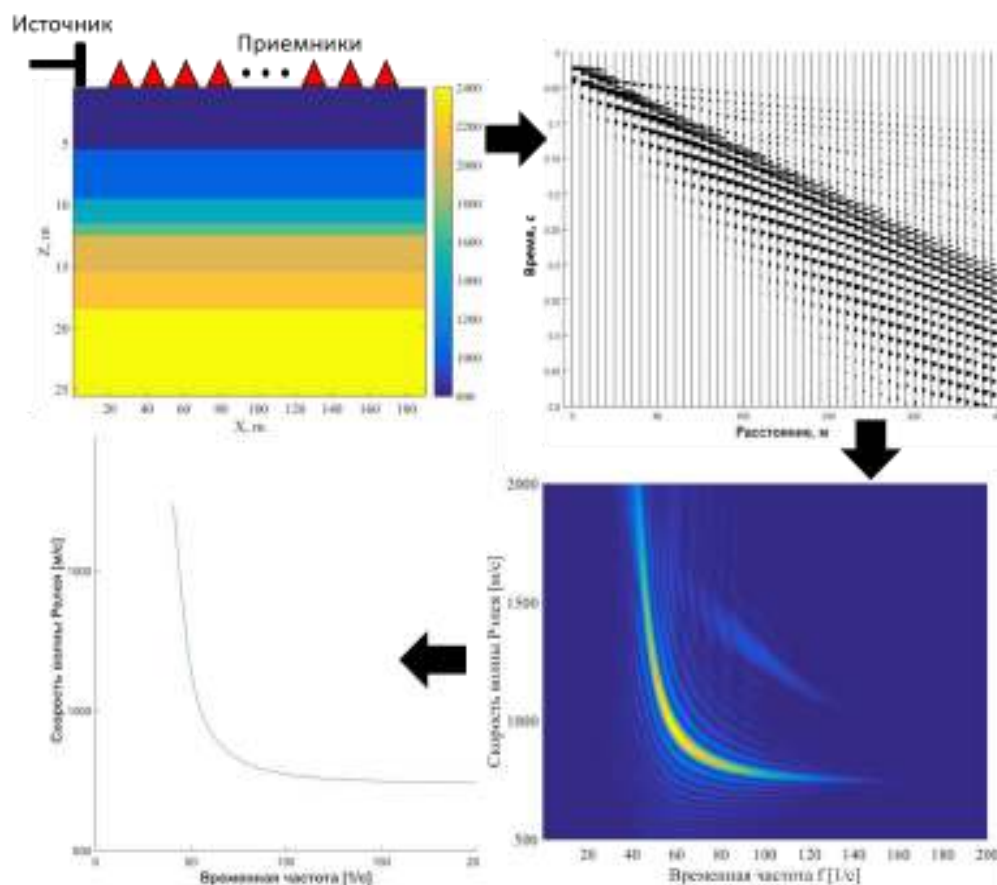


Рисунок 1 Основные этапы метода многоканального анализа поверхностных волн

Спектральный анализ: построение дисперсионных изображений из сейсмограмм и выделение дисперсионных кривых. Первым шагом этого этапа является переход в спектральную $f-k$ область путем применения ко всей сейсмограмме двумерного преобразования Фурье по координате выноса и по времени. Далее осуществляется трансформация $f-k$ ($1/c-1/m$) изображения в область зависимости фазовой скорости волны Релея от временной частоты $V-f$ ($m/c-1/c$) (преобразование Радона). Поверхностные волны сильно выделяются по уровню энергии. Зачастую может быть выделено несколько типов мод, т.е. наблюдается мультимодальный характер распространения. Снятие дисперсионных кривых происходит путем пикирования максимумов амплитуд в прослеживаемом частотном диапазоне, который зависит от длины сейсмического профиля, шага между сейсмоприемниками, длины записи сейсмограммы и шага дискретизации по времени.

Восстановление профиля скорости поперечной волны основано на подборе параметров слоистой одномерной модели (скорости поперечных волн) по наблюдаемой дисперсионной кривой путем многократного решения прямой задачи. Далее, как правило, применяется интерполяция одномерных профилей с целью получения 2D, 3D-моделей исследуемого геологического разреза. Прямая задача решается в рамках одномерной модели среды: состоящих из однородных изотропных горизонтальных плоскопараллельных слоев, для которых зависимость фазовой скорости от частоты (дисперсионную кривую) можно получить аналитическим путем, с помощью решения задачи на собственные значения для вектора движения-напряжения [Аки, Ричардс 1983]. Для решения этой задачи нами используется

модифицированный метод матричного пропагатора «метод коэффициентов отражения и преломления» («method of reflection and transmission coefficients») [Lai, Rix 1998]. Далее на этой основе строится алгоритм решения обратной задачи, заключающийся в поиске параметров модели, которые соответствуют минимуму функционала невязки между наблюдаемыми дисперсионными кривыми и рассчитанными аналитически. Минимизация осуществляется с помощью алгоритма Левенберга-Марквардта, представляющего собой модификацию метода Ньютона [Solano 2013]. В виду слабой зависимости дисперсионных кривых от скоростей продольных волн, толщин и плотностей слоев целесообразно рассматривать восстановление только профиля скорости поперечной волны, которая напрямую связана с жесткостью, модулем сдвига и модулем Юнга. Для задания скорости продольной волн и толщины слоев, используется информация, получаемая из метода преломленных волн t_0' .

Современные стационарные и портативные компьютеры предоставляют возможность распараллеливания вычислений, создания новых методов и алгоритмов, ориентированных на эффективное использование в многопроцессорных системах. Нами была применена методика распараллеливания Open MP для вычисления матрицы чувствительности (Якобиана) походу решения обратной задачи. В результате программная реализация алгоритма MASW была значительно ускорена (в 3-4 раза) по сравнению с последовательным алгоритмом.

Было проведено исследование поведения алгоритма на ряде синтетических скоростных моделей для различных сред, на предмет повышения достоверности и эффективности метода. В данной работе для моделирования волнового поля и записи сейсмограмм от источников типа вертикальной силы в двумерном пространстве использовался открытый программный пакет SOFI2D, разработанный сотрудниками технологического института г. Карлсруэ, Германия [Bohlen 2002]. В пакете реализована схема на сдвинутых сетках на основе аппроксимаций производных различного порядка точности для изотропной системы уравнений упругости.

В результате исследования алгоритма инверсии была дана оценка сходимости процесса в зависимости от выбора начального приближения. На рисунке 2 представлены результаты инверсии по синтетическим данным при разном отклонении стартовой модели от истинной модели среды и соответствующее им поведение функционалов невязки в зависимости от шага итерации. Как видно из поведения функционала глобальный минимум достигается, т.е. итерационный процесс решения обратной задачи сходится, при начальной модели, отличающейся от истинной не более чем на 45%.

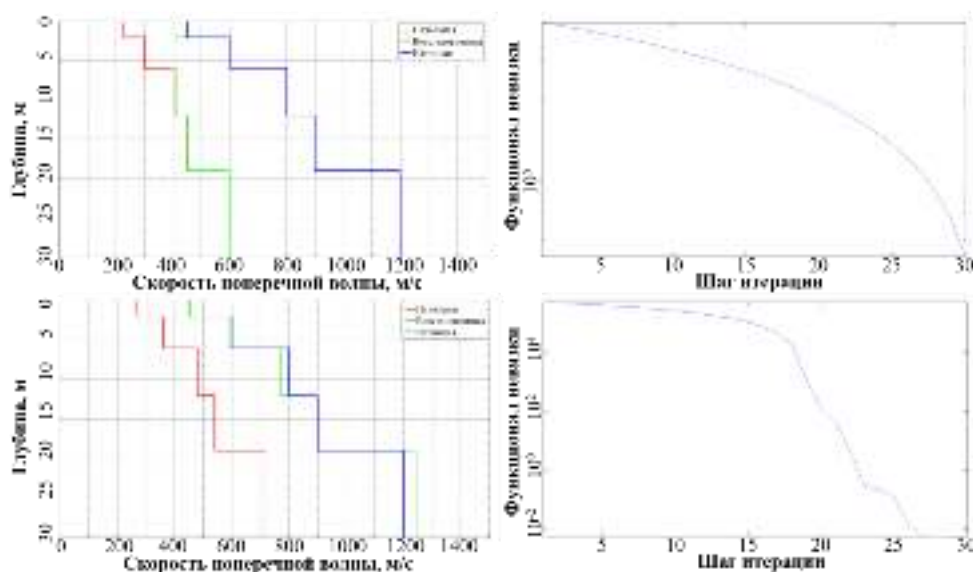


Рисунок 2: Сверху слева результат инверсии при стартовой модели, отличающейся от истинной на 50%, на рисунке снизу слева на 40% для каждого слоя. Справа представлены функционалы невязки в зависимости от шага итерации для каждого случая.

Подобную точность задания стартового приближения можно достичь при использовании предложенного нами способа, схематично представленного на рисунке 3. Для задания стартовой модели используется наблюдаемая дисперсионная кривая и некоторые физические особенности волны Релея. Максимальная глубина исследования h_{\max} примерно равна половине максимальной длины волны, которая определяется типом используемого источника, характеристикой среды и параметрами системы наблюдений. Повысить глубину исследования можно используя более мощные источники и более низкочастотные приемники. Связь скорости поперечной волны и волны Релея берется из расчета для однородной среды. При коэффициенте Пуассона $\nu \in [0; 0,5]$ скорость волны Релея меняется в пределах $V_R \in [0,87; 0,96]V_s$.

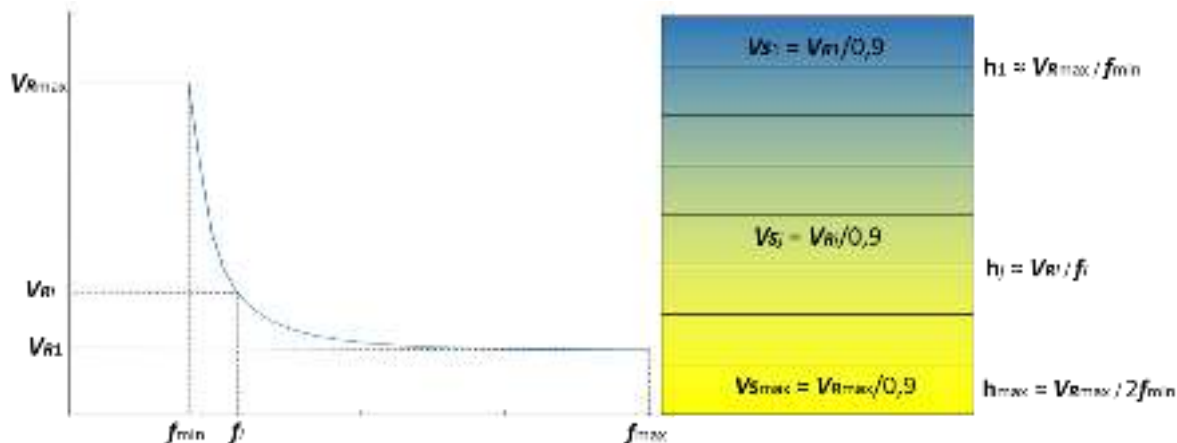


Рисунок 3 Схема построения начальной модели из наблюдаемой дисперсионной кривой

Как показывают примеры обработки реальных и синтетических данных выделение дисперсионных кривых на спектрах сейсмограмм является не простой и неоднозначной процедурой, т.к. малые отклонения в значениях дисперсионной кривой дают большие отклонения в скоростях конечной модели. В связи с этим было проведено исследование спектров сейсмограмм и предложена процедура улучшения их расчета, а, следовательно, и повышение однозначности выделения дисперсионной кривой. Процедура представляет из себя систему двумерных сглаженных прямоугольных оконных преобразований. Переход к спектрам сейсмограмм выражается общей формулой:

$$F(k, f) = \iint f(x, t) W(x - x_0, t - t_0) \exp(-i2\pi ft) \exp(i2\pi kx) dt dx.$$

где $f(x, t)$ – сейсмограмма, $W(x - x_0, t - t_0)$ – некоторая оконная функция. В результате таких преобразований спектр сейсмограмм становится значительно «чище», что позволяет лучше проследить дисперсионную кривую. На рисунке 4 представлен пример использования процедуры оконных преобразований для реальных данных, полученных профильной системой наблюдения близ села Быстровка, Новосибирская область. На этом примере видно, что без сглаживающих оконных преобразований спектр сейсмограммы зашумлен различными помехами, представляющие из себя паразитные волны в низкочастотной части спектра, и затруднена пикировка дисперсионной кривой фундаментальной моды. После применения оконного преобразования большая часть помех убирается, и можно более точно судить о количестве наблюдаемых мод, в данном примере их три, и более точно выделить фундаментальную моду.

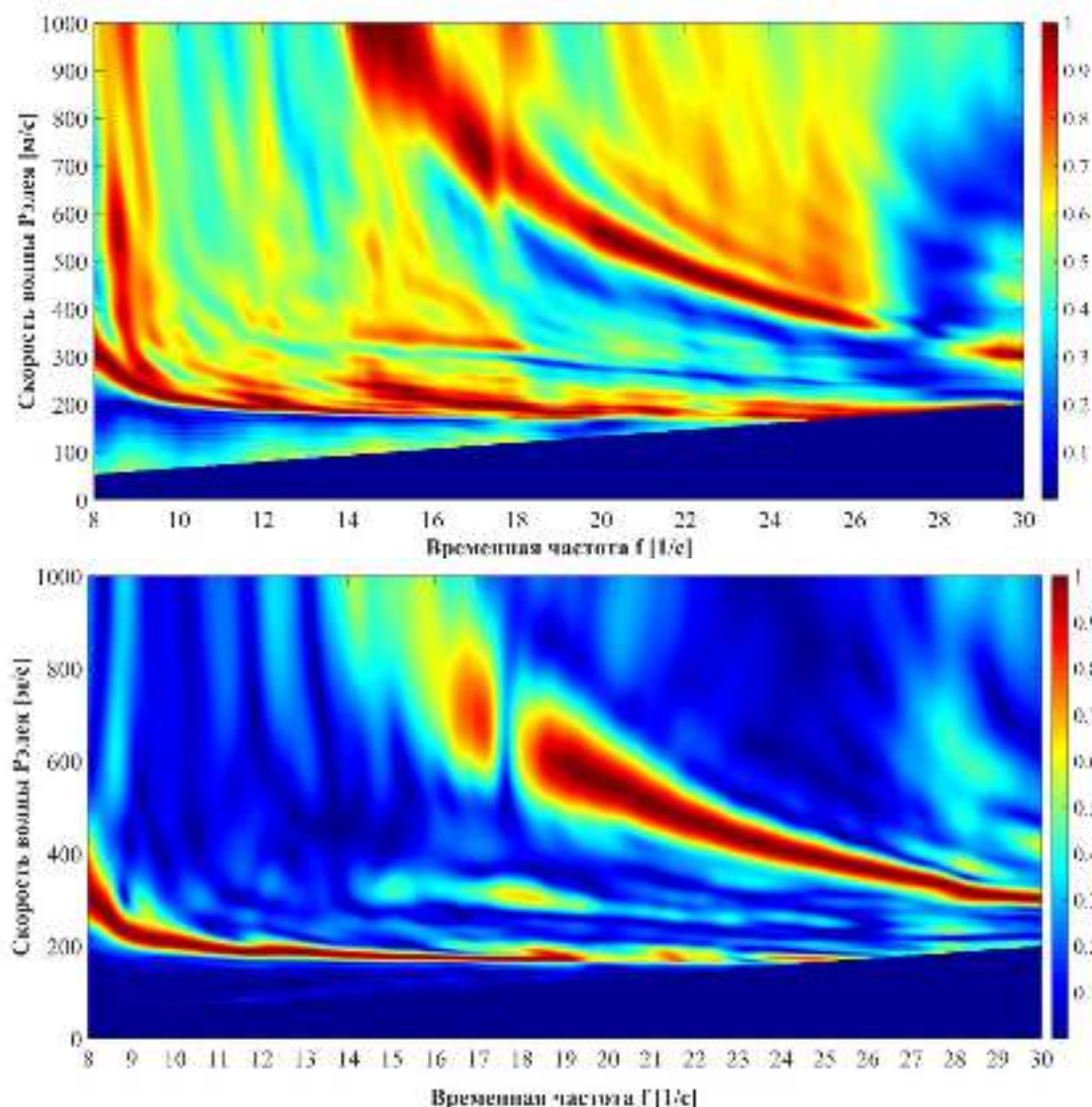


Рисунок 4 Пример дисперсионного изображения для реальных данных. Сверху: без оконного преобразования. Снизу: со сглаживанием во временной области с помощью оконного преобразования

Пример обработки реальных данных

В рамках опытно-методических работ полевого отряда малоглубинной инженерной сейсмологии ИНГГ СО РАН 8 ноября 2015 года проводился мониторинг размытия дороги, ведущей в поселок Ключи в Новосибирской области.

Все измерения проводились вдоль линейного профиля общей длиной $L=92$ метра. Использовались однокомпонентные (вертикальные «z») 10-герцовые сейсмоприемники, шаг между которыми составлял 1 метр. Пункты возбуждения (ПВ) располагались вдоль профиля с шагом 5 метров. Все ПВ производились с помощью ударного сейсмического источника (кувалды).

Обработка по методу многоканального анализа поверхностных волн проводилась по методике «профилирования» с привязкой результата к серединной точке расстановки. Согласно методике, сейсмограммы с каждого ПВ нарезаются по метражу с шагом, соответствующему шагу между ПВ, на участки равной длины (длина участка была выбрана 20 метров) и результат инверсии с каждой нарезанной сейсмограммы привязывается к ее середине. Шаг по

приемникам сохраняется прежним. Для обработки используется первая от источника сейсмограмма с одной и той же стороны.

Пример сейсмограмм вертикальной компоненты смещения, полученный на профиле показан на рисунке 5. Далее от сейсмограмм переходим к их спектрам (пример см. на рисунке 6) и извлекаем дисперсионные кривые (рисунок 7). По каждой извлеченной кривой было проведена инверсия и была получена одномерная модель скорости поперечной волны. Затем данный результат был интерполирован по X- и Y-направлению методом Криге (Kriging) в программе Surfer (рисунок 8).

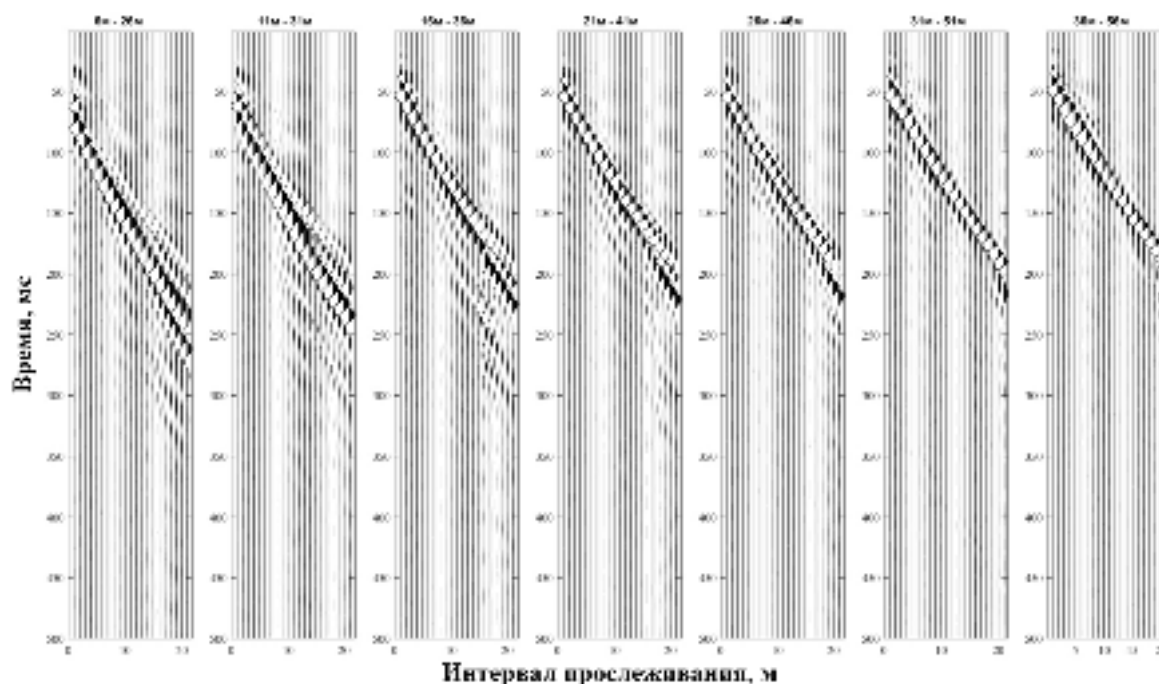


Рисунок 5 Сейсмограммы вертикальной компоненты смещений после обрезки для привязки результата к серединной точке расстановки, полученные на пунктах взрыва 1-7

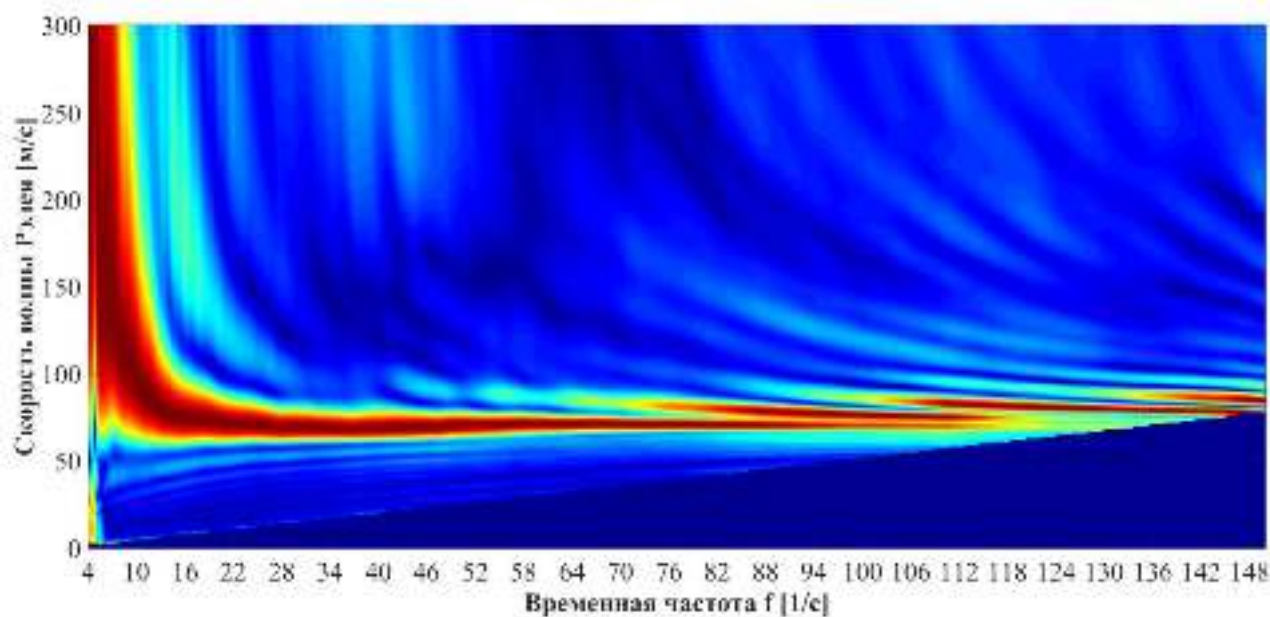


Рисунок 6 Спектр сейсмограммы в виде дисперсионного изображения, области зависимости фазовой скорости волны Релея от временной частоты, полученной на пункте взрыва 6

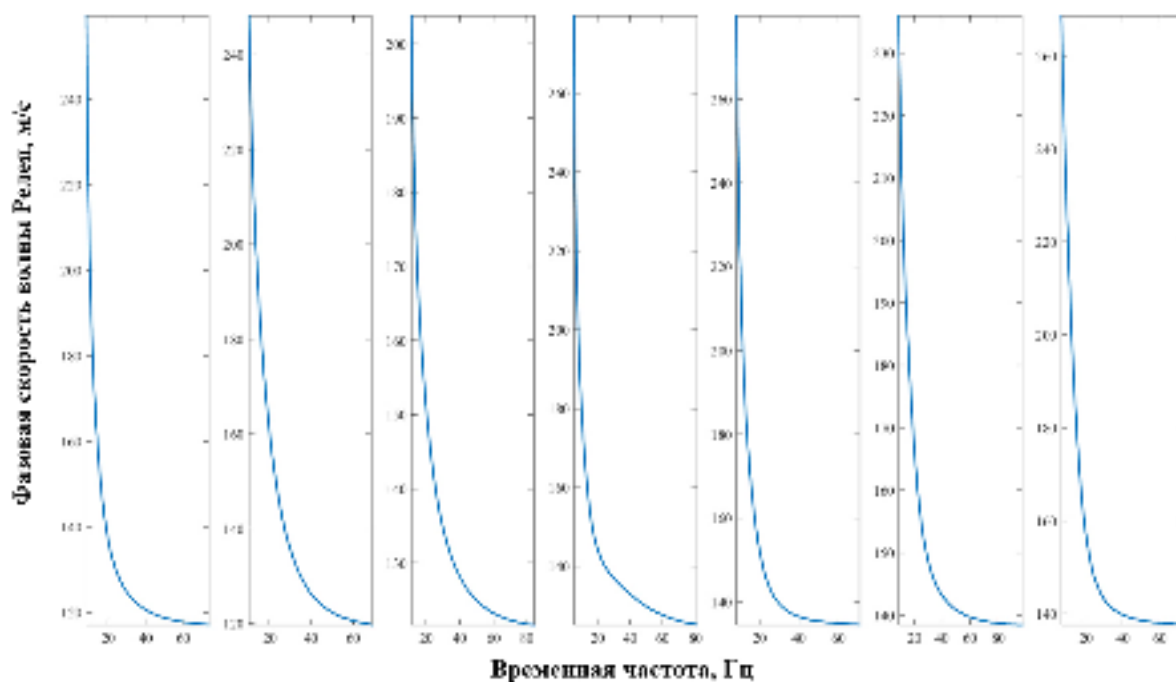


Рисунок 7 Дисперсионные кривые, извлеченные из спектра сейсмограмм 1-7

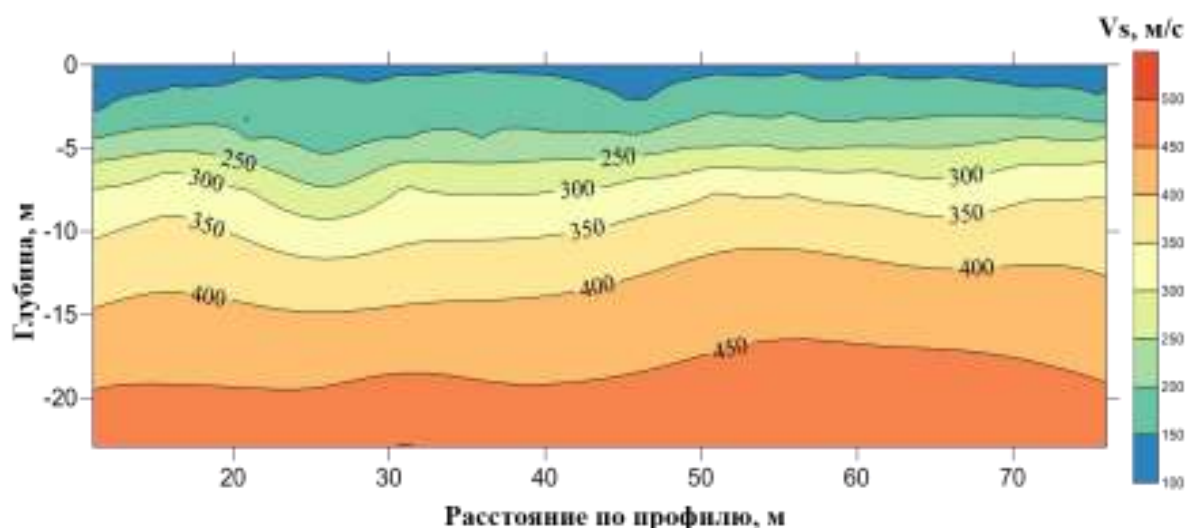


Рисунок 8 Скоростной разрез (V_s) с восстановленным градиентом, построенный путем интерполирования по X - и Y - направлениям $1D$ -моделей методом Криге (Kriging) в программе Surfer.

На рассматриваемом объекте также было проведено восстановление скоростного разреза продольных волн методом t_0' . В результате была восстановлена резкая граница на глубине порядка 5 метров с перепадом продольных скоростей от значений порядка 400 м/с до 1200 м/с. Из рисунка 9 следует, что данная граница не является литологической, так как не наблюдается резких перепадов значений скорости поперечной волны. Можно сделать вывод, что перепад скоростей продольных волн на 5 метров соответствует линии грунтовых вод.

Выводы

Была разработана новая эффективная реализация метода многоканального анализа поверхностных волн, включающая в себя процедуру построения начального приближения, реализацию алгоритма построения спектров сейсмограмм с применением сглаженных оконных преобразований и извлечения дисперсионных кривых, и ускорение алгоритма решения

обратной задачи по поиску минимума функционала невязки. Было проведено тестирование на ряде синтетических и реальных данных на предмет повышения достоверности и эффективности метода.

Благодарности

Суворову В.Д и Кулакову И.Ю. за полезное обсуждение работы и ценные замечания, Никитину А.А. за отладку и настройку программы прямого моделирования упругих волн SOFI2D. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований – грант РФФИ № 16-35-60062 мол_а_дк.

Библиография

1. Аки К., Ричардс П. [1983]. Количественная сейсмология: Теория и методы. Т. 1.
2. Lai, C. G., Rix, G. J. [1998]. Simultaneous inversion of Rayleigh phase velocity and attenuation for near-surface site characterization. School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology.
3. Solano, C. A. P. [2013]. Two-dimensional near-surface seismic imaging with surface waves: alternative methodology for waveform inversion. Doctoral dissertation, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France, 2013.
4. Bohlen, T. [2002]. Parallel 3-D viscoelastic finite difference seismic modelling. Computers and Geosciences, 28(8), 887-899.

Контактная информация

ФИО: Яблоков Александр Викторович

E-mail: yablokov.alexandr93@gmail.com

телефон: +79139197203

почтовый адрес: г. Новосибирск, ул. Ляпунова, д.2, почтовый индекс 630090.