

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ МАЛОГЛУБИННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ НА ОСНОВЕ  
ОБРАБОТКИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ДАННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН**

**А.В. Яблоков<sup>1</sup>, А.С. Сердюков<sup>2,3</sup>**

*Научный руководитель ст. науч. сотр. А.С. Сердюков*

*<sup>1</sup>Национальный исследовательский Новосибирский государственный  
университет, г. Новосибирск, Россия*

*<sup>2</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
г. Новосибирск, Россия*

*<sup>3</sup>Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

Большая часть территории России расположена в зоне многолетнемерзлых пород. На этих землях находится более 30% разведанных запасов нефти и около 60% природного газа, развита промышленная и транспортная инфраструктура. Глобальное потепление климата оказывает влияние на термальный режим вечномерзлых грунтов. В дополнение к этому усиливается техногенное воздействие человека, производятся механические нагрузки на массив грунтов всеми типами инженерных объектов. Реакция многолетнемерзлых пород на это воздействие проявляется в виде образования зон оттаивания, размыва и деформаций. Это приводит к росту числа аварий на инженерных сооружениях.

В настоящее время активно разрабатываются геофизические методы мониторинга и прогнозирования состояния грунтов при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений на вечной мерзлоте. Изменение термального режима неизбежно влияет на физико-механические свойства грунтов и ведет к формированию границ резкого изменения геомеханических свойств (мерзлые – талые, сухие – водонасыщенные породы и т. д.). Наиболее подходящим методом для мониторинга изменения физико-механических свойств является сейсморазведка. Важнейшие свойства, определяемые согласно регламенту инженерно-геологических изысканий, могут быть с достаточной степенью точности найдены из скоростных разрезов продольных и поперечных упругих волн [3].

В работе предлагается метод исследования скоростного строения верхней части геологического разреза глубиной порядка несколько десятков метров на основе анализа многокомпонентных данных поверхностных волн. Использование многокомпонентных данных позволяет оценить анизотропные свойства среды. Важность определения этих свойств связана с естественной тонкослоистой структурой осадочных пород. Кроме этого, процессы многократного оттаивания и промерзания приводят к развитию системы трещин, которые осложняют структуру и усиливают анизотропность среды.

Методы, основанные на обработке поверхностных волн, отличаются достоверностью результатов. При возбуждении упругих колебаний на поверхности не менее 2/3 энергии затрачивается на образование волн данного типа, поэтому достигается высокое соотношение сигнал/помеха на записях сейсмограмм. Данный подход получил широкое распространение в инженерной геофизике и реализован во многих коммерческих программных пакетах. Типичная реализация методики подразумевает обработку данных только волн Релея, что, несомненно, не может дать полного представления о строении среды, в частности, о распределении параметров анизотропии. Определение параметров трещиноватости среды является новой и важной задачей, т.к. вдоль поверхности трещин может происходить проскальзывание и сползание слоев грунта даже при относительно малых углах наклона [4].

Целью работы является усовершенствование методов, основанных на анализе поверхностных волн, для повышения их эффективности и достоверности результатов. Особенности данной реализации методики включают в себя: 1) ускорение процедуры решения прямой задачи расчета дисперсионных кривых волн Релея и Лява; 2) исследование путей улучшения перехода к спектрам сейсмограмм путем применения системы оконных преобразований; 3) реализацию нового метода решения обратной задачи, основанного на алгоритме Оккама; 4) оригинальный метод построения начального приближения с использованием только наблюдаемой дисперсионной кривой.

Прямая задача решается в рамках одномерной модели среды, состоящей из однородных изотропных горизонтальных плоскопараллельных слоев, для которых кривую зависимости фазовой скорости от частоты (дисперсионную кривую) можно получить путем решения аналитических выражений. Решается задача на собственные значения для вектора движения-напряжения [2]. Для решения этой задачи в данной работе используется модифицированный метод матричного пропагатора – «метод коэффициентов отражения и преломления».

Для извлечения дисперсионной кривой поверхностной волны из сейсмограммы необходимо применять двумерное преобразование Фурье для перехода в спектральную область. Как показывают примеры обработки реальных и синтетических данных, выделение дисперсионных кривых на спектрах сейсмограмм является непростой 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 и, следовательно, повышения однозначности выделения дисперсионной кривой. Процедура представляет из себя систему двумерных сглаженных прямоугольных оконных преобразований, которые применяются к сейсмограммам до перехода к их спектрам. Также необходимо отметить, что предварительное выделение поверхностных волн на исходной сейсмограмме значительно упрощает и повышает однозначность пикирование кривой на спектре.

Восстановление профиля скорости поперечной волны основано на подборе параметров слоистой одномерной модели (скорости поперечных волн) по наблюдаемой дисперсионной кривой путем многократного решения прямой задачи. Решение обратной задачи заключается в поиске параметров модели, которые соответствуют минимуму функционала невязки между наблюдаемыми и аналитически рассчитанными дисперсионными кривыми. Применение алгоритма Оккама [1] позволяет из всех возможных моделей выбирать максимально гладкую за счет входящих в инверсию сглаживающих операторов. Такой подход представляется авторам наиболее обоснованным.

В рамках опытно-методических работ полевого отряда малоуглубинной инженерной сейсмологии ИНГГ СО РАН в июне 2016 года проводились сейсмические работы в районе развития вечной мерзлоты Республики Алтай. Объект представляет собой небольшое поднятие (высотой 5 м) типа бугра пучения. Для обработки по методу поверхностных волн, был выбран профиль длиной 80 м, на котором проводились возбуждения с помощью как вертикальных ударов кувалдой по металлической подложке, так и горизонтальных ударов в торец пригруженной шпалы. Волны Релея и Лява регистрировались с шагом 2 м вертикальными и горизонтальными сейсмоприемниками соответственно.

Как можно заметить на приведенном рисунке, иллюстрирующем результаты решения обратной задачи, скорости поперечных волн в двух ортогональных направлениях для одних и тех же глубин существенно различаются (в 1,5-2 раза). Это говорит о наличии в среде сильной анизотропии грунтов, которая предположительно связана с образованием системы трещин, являющихся питающими каналами бугра пучения. Этот пример является показательным в плане наличия в среде в общем случае некоторой степени анизотропии, которая должна учитываться при проведении инженерно-геологических изысканий

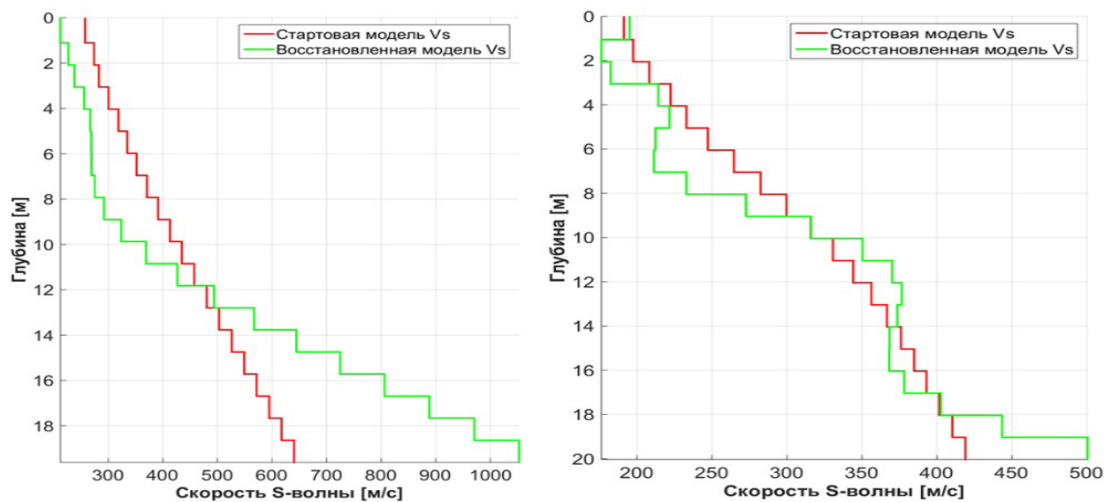


Рис. Восстановленные путем обработки поверхностных волн одномерные модели скоростей поперечной волны по данным, полученным в районе развития бугров пучения. Слева – по волнам Лява, справа – Релея

Таким образом, в результате исследований была рассмотрена задача восстановления скоростного разреза поперечной волны по поверхностным волнам Релея и Лява и показана целесообразность использования волн обоих типов при обработке сейсмических данных для определения параметров анизотропии в среде. Полученные результаты говорят об успешном применении новой реализации метода анализа многокомпонентных данных поверхностных волн, включающей в себя обработку первичных сейсмограмм, спектральный анализ и инверсию волн Лява и Релея.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации № МК-7778.2016.5.

#### Литература

1. Constable S. C., Parker R. L., Constable C. G. Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data // *Geophysics*. – 1987. – Т. 52. – № 3. – С. 289 – 300.
2. Lai C. G., Rix G. J. Simultaneous inversion of Rayleigh phase velocity and attenuation for near-surface site characterization. – School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, 1998. – 258 p.
3. Курленя М.В., Сердюков А.С., Чернышов Г.С., Яблоков А.В., Дергач П.А., Дучков А.А. Методика и результаты исследования физико-механических свойств связанных грунтов сейсмическим методом // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2016. – № 3. – С. 3-10.
4. Курленя М.В., Чернышов Г.С., Сердюков А.С., Дучков А.А., Яблоков А.В. Методика и результаты сейсмического исследования процессов образования оползней в условиях многолетнемерзлых пород // *ФТПРПИ*. – 2016. – № 5. – С. 3-11.