

**РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ ПОСЛОЙНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ  
РАЗРЕЗА ПО ДАННЫМ МАЛОГЛУБИННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ  
В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ**

**Г.С. Чернышов, А.В. Яблоков, А.С. Смелов**

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

**Национальный исследовательский Новосибирский государственный университет,  
г. Новосибирск, Россия**

В работе предлагается методика послойного восстановления разреза для моделей с латерально-неоднородным распределением скорости в слоях и криволинейными границами по данным малоуглубинной сейсморазведки. Суть подхода заключается в комбинировании стандартных способов обработки с целью повышения точности определения скоростного разреза в условиях вечной мерзлоты. Метод был применен для обработки реальных данных, полученных при малоуглубинных сейсмических исследованиях в республике Горный Алтай вблизи поселка Чаган-Узун в июне 2016 г.

Техногенное воздействие вызывает неизбежные изменения в геокриологических условиях, которые могут приводить к интенсивному оттаиванию вечной мерзлоты. При ее деградации деструктивные экзогенные процессы начинают протекать интенсивнее, могут перейти в катастрофическую стадию. Эти явления протекают на фоне общего естественного повышения температуры и постепенного оттаивания мерзлых пород. В последние двадцать лет в зоне вечной мерзлоты увеличилось число аварий на объектах инфраструктуры. Важной задачей является мониторинг состояния мерзлых пород и грунтов [5]. Особенно подобные исследования актуальны при разработке месторождений твердых полезных ископаемых открытым способом – эта деятельность сопровождается радикальным антропогенным воздействием. Необходимо контролировать устойчивость оснований и откосов карьеров, отслеживать возникновение оползней, в том числе и вдоль естественных склонов в районах проведения взрывных работ [3].

Особенностью районов с вечной мерзлотой являются: сильная латеральная неоднородность разрезов, связанная с наличием линз оттаявших (талых) пород; большой контраст скоростей между мерзлой толщей и талыми линзами пород. Стандартные способы обработки данных малоуглубинной сейсморазведки – метод  $T_0'$ , работающий в предположении слонстой модели среды с небольшими наклонами плоских границ. Другим распространенным подходом является лучевая томография, позволяющая восстанавливать гладкую скоростную модель без резких границ. При наличии субвертикальных границ эти методы оказываются неприменимы. Предлагаемый нами способ работает в предположении, что каждый из слоев имеет гладко-неоднородное скоростное строение, а граница между ними представляет собой произвольную кусочно-гладкую кривую [4]. Такая постановка задачи актуальна при проведении сейсмических исследований в районах с вечной мерзлотой.

Опишем предлагаемую методику более подробно. Сначала необходимо получить систему увязанных годографов со всего профиля наблюдений, дальнейшая обработка включает в себя четыре этапа:

Этап 1. Необходимо определить точки перегибов годографов, определяющих координату профиля, после которой в первых вступлениях наблюдается головная волна. На этом этапе разделяются точки перелома годографов в случае с переходом от прямой к головной волне и точки перелома, связанные с выклиниванием слоя.

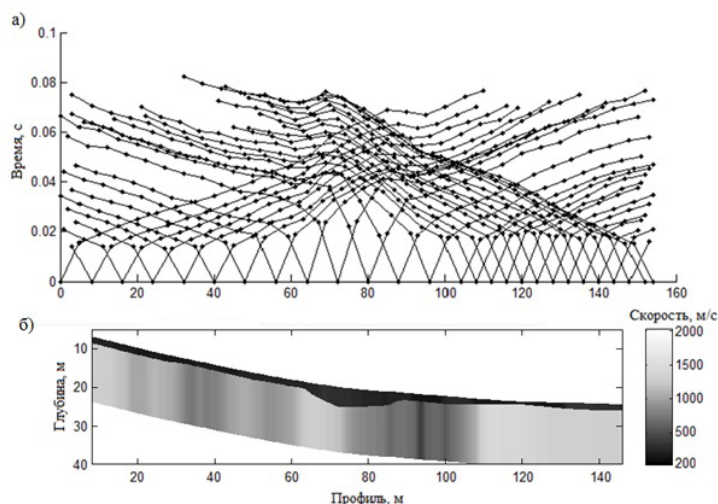
Этап 2. Определяется скорость распространения сейсмических волн в верхнем слое. При однородных слоях скорость во всем слое определяется по наклону годографа. В данной работе слои считаются неоднородными, вследствие чего для восстановления скоростной модели используется лучевая томография методом усеченного SVD разложения. В качестве начальной модели берется одномерная модель со скоростью, определенной по наклону годографа прямой волны. После построения скоростной модели верхнего слоя необходимо найти геометрию границы раздела. Так как она не предполагается плоско-горизонтальной, важно учитывать, что не все наблюдаемые преломленные волны являются головными. На отдельных участках профиля могут наблюдаться многократно преломленные волны. Применение стандартного метода  $T_0'$  [2] в таком случае проблематично. Поэтому мы применяем метод полей времен пробега. При таком подходе (в отличие от  $T_0'$ ) нет необходимости заранее находить распределение скоростей в подстилающем высокоскоростном слое. В условиях сложной криволинейной геометрии границы раздела это является существенным преимуществом.

Этап 3. В полученной модели первого слоя методом полей времен определяется граница первого слоя. Метод заключается в расчете полей времен для прямой и для головной волны по выделенным участкам одного годографа. Далее поле времен вычитаются, и по точкам нулевых значений проводится кривые совпадения времен. Границей является огибающая кривых совпадения времен для всей совокупности годографов. Для расчета полей времен использовался метод численного решения уравнения эйконала Fast Marching [1].

Этап 4. Годографы первых вступлений пересчитываются на восстановленную границу. В результате получаем двухслойную модель среды с латерально неоднородными слоями и годографы на поверхности границы, что дает возможность повторить методику для восстановления следующей границы.

Данная методика была применена при обработке полевых данных. Сейсморазведочные работы проводились на профиле длиной 154 м с шагом между пунктами приема 2 м, шаг по пунктам взрыва до 114 м профилем составлял 8 м, после – 4 м. В качестве источника использовалась кувалда массой 5 кг. Полученные сейсмограммы имели достаточно высокий уровень сигнал/помеха, что способствовало легкому пикированию времен первых вступлений (рис. 1а). Погрешность увязки взаимных времен годографов не превышала 3 мс. Далее к годографам

была применена методика послойного восстановления разреза, результаты которой приведены на рис. 16. Основным критерием выделения границ разделов между мерзлыми и тальми породами являются различия в значениях скоростей сейсмических волн. Увеличение скорости упругих волн в мерзлых породах определяется дисперсностью пород. На исследованном объекте толща грунтов сложена глинистыми породами. Идентификация мерзлого состояния в глинах только по значениям скоростей продольных волн может быть неоднозначной, т.к. диапазоны скоростей в мерзлых и талых (водонасыщенных) глинах перекрываются. Но при наличии резких перепадов скоростей, полученных на однородном по литологическому составу разрезе, можно с уверенностью говорить о четкой границе между этими двумя фазами. Удалось выделить низкоскоростную (200-250 м/с) линзу оттаявших пород по центру профиля, переходящую в тонкий слой, прослеживающийся вдоль всей линии наблюдений, что говорит о неравномерности оттаивания мерзлых пород. В совокупности с резкими перепадами в рельефе, которые характерны для исследуемого района, это может привести к откалыванию и сходу грунтовых масс.



**Рис.1. а) совокупность годографов; б) результат решения обратной кинематической задачи на активном оползне вблизи поселка Чаган-Узун Республики Алтай**

*Заключение.* В работе предложена и опробована методика обработки данных малоглубинной сейсморазведки в условиях наличия резких контрастов скорости сейсмических волн, связанных с вечной мерзлотой. На основе применения метода полей времен пробега, реализованного с использованием численного решения уравнения эйконала, и метода сейсмической томографии решена задача построения модели среды, представляющей собой два неоднородных слоя: верхний низкоскоростной и нижний высокоскоростной с криволинейной границей раздела между ними. Возможности предложенной методики продемонстрированы на примере обработки реальных полевых данных. Построены скоростные разрезы продольных волн вдоль активного оползня вблизи поселка Чаган-Узун Агачского района Республики Алтай.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ № 16-35-60062.*

#### Литература

1. Sethian J.A. Fast marching level set method for monotonically advancing fronts // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. – 1996. – V.93. – P.1591-1595.
2. Гольдин С.В., Киселева Л.Г., Пашков В.Г., Черняк В.С. Двумерная кинематическая интерпретация сейсмограмм в слоистых средах // Труды ИГиГ СО РАН, Вып. 808, ВО "Наука". – Новосибирск, 1993. – 209 с.
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 связных грунтов сейсмическим методом // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – №3. – С. 3-10. Режим доступа: [http://www.misd.ru/publishing/jms/numbers/2016/a3\\_2016/](http://www.misd.ru/publishing/jms/numbers/2016/a3_2016/)
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.6-14. Режим доступа: [http://www.misd.ru/publishing/jms/numbers/2016/a5\\_2016/](http://www.misd.ru/publishing/jms/numbers/2016/a5_2016/)
5. Сердюков А.С., Яблоков А.В., Дергач П.А. Исследование и эффективная реализация метода многоканального анализа поверхностных волн // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XX Международного симпозиума им. акад. М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвящ. 120-летию со дня основания Томского политехнического университета. – Томск: Изд-во ТПУ, 2016. – Т. I. – С. 495-497.