

## ГЕОМЕХАНИКА

УДК 550.834

### МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ ОПОЛЗНЕЙ В УСЛОВИЯХ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

**М. В. Курленя<sup>1</sup>, Г. С. Чернышов<sup>2,3</sup>, А. С. Сердюков<sup>1,2,3</sup>,  
А. А. Дучков<sup>2,3</sup>, А. В. Яблоков<sup>2,3</sup>**

<sup>1</sup>*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: ss3032@yandex.ru,  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

<sup>2</sup>*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,  
просп. Академика Коптюга, 3, 630090, г. Новосибирск, Россия*

<sup>3</sup>*Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, 2, 630090, г. Новосибирск, Россия*

Рассматривается проблема сейсмического мониторинга процессов оползнеобразования. Подобные исследования особенно актуальны при разработке месторождения твердых полезных ископаемых открытым способом в районах с вечной мерзлотой. Интенсивное антропогенное воздействие на фоне естественных процессов оттаивания вечной мерзлоты в результате потепления климата может приводить к катастрофическим последствиям. Предлагается методика построения скоростных разрезов сейсмических волн вдоль склонов при наличии резко-контрастных неоднородностей, обусловленных наличием мерзлых пород. С помощью данного подхода возможно исследовать поверхности скольжения оползней, выявлять зоны возможного обрушения с пониженной скоростью волн, обусловленной повышенной трещиноватостью. Приведены результаты обработки полевых данных, полученных вблизи пос. Чаган-Узун Кош-Агачского района Республики Алтай.

*Многолетнемерзлые породы, устойчивость бортов карьеров, оползни, малоглубинная сейсморазведка, продольные волны, метод полей времен пробега, томография, поверхность скольжения*

Свыше 60 % территории нашей страны находится в зоне вечной мерзлоты. На этих землях интенсивно добываются различные полезные ископаемые, например большая часть российской нефти и газа. Техногенное воздействие вызывает неизбежные изменения в геокриологических условиях, которые могут приводить к интенсивному оттаиванию вечной мерзлоты. При ее деградации деструктивные экзогенные процессы начинают происходить интенсивнее и могут перейти в катастрофическую стадию. Эти явления протекают на фоне общего естественного повышения температуры и постепенного оттаивания мерзлых пород [1]. В последние 20 лет в зоне вечной мерзлоты увеличилось число аварий на объектах инфраструктуры [2]. Важной задачей является мониторинг состояния мерзлых пород и грунтов. Подобные исследования особенно 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. На рис. 1 приведена фотография обрушенного участка борта карьера “Юбилейный” в мерзлых породах при разработке месторождения алмазов [1]. Преимуществами геофизических методов исследования по сравнению с непосредственными инженерно-геологическими изыскательными работами являются:

- возможность проведения измерений непосредственно в ненарушенном массиве пород;
- отслеживание динамики изменения свойств мерзлых пород в большом объеме в течение длительного времени;
- картирование границ разделов пород с различными свойствами.



Рис. 1. Обрушенный участок борта карьера “Юбилейный” (Западная Якутия, пос. Айхал) в мерзлых породах [1]

В работе рассматривается метод сейсморазведки [3]. Скорости распространения сейсмических волн в мерзлых грунтах намного превосходят их значения в грунтах, находящихся при положительных температурах [4, 5]. То же самое справедливо и для водонасыщенных талых грунтов. При наличии таких контрастов при распространении волн от ударных поверхностных источников, применяемых в малоглубинных исследованиях, наблюдаются преломленные волны. Большинство методов интерпретации годографов преломленных волн основаны на предположении о горизонтально-слоистом строении среды [6, 7]. При неравномерном оттаивании вечной мерзлоты, сползании грунтов вниз по естественным склонам и при антропогенном воздействии возникают гораздо более сложные, в том числе и горизонтально-неоднородные структуры, крутопадающие границы раздела.

Исследования показали, что в подобных ситуациях для нахождения положения границ имеет смысл использовать метод полей времен пробега [6]. В классическом варианте данный метод предполагает однородность слоя, лежащего над восстанавливаемой границей. В то же время скорость в подстилающем слое вообще никак не используется и в результате не восстанавливается. Нами предлагается методика, включающая в себя три этапа. На первом этапе происходит восстановление распределения скоростей в верхнем слое путем применения метода томографии к данным времен первых вступлений прямых волн. Затем в уже неоднородной среде применяется обобщенный метод полей времен пробега, основанный на использовании численного решения уравнения эйконала. На последнем этапе методом сейсмической томографии восстанавливается скорость распространения продольных волн в подстилающем слое вдоль найденных границ раздела. При этом используются сводные годографы преломленных волн. Применение данной схемы обработки предполагает детальный анализ системы встречных и нагоняющих годографов. Важным моментом является выделение точек излома и других особенностей годографов. Необходимо правильно интерпретировать эти особенности — часть из них, например, может быть связана с наличием латеральных неоднородностей, а не с образованием головных волн.

Предложенная методика протестирована и отработана на серии численных экспериментов, а затем применена при обработке реальных данных малоглубинной сейсморазведки. Построены скоростные разрезы продольных волн вдоль активного оползня вблизи пос. Чаган-Узун Агачского района Республики Алтай. На объекте широко распространены криогенные процессы, влияющие на механические свойства грунтов. Представлены результаты обработки, сделана попытка интерпретации. Удастся выделить поверхность скольжения и низкоскоростную область, обусловленную растрескиванием сухих глинистых пород в месте срыва оползня.

#### МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ДВУХСЛОЙНОЙ МОДЕЛИ СРЕДЫ

Рассмотрим метод построения двумерных скоростных разрезов сейсмических волн в случае двухслойной модели среды, состоящей из верхнего низкоскоростного и нижнего высокоскоростного слоев. Используются данные времен первых вступлений продольных сейсмических волн, полученные путем пикирования сейсмограмм, записанных профильной поверхностной системой наблюдения. Предполагается, что каждый из слоев имеет гладко-неоднородное скоростное строение без резких изменений, а граница между ними представляет собой произвольную кусочно-гладкую кривую. Допускается, чтобы граница раздела на некоторых участках профиля наблюдения проходила в субвертикальном направлении, выходила на дневную поверхность. Несмотря на упрощенность, такая постановка задачи является актуальной в малоглубинной сейсморазведке. В частности, в случае вечной мерзлоты, низкоскоростной слой — это талые породы, высокоскоростной — мерзлые. Предлагаемая методика заключается в последовательном восстановлении скоростного распределения в верхнем слое, геометрии границы раздела и распределения скорости в нижнем слое.

В рассматриваемой модели среды первые вступления продольных сейсмических волн представлены прямыми и преломленными волнами. Необходимо определить точки перегибов годографов — координаты вдоль профиля, после которых в первых вступлениях прямая волна сменяется преломленной. Следующий шаг — восстановление распределения продольной скорости в верхнем слое по данным прямых волн. Они наблюдаются на небольших выносах источник — приемник. Не будем отдельно рассматривать случай “ныряющих” рефрагированных волн (возникающих при наличии в первом слое градиентного увеличения скорости с глубиной) — в силу специфики решаемой задачи это не имеет практического смысла. В малоглубинной сейсморазведке речь идет о толщине слоя порядка метров — первых десятков метров. Доминирующая частота в спектре удара кувалды  $\approx 50$  Гц, частоты волновых форм первых вступлений, как правило, не превышают 100 Гц. Шаг между приемниками составляет обычно 1–5 м. Прямые волны могут быть представлены записями всего нескольких приемников. В такой ситуации соответствующие участки годографов аппроксимируются прямыми линиями и интерпретируются как времена пробега волн, распространяющихся непосредственно вдоль дневной поверхности. По этим данным строится одномерное (вдоль горизонтального направления) распределение скорости продольной волны в верхнем слое.

Для построения скоростного распределения предлагается применять лучевую сейсмическую томографию [8]. Скоростная модель представляется в виде  $V(x) = V_0(x) + \delta V(x)$ , где  $x$  — горизонтальная координата (вынос вдоль профиля наблюдения);  $\delta V(x)$  предполагается неизвестной малой добавкой, а  $V_0(x)$  — известная референтная модель среды. Путем линеаризации можно связать невязку времени пробега в реальной и референтной моделях  $t_{ij}$  прямой волны между источником с номером  $i$  и приемником с номером  $j$  с возмущениями  $\delta V(x)$ :

$$\delta t_{ij} = \int_{\Gamma_{ij}} \frac{\delta V}{V_0^2} ds, \quad (1)$$

где  $\Gamma_{ij}$  — луч источник – приемник в референтной модели. При построении лучевых траекторий необходимо учитывать топографию дневной поверхности. Задача дискретизируется. Скоростной модели сопоставляется кусочно-постоянная функция (т. е. вектор). Линеаризованное соотношение (1) принимает форму линейной алгебраической системы:

$$A\delta V = \delta t, \quad (2)$$

где  $\delta V$  — вектор невязок скоростей в каждой ячейке расчетной сетки;  $\delta t$  — вектор невязок времен для всех пар источник – приемник.

Система (2) решается численно с помощью метода усеченного сингулярного разложения [8] по формуле

$$\delta V = \sum_{n=1}^r \frac{(\delta t, \mathbf{u}_n)}{s_n} \mathbf{v}_n, \quad (3)$$

где  $\mathbf{u}_n$  и  $\mathbf{v}_n$  — левый и правый векторы, соответствующие сингулярному числу  $s_n$ . Сингулярные числа отсортированы ( $n$  — порядковый номер) в порядке убывания. Скобками обозначено скалярное произведение. Число  $r$  привлекаемых сингулярных векторов является параметром, отвечающим за регуляризацию. Оптимальное число  $r$  определяется по результатам предварительного тестирования на известных моделях, а также исходя из априорной информации о точности данных.

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 головные. На отдельных участках профиля могут наблюдаться многократно преломленные волны. Применение стандартного метода  $t_0'$  [6] в таком случае проблематично, поэтому мы используем 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 существенное преимущество.

Опишем алгоритм восстановления границ методом полей времен пробега в неоднородных средах. Сначала необходимо получить времена прихода преломленной волны от каждого отдельного источника в каждой точке рассматриваемого профиля наблюдения. На участки прослеживания прямой волны сносятся времена пробега преломленных волн с нагоняющих годографов. Будем называть эту процедуру построением сводных годографов преломленных волн. Далее в ранее полученной скоростной модели верхнего слоя для каждого источника и всех приемников рассчитываются два поля времен:  $t_1$  и  $t_2$  (см. рис. 2):  $t_1$  — это поле времен прямой волны из источника. На рис. 2 серым цветом показаны изохроны поля времен  $t_1$ . На отдельных изохронах приведены соответствующие им значения. Поле  $t_2$  рассчитывается путем продолжения сводных годографов вглубь среды в обратном времени (показано на рис. 2 черным цветом). Множество точек, в которых поля времен совпадают:  $t_1 = t_2$ , представляет собой кривую. Эта линия, отмеченная на рис. 2 пунктиром, касается границы раздела. Чтобы найти положение границы раздела, надо построить линии совпадения полей времен для каждого источника и построить их общую касательную.

Пример построения границы раздела методом полей времен пробега приведен на рис. 3. Данные времен пробега предварительно рассчитаны в известной двухслойной скоростной модели. В результате обработки этих синтетических данных удается достоверно восстановить часть границы раздела — до точек касания с крайними для рассматриваемой системы наблюдения кривыми совпадения времен.

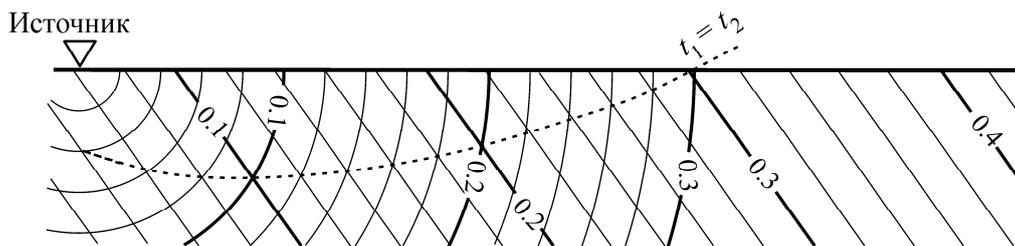


Рис. 2. Метод полей времен пробега: изохроны и кривая совпадения времен

Для реализации метода полей времен пробега необходимо многократно рассчитывать времена пробега сейсмических волн в неоднородных средах. С этой целью мы использовали метод численного решения уравнения эйконала *Fast Marching* [9]. В основе метода лежит конечно-разностная схема. Все точки прямоугольной сетки разбиваются на три группы: 1) “принятые” точки с уже рассчитанным временем; 2) “граничные” точки, соседние к принятым; 3) “дальние” точки, не затронутые расчетом, значение времени в которых изначально задается равным бесконечности. На каждом шаге алгоритма “принимается” “граничная” точка с наименьшим значением расчетного времени пробега. Таким образом, распространение поля времен идет от узлов с меньшими значениями времени к узлам с большими. Выполняется принцип причинности. При этом значение времени пробега  $\tau_{ij}$  в узле  $ij$  прямоугольной сетки находится из соотношения (противопоточная конечно-разностная аппроксимация уравнения эйконала):

$$\max(\max(D_{ij}^{-x} \tau, 0), -\max(D_{ij}^{+x} \tau, 0))^2 + \max(\max(D_{ij}^{-z} \tau, 0), -\min(D_{ij}^{+z} \tau, 0))^2 = \frac{1}{V_{ij}^2}, \quad (4)$$

где  $D_{ij}^{-x} \tau = \frac{\tau_{ij} - \tau_{i-1j}}{h}$ ,  $D_{ij}^{-z} \tau = \frac{\tau_{ij} - \tau_{ij-1}}{h}$ ,  $D_{ij}^{+x} \tau = \frac{\tau_{i+1j} - \tau_{ij}}{h}$ ,  $D_{ij}^{+z} \tau = \frac{\tau_{ij+1} - \tau_{ij}}{h}$ ,  $\tau_{ij}$  — значение временного поля в узле  $ij$  сетки;  $V_{ij}$  — значение скорости в узле  $ij$  сетки;  $h$  — шаг прямоугольной сетки.

Значение  $\tau_{ij}$  считается неизвестным, а времена в соседних точках известны (либо уже ранее были посчитаны, либо считаются равными бесконечности). Выражение (4) — это квадратное алгебраическое уравнение относительно  $\tau_{ij}$ . Если в результате решения уравнения получаются два корня, то выбирается наибольший из них в соответствии с концепцией “вязкого” решения [10].

Перед расчетом времени пробега описанным методом *Fast Marching* проводится инициализация поля времен пробега. В случае прямого поля  $t_1$  из источника достаточно зафиксировать соответствующую точку сетки (сделать ее “принятой”), задав в ней нулевое время. В случае расчета поля  $t_2$  фиксируются (“принимаются”) все необходимые точки на дневной поверхности (вдоль профиля). В них задаются временные задержки согласно сводному годографу преломленной волны.

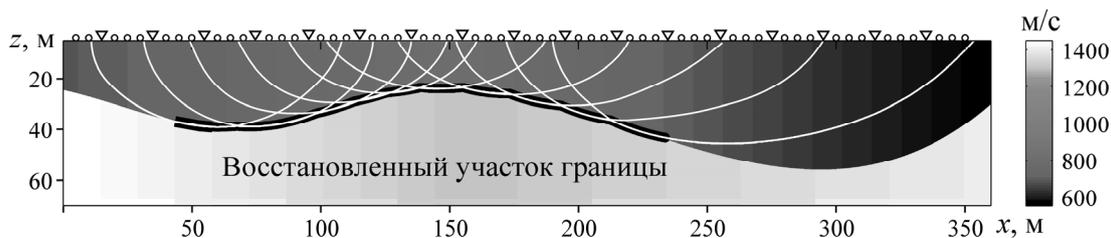


Рис. 3. Синтетическая двухслойная скоростная модель, линии совпадения полей времен и граница раздела, восстановленная методом полей

### ОБРАБОТКА РЕАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Летом 2015 г. были проведены сейсморазведочные работы на активном оползне вблизи пос. Чаган-Узун Республики Алтай. На данном объекте широко развиты различные криогенные процессы, влияющие на движение оползня.

Длина профиля составляла 395 м с шагом между пунктами приема (ПП) 5 м и пунктам возбуждения (ПВ) через каждые 20 м. В качестве источника использовалась кувалда массой 5 кг. Полученные сейсмограммы имели достаточно высокий уровень сигнал/помеха (рис. 4), что способствовало легкому пикированию времен первых вступлений (рис. 5а). Погрешность увязки взаимных времен годографов не превышала 5 мс.

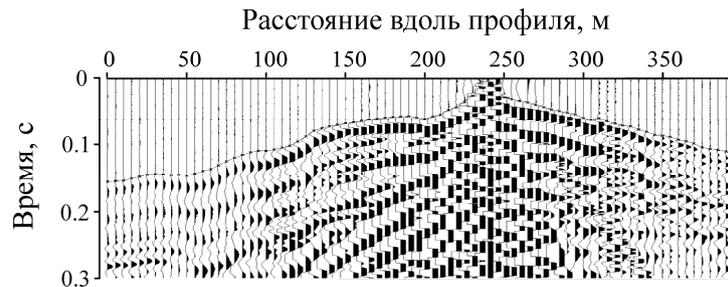


Рис. 4. Сейсмограмма с ПВ на 240 м профиля (показан пропикированный годограф первых вступлений)

В результате анализа годографов (прямых волн), приведенных на рис. 5а, на фоне достаточно больших значений кажущейся скорости выделены участки низкоскоростных аномалий (AB, CD). Так как по точкам переломов можно идентифицировать только одну преломленную волну, принята двухслойная модель среды. Аномалии, прослеживающиеся на всех годографах в одних и тех же точках профиля, интерпретированы как латеральные приповерхностные неоднородности. Наличие в окрестностях точек A, B, C, D участков с отрицательной кажущейся скоростью (см. рис. 5а) объясняется наличием головной волны от вертикальных участков границы первого слоя.

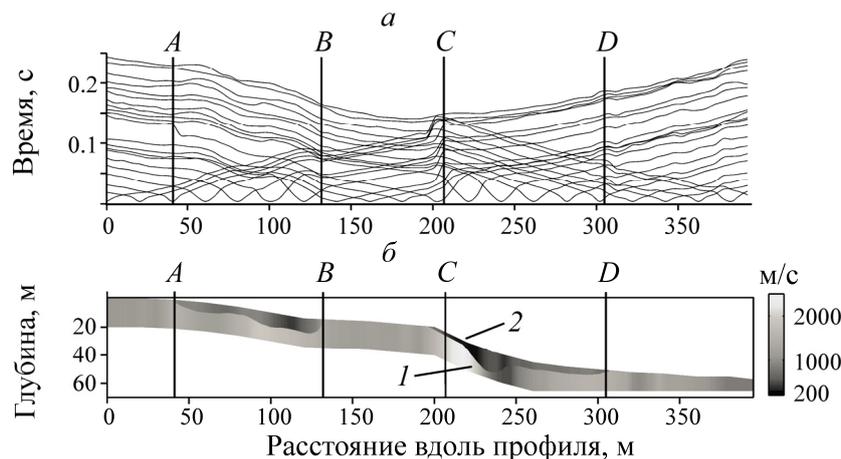


Рис. 5. Совокупность годографов (а) и результат решения обратной кинематической задачи (б) на активном оползне вблизи пос. Чаган-Узун Республики Алтай: 1 — поверхность скольжения; 2 — зона обрушения

Для каждого годографа выделен участок прослеживания прямой волны. С целью определения скорости в первом слое по выделенным отрезкам проведена одномерная лучевая томография. В качестве начальной модели использовалась однородная модель со скоростью продольных волн 500 м/с.

Точку перелома годографов, т. е. наличие прямой и преломленной волны, можно выделить только на отрезках профиля  $AB$ ,  $CD$ , что задает рамки для применения метода полей времен. Далее в уже известной модели верхнего слоя находим кривую совпадения времен для каждого источника на указанных отрезках. Затем к имеющимся кривым совпадения времен, учитывая все особенности годографов, построена касательная, которая определяет положение границы раздела. Для определения скорости во втором слое на годографах в интервалах  $AB$ ,  $CD$  выделены участки прослеживания головной волны. По данным времен головных волн вдоль уже известной границы раздела путем использования одномерной лучевой томографии определена скорость во втором слое вдоль границы раздела.

Получившийся в результате двухслойный скоростной разрез с латерально-неоднородными слоями приведен на рис. 5б.

### ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

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 [4, 5]. В крупнодисперсных грунтах и породах относительное увеличение скорости сейсмических волн при переходе в мерзлое состояние значительно больше, чем в тонкодисперсных. Идентификация мерзлого состояния только по значениям скоростей продольных волн может быть неоднозначной. Диапазоны скоростей в мерзлых и талых воднонасыщенных породах перекрываются [5]. Особенно эти проблемы актуальны для глинистых пород.

На исследованном объекте толща грунтов сложена глинистыми породами. Тем не менее по структуре построенного разреза (см. рис. 5б) можно судить о том, что мерзлые породы выходят близко к дневной поверхности на самом левом участке профиля до отметки  $A$ , на участке  $BC$  и на крайнем правом отрезке — правее метки  $D$ . Эти выводы подтверждаются и результатами электрофотографии рассматриваемого объекта. На тех же участках профиля наблюдаются зоны высокого сопротивления, характерные для мерзлых пород.

Идентификация мерзлого и талого состояния грунтов с практической точки зрения — не основная цель сейсморазведки на рассматриваемом объекте. Важными задачами являются: выявление механизмов образования оползня, выделение поверхностей скольжения, зон проседания. На участке  $CD$  выделяется поверхность скольжения (см рис. 5б). На этом же участке профиля отмечается срыв оползня (на рис. 5б это хорошо видно по топографии). Все это согласуется с низкими значениями скорости в самой верхней части разреза в окрестности метки  $C$ . Здесь в результате сползания наблюдается растрескивание и разрушение сухого верхнего слоя глинистых пород. Выделение поверхности скольжения позволяет судить об объеме сползающей толщи грунтов. Это важно для последующих геомеханических расчетов. На участке профиля  $AB$ , по-видимому, происходит проседание пород в силу оттаивания мерзлоты. В пользу этого предположения свидетельствует и топография дневной поверхности.

В рекомендациях [3] приведена классификация оползней — десять основных инженерно-геологических типов. При характеристике учитывается вся доступная информация о составе грунтов и пород, морфологические параметры: форма в плане и характер дневной поверхности. Скоростные разрезы сейсмических волн существенно повышают эффективность и достоверность инженерно-геологической классификации. Оползень, рассмотренный в работе, составного типа. Для верхней части (отрезок  $AB$ ) характерны свойства *оползней проседания*, а явления, наблюдающиеся на обрыве в окрестности отметки  $C$ , можно отнести к *оползням течения*.

## ВЫВОДЫ

Предложена и опробована методика обработки данных малоглубинной сейморазведки 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 пос. Чаган-Узун Агачского района Республики Алтай. Интерпретация результатов сейморазведки позволила определить тип оползня, выявить процессы оползнеобразования, установить поверхность скольжения горных пород, что дает возможность сделать заключение об объеме массива сползающей толщи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Великин С. А., Марченко Ю. Л., Бажин К. И. Геофизические исследования при изучении инженерно-геокриологического состояния вмещающих горных пород восточного карьера “Нюрбинский” (Западная Якутия) // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. — 2015. — № 3. — Вып. № 27. — С. 35–46.
2. Булыгина О. Н., Коршунова Н. Н., Разуваев В. Н. Специализированные базы данных о климатических ресурсах для различных отраслей экономики // Климатические ресурсы и методы их представления для прикладных целей: сб. докл. конф. — СПб., 2005. — С. 146–150.
3. Рекомендации по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития оползней / Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве Госстроя СССР. — М., 1969. — 98 с.
4. Воронков О. К., Моторин Г. А., Михайловский Г. В., Кунцевич С. П. Сейсмогеологические классификации грунтов криолитозоны // Криосфера Земли. — 1997. — № 3. — С. 47–54.
5. Скворцов А. Г., Садуртинов М. Р., Царев А. М. Сейсмические критерии идентификации мерзлого состояния горных пород // Криосфера Земли. — 2014. — № 2. — С. 83–90.
6. Гольдин С. В., Киселева Л. Г., Пашков В. Г., Черняк В. С. Двумерная кинематическая интерпретация сейсмограмм в слоистых средах // Тр. ИГиГ СО РАН, Вып. 808. — Новосибирск: ВО Наука. — 1993. — 209 с.
7. 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 // ФТПРПИ. — 2016. — № 3. — С. 3–10.
8. Serdyukov A. S., Patutin A. V., Shilova T. V. Numerical evaluation of the truncated singular value decomposition within the seismic traveltimes tomography framework, Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics, 2014, Vol. 7, No. 2. — P. 224.
9. Sethian J. A. Fast marching level set method for monotonically advancing fronts, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 1996, Vol. 93. — P. 1591–1595.
10. Crandall M. G., Lions P. L. Viscosity solutions of Hamilton–Jacobi equations, Transactions of the American Mathematical Society, 1983, Vol. 277, No. 1. — P. 1–42.

Поступила в редакцию 1/VIII 2016