

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 550.834

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВЯЗНЫХ ГРУНТОВ СЕЙСМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

М. В. Курленя¹, А. С. Сердюков^{1,2,3}, Г. С. Чернышов^{2,3},
А. В. Яблоков^{2,3}, П. А. Дергач², А. А. Дучков^{2,3}

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: ss3032yandex.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

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

³Новосибирский государственный университет,
ул. Пирогова, 2, 630090, г. Новосибирск, Россия

Предлагается методика определения строения и физико-механических свойств толщи приповерхностных связных грунтов на основе сейсмических наблюдений. Суть подхода заключается в использовании распределений продольных и поперечных скоростей, получаемых комбинированием новой модификации метода преломленных волн и многоканального анализа поверхностных волн. Для восстановления физико-механических свойств применяются корреляционные зависимости. Приведен пример обработки полевых данных. Выполнены исследования на участке автодороги. Определен уровень грунтовых вод, выявлены зоны, подверженные размыванию и деформациям.

Инженерно-геологические изыскания, малоглубинная сейсморазведка, метод преломленных волн, многоканальный анализ поверхностных волн, волна Рэлея, физические и механические свойства грунтов, связные дисперсные грунты

При проведении инженерно-геологических изысканий, а также при оценке устойчивости бортов карьеров [1] актуальны исследования физико-механических свойств горных пород и грунтов *in situ*. Результаты камеральной обработки кернов могут не соответствовать состоянию грунтов в месте их залегания. Особенно эта проблема актуальна для дисперсных грунтов. Задача определения физико-механических свойств связных дисперсных грунтов решается при помощи сейсморазведки. Процессы распространения сейсмических волн в исследуемых средах можно лишь приближенно описывать в рамках линейной теории упругости. При распространении сейсмических волн проявляется поглощение — внутреннее и связанное с рассеянием на мелких неоднородностях — и другие нелинейные эффекты. Кроме этого, динамические упругие характеристики не равны статическим. При решении инженерных задач следует учитывать и

пластические деформации. Тем не менее, согласно исследованиям [2, 3], скорости продольных и поперечных волн, определяемые сейсмоакустическими методами, могут быть использованы при проведении инженерно-геологических изысканий. Важнейшие свойства, определяемые по регламенту инженерно-геологических изысканий [4, 5]: влажность W , предел текучести W_m , плотность ρ , плотность скелета ρ_m , модуль общей деформации E — с достаточной степенью точности находятся из скоростных разрезов продольных V_p и поперечных V_s волн [6]. Корреляционные формулы для типичных дисперсных связных грунтов (супеси, суглинки, глины и т. п.), полученные методами регрессионного анализа, приведены в методических рекомендациях [6].

В данной работе рассматриваются линейные системы наблюдений, оснащенные однокомпонентными датчиками, — измеряются вертикальные смещения. Для возбуждения колебаний используются ударные источники. Именно такая схема проведения сейсморазведочных работ чаще всего применяется на практике. Возбуждение и регистрация поперечных колебаний принципиально возможны, но затруднительны по техническим причинам. Для зоны малых скоростей характерны резкие перепады свойств, наличие контрастных преломляющих границ. В связи с невозможностью учета всех явлений при распространении сейсмических волн в подобных сложных средах используются кинематические методы сейсмоки [7]. Возникает задача выделения отдельных типов волн из сейсмограмм, определения их времен пробега и кажущихся скоростей вдоль линейного профиля наблюдений. На сейсмограммах легко выделяются первые вступления продольных волн. На небольших выносах это прямые или рефрагированные волны, а на удалении от источника — головные (преломленные). Использование отраженных волн затруднительно. Их редко удается выделить на фоне более сильных по амплитуде поверхностных волн.

Стандартный метод обработки однокомпонентных данных при проведении инженерно-геологических изысканий заключается в восстановлении скоростного разреза продольных волн методом преломленных волн (МПВ), а скорости поперечных волн — по палеткам Кнопова [6]. Подобный подход имеет недостатки. В классических алгоритмах [8] решается задача нахождения глубины преломляющих границ, а значения скоростей между слоями считаются постоянными. По данным головных волн восстанавливаются распределения скоростей вдоль границы преломления, а по данным прямых волн — средние значения скорости в приповерхностном слое. На практике возможны латеральные изменения скоростей продольных волн, связанные, например, с изменениями влажности. Участки неоднородности годографов, соответствующих верхнему слою, при построении скоростного разреза в рамках классической методики t'_0 (плюс-минус метод) интерпретируются как изменения глубины отражающей границы [9]. Эти же неоднородности могут быть скомпенсированы внесением латеральных возмущений в распределение скоростей продольной волны в верхнем слое. Для того чтобы разрешить данную неоднозначность, следует максимально использовать априорную информацию.

В работе рассматривается достаточно типичный случай, когда границей является уровень грунтовых вод (УГВ). В такой ситуации возможны лишь плавные изменения глубины преломления. Это значит, что необходимо сглаживать границу за счет внесения эквивалентных возмущений скорости в верхний слой. Эта идея реализована модификацией МПВ. Для построения скоростного разреза поперечных волн вместо палеток Кнопова используется метод многоканального анализа поверхностных волн (MASW) [10]. Суть данного подхода сводится к построению слоистой модели на основе дисперсионных кривых фазовой скорости рэлеевских волн. Данные кривые могут быть выделены с помощью спектрального анализа сейсмограмм за счет более высокого уровня энергии. Для задания начального распределения поперечных волн, границ слоев и значений продольных волн в слоях используется скоростной разрез, полученный МПВ.

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД ПРЕЛОМЛЕННЫХ ВОЛН

Метод преломленных волн достаточно подробно изложен в [9]. Приведем основы оригинального подхода и вывод соотношения, связывающего возмущения глубины залегания преломляющей границы и значений скорости продольной волны в верхнем слое. Именно это соотношение и используется в предлагаемой здесь модификации МПВ.

Рассмотрим схему распространения головной волны в двухслойной среде (рис. 1). Для определения глубины h залегания границы раздела в точке D возьмем следующее выражение, составленное из времен пробега головных волн: $T_D^+ = T_{AD} + T_{HD} - T_{AH}$, где T_{AD} , T_{HD} , T_{AH} — времена пробега между соответствующими точками.

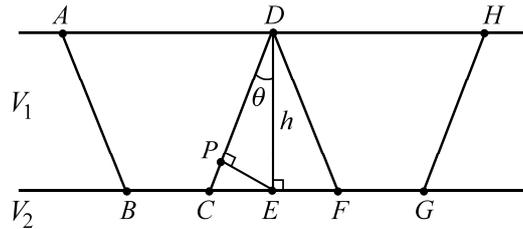


Рис. 1. Лучевая схема

Из лучевой схемы, представленной на рис. 1, следует:

$$T_D^+ = \frac{CD}{V_1} - \frac{CE}{V_2} + \frac{FD}{V_1} - \frac{EF}{V_2}, \quad (1)$$

где V_1 , V_2 — скорости продольной волны в слоях.

Пусть скорость в первом слое, определяемая по временам пробега прямой волны, известна неточно. При полевых измерениях такая ситуация может быть следствием целого ряда причин: низкой частоты зондирующего сигнала, малой мощности приповерхностного слоя, редкой расстановки приемников, наличия в нижней части слоя неоднородностей. Подставим в выражение (1) вместо V_1 возмущенную скорость $V_1 + \delta V_1$, где δV_1 мало по сравнению с V_1 . После линеаризации (здесь и далее оставляем только слагаемые, зависящие от первой степени δV_1) получим:

$$T_D^+ = \delta D_l + \delta D_r - \frac{CD + FD}{V_1^2} \delta V_1,$$

где $\delta D_l = T_{CD} - T_{CE}$ и $\delta D_r = T_{FD} - T_{EF}$ — так называемые “левое” и “правое” времена запаздывания. При поиске МПВ предполагается, что $\delta D_l = \delta D_r$. Приведем выкладки, благодаря которым можно связать задержки по времени с глубиной h :

$$\delta D_l = \frac{CP + PD}{V_1} - \frac{CE}{V_2}.$$

Из условия образования головной волны следует равенство $CP/V_1 = CE/V_2$. Получаем

$$\delta D_l = \frac{PD}{V_1} = \frac{h \cos \theta}{V_1} = \delta D_r.$$

Таким образом,

$$T_D^+ = \frac{2h \cos \theta}{V_1} - \frac{2h}{V_1^2 \cos \theta} \delta V_1.$$

Выразим отсюда h линеаризацией по δV_1 :

$$h = \frac{T_D^+}{2 \cos \theta} \left(V_1 + \frac{\delta V_1}{\cos^2 \theta} \right). \quad (2)$$

При выводе данного соотношения предполагалось, что лучи в возмущенной среде распространяются по тем же траекториям, что и в невозмущенной. Заметим, что подобное допущение лежит в основе классического метода лучевой сейсмической томографии.

При использовании МПВ для обработки полевых данных малоглубинной сейсморазведки форма восстанавливаемой границы часто получается негладкой, с небольшими частыми локальными перепадами по глубине. С физической точки зрения такие частые изменения маловероятны. Например, уровень верхних грунтовых вод может плавно меняться, но частые малые неровности не характерны.

Формула (2) позволяет интерпретировать малые отклонения от гладкого тренда глубины опорной границы, определенной с помощью классического метода t'_0 , как изменения δV_1 скорости в верхнем слое. Пусть $h = h_0 + \delta h$, где h — гладкая трендовая составляющая, полученная сглаживанием глубины h_0 , определенной методом t'_0 . Отклонения δh от тренда свяжем с вариациями δV_1 скорости в верхнем слое:

$$\delta h = \frac{T_D^+ \delta V_1}{2 \cos^3 \theta}. \quad (3)$$

Предлагаемая методика заключается в следующем: сначала применяется классический МПВ, затем найденная граница сглаживается, а разница между исходной и сглаженными глубинами подставляется в (3) с целью уточнения скорости в верхнем слое. Так как (3) получена линеаризацией с использованием предположения о малости соответствующих возмущений, ее лучше применять в несколько этапов с постепенным сглаживанием границы. После проведения предлагаемой процедуры исходная скорость в верхнем слое, найденная по годографам прямых волн, может сильно отличаться от уточненной. Это означает, что полученные возмущения скорости следует отнести к нижней части слоя. В соответствии с этим принципом для каждого значения выноса строится градиентная (по глубине) модель.

МЕТОД МНОГОКАНАЛЬНОГО АНАЛИЗА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

Используемый здесь метод MASW хорошо известен [10]. Дадим лишь краткое описание основных принципов и особенностей нашей реализации данного алгоритма.

Поверхностные волны могут быть выделены в результате спектрального анализа сейсмограмм. 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. Запись сейсмограмм проводится профильной системой наблюдений с использованием активных сейсмических источников. В качестве приемников рекомендуется применять низкочастотные (4.5 Гц) вертикальные сейсмоприемники, допускаются и более высокочастотные (10 Гц). Наличие низких частот важно для увеличения глубины восстановления скоростного разреза. Первым этапом обработки является переход в спектральную $f-k$ область с применением 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 Рэлея от временной частоты $V-f$ ($m/c - 1/c$) (преобразование Радона). Снятие дисперсионных кривых происходит пикированием максимумов амплитуд в прослеживаемом частотном диапазоне, который зависит от длины сейсмического профиля, шага между сейсмоприемниками, длины записи сейсмограммы и шага дискретизации по времени. Пример фазового спектра приведен на рис. 2. Результат получен с помощью обработки реальных данных (см. описание эксперимента в следующем разделе). На рис. 2. практически во всем частотном диапазоне достаточно четко прослеживается кривая фазовой скорости фундаментальной моды волны Рэлея.

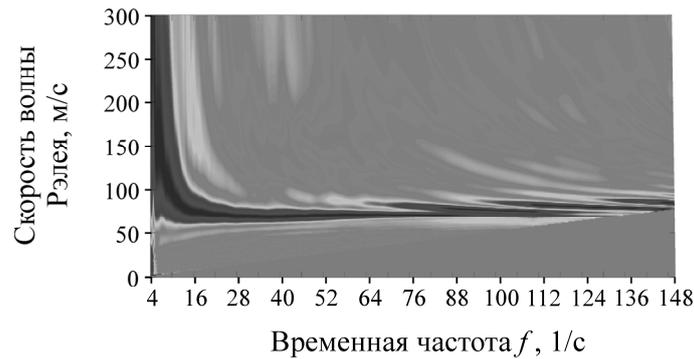


Рис. 2. Фазовой спектр (темным цветом выделена фундаментальная мода волны Рэлея)

Восстановление профиля скорости поперечной волны основано на подборе параметров слоистой модели (скорости поперечных волн) по наблюдаемой дисперсионной кривой путем многократного решения прямой задачи. Далее применяется интерполяция одномерных профилей с целью получения 2D (или 3D) моделей исследуемого геологического разреза.

Прямая задача решается в рамках одномерной модели среды, состоящей из однородных изотропных горизонтальных плоскопараллельных слоев, для которых зависимость фазовой скорости от частоты (дисперсионную кривую) можно получить аналитическим путем, решая задачу на собственные значения для вектора движения-напряжения [11]. Используется модифицированный метод матричного пропагатора — “метод коэффициентов отражения и преломления” [12]. Затем осуществляется поиск минимума функционала невязки между наблюдаемыми и рассчитанными дисперсионными кривыми. Минимизация выполняется с помощью алгоритма Левенберга–Марквардта, представляющего собой модификацию метода Ньютона [13]. Ввиду слабой зависимости дисперсионных кривых от скоростей продольных волн, толщин и плотностей слоев целесообразно рассматривать восстановление только скорости поперечной волны. Для задания скорости продольных волн и толщины слоев используется информация, получаемая МПВ.

Современные компьютеры предоставляют возможность распараллеливания вычислений. Здесь применена методика Open MP для вычисления матрицы чувствительности (Якобиана) по ходу решения обратной задачи. В результате программная реализация алгоритма была значительно ускорена (в 3–4 раза) по сравнению с последовательным алгоритмом.

МЕТОДЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ СКОРОСТНЫХ РАЗРЕЗОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВОЙСТВ ДИСПЕРСНЫХ СВЯЗНЫХ ГРУНТОВ

Интерпретировать границы раздела среды можно путем сравнения скоростей продольных V_p и поперечных V_s . В случае уровня грунтовых вод скорости поперечных волн, в отличие от продольных, не претерпевают резких изменений [6]. Для литологических границ, расположенных выше уровня грунтовых вод, наблюдаются изменения V_p и V_s . Для литологических границ ниже уровня грунтовых вод могут наблюдаться резкие изменения V_s при незначительных изменениях V_p [6]. Важно использовать априорную геологическую информацию. Полезны данные электроразведки. Определение физических и механических свойств связанных дисперсных грунтов основано на корреляционных зависимостях, взятых из методических рекомендаций [6]. Данные формулы справедливы для неводонасыщенных грунтов выше УГВ при влажности менее 30%. При сильном водонасыщении продольная волна фактически распространяется по жидкости и ее скорость слабо зависит от свойств породного скелета.

Приведем соотношения, позволяющие определить ряд важнейших свойств. Согласно [6], плотность может быть найдена по формуле

$$\rho = 1.835 + 0.000359V_p - 0.00083V_s. \quad (4)$$

Здесь и далее эмпирические константы имеют соответствующую необходимую размерность.

Для определения влажности W и плотности скелета ρ_m применяется итерационная процедура уточнения значений. Сначала приближенно оценивается плотность скелета (г/см^3):

$$\rho_m = 1.38 + 0.00033V_p.$$

Найденное значение плотности скелета используется для оценивания влажности:

$$W = 79.06 - 0.00382V_p - 30.1 \frac{V_s}{V_p} \rho_m. \quad (5)$$

Влажность измеряется в процентах от веса. Рассчитанная по (5) влажность используется для уточнения плотности скелета:

$$\rho_m = 2.34 - 0.736 \frac{V_s}{V_p} - 0.0245W. \quad (6)$$

Уточненное значение ρ_m снова подставляется в (5) и т. д. Как показали численные эксперименты, для характерных значений V_p и V_s итерационный процесс (5), (6) сходится примерно за 10 итераций при относительной точности 0.001.

Важный физический параметр — предел текучести W_m — представляет собой влажность, при которой грунт переходит из пластического состояния в жидкое и определяется по формуле

$$W_m = 36.93 + 0.8W - 13.143\rho + 0.042V_s. \quad (7)$$

Найденные значения ρ_m и W_m позволяют оценить модуль общей деформации E (определяется согласно регламенту лабораторных испытаний, размерность кг/см^2):

$$E = 0.0549V_p + 0.666V_s + 145.4\rho_m + 20.66(W_m - 27.8)(\rho_m - 1.56) - 266.1, \quad (8)$$

характеризующий сжимаемость грунта при статических (квазистатических) вертикальных нагрузениях.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ПОЛЕВЫХ ДАННЫХ

Сейсморазведочные малоглубинные исследования проведены в пригороде г. Новосибирска 8–10 октября 2015 г. вдоль дороги Академгородок–Ключи в районе р. Каменушки. Расстояние между приемниками линейной системы наблюдений составляло 1 м. Использовались однокомпонентные вертикальные 10-герцовые сейсмоприемники. Пункты возбуждения располагались вдоль профиля наблюдений на расстоянии 5 м друг от друга. Во всех пунктах для возбуждения колебаний применялась кувалда массой 5 кг, удары которой наносились по металлической подложке. Положение сейсмического профиля на местности представлено на рис. 3. На исследуемом участке дороги наблюдаются деформации дорожного полотна (просадки), плавунуны.



Рис. 3. Положение сейсмического профиля и проблемных участков дороги на местности

На рис. 4 приведены результаты построения скоростного разреза продольных волн. На глубине порядка 4 м обнаружена преломляющая граница. На рис. 4а показан скоростной разрез, построенный МПВ, на рис. 4б — с помощью предложенной модифицированной методики. На рис. 5 представлен скоростной разрез поперечных волн, полученный методом многоканального анализа поверхностных волн. Из сравнения скоростных разрезов продольных и поперечных волн сделан вывод о том, что граница, наблюдаемая на рис. 3, является уровнем грунтовых вод (сами грунты представляют собой супеси). Сглаживание, а значит и применение модифицированного МПВ, обосновано с физической точки зрения.

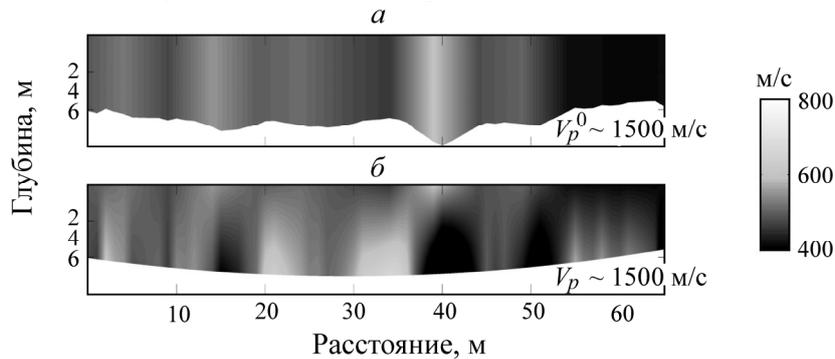


Рис. 4. Скоростные разрезы продольных волн, полученные с помощью: а — стандартного подхода; б — модифицированной методики

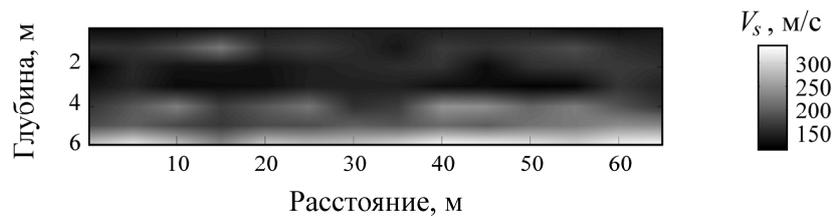


Рис. 5. Скоростной разрез поперечных волн

На рис. 6 приведены результаты восстановления распределения свойств грунтов до глубины 3.5 м. На рис. 6а показано полученное отношение предела текучести к влажности. Значения, близкие к единице, являются индикатором перехода в текучее состояние при небольшом повышении влажности. Модуль общей деформации (рис. 6б) характеризует сжимаемость грунта. Области с низкими значениями этого показателя наиболее подвержены деформациям. Проблемные участки — просадки на участке профиля 12–24 м, плавучины (43–56 м) — соответствуют изменениям свойств, приведенным на рис. 3.

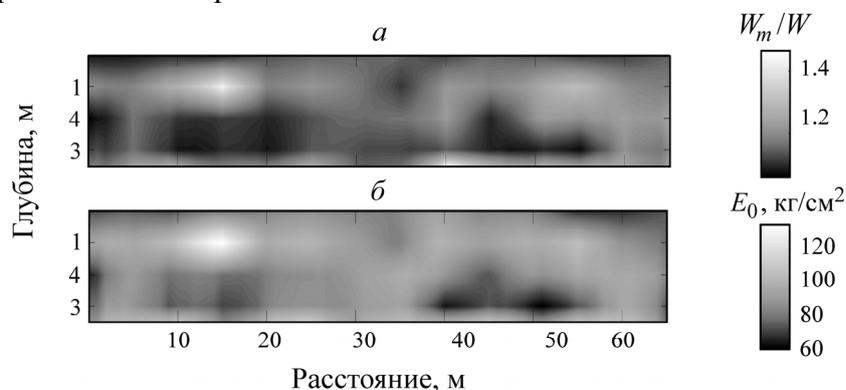


Рис. 6. Распределение свойств грунтов: а — отношение предела текучести к влажности; б — модуль общей деформации

ВЫВОДЫ

При проведении инженерно-геофизических изысканий следует сочетать методы, основанные на обработке преломленных и поверхностных волн. В ряде ситуаций правильная совместная интерпретация скоростных разрезов продольных и поперечных волн позволяет существенно уточнить распределение скоростей продольных волн в верхнем слое толщи грунтов с использованием модифицированного метода преломленных волн, предложенного в работе. На основе найденных скоростных разрезов продольных и поперечных волн можно восстановить физические свойства связных дисперсных грунтов с помощью корреляционных зависимостей. В качестве примера в работе приведены результаты обработки полевых данных. Удалось выявить зоны, подверженные деформациям и размыванию вдоль участка дороги. Результаты согласуются с непосредственными наблюдениями дорожного полотна, что является подтверждением эффективности предлагаемого метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багдасарьян А. Г., Сытенков В. Н. К вопросу об изменении устойчивости бортов с увеличением глубины карьеров // ФТПРПИ. — 2014. — № 1. — С. 75–79.
2. Пиоро Е. В., Ошкин А. Н. Взаимосвязи акустических характеристик и показателей физических и деформационных свойств глинистых грунтов // Вестн. МГУ. Сер. Геология. — 2011. — № 6. — С. 71–74.
3. Горянов Н. Н. Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии. — М.: Недра, 1992. — 264 с.
4. Грунтоведение / под ред. В. Т. Трофимова. — М.: Наука, МГУ, 2005. — 1023 с.
5. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. — М.: МНТКС, 2011. — 83 с.
6. Методические рекомендации по применению сейсмоакустических методов для изучения физико-механических свойств грунтов. — М.: Изд-во Всесоюз. науч.-исслед. ин-та трансп. стр-ва, 1976. — 71 с.
7. Курленя М. В., Сердюков А. С., Дучков А. А., Сердюков С. В. Волновая томография очагов аккумуляции метана в угольном пласте // ФТПРПИ. — 2014. — № 4. — С. 3–9.
8. Гольдин С. В., Киселева Л. Г., Курдюкова Т. В. Интерпретация системой КИНГ годографов преломленных волн при сложном рельефе дневной поверхности // Геология и геофизика. — 1985. — № 6. — С. 120–126.
9. Van Overmeeren R. A. Hagedoorn's plus-minus method: the beauty of simplicity, Geophysical prospecting, 2001, T. 49, No. 6. — P. 687–696.
10. Park C. B., Miller R. D., Xia J. Multichannel analysis of surface waves, Geophysics, 1999, Vol. 64, No. 3. — P. 800–808.
11. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. — Т. 1, 2. — М.: Мир, 1983.
12. 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.
13. Solano C. A. P. Two-dimensional near-surface seismic imaging with surface waves: alternative methodology for waveform inversion: Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2013.

Поступила в редакцию 11/III 2016