

## МНОГОУРОВНЕВАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА НА ВЕРХНЕКАМСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ: ТЕОРИЯ, ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ\*



А.В. Чугаев,  
Горный институт УрО РАН



И.А. Санфи́ров,  
Горный институт УрО РАН

Исследования месторождений водорастворимых полезных ископаемых одиночными сейсмическими методами имеют некоторые ограничения, снять которые в рамках одной методики не представляется возможным. Предложено комплексное использование сразу нескольких типов волн (отраженных, преломленных и поверхностных), регистрируемых при проведении стандартной сейсморазведки на отраженных волнах. Описана базовая теория основных сейсморазведочных методик, входящих в предложенный комплекс, помогающая неспециалисту понять суть сейсморазведочных технологий. Приводятся наиболее показательные примеры реализации технологии при изучении объектов, связанных с разработкой и эксплуатацией Верхнекамского месторождения калийных солей.

**Ключевые слова:** сейсморазведка, многоволновая сейсморазведка, геофизический контроль, отраженные волны, поверхностные волны, мониторинг, техногенная катастрофа, безопасность горных работ, калийное месторождение.

Месторождения водорастворимых полезных ископаемых солевого типа являются наиболее требовательными в плане обеспечения безопасности ведения горных работ, а также сохранения устойчивости территорий над отработанными площадями. Ситуация, когда горные выработки сопряжены с жилыми и промышленными территориями, не является редкой. В таких условиях необходимо одно-

временно контролировать как состояние водозащитной толщи, препятствующей проникновению грунтовых вод в соляной массив, так и инженерно-активной зоны, устойчивость которой напрямую влияет на сохранность зданий и сооружений, находящихся на поверхности.

В таких условиях представляет ценность любая информация о разрезе на всем интервале от поверхности до кровли

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 12-05-31102.

выработок. Одними из наиболее информативных геофизических методов исследования объектов подобного рода являются сейсморазведочные [2, 3, 4].

Волновое поле, возникающее при проведении сейсморазведочных работ, содержит сразу несколько типов и классов волн, имеющих различные возможности по изучению породного массива. При этом в результате выбора определенной волны в качестве целевой остальные волны рассматриваются как помехи.

Целью настоящего исследования является совмещение нескольких методов сейсморазведки, проводимых на базе единой системы расстановки, для получения максимального количества информации о строении горного массива.

### ТЕОРИЯ

Активная сейсморазведка подразумевает специальное возбуждение сейсмических волн в горном массиве и их последующую регистрацию. Волна, пройдя через массив, несет информацию о его строении и свойствах. Эта информация может быть извлечена в результате обработки и геологической интерпретации полученных данных.

Поскольку это важно для понимания методики, остановимся на базовых принципах сейсморазведки. В результате вертикального импульсного воздействия на поверхности земли (это может быть взрыв, падение груза, удар кувалды) возникают сразу несколько **типов** волн: *продольные* – наиболее простой для понимания тип волн. К продольным волнам относятся, например, звуковые волны. С точки зрения движения частиц процесс распространения продольной волны можно представить в виде «эффекта доми-

но» – когда каждая частица толкает следующую; при описании *поперечных* волн в качестве аналогии можно привести струну или кнут, когда частицы среды движутся перпендикулярно к направлению распространения волны. Поперечные и продольные волны являются объемными, т.е. распространяются во всех направлениях в массиве. В противопоставление им *поверхностные* волны, отражая свое название, движутся вдоль поверхности земли и весьма сходны с волнами на поверхности жидкости, когда частицы движутся по эллипсу (хотя на самом деле эти две волны имеют абсолютно различную физическую природу). Необходимо также отметить, что на образование поверхностных волн расходуется большая часть энергии импульса – от 50 до 70 %. Поэтому при землетрясениях именно поверхностные волны обладают большой разрушительной силой.

Когда объемная волна падает на границу двух сред с различными акустическими характеристиками (к ним относятся скорость распространения волны и плотность пород), возникает два **класса** волн: *отраженные* и *преломленные*.

На Верхнекамском месторождении калийных солей (ВКМКС) сейсморазведка выполняется преимущественно по методике многократных перекрытий (ММП) на продольных отраженных волнах. Отраженные волны при подходе к поверхности имеют вертикальную ориентацию движения частиц, поэтому регистрация волнового поля осуществляется датчиками вертикальной ориентации.

В таблице приведены ориентации частиц для классов и типов волн, распространяющихся в массиве при проведении работ по ММП. Как видно из таблицы, волновое поле, зарегистрированное с помощью

Ориентация частиц при регистрации на поверхности

Тип		Класс		
		проходящие	отраженные	преломленные
Объемные	продольные	неопред.	верт.	верт.
	поперечные	неопред.	горизонт.	горизонт.
Поверхностные	Релея	верт.+горизонт.	–	–
	Лява	горизонт.	–	–

вертикально-ориентированных датчиков, помимо целевых отраженных волн будет содержать продольные преломленные и поверхностные волны.

**Отраженные волны** возникают в результате падения волны на отражающую границу, после чего возвращаются к поверхности, где могут быть зарегистрированы с помощью сейсмодатчиков. Сейсмический метод, использующий отраженные волны, называется *методом отраженных волн*.

Рассмотрим, как отражающая граница отображается во временном поле, которое мы регистрируем. На рис. 1 в верхней части построена зависимость времени прихода волны от удаления (годограф) приемника от источника, внизу – ход лучей волны [6]. Волна из точки *S* отражаясь от *C* регистрируется в точке *R*. Заменив реальный источник мнимым, расположенным в точке *I*, можно считать, что волна проходит путь *IR* со скоростью *V* за время *t*. Согласно построению хода волн из треугольника *ISR*, по теореме Пифагора получим уравнение

$$x^2 + 4h^2 = V^2 t^2, \quad (1)$$

где *h* – глубина до отражающей границы.

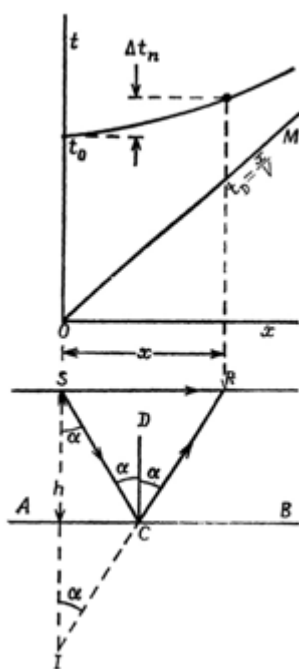


Рис. 1. Ход лучей и годограф отраженных волн

Выразив время, получим формулу

$$t^2 = \frac{x^2}{V^2} + \frac{4h^2}{V^2}. \quad (2)$$

Заметим, что второй член правой части уравнения равен квадрату времени прохода волны из пункта взрыва и обратно по вертикали, получим конечное уравнение годографа отраженной волны для горизонтальной границы:

$$t^2 = \frac{x^2}{V^2} + t_0^2. \quad (3)$$

Таким образом, годограф отраженной волны представляет собой гиперболу.

В методе отраженных волн необходимо выделить важную модификацию – это методика многократных перекрытий. Суть ММП заключается в следующем: вдоль линии профиля, на котором расставлены регистрирующие сейсмические датчики, с равным шагом перемещается пункт возбуждения, в результате регистрируется количество сейсмических трасс, равных произведению количества приемников и числа взрывов. После этого зарегистрированные трассы можно сгруппировать по точке отражения и получить сейсмограммы общей глубинной точки (ОГТ). В результате применения ММП регистрируется избыточное количество информации, что позволяет существенно уменьшить влияние случайных ошибок и поднять уровень полезного сигнала. Максимальная глубина исследования отраженными волнами оценивается примерно равной длине расстановки, минимальная зависит от шага между пунктами приема ( $\Delta X_{nn}$ ) и составляет 4–6  $\Delta X_{nn}$ . Для мало-глубинной сейморазведки диапазон изучаемых глубин составляет от 50 до 500 м.

**Преломленные волны.** Угол преломления на границе двух сред определяется из закона Снеллиуса:

$$\frac{V_1}{\sin(\theta)} = \frac{V_2}{\sin(i)}, \quad (4)$$

где  $V_1$  и  $V_2$  – скорости сейсмических волн в верхнем и нижнем слоях,  $\theta$  и  $i$  – соответственно углы падения и преломления (рис. 2). Если  $V_2 > V_1$ , то найдется такой критический угол падения, при котором

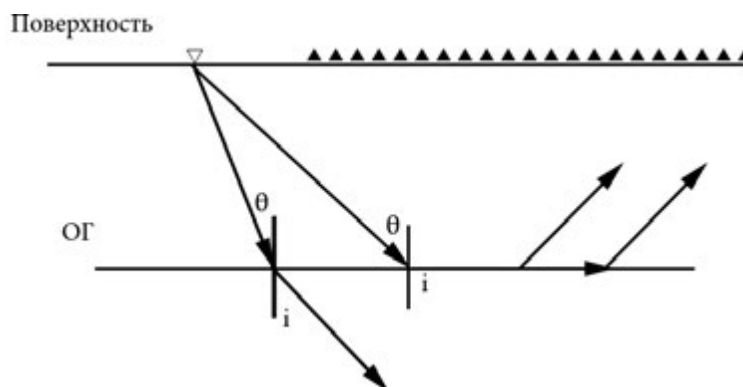


Рис. 2. Схема распространения преломленных волн

угол преломления будет равен  $90^\circ$ , т.е., преломленная волна будет распространяться вдоль границы преломления. При этом ее можно представить таким образом, будто бы она «падает» на эту границу под углом  $90^\circ$  из нижнего полупространства и преломляется в верхнее под углом  $\theta_i$ , причем этот угол равен  $\theta$ . Регистрируя на поверхности образующуюся таким образом волну, можно определять скорости сейсмических волн в обоих пластах. Метод сейсморазведки, основанный на преломлении волн, называется *методом преломленных волн*. Глубина исследования преломленными волнами составляет  $1/4$  от длины приемной линии, что для малоглубинной сейсморазведки равно 100–120 м.

Необходимо отметить ограничения методов преломленных и отраженных волн. Метод преломленных волн применим только в случае увеличения скорости с глубиной, что создает трудности при определении скоростей в средах со знакопеременным градиентом скоростей.

Что касается отраженных волн, то с уменьшением глубины залегания отражающих границ усиливается интерференция с интенсивными преломленными и поверхностными волнами, а также уменьшается количество датчиков, которыми регистрируется отражающая граница. Для уверенного прослеживания отраженных волн необходимо сгущать сеть приемных датчиков, что, как правило, не целесообразно с экономической точки зрения. При этом необходимо учитывать тот факт, что

верхняя инженерно-активная часть массива очень важна, поскольку она влияет на устойчивость зданий и сооружений, расположенных на поверхности.

Решением проблемы изучения этой зоны без постановки дополнительных измерений стало привлечение **поверхностных волн Релея** (далее – «поверхностные волны») [5]. Такое решение выглядит несколько парадоксально, ведь поверхностные волны в сейсморазведке являются самыми интенсивными регулярными помехами.

В силу того, что системы наблюдений ММП направлены на регистрацию отраженных волн (ОВ), необходима предварительная цифровая обработка материала для выделения поверхностных волн.

На основании анализа волнового поля разработан специальный граф обработки. Фильтрация ведется как одномерная, так и двумерная.

Технологически изучение поверхностных волн можно разбить на несколько этапов. 1-й этап – получение данных – включает в себя выбор источника, приемников, параметров системы наблюдений, а также выбор параметров регистрации. Нами проведен анализ источников и систем наблюдений, применяемых при сейсмоакустических исследованиях на ВКМКС, в результате чего установлена возможность применения метода поверхностных волн для этих условий; для систем цифровой регистрации установлена минимальная длина записи, позволяющая получать удовлетворительный сигнал поверхностных волн.

Следующий этап технологии – установление параметров поверхностной волны: скоростного и частотного состава. Этап необходим для определения глубины исследования и вертикальной разрешающей способности.

Рассчитанные параметры поверхностной волны используются для подбора параметров фильтров при выполнении цифровой обработки.

После цифровой обработки по сейсмограммам рассчитывается частотно-временное распределение, с него снимается дисперсионная кривая. По полученным дисперсионным кривым путем итерационного подбора строится модель среды. Одна итерация включает в себя построение теоретической дисперсии по априорной модели среды, сравнение с практически полученной дисперсионной кривой и изменение исходной модели. Подбор продолжается до тех пор, пока расхождение между расчетной и зарегистрированной дисперсионными кривыми не будет удовлетворять заданным условиям. В итоге строится модель скоростной характеристики среды, в которой распространяется поверхностная волна.

Амплитуда колебаний поверхностной волны экспоненциально убывает с глубиной. Поэтому практически можно говорить о том, что волна распространяется в некотором приповерхностном слое мощностью  $H$ , которую обычно принимают равной длине поверхностных волн (рис. 3). Для малоглубинной сейсмора-

ведки мощность слоя, который можно изучать поверхностными волнами, составляет от 20 до 50 м.

### ЗАДАЧА ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика многократных перекрытий на продольных отраженных волнах позволяет детально изучать глубинное строение массива, при этом ММП имеет ограничение по определению скоростей в самой верхней части разреза. Волновое поле, регистрируемое в рамках ММП, содержит дополнительную информацию в виде преломленных волн и поверхностных волн Релея, изучение которых может дать достоверную информацию о строении приконтурной части массива без постановки дополнительных измерений.

Разработанная технология позволяет объединить методы поверхностных, преломленных и отраженных волн в единый многоуровневый комплекс, который может быть зарегистрирован в рамках единой системы наблюдений (рис. 4).

Как видно из рис. 4, интервалы исследования поверхностными и преломленными волнами перекрываются, а поскольку они дают значения скоростей, соответственно поперечных и продольных волн, то имеется возможность перейти к физико-механическим свойствам массива и давать заключения об устойчивости территории. Кроме того, полученные данные могут быть использованы при обработке отраженных волн в качестве априорной

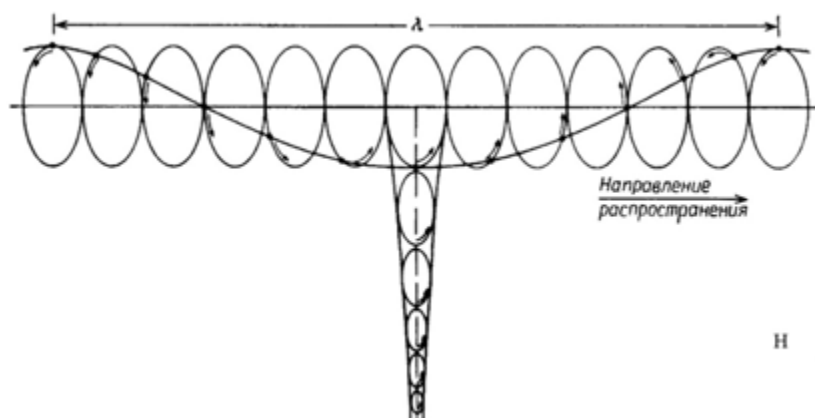


Рис. 3. Движение частиц поверхностной волны

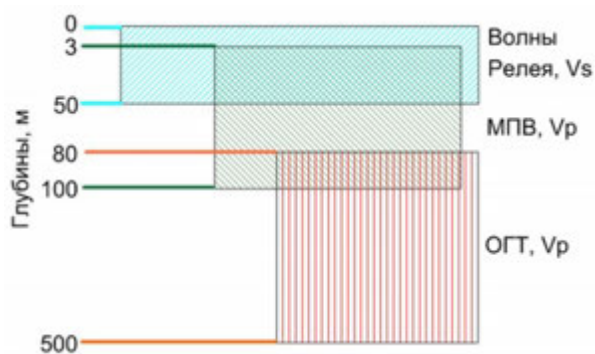


Рис. 4. Интервалы исследования различными методами сейсморазведки

информации, а также в процессе геологической интерпретации, как на качественном, так и на количественном уровне.

### ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ

Технология комплексного изучения волнового поля применяется при решении широкого набора задач, которые можно разделить на несколько основных направлений. К первому направлению относится изучение водозащитной толщи (ВЗТ) и контроль ее состояния как на действующих, так и на отработанных шахтных полях, в том числе на аварийных уча-

стках. Второе направление связано с исследованиями, проводимыми непосредственно в шахте. Сюда включается изучение стволов, охранных и междукammerных целиков, крепи, кровли и стенок выработок и прочих горнотехнических объектов. К третьему направлению относятся инженерные исследования, связанные, как правило, с изучением состояния сооружений, конструкций и коммуникаций на подработанных территориях.

Горький мировой опыт насчитывает более 80 аварий, связанных с затоплением калийных и соляных шахт. В их число входят рудники Германии, Канады, США, Польши, Украины, Российской Федерации и стран бывшего СССР.

В литературе описано большинство аварий на калийных рудниках, однако аварию на 1-м Березниковском руднике на Верхнекамском месторождении калийных солей в 2006 году можно считать одной из самых сложных в истории калийной промышленности, потому что не отмечено случаев, когда затопление рудника произошло бы под промышленным городом с населением 170 000 человек (рис. 5). Естественно, для того чтобы принимать свое-



Рис. 5. Провал на территории БРУ1, 2006 г.

временные решения, необходимо иметь как можно более точную информацию о состоянии подработанного массива в целом, а также об инженерно-активной зоне.

Ключевым условием безопасности рудника считается сохранность ВЗТ [1]. Сейсмические методы лучше всего подходят для контроля состояния ВЗТ. Традиционно изучение водозащитной толщи ведется с помощью отраженных волн по методике многократных перекрытий. Для получения информации о приповерхностной части массива, устойчивость которой напрямую влияет на сохранность зданий и сооружений, применяются методы поверхностных и преломленных волн. Полученная информация используется как

по отдельности, так и для сопоставления полученных данных и совместных построений.

В качестве примера приведем исследование, проведенные на ВКМКС с целью контроля состояния ВЗТ. По данным отраженных волн построена скоростная характеристика глубинной части массива (рис. 6). По данным поверхностных волн строится распределение скоростей поперечных волн в верхней части разреза (рис. 7, а). Привлекая информацию о скоростях продольных волн, полученную с помощью преломленных волн (рис. 7, б), можно строить подробный разрез скоростей в значениях продольных волн. Имея разрез приповерхностной части и разрез,

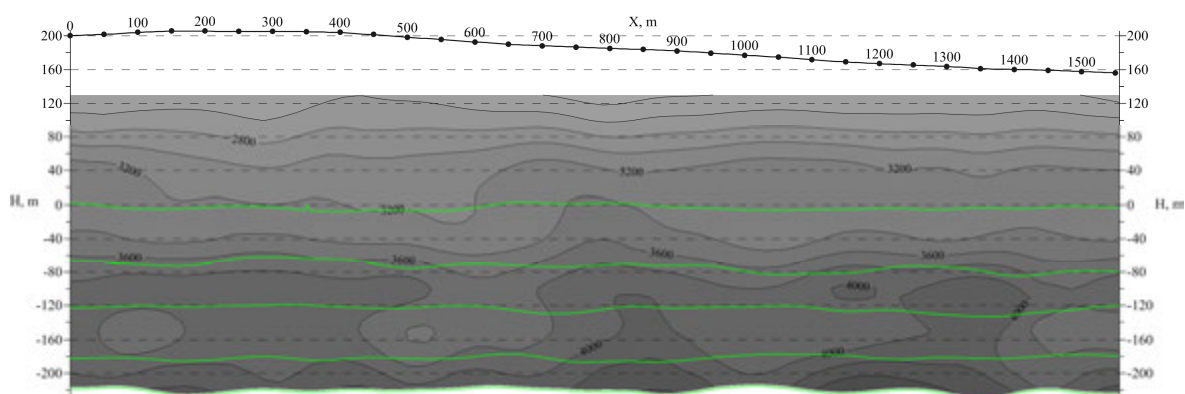


Рис. 6. Эффективные скорости по данным отраженных волн

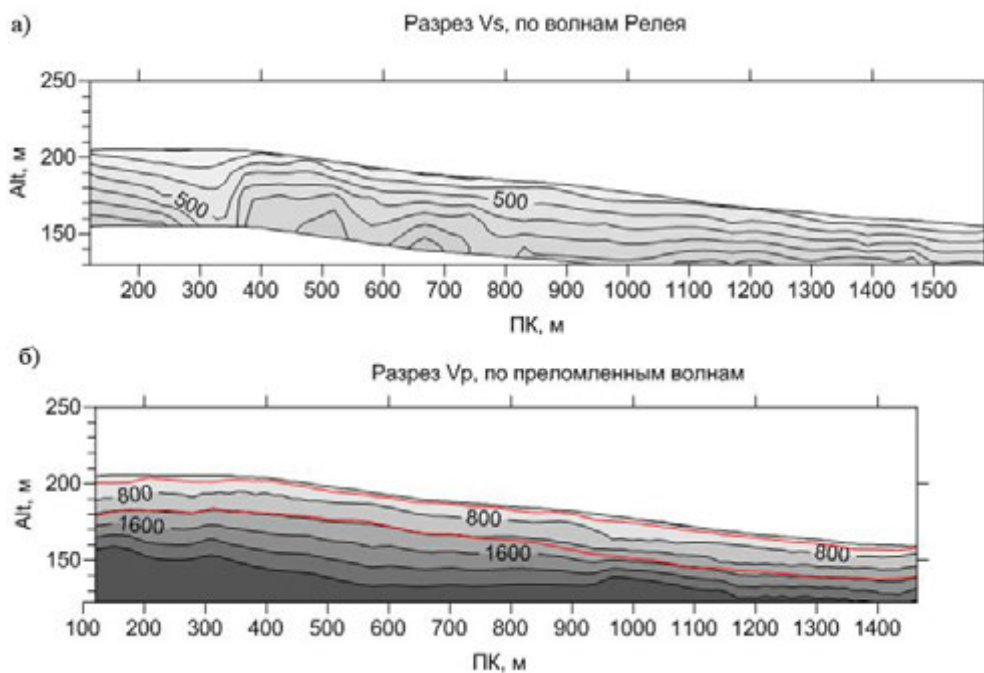


Рис. 7. Скоростные разрезы по данным поверхностных и преломленных волн

полученный по данным ММП, возможно построение совместного сейсмогеологического разреза, содержащего информацию о скоростях продольных волн от поверхности до нижних целевых горизонтов (рис. 8).

Как видно из сопоставления рисунков 8, а и 8, б, понижение скоростей в верхней части разреза (ВЧР) соответствует аномалии в ВЗТ, что указывает на связь глубинного строения и состояния ВЧР. Скважина, пробуренная на пикете 350, вскрыла зону с аномальной мощностью пестроцветной толщи с большим количеством песчаника. Поскольку песчаник обладает повышенными параметрами водопроницаемости, то, скорее всего, именно этот факт способствовал водонасыщению, ослаблению прочностных характеристик и падению скоростей в этой зоне.

Важное направление применения многоволновой малоглубинной сейсморазведки – это мониторинговые исследования потенциально опасных зон на подработанных территориях.

В зоне аварии на 1-м Березниковском рудоправлении имеются профили, по которым исследования проводятся регулярно (рис. 9). Накопленное количество дан-

ных позволяет давать статистические оценки. По отраженным волнам выделены аномальные зоны, по поверхностным волнам проведен статистический анализ изменения средней скорости поверхностных волн в этих зонах (рис. 10). Необходимо отметить, что общий тренд характеризуется отрицательным наклоном, что указывает на наличие в горном массиве негативных процессов ослабления прочностных характеристик. Уменьшение скоростей на всем протяжении профиля можно объяснить масштабным эффектом, когда локальная подземная аномалия, находящаяся в зоне выработок на глубинах 300–400 м, в приповерхностных отложениях выражается на достаточно большой площади, в результате в приповерхностной зоне аномалия «размывается» и сглаживается.

В качестве примера применения многоуровневой сейсморазведки при решении горнотехнических задач приведем сейсмоакустические исследования междокамерного целика.

Исследование строения и свойств целика выполнялось с целью локализации и количественной оценки внутренних дефектов. На рис. 11 представлен план целика: возбуждение и прием колебаний

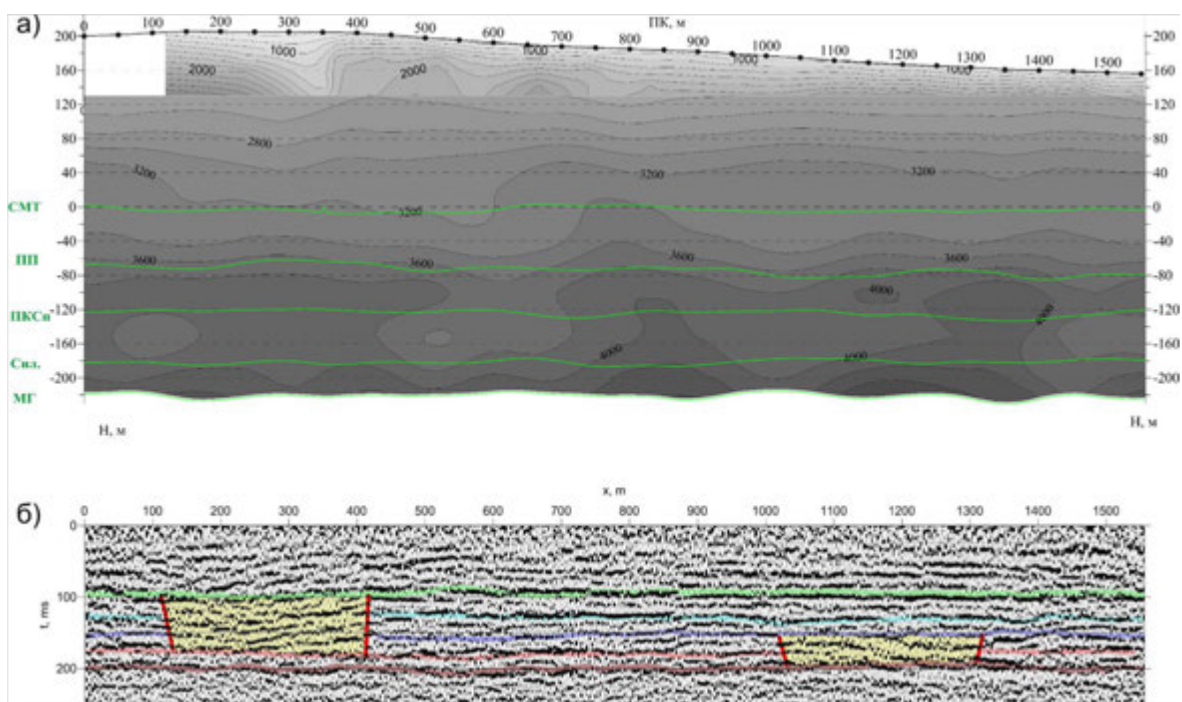


Рис. 8. Сводный сейсмогеологический разрез



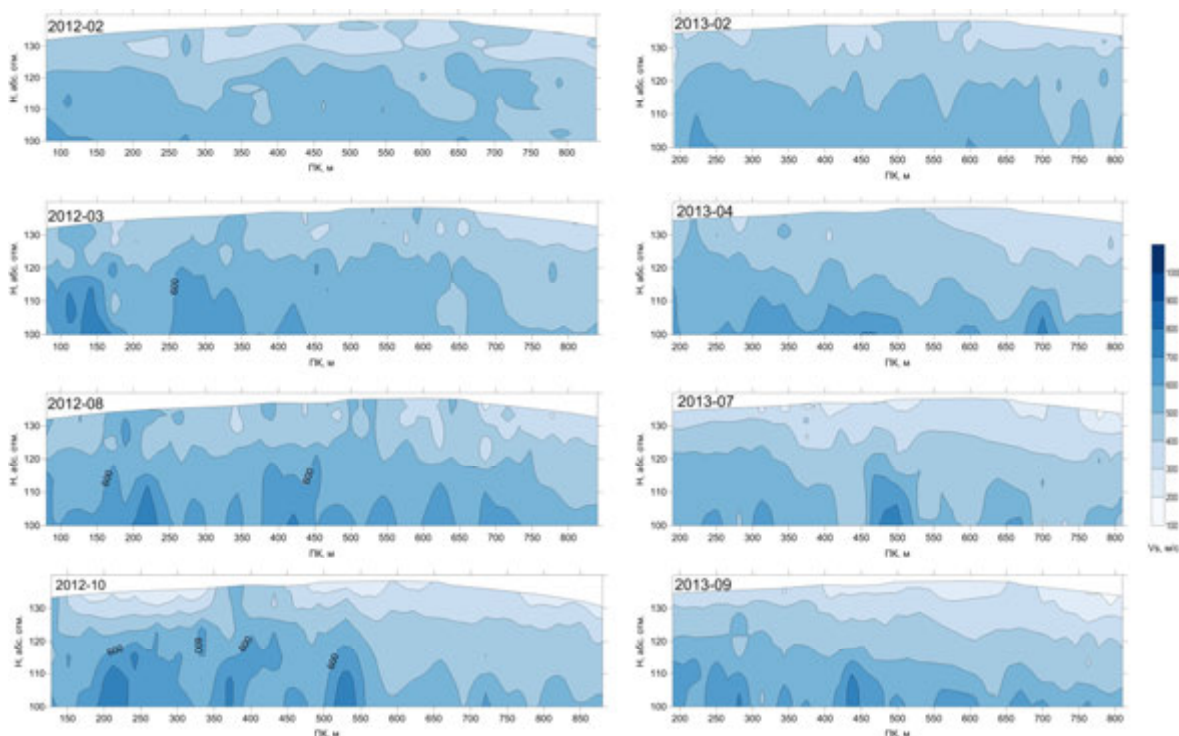


Рис. 9. Мониторинговые исследования аварийного участка

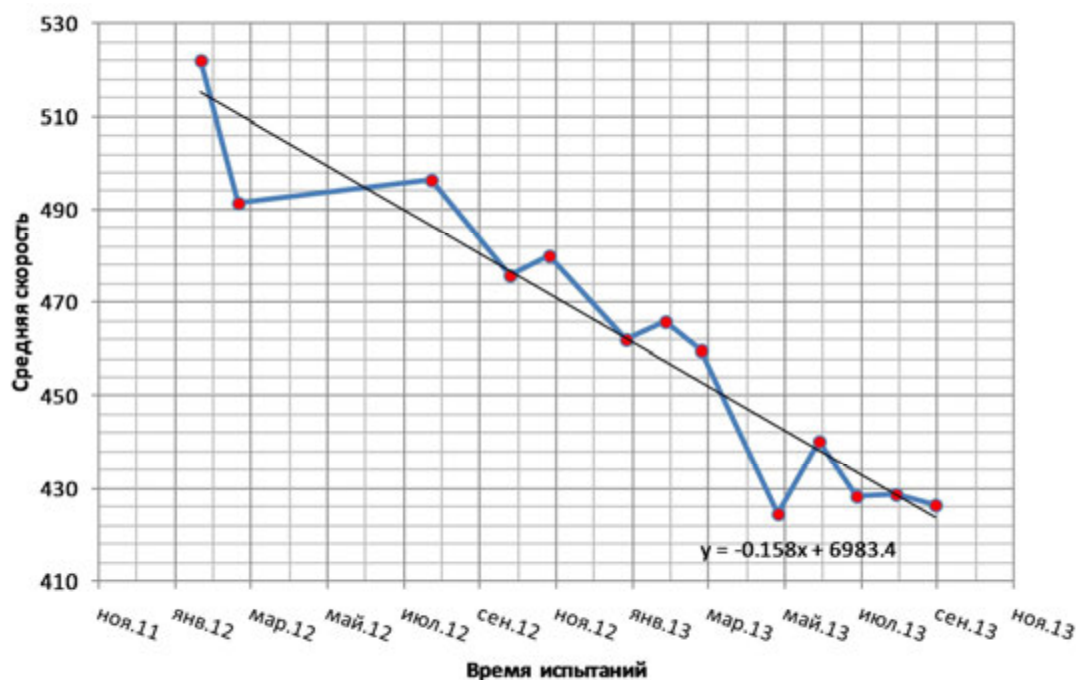


Рис. 10. Изменение средней скорости в верхней части разреза на аварийном участке

проводились на стенке целика.

По результатам исследований построены временные и скоростные разрезы ОГТ. Несмотря на уверенное определение геометрии границ разрушенной части целика с помощью метода отраженных волн (рис. 12, б, 12, в), скоростной анализ в

среде, непосредственно примыкающей к поверхности возбуждения колебаний, по отраженным волнам невозможен, поэтому для определения скоростей использован метод поверхностных волн. Построена скоростная характеристика приконтурной части целика (рис. 12, а). На распре-

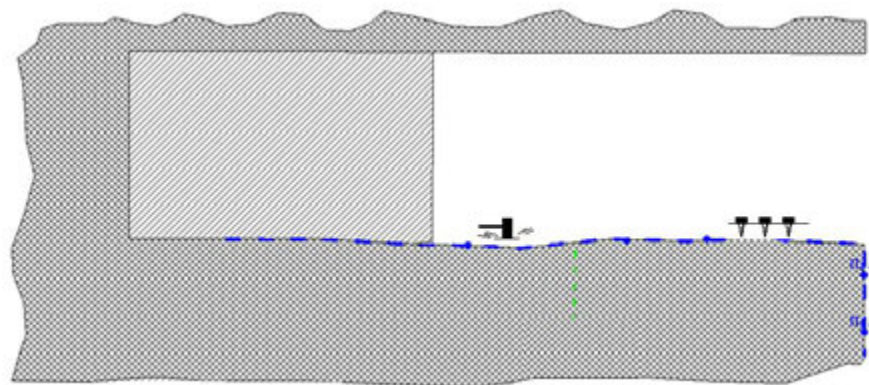


Рис. 11. План исследования междукамерного целика

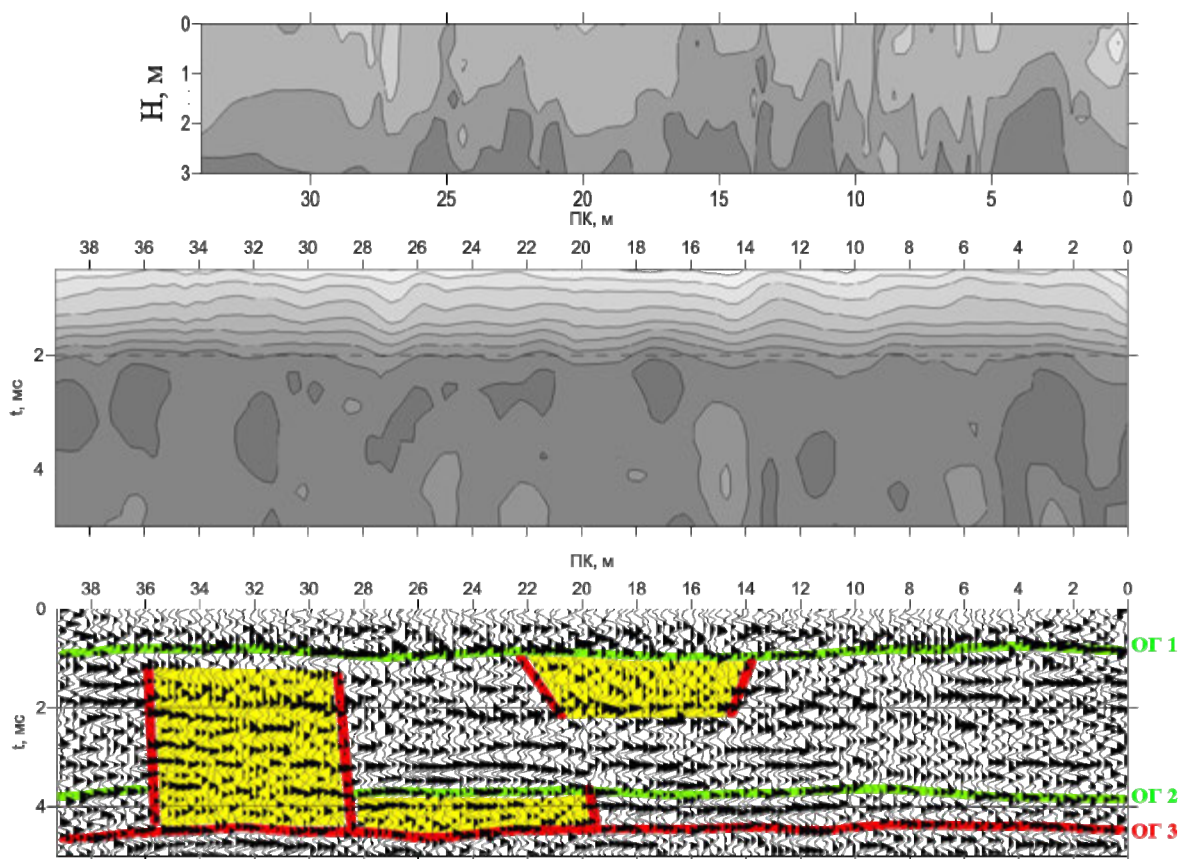


Рис. 12. Исследования междукамерного целика: а) скоростной разрез  $V_S$  по поверхностным волнам; б) скоростной разрез  $V_P$  по отраженным волнам, в) временной разрез ОГТ

делении выделены наиболее ослабленные зоны в приконтурной части. Полученные результаты могут быть использованы для уточнения границ разрушенной части целика и количественных оценок его несущей способности.

Следующий пример применения технологии комплексного изучения волнового поля описывает решение инженерной задачи по исследованию фундамента строящегося здания. Фундамент представляет со-

бой железобетонную плиту размерами  $50 \times 100$  м и толщиной 70 см, подстилаемую несколькими слоями технологических материалов, лежащих непосредственно на грунтах (рис. 13).

Основанием для постановки сейсмо-разведочных исследований явились случаи провала бурового инструмента при дополнительном армировании отдельных участков плиты и предположительное наличие полостей в ее основании.



Рис. 13. Поперечный разрез плиты и подстилающих материалов

По данным отраженных волн в подстилающих грунтах выделяются локальные участки, характеризующиеся нарушенной регулярностью волнового поля, а также пониженными значениями скоростей и амплитуд, что, вероятно, обусловлено наличием областей с нарушенной структурой и пониженными прочностными характеристиками пород.

При распространении поверхностных волн плита создала своего рода экранирующий эффект, поскольку скорость сейсмических волн в бетоне (2 300 м/с для продольных волн) намного выше, чем в нижележащем грунте (600–1 000 м/с), соответственно можно изучать поверхностные волны только в самой плите. Скоростные разрезы и площадные распределения скорости поверхностных волн в

плите позволяют в центре плиты выделить зону пониженных скоростей, которая совпадает с аномальной зоной в нижележащем грунте, выделенной по данным сейсморазведки ОГТ. Кроме того, в эту же зону попадают участки провала бурового инструмента. Предполагается связь состояния плиты и особенностей строения подстилающих ее отложений. На основании этих исследований даны заключения о наиболее ослабленных участках плиты (рис. 14).

Последний пример иллюстрирует оценку состояния дорожного покрытия в зоне влияния горных работ.

Основанием для постановки сейсморазведочных работ стало проседание дорожного полотна. Скоростные характеристики отраженных волн (рис. 15, а) не дают возможности четкого выделения аномальной зоны, поэтому требуются дополнительные признаки для локализации зоны негативных изменений. Такую возможность дает изучение поверхностных волн: на скоростном разрезе поперечных волн ярко выделяется зона пониженных скоростей, которая может свидетельствовать об обводненности участка и понижении прочностных характеристик. Эти предположения были подтверждены прямым вскрытием участка, показавшего образование выделенной зоны вследствие прорыва коммуникаций и размыва песчаного грунта.

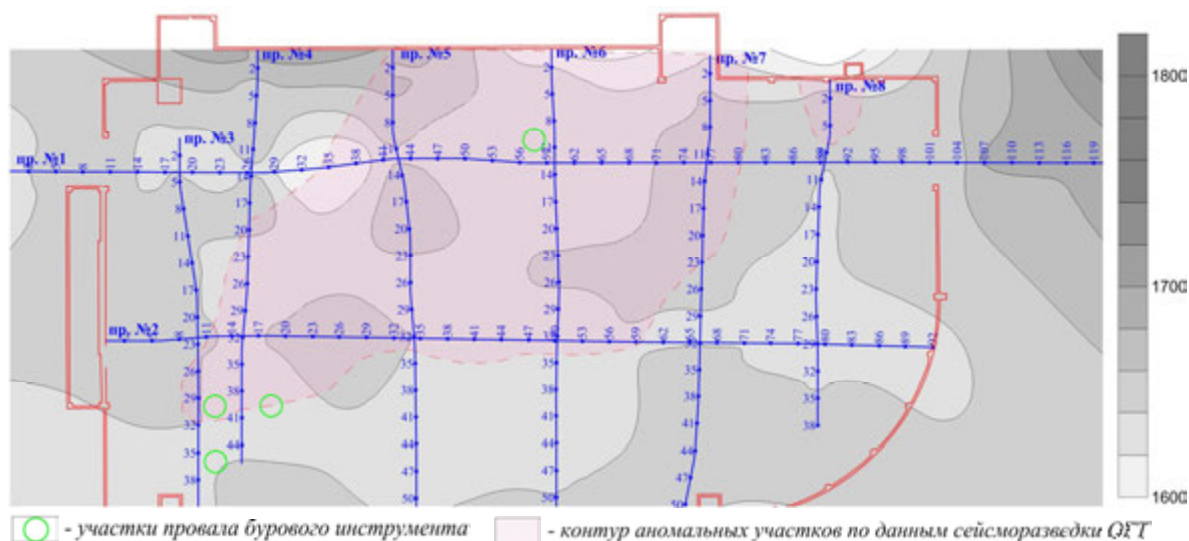


Рис. 14. План исследования плиты фундамента и распределение скоростей  $V_S$

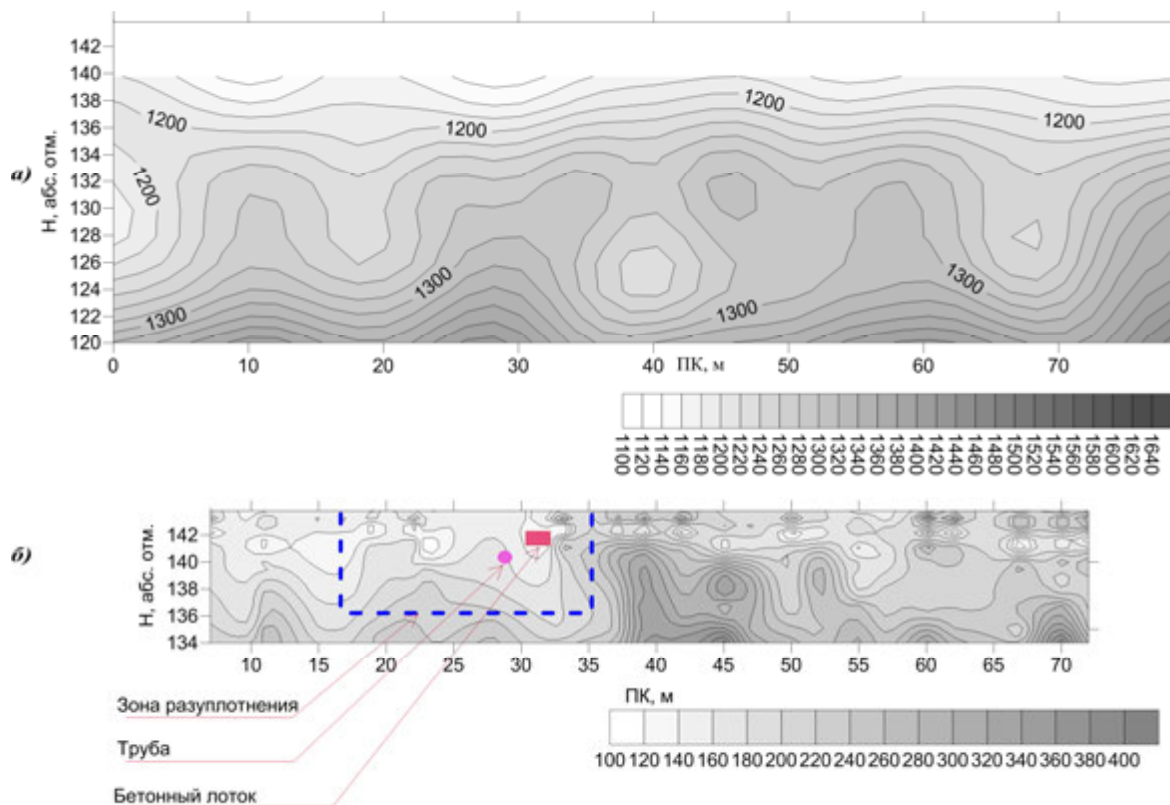


Рис. 15. Скоростная характеристика по данным отраженных волн (а) и глубинный разрез по поверхностным волнам (б)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная технология позволяет реализовать комплексное изучение волнового поля, регистрируемого при проведении сейсморазведки по методике многократных перекрытий, и включает, помимо отраженных волн, исследование поверхностных и преломленных волн. Такой подход позволяет получать информа-

цию обо всей толще разреза, от верхней кровли выработок, до поверхности, включая инженерно-активную зону, состояние которой напрямую связано с сохранностью зданий и сооружений, расположенных на поверхности, что особенно актуально в условиях градопромышленных агломераций, когда в зоне влияния выработок находится большая часть городских территорий.

## Библиографический список

1. Глебов С.В. Обоснование рациональных комплексов геофизических исследований водозащитной толщи на месторождениях водорастворимых руд: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.16. – Пермь, 2006. – 156 с.
2. Методические рекомендации по проведению инженерно-геологических изысканий на карстоопасных территориях (на примере Пермского края). – М.:ГИ УрО РАН, ОАО «ПНИИИС», 2009.
3. Санфиоров И.А. Рудничные задачи сейсморазведки МОГТ. – Екатеринбург: УрО РАН, 1996. – 168 с.
4. Санфиоров И.А. Сейсморазведочные исследования условий разработки калийной залежи / И.А. Санфиоров, А.И. Бабкин, А.Г. Ярославцев, Г.Ю. Прийма, К.Б. Фаткин // Геофизика, 5. – М., 2011. – С. 53–59.
5. Чугаев А.В. Технология изучения поверхностных волн в рамках методики многократных перекрытий // Тез. докл. третьей междунар. науч.-практ. конф. «Инженерная и рудная геофизика – 2007». – Геленджик, 2007. – С. 20–21.
6. Шерифф Р. Сейсморазведка / Р. Шерифф, Л. Гелдарт // В 2 т. Пер. с англ. – М.: Мир, 1987.

**MULTILEVEL SEISMIC ON UPPER KAMA POTASH DEPOSIT: THEORY AND PRACTICAL SOLUTIONS**

A.V. Chugayev, I.A. Sanfirov

Water-soluble mineral deposits research with single seismic methods have some limitations, which can't be avoided within the scope of single technique. As a solution to this problem the paper proposes integrated use of several types of waves (reflected, refracted and surface), recorded during the standard reflection method.

The basic theory of seismic techniques included in the proposed complex is provided to help the layman understand the seismic technologies. The second part shows the most significant examples of the implementation of technology while studying objects related to the development and operation of Upper Kama potash deposit.

*Keywords: seismic, multiwave seismic, geophysical control, CDP, MASW, monitoring, anthropogenic disaster, mining safety, potash deposit.*

**Сведения об авторах**

*Чугаев Александр Валентинович*, кандидат технических наук, научный сотрудник, Горный институт УрО РАН (ГИ УрО РАН), 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; e-mail: chugaev@mi-perm.ru

*Санфиоров Игорь Александрович*, доктор технических наук, профессор, зам. директора, Горный институт УрО РАН (ГИ УрО РАН), 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; e-mail: sanf@mi perm.ru

*Материал поступил в редакцию 16.12.2013 г.*