

УДК 550.834

**ПРИМЕНЕНИЕ ШАХТНОЙ СЕЙСМОАКУСТИКИ ДЛЯ
РЕШЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ
ЗАДАЧ НА РУДНИКАХ ВЕРХНЕКАМСКОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ**

Санфиров И. А., Бабкин А. И., Фатькин К. Б.

*(Горный институт Уральского отделения РАН, г. Пермь,
Россия)*

Представлені результати шахтних сейсмоакустичеських досліджень, що проводяться для вирішення геологічних гірничотехнічних завдань: картірованіє геологічних неоднородностей; дистанційний прогноз фізико-механічних властивостей порідного масиву; контроль стану гірничотехнічних конструкцій.

Results of the mine seismoacoustic researches conducted for the solution of geological mining tasks are presented: mapping of geological inhomogeneities; remote forecast of physical and mechanical properties of the rock massif; control of a condition mining constructions.

Планомерное и безопасное освоение месторождений твердых полезных ископаемых шахтным способом требует постоянного и своевременного изучения горно-геологической обстановки на всех стадиях его разработки. Оперативное решение данной задачи возможно с помощью геофизических методов. Выбор метода обуславливается поставленными задачами и особенностями геологического строения объекта изучения.

Калийная залежь Верхнекамского месторождения солей (ВКМКС) представлена тонкослоистым разрезом с интенсивной складчатостью и латеральной изменчивостью физических свойств слагающих её пород. В таких сложных геологических

условиях обоснованным представляется использование сейсмоакустических методов исследований, из которых наиболее эффективной является методика общей глубинной точки (МОГТ). Её высокая информативность обусловлена применением интерференционных систем регистрации, развитыми теоретической и алгоритмической базами цифровой обработки. Интерференционные системы наблюдений проектируются в соответствии с частотным составом, скоростными характеристиками полей отражённых волн и требованиями методики многократных перекрытий с позиции получения заданной разрешающей способности, глубинности исследований и качественной избирательной селекции целевых волн [1].

Проведение наблюдений в условиях горных выработок накладывает определённые требования и к используемой регистрирующей аппаратуре. В этой связи, для регистрации высокочастотных колебаний разработан и адаптирован к применению в горных выработках калийных рудников ряд портативных регистрирующих устройств. В настоящее время успешно используется 24-х разрядная телеметрическая система сбора сейсмоакустических данных, позволяющая регистрировать в частотном диапазоне до 5 кГц с динамическим разрешением сейсмоакустических сигналов до 130 дБ. Модульная реализация сбора данных обеспечивает более гибкий подход к проектированию подземных систем наблюдений и позволяет учитывать не только особенности геологического строения изучаемых толщ, но и множество горно-геологических, горнотехнических и технологических факторов.

В настоящее время геофизические исследования, проводимые в пределах шахтных полей ВКМКС, как на земной поверхности, так и во внутренних точках среды, осуществляются для контроля целостности водозащитной толщи (ВЗТ) и степени техногенного воздействия на породный массив в процессе его разработки. Целью сейсмоакустических наблюдений в данном контроле является информационное обеспечение решения двух групп задач: горно-геологического и горнотехнического направлений (рис. 1).



Рис. 1. Применение шахтной сейсмоакустики на ВКМКС

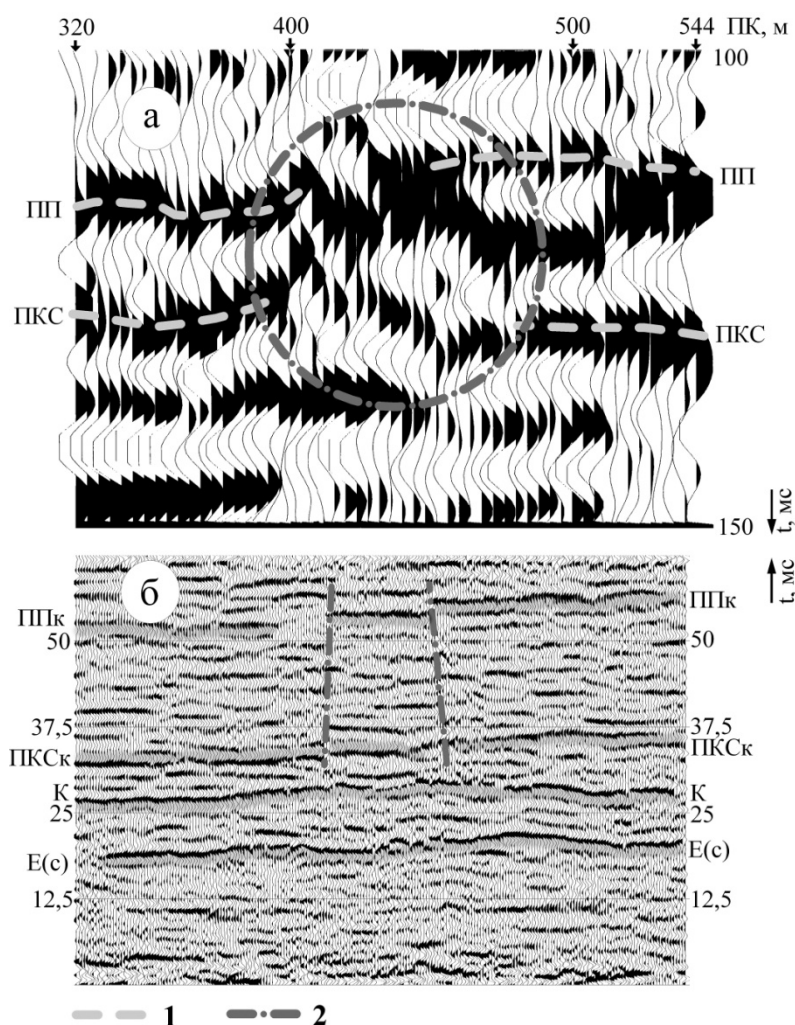
Из представленного перечня задач для шахтной сейсмоакустики (см. рис. 1) к первой группе относится картирование геологических неоднородностей ВЗТ, прежде всего, малоамплитудных тектонических нарушений, областей развития трещин, зон замещения и газонасыщенных участков. Наибольшую угрозу для сохранности ВЗТ, следовательно, и для рудников представляют тектонические нарушения.

Традиционно для поиска подобных геологических образований применяют наземные сейсморазведочные исследования МОГТ [2]. Однако, оценка вертикальных пределов распространения тектонических нарушений по данным наземной сейсморазведки не всегда достоверна. Основные причины тому: направленность излучения упругих волн и ограничения частотного диапазона (≤ 100 Гц).

Значительное повышение частот регистрируемых упругих колебаний (до 2 кГц), при изучении особенностей строения горного массива во внутренних точках среды и смена направления излучения обеспечивает детализацию строения подобных объектов. Крайне важно, что появляется определенность в локализации

нижней точки нарушения. Поиск нарушений по шахтным данным базируется на выявлении традиционных интерпретационных признаков в суммарном сейсмическом волновом поле: особенностям волновой картины и их количественным оценкам. К первым относятся: геометрия осей синфазности (разрыв, смещение, прогиб и т. д.), явления дифракции и интерференции. Ко вторым – динамические и кинематические параметры отраженных волн.

На фрагменте временного разреза МОГТ (рис. 2, а), полученном по данным наземной малоглубинной сейсморазведки выделяется волновая дифракционная аномалий с нарушением корреляции ОГ.



1 – ОГ; 2 – границы тектонического осложнения

Рис. 2. Сопоставление наземной (а) и шахтной (б) волновых картин в пределах тектонического осложнения

В пределах данного участка также проведены шахтные сейсмические исследования в выработке, пространственно совмещенной с наземным профилем. На шахтном временном разрезе данное тектоническое нарушение, предполагаемое в интервале переходной пачки (ПП), определяется по всей совокупности диагностических признаков как ступенчатый сброс (рис. 2, б). Его горизонтальные размеры (30 м) и амплитуда смещения (1-2 м) не позволили однозначно проявиться в низкочастотном волновом поле наземных сейсморазведочных исследований.

Представленные результаты демонстрируют комплекс сейсморазведочных исследований для картирования малоамплитудных тектонических нарушений. На первом этапе в пределах площадей, характеризующихся сложным тектоническим строением, производятся наземные сейсморазведочные работы. На выделенных по их результатам участках выполняются сейсмические наблюдения в горных выработках, которые позволяют более детально определить строение и размеры предполагаемых тектонических нарушений.

К тектоническим нарушениям относятся и всевозможные трещины, которые могут образовывать целые системы, создающие ослабленные зоны в разрабатываемом массиве и ВЗТ. Распространение таких зон выше продуктивных пластов не прослежено, так как эта часть разреза выработками и подземным бурением не вскрывается. В этой связи, привлечение геофизических методов для определения пределов распространения подобных зон просто необходимо. В качестве исходной информации для интерпретации используются те же параметры волнового поля, что и при выявлении тектонических нарушений: 1) структура волновой картины, представленная на временном разрезе МОГТ, 2) ее интенсивность, 3) кинематическая составляющая, оцениваемая по скоростной характеристике, представляющей собой распределение эффективных скоростей во временной области.

Для известных зон развития трещин отмечается: уменьшение значений регулярности и частоты сейсмической записи, снижение интенсивности сигналов и значений скоростей распространения волн. Данные параметры волнового поля можно рассматривать совместно. Для этого они пересчитываются в единый

комплексный параметр, который представляет собой логическую сумму интерпретационных выводов об отрицательной аномальности каждой из анализируемых характеристик волнового поля.

В пределах горной выработки одного из участков шахтного поля калийного рудника вскрыты области трещинообразования. Для уточнения границ их распространения вверх по разрезу проведены шахтные сейсмоакустические исследования МОГТ. По особенностям структуры волновой картины выделяются основные ОГ и ряд участков с нарушением структуры сигнальной составляющей сейсмической записи (рис. 3, а).

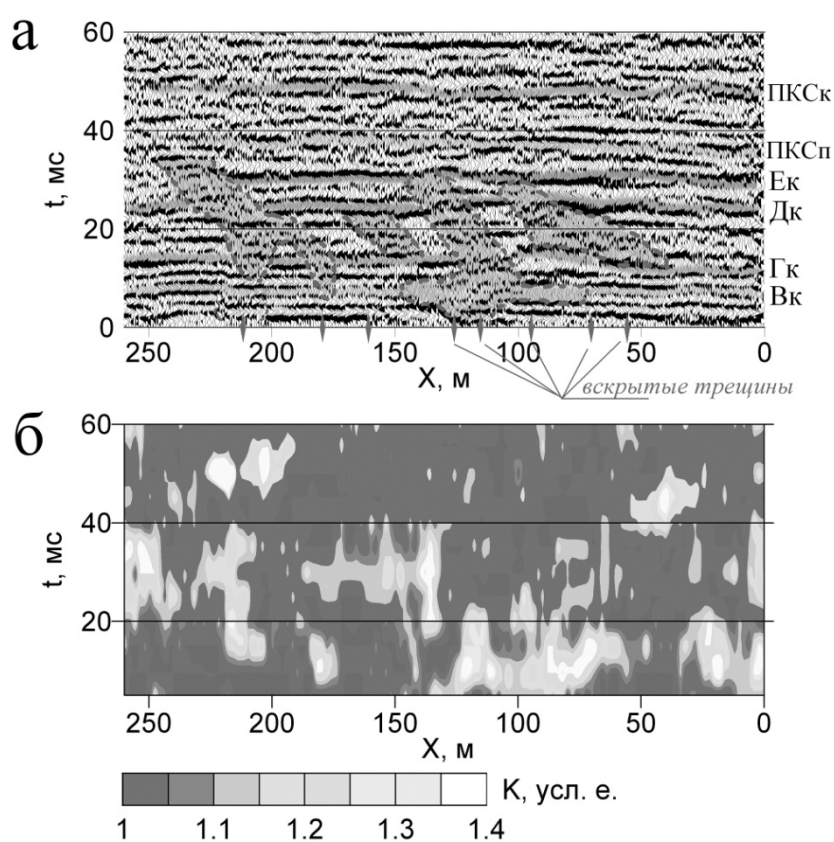


Рис. 3. Результаты шахтных сейсморазведочных исследований зон развития трещин: а – временной разрез МОГТ; б – распределение комплексного параметра

Их пространственное распространение имеет направление, соответствующее положению осей вскрытых выработкой складок. Трещины, как правило, приурочены к участкам интенсивного складкообразования. Снижается когерентность и интенсив-

ность записи, её частотный состав смещается в низкочастотную область, наблюдаются дифракционные и интерференционные явления. Наибольшие изменения наблюдаются в интервале ОГ V_K - E_K . Выше по разрезу изменения сейсмической записи имеют менее явный характер. Совместные изменения всех атрибутов волнового поля представлены в виде распределения по разрезу комплексного параметра (см. рис. 3, б). Аномальные участки суммарного волнового поля проявляются повышенными значениями параметра. Предполагается, что по их пространственному положению и интенсивности возможна оценка пределов распространения трещиноватых зон и степени нарушенности пород.

Нередко к областям повышенной трещиноватости приурочены и газонасыщенные зоны. Физико-геологическую модель выбросоопасной, газонасыщенной зоны можно представить из трех основных частей [3]: 1) центральной – газонасыщенной, с повышенной пористостью, трещиноватостью и соответственно с низкой скоростью распространения упругих волн и их повышенным затуханием, особенно в высокочастотной части спектра; 2) переходной, расположенной с внешней стороны границы из слабо-трещиноватых пород, характеризующихся повышенным напряжением, уменьшением пористости, улучшением акустических контактов и, соответственно, увеличением значений скорости распространения упругих волн, пониженным затуханием; 3) вмещающей с нормально-пористыми, слабо-трещиноватыми породами, характеризующимися фоновыми, средними значениями скорости, затухания и частоты упругих волн.

Исходя из физико-геологической модели, диагностическими признаками при поиске возможных скоплений газа в карналлитовых пластах ВКМКС являются: понижение частоты и высокое затухание сейсмического сигнала в соответствующей газонасыщенному участку области, уменьшение скорости распространения упругих волн и формирование усложненных интерференционными явлениями отражений на внешней границе зоны.

Значительное повышение достоверности интерпретационных выводов при поиске подобных образований возможно за счет совместного изучения закономерностей распространения разнотипных волн [4]. Кроме того, многоволновой подход обеспечива-

ет возможность получения дополнительного физического параметра – γ (отношение скоростей продольных и поперечных волн).

На временных разрезах Р- и S-волн, полученных в горной выработке по газоопасному карналлитовому пласту «В» выделяется ряд отражающих горизонтов, соответствующих кровлям одноименных карналлитовых пластов: «Г», «Д» и «Е» (рис. 4, а).

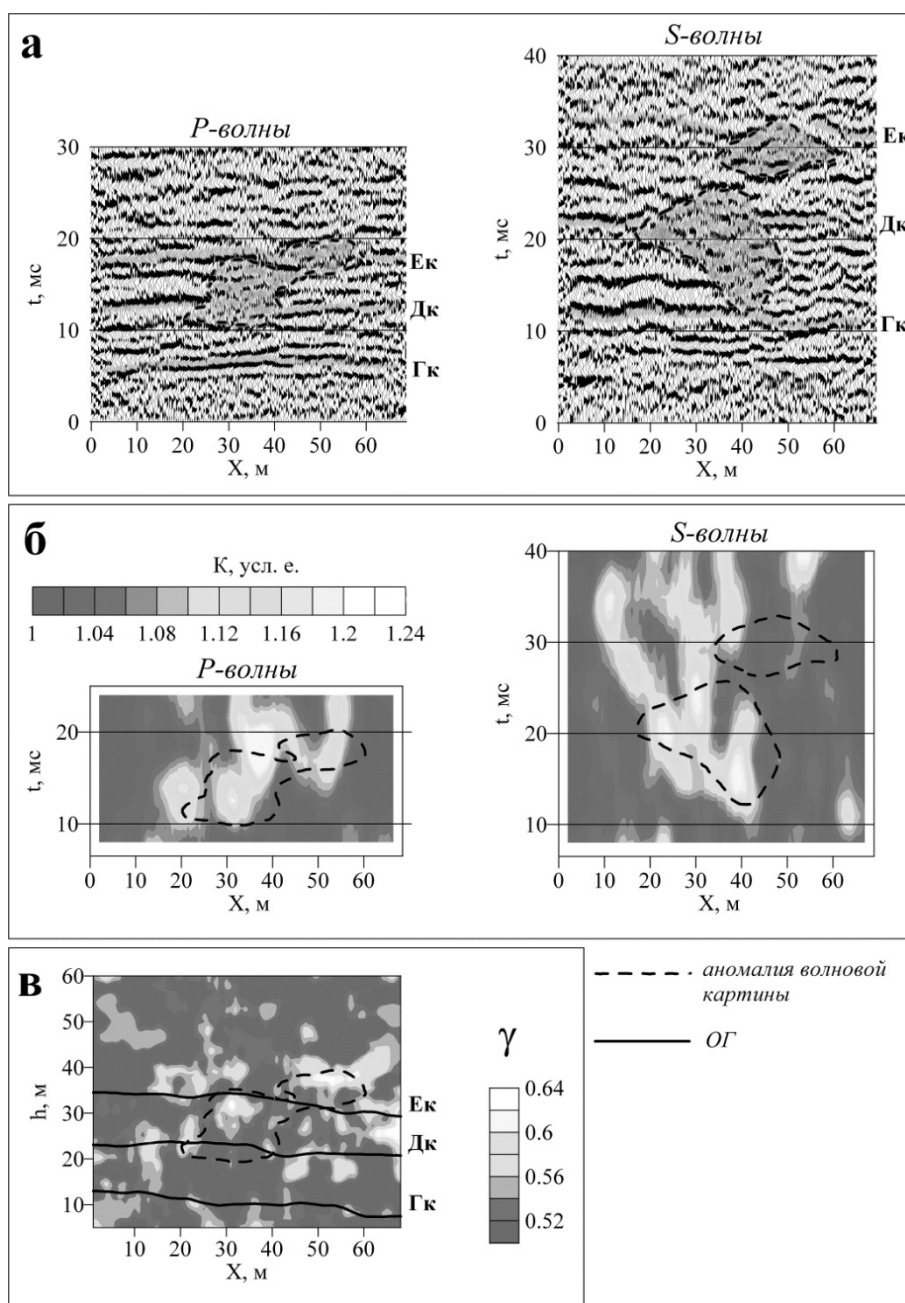


Рис. 4. Проявление газонасыщенных зон на временных разрезах разнотипных волн (а), распределения комплексного параметра (б) и параметра γ (в)

По особенностям структуры волновых картин на данных разрезах выделяется по два участка. Внешние границы выделенных зон оконтуриваются отражающими элементами, имеющими сложный интерференционный характер. Отметим, что на волновой картине поперечных волн участки нарушенной структуры сейсмической записи имеют большее пространственно-временное распространение.

Изменения физических свойств массива в пределах выделенных зон оцениваются по согласованности поведения когерентности, частоты, интенсивности и эффективных скоростей для каждого типа волн. Суммарное проявление данных параметров представлено в пространственно-временном распределении комплексного параметра (рис. 4, б). Области его повышенных значений для продольных волн в данном случае увязываются с газонасыщением массива. Для поперечных волн связь менее однозначная, поскольку влияние литологического фактора может преобладать. В ряде случаев изменение состава отложений, например – повышение глинистости, более дифференцировано влияет на значения скоростей распространения упругих поперечных волн.

Важная дополнительная информация для интерпретации аномалий волновой картины содержится в поведении параметра γ (рис. 4, в). Распределение γ с учетом результатов скоростного анализа, представлено в масштабе глубин. Повышенные значения γ сосредоточены в верхних частях аномалий по продольным волнам. Подобное наложение позволяет с большей уверенностью говорить о газонасыщенности данных участков. Зоны повышенных значений γ , несовпадающие с волновыми аномалиями, могут быть обусловлены изменением литологического состава без нарушения структуры геологического разреза.

Подобная особенность характерна для геологического строения продуктивной толщи в пределах зон замещения. Их негативное влияние на процесс разработки месторождения связано с нарушением технологии отработки продуктивных пластов и возникающими при этом экономическими потерями.

Физико-геологическая модель зоны замещения на локальном уровне характеризуется высокими скоростями распространения упругих волн по отношению к вмещающим породам и

уменьшением внутренней акустической контрастности отложений вследствие однотипного минерального состава различных пластов в ее пределах. Данная модель позволяет предположить в качестве основных поисковых признаков: высокий уровень скоростной изменчивости на границах зоны замещения, общее повышение скорости, снижение интенсивности сейсмических колебаний и искажение волновой картины в центральной части.

На рисунке 5 представлены результаты сейсмоакустических наблюдений МОГТ, полученные в разведочной горной выработке, вскрывшей зону замещения сильвинито-карналлитовой пачки каменной солью.

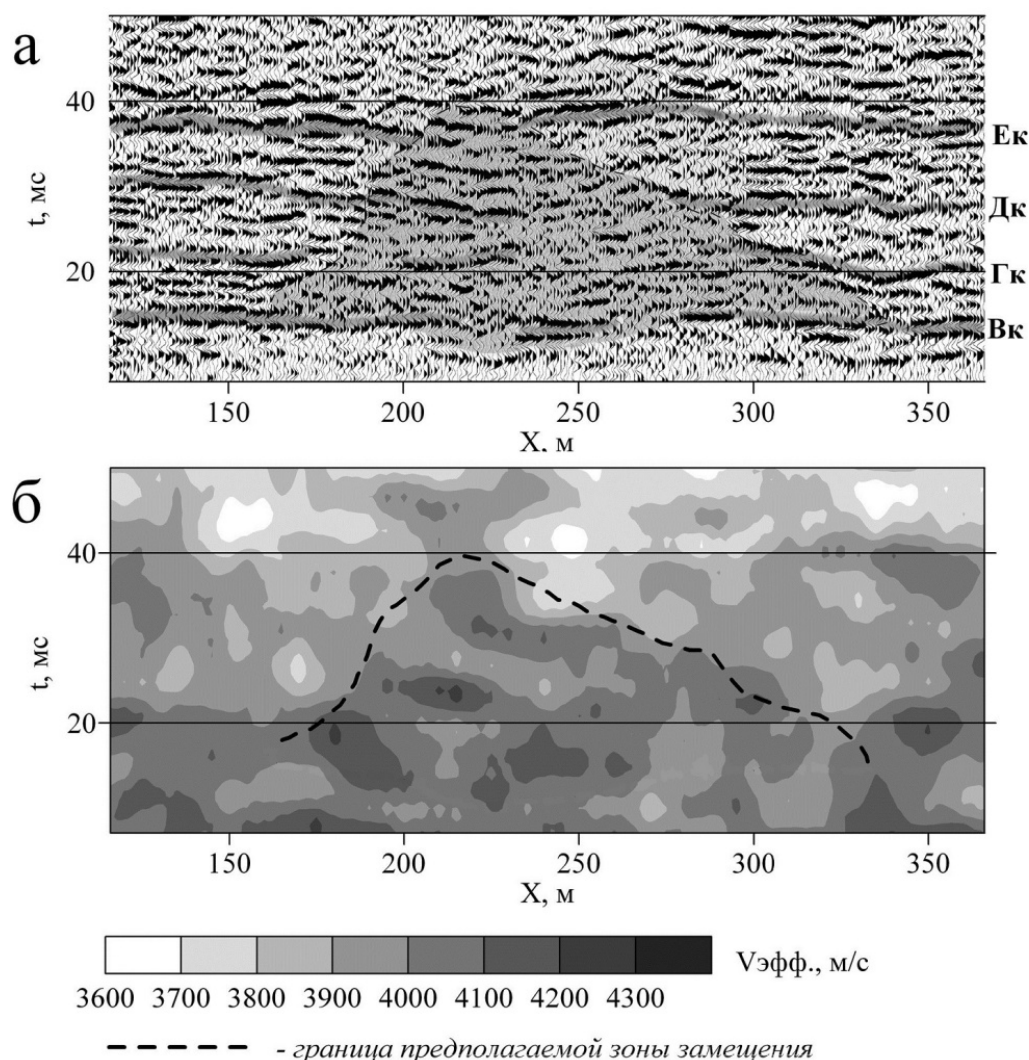


Рис. 5. Картирование зоны литологического замещения продуктивных пластов: а – временной разрез МОГТ; б – скоростная характеристика разреза

На волновой картине при общей выдержанности ОГ выделяется достаточно протяженная зона с низкой когерентностью сейсмической записи (см. рис. 5, а). Данная зона совпадает с высокоскоростной областью на скоростной характеристике временного разреза (рис. 5, б). Увеличение скоростей распространения упругих колебаний внутри зоны замещения относительно вмещающих пород составляет 200-300 м/с.

Представленные примеры иллюстрируют наиболее типичные горно-геологические проблемы, разрешаемые с помощью шахтных сейсморазведочных исследований. Их применение позволяет определять строение и свойства рассматриваемых неоднородностей. Подобные результаты учитываются при формировании планов горных работ.

Вторая группа задач, при решении которых эффективно использование данных шахтных сейсмоакустических исследований, имеет горнотехническую направленность. К таковым в первую очередь относится параметрическое обеспечение геомеханических расчетов, проводимых для оценки прочностных свойств горного массива и динамики возможных его изменений под влиянием добычных работ. Точность данных расчетов во многом зависит от достоверности исходной расчетной модели среды, учитывающей реальную геологическую обстановку и прогнозные физико-механические свойства слагающих горных пород. Дистанционный прогноз физико-механических свойств горного массива возможен на основе многоволновой шахтной сейсмоакустики [5]. На основе сейсмических исследований определяются параметр γ , представляющий собой отношение скоростей распространения поперечных и продольных волн $\gamma = V_S/V_P$, и коэффи-

$$\text{циент Пуассона } \sigma_{II} = \frac{V_P^2 - 2V_S^2}{2(V_P^2 - V_S^2)}.$$

В качестве примера геофизического опережающего прогноза физико-механических свойств горных пород ВЗТ приведем результаты многоволновых наблюдений МОГТ в горных выработках калийного рудника. На представленных временных разрезах (рис. 6) выделен ряд ОГ, приуроченных к акустически наиболее контрастным границам. В процессе решения обратной задачи для

обоих типов волн отмечены незначительные расхождения структурных построений, укладываемые в пределы разрешающей способности метода.

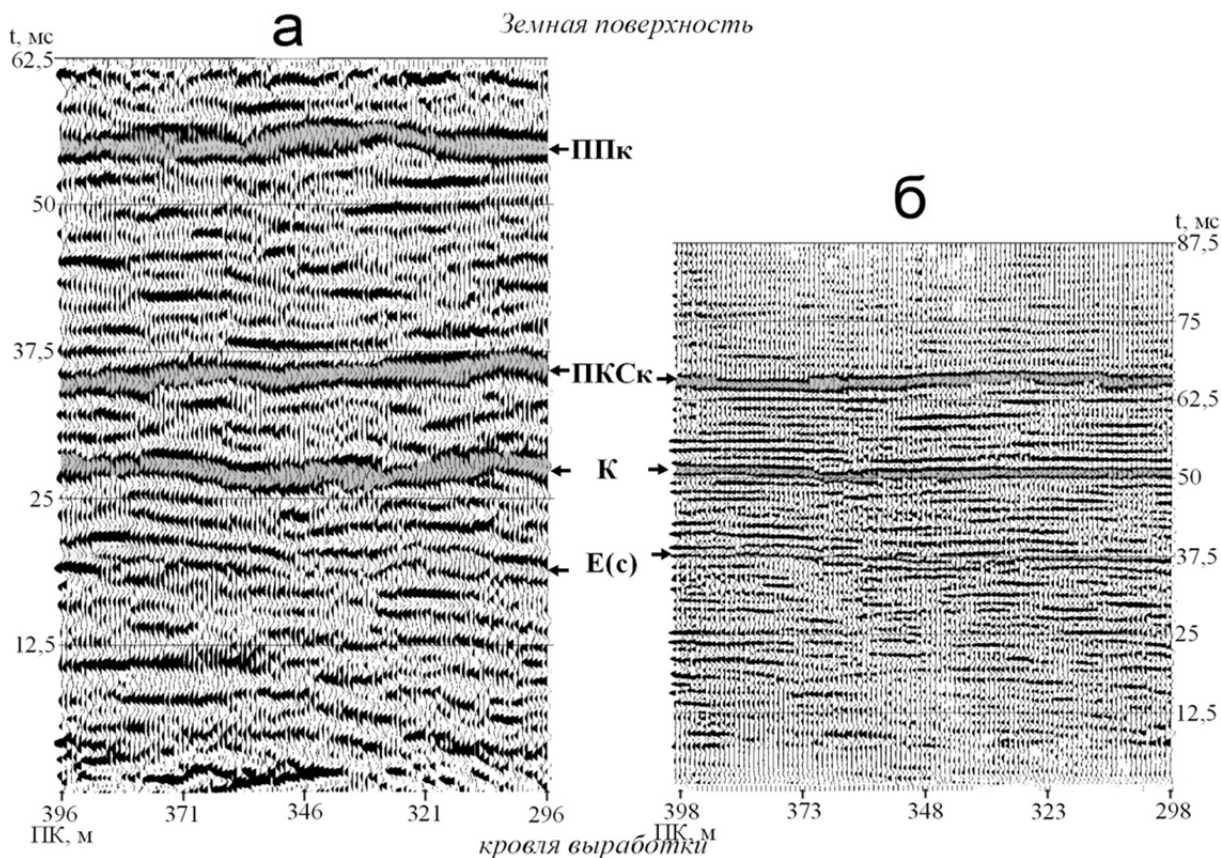


Рис. 6. Временные разрезы МОГТ для Р-волн (а) и S-волн (б)

Неоспоримым преимуществом используемых в МОГТ интерференционных систем наблюдений является их высокая информативность в определении скоростных параметров отраженных волн. Представленные распределения скоростных характеристик имеют отчетливую слоистую структуру, в пределах которой выделяются локальные участки как понижения, так и повышения значений скоростей (рис. 7, а, б). Положительная аномалия в пределах ОГ «E(c)» и «ПКСК», отмеченная на скоростной характеристике поперечных волн, совпадает с областью понижения скоростей продольных волн. Наиболее наглядна выделенная область в пересчете в физико-механические параметры (рис. 7, в, г). Разрезы параметра γ и коэффициента Пуассона (σ) также отра-

жают выдержанное слоистое строение по всему профилю с устойчивой аномалией в его центре.

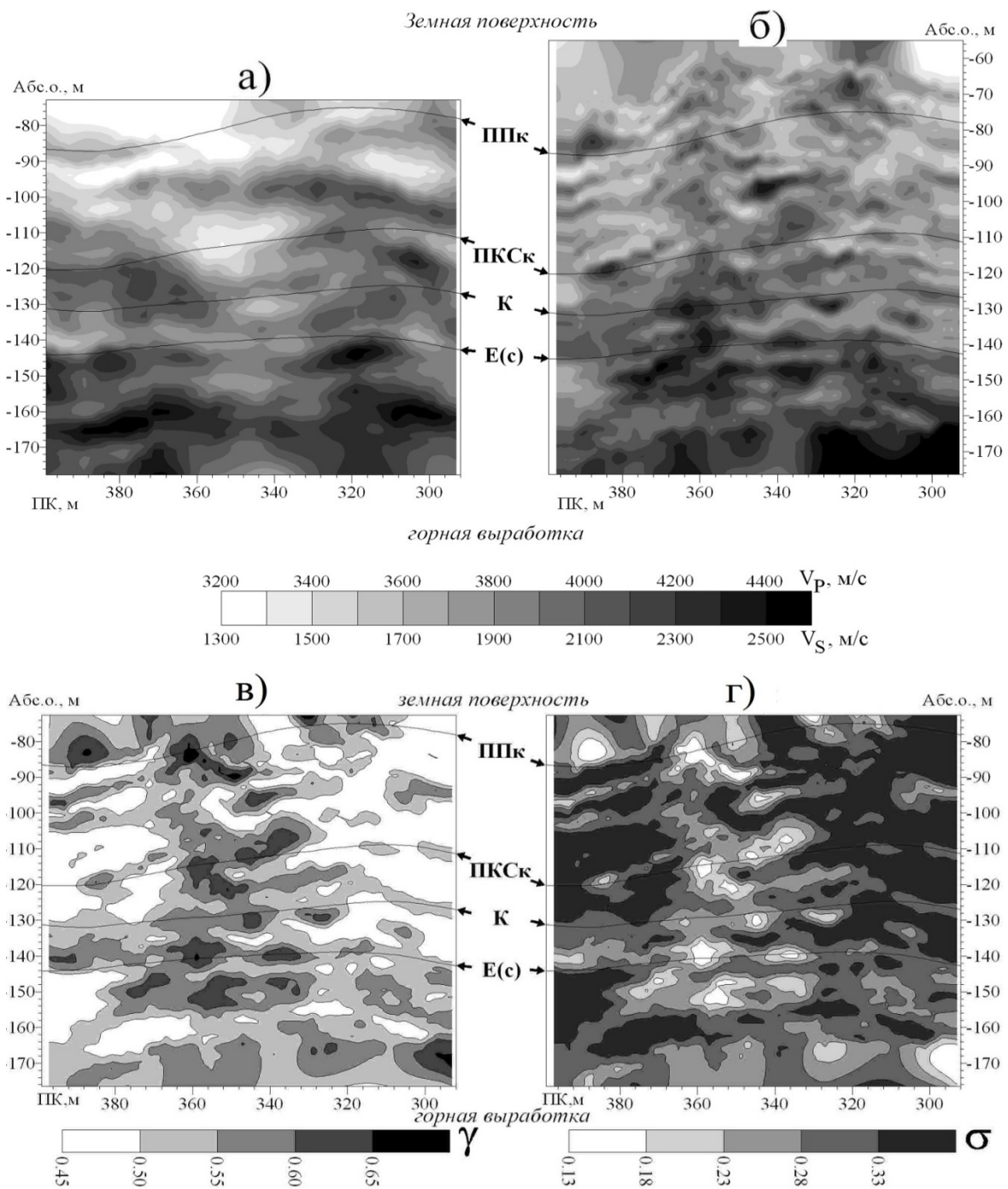


Рис. 7. Результаты цифровой обработки многоволновых сейсмоакустических данных: разрезы скоростных характеристик P-волн (а) и S-волн (б); разрезы распределения параметра γ (в) и коэффициента Пуассона σ (г)

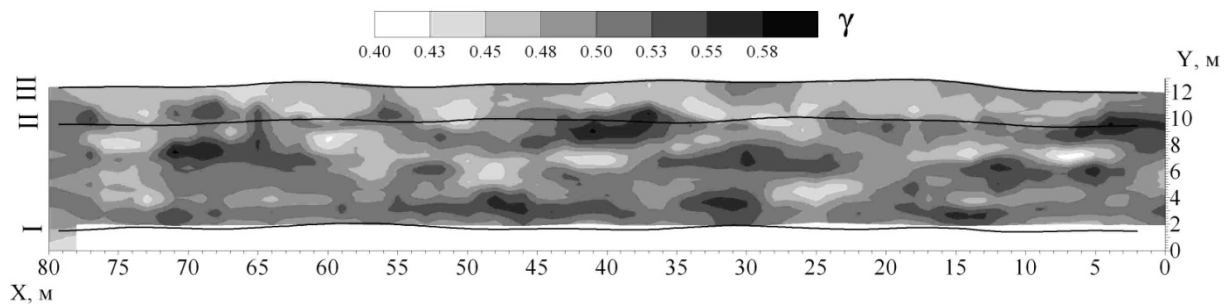
Коэффициент Пуассона весьма чувствителен к изменению литологических свойств геологической среды. Анализ особенностей распространения σ позволяет предположить наличие в интервале соляной толщи зоны, неблагоприятной для распространения продольных волн. Возможные причины тому – газонасыщение или повышенная трещиноватость.

Достоинства многоволновой сейсмоакустики при дистанционном прогнозе физико-механических параметров геологической среды в условиях горных выработок могут успешно использоваться в решении задач оперативного контроля состояния междукамерных целиков (МКЦ) [6]. Одной из них является прогноз остаточного срока службы МКЦ, основанный на информации об ослаблении прочностных свойств пород в приконтурной части целика.

Основной причиной возникновения закономерностей в распределении параметров, характеризующих свойства пород вокруг выработки после ее проходки, является перераспределение горного давления в массиве. В результате этого в приконтурной части целика формируются акустически контрастные зоны пригрузки и разгрузки, на границах которых могут образовываться отражённые и рефрагированные волны. Положение границ перечисленных зон и дифференциация значений скоростей на них зависят от свойств пород массива, размеров и возраста выработок, величины естественных напряжений [7].

В качестве примера оперативного контроля состояния МКЦ для оценки его остаточного срока службы приведем результаты многоволновых наблюдений в горизонтальной плоскости тела целика. Наблюдения проводились методом сейсмического просвечивания отраженными волнами с использованием систем наблюдений многократного перекрытия. Необходимость изучения объектов с детальностью менее одного метра предопределяет проведение исследований в акустическом диапазоне частот. Минимальные размеры выделяемых неоднородностей при этом составляют 0,15 – 0,2 метра. В целом отмечается понижение скоростей в приконтурной части целика. Скоростная дифференциация продольных волн $\approx 15\%$ от максимального значения, а для поперечных волн достигает $\approx 35\%$. По результатам определения ско-

ростных характеристик Р- и S-волн строятся распределения γ в целиках (рис. 8). Основной и очень важной с методической точки зрения особенностью данного распределения является концентрация низких значений γ в пределах зон нарушенности приконтурных частей целика, обусловленная их повышенной влагонасыщенностью.



I – Граница ближней зоны влияния горной выработки; II – граница дальней зоны влияния горной выработки; III – стенка противоположной выработки.

Рис. 8. Распределение параметра γ в горизонтальной плоскости МКЦ

Полученные сейсмоакустические данные, характеризующие качественные изменения скоростных свойств горных пород в пределах МКЦ, в дальнейшем используются для геомеханических прогнозных оценок прочностных свойств исследуемого массива по следующей технологической схеме: Инструментальными прямыми методами оценки физико-механических свойств массива производятся точечные измерения в горных выработках, в пределах которых также проводятся сейсмоакустические наблюдения [6]. При условии нахождения устойчивых зависимостей изменения скоростных характеристик с данными инструментальных измерений возможна прогнозная оценка физико-механических свойств горного массива между точками измерений в пределах всего объема просвечиваемого целика [8].

Шахтные сейсмоакустические исследования, проводимые в горизонтальной плоскости межштрекового пространства не ограничиваются решением задач, связанных с параметрическим обес-

печением геомеханических расчетов. Контроль состояния горно-технических конструкций – еще одна важная задача, для решения которой могут применяться шахтные сейсмоакустические методы исследований.

Наибольшую значимость в этой проблематике имеют работы по оценке состояния затюбингового пространства шахтных стволов [9]. В условиях тубинговой крепи по очевидным причинам возможно применение только сейсмоакустических методов исследований. Требуемая при этом глубинность и детальность предопределяет использование акустического диапазона частот. Наибольшая информативность акустических методов достигается также в рамках методики общей глубинной точки за счет многократности наблюдений, эффективной пространственной обработки и скоростного анализа отраженных волн. Физическими предпосылками к возможности применения традиционных сейсморазведочных подходов в акустическом диапазоне частот служит физико-геологическая модель строения шахтного ствола в горизонтальной плоскости – тубинг, цементное кольцо, породный массив. На основании результатов сейсмоакустических наблюдений в пределах проблемных или аварийных участков шахтных стволов принимаются технологические решения по тампонажу околоствольного пространства.

Представленные горнотехнические приложения сейсморазведочных исследований используются сегодня на всех рудниках ВКМКС и могут быть адаптированы к любым подземным разработкам месторождений полезных ископаемых при условии акустической контрастности слагающих их разрез горных пород. Возрастающая потребность в использовании геофизических методов контроля состояния разрабатываемого массива на ВКМКС продиктована все более жесткими требованиями к безопасности горного производства в условиях его интенсификации.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Санфиров И. А. Рудничные задачи сейсморазведки МОГТ. Екатеринбург : УрО РАН, 1996. — 167 с.

2. Мешбей В. И. Методика многократных перекрытий в сейсморазведке. Москва : Недра, 1985. — 264 с.
3. Бабкин А. И. Сейсмическое моделирование газонасыщенных зон в соляных отложениях // Геология Западного Урала на пороге XXI века : Материалы региональной научной конференции / Перм. Ун-т. — Пермь, 1999. — С. 259—260.
4. Санфиоров И. А., Бабкин А. И., Сальников А. П. Контроль состояния горного массива методом многоволновой шахтной сейсморазведки / Горный Вестник, 1998. — № 6. — С. 94—99.
5. Sanfirov I., Babkin A., Lisin V. Multicomponent subsurface seismic for the evaluation of salt petrophysics. Extended abstracts book. EAGE 64th Conference & Exhibition — Florence, Italy, 27–30 May 2002. European Association of Geoscientists & Engineers, 2002.
6. Barykh A., Safirov I., Asanov V., Babkin A., Toksarov V., Geghin A., Bruev A. Tool checking of salt pillars state for prediction of their residual time working. Mining Geotechnics and Underground Building at the Beginning of the 21st Century (24th Winter School of Rock Mechanics) 12-16 march 2001. Scientific Papers of the Institute of Geotechnics and Hydrotechnics of the Wroclaw University of Technology. No. 73
7. Барях А. А., Асанов В. А., Токсаров В. Н., и др. К оценке остаточного срока службы соляных междукammerных целиков / Физ.-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. — 1998. — № 1.
8. Бабкин А. И., Ахматов А. Е. Согласование натуральных и лабораторных сейсморазведочных оценок напряженно-деформированного состояния массива / Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2006. — № 6. — С. 100—105.
9. Бабкин А. И., Санфиоров И. А. Геофизический мониторинг затюбингового пространства / Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2011. — № 1.