



УДК 550.834.05:622.33(571.17)

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ РАБОТ ПО ПРОСВЕЧИВАНИЮ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОНОМНЫХ СТАНЦИЙ РОСА-A

А. С. Сальников*, К. А. Дунаева*, Б. А. Канарейкин*, О. М. Сагайдачная*, В. Г. Турчанинов**,
В. А. Чурин**, А. Н. Шмыков*

Приведены результаты опытной апробации в шахтах Кузбасса автономных сейсмических станций РОСА-A в условиях отсутствия спутниковых сигналов от GPS-приемника. Показано, что система высокоточной временной синхронизации, реализованная в этой станции, обеспечивает детальные сейсмические исследования несколькими станциями одновременно в шахтах (и других подземных и наземно-подземных сооружениях). Сейсмические исследования выполнены с целью выявления зон геологических нарушений в выемочных столбах угольных шахт. Актуальность проблемы обусловлена необходимостью снизить значительные издержки добывающего предприятия (шахты) при внезапной встрече не вскрытого подготовительными выработками нарушения или при неопределенной его конфигурации. По полученным сейсмическим материалам выполнена идентификация зарегистрированных волн, построены системы их годографов, проведена сейсмотомографическая обработка проходящих среду волн, определены особенности структуры угольного пласта и границы его размыва.

Ключевые слова: сейсмические исследования в шахтах, система наблюдений на проходящих волнах, автономный регистратор, сейсмотомографическая обработка.

INITIAL RESULTS OF SEISMIC OPERATIONS IN ILLUMINATING COAL BEDS WITH THE POCA-A AUTONOMOUS STATIONS

A. S. Salnikov, K. A. Dunaeva, B. A. Kanareikin, O. M. Sagaidachnaya, V. G. Turchaninov,
V. A. Churin, A. N. Shmykov

Results of an evaluation test of autonomous seismic stations of the POCA-A-type in Kuznetsk Basin mines in circumstances where there are no GPS-receiver signals are presented. It is shown that a high-accuracy time synchronization system implemented in the station enables detailed seismic investigations by several stations simultaneously in mines and other underground and above-and underground structures. Seismic investigations have been aimed at revealing geological dislocations in extraction pillars of coal pits. The problem is governed by the necessity to decrease considerable expenses of an extractive enterprise (a mine) in case that not uncovered by development workings a dislocation is unexpectedly met or its configuration is uncertain. Recorded waves are identified from the gathered seismic data, assemblages of their time-distance curves are constructed, transmitted waves are processed with seismic tomography, and structural features of a coal-bed and its washout boundaries are determined.

Key words: seismic investigations in mines, transmitted-wave spread, autonomous recorder, seismic tomographic processing

В настоящее время на шахтах Кузбасса для исключения аварий, обусловленных повышенным газовыделением из угольных пластов в подземные выработки, проводятся работы по дегазации угольного пласта путем проведения буровых работ как с поверхности (до начала разработки участка месторождения), так и в подземных условиях в пределах подготовленного к выемке столба.

Для локализации потенциальных зон с повышенным выделением метана в подготовительных выработках и для оптимизации заложения подземных дегазационных скважин рекомендуется проводить опережающие геолого-геофизические исследования выемочного столба. Некоторую помощь в решении этих задач дают наземные сейсмические наблюдения, однако они не обеспечивают требуемой разрешенности по вертикали

(первые метры) и латерали (первые десятки метров). Наиболее эффективным способом изучения структуры угольных пластов может служить способ их сейсмического просвечивания [5] из подготовительных выработок (штреков).

Весьма существенная задача, решение которой позволяет значительно снизить затраты по выемке угля и повысить безопасность на этой стадии технологического цикла, – прогнозирование возможных скрытых нарушений (не выявленных на этапах разведки и проведения подготовительных выработок) или неопределенной конфигурации нарушений пласта, вскрытых подготовительными выработками.

Исследования на шахте ООО «Байкаимская» способом сейсмического просвечивания на проходящих волнах с целью обнаружения распространения зон геологических нарушений в угольных пластах выполнены ООО «НТЦ „Восточный“» сов-

*ФГУП «СНИИГГиМС», Новосибирск

** ООО «НТЦ „Восточный“», Кемерово



местно с ФГУП «СНИИГТИМС» в 2010 г. Результаты приведены в настоящей статье.

На исследуемом участке размером 340×242 м наблюдаются замещения угольного пласта вмещающими породами (песчаником повышенной крепости), наличие которых не только уменьшает рабочую мощность пласта, но и существенно усложняет добычу угля даже с использованием современной технологии и механизмов.

Методика полевых исследований

Полевая методика сейсмических работ включала систему многократных перекрытий на проходящих волнах (рис. 1, а).

Пункты приема (ПП) сейсмических колебаний размещались с шагом 10 м на висячем борту конвейерного штрека. Сейсмоприемники помещались в горизонтально пробуренные в угольном пласте шпуров глубиной около 1,0 м. На участке выхода песчаника сейсмоприемники приклеивались непосредственно к борту выработки, при этом ось максимальной чувствительности датчиков была направлена по угольному пласту перпендикулярно борту выработки (конвейерного штрека).

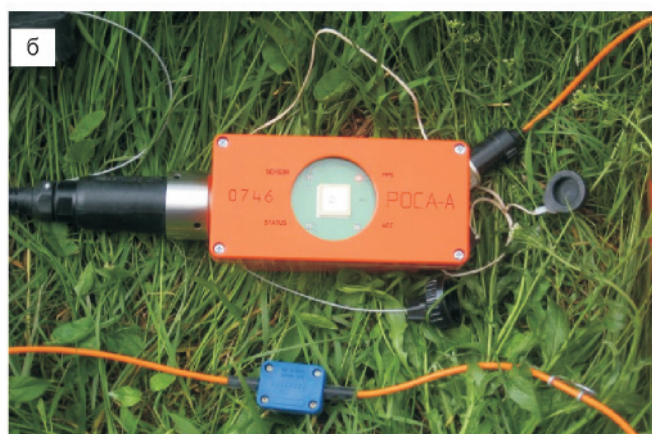
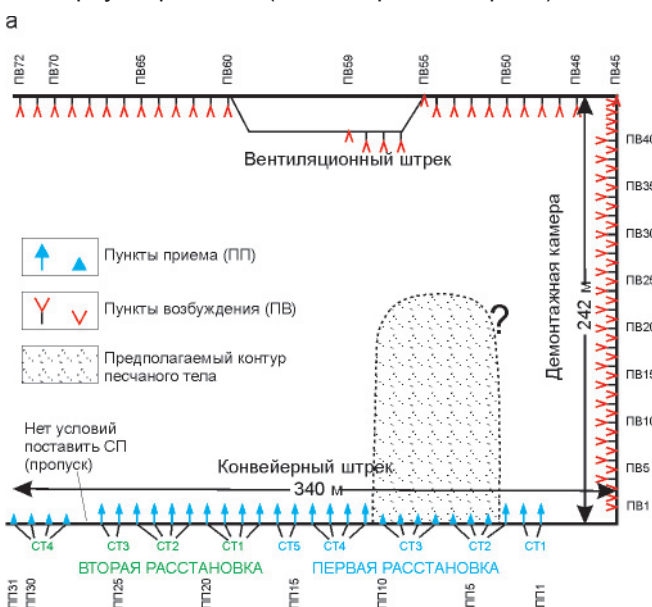


Рис. 1. Схема сейсмических наблюдений в лаве 2бис (а) и автономный сейсмический регистратор РОСА-А (б)

Пункты возбуждения (ПВ) упругих колебаний размещались в борту вентиляционного штрека и стенке демонстрационной камеры. Расстояния между ПВ в вентиляционном штреке составляли 10 м, в демонстрационной камере 5–6 м. На каждом ПВ выполнялось 6–8 ударов кувалдой весом 10 кг по металлическому штырю, помещаемому в горизонтально пробуренный шпур глубиной 1,0–1,5 м.

Для регистрации волнового поля использовалась автономная сейсмическая станция РОСА-А (см. рис. 1, б), предназначенная для выполнения высокоточных сейсмических измерений, в том числе длительных [1, 2, 6]. Данная аппаратура прошла экспертизу на соответствие требованиям нормативных документов по безопасности во исполнение Федерального закона «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (заключение № 189-7 от 22.12.2009).

Реализация системы наблюдений на проходящих волнах с использованием автономных регистраторов обладает важным преимуществом: отсутствием проводных линий между ПВ и ПП, находящихся в разных штреках [2].

Важнейшим условием использования в шахтах сейсмических автономных станций РОСА-А является обеспечение высокоточной синхронизации времени при отсутствии спутниковых сигналов. Система синхронизации времени, реализованная в автономной станции РОСА-А, включает GPS-приемник, прецизионный тактовый генератор и систему автоподстройки. Использование GPS-приемников позволяет получить точность синхронизации не хуже ± 1 мкс. При отсутствии устойчивого приема спутниковых сигналов GPS термостатированный генератор позволяет длительное время работать в автономном режиме с погрешностью менее ± 1 мс/сут. Эти два способа гарантируют достоверную временную синхронизацию модулей регистрации между собой.

Для обеспечения привязки сейсмических данных к мировому времени используется канал автономного регистратора РОСА-А с подключенным сейсмическим датчиком, располагаемым в непосредственной близости от источника возбуждения. При работе использовался пьезодатчик, закрепленный непосредственно на кувалде и подключенный к формирователю импульсов. Реализованный импульс нормируется по длительности (менее 0,5 с) и имеет крутые фронты. Высокая степень идентичности импульсов позволяет выполнить при обработке достоверную идентификацию и временную привязку зарегистрированных отметок момента возбуждения (рис. 2, а). В качестве отметки момента возбуждения принимается точка, в которой дифференциал превышает половину средней амплитуды импульсов (при этом учитывается, что реальный фронт имеет правильную форму, а после возбуждения фронты игнорируются в течение 0,6 с).

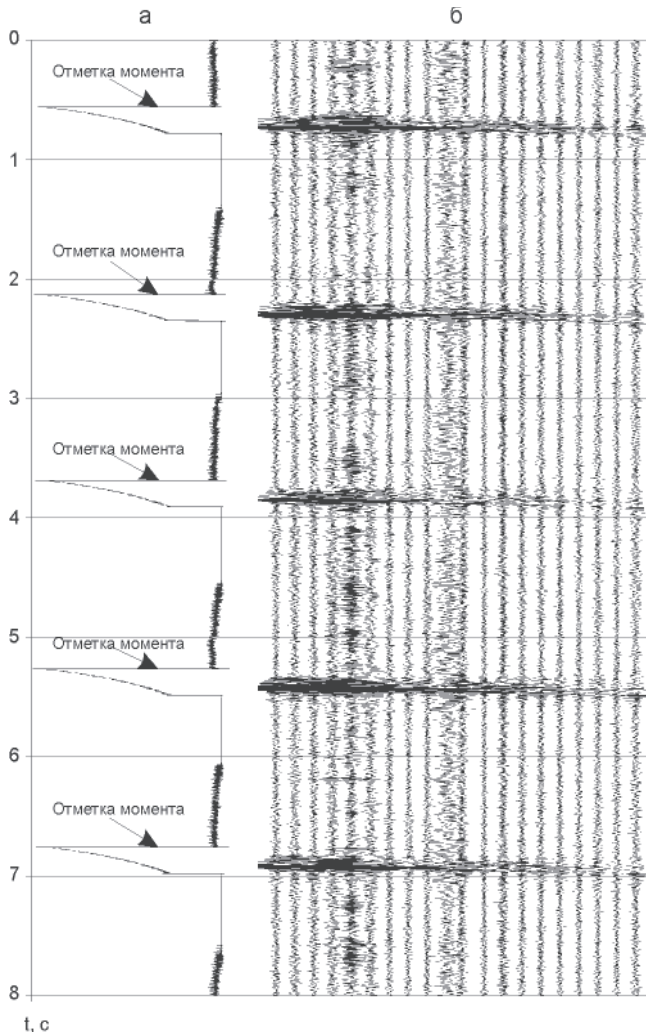


Рис. 2. Фрагмент записи «отметчика» (а) и объединенная сейсмограмма, соответствующая записи пяти регистраторов на первой расстановке (б)

Этап начальной обработки (препроцессинг)

Результатом первичной обработки полевых записей длительностью около 1 ч, зарегистрированных автономной станцией РОСА-А в виде последовательности отсчетов в формате РСА, является формирование сейсмограмм от общего пункта возбуждения ОТВ (рис. 3). Во время регистрации этих сеансов выполняется, как правило, несколько (до 8) ударов кувалдой на заданных ПВ. Обработка полевых записей включает следующие обязательные действия (процедуры):

1. Определение списка отметок моментов времен возбуждения для каждого сеанса записи «отметчика».
2. Формирование вспомогательных файлов (привязка времен возбуждений к ПВ, описание расстановки регистраторов) в специальном формате в текстовом виде. Основой для файла привязки времен ПВ является список отметок моментов с «отметчика» (п. 1).
3. Первичная нарезка из длинных записей регистраторов РОСА-А (*.рса) фрагментов сейсмических трасс (например, по 16 с), переформатирование их в формат SEG-Y (*.sgy).

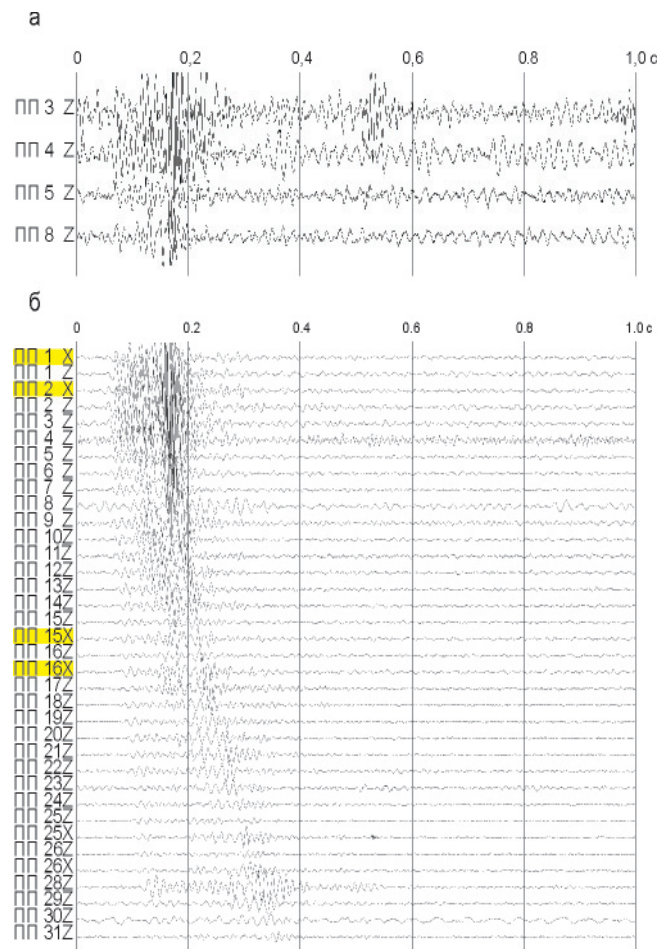


Рис. 3. Типичная сейсмозапись одного удара на открытом канале РОСА-А (а) и объединенная суммированная сейсмограмма ОТВ (ПВ26), содержащая записи двух расстановок регистраторов (б)

4. Объединение 16-секундных фрагментов записей всех регистраторов, соответствующих одному временному интервалу, в обобщенные сейсмограммы записи с расстановки (см. рис. 2, б).

5. Первичный просмотр сейсмограмм (п. 4) в любой программе для просмотра. Проверка корреляции откликов сигнала с временами возбуждения с отметчика (п. 1) и рапортом оператора. Выделение отметок моментов возбуждений, которым соответствует отклик сигнала на записях. Выбраковывание ложных отметок моментов возбуждений, а также тех отметок времени, отклик от которых на записи есть, но с явным смещением относительно ожидаемого времени (сбой записи отметки момента) либо с сильными помехами (например, отскок кувалды, хождение по профилю во время записи отклика).

6. Привязка выделенных отметок моментов времен с указанием соответствующих им ПВ, порядковая нумерация ударов для каждого ПВ (для последующего накопления). Редактирование вспомогательных файлов (п. 2) с учетом обновленных данных.

7. Нарезка из длинных записей РОСА-А фрагментов сейсмических трасс в соответствии со сформированными в п. 6 вспомогательными



файлами (аналогично п. 3). Результат – сейсмограммы по четыре трассы в формате SEG-Y, каждая содержит секундную запись одного возбуждения с началом записи в момент возбуждения (рис. 3, а).

8. Визуализация и анализ полученных в п. 7 данных (от одиночных ударов) в подробном масштабе. Выбраковывание неудачных записей, пропущенных в п. 5.

9. Накопление (суммирование) записей одиночных возбуждений.

10. Объединение 1-секундных суммированных сейсмограмм для всех регистраторов, соответствующих одному и тому же ПВ, в сейсмограммы ОТВ (см. рис. 3, б).

11. Визуализация и анализ суммированных сейсмограмм ОТВ, редактирование сейсмограмм, в том числе удаление, перестановка, инверсия отдельных каналов при необходимости.

Динамический диапазон сейсмического канала станции РОСА-А и прецизионная система временной привязки позволили получить качественный материал на частоте дискретизации 0,5 мс в условиях высокого уровня микросейсм.

Особенности волнового сейсмического поля

Наблюдаемые сейсмические колебания характеризуются широким частотным диапазоном от 20–30 до 200 Гц. На всех полученных сейсмограммах выделяются в основном три группы волн (рис. 4):

- продольные волны P^{yB} , распространяющиеся по вмещающим угольный пласт породам (в кровле или подошве угольного пласта);
- поперечные волны S^{yB} , распространяющиеся по вмещающим угольный пласт породам (в кровле или подошве угольного пласта);
- каналовые волны S^y , распространяющиеся по угольному пласту.

Наблюдаемые (см. рис. 4, а) в первых вступлениях волны P^{yB} в физическом отношении являются преломленными, распространяющимися по высокоскоростным (относительно угля) угле-вмещающим породам (песчаникам, алевролитам). При возбуждении колебаний в угольном пласте одновременно формируются две преломленные волны: одна распространяется в породах кровли угольного пласта, другая – в породах его подошвы. Как следствие, в первых вступлениях может регистрироваться волна, распространяющаяся по породам либо кровли угольного пласта, либо его подошвы в зависимости от значений скорости продольных волн в них. Продольные волны регистрируются в виде многофазного цуга протяженностью от 50 до 150 мс.

Поперечные волны S^{yB} в физическом отношении также являются преломленными, распространяющимися по угле-вмещающим породам (см. рис. 4, а). Здесь, так же как и в случае с продольными волнами P^{yB} , цуг поперечных волн

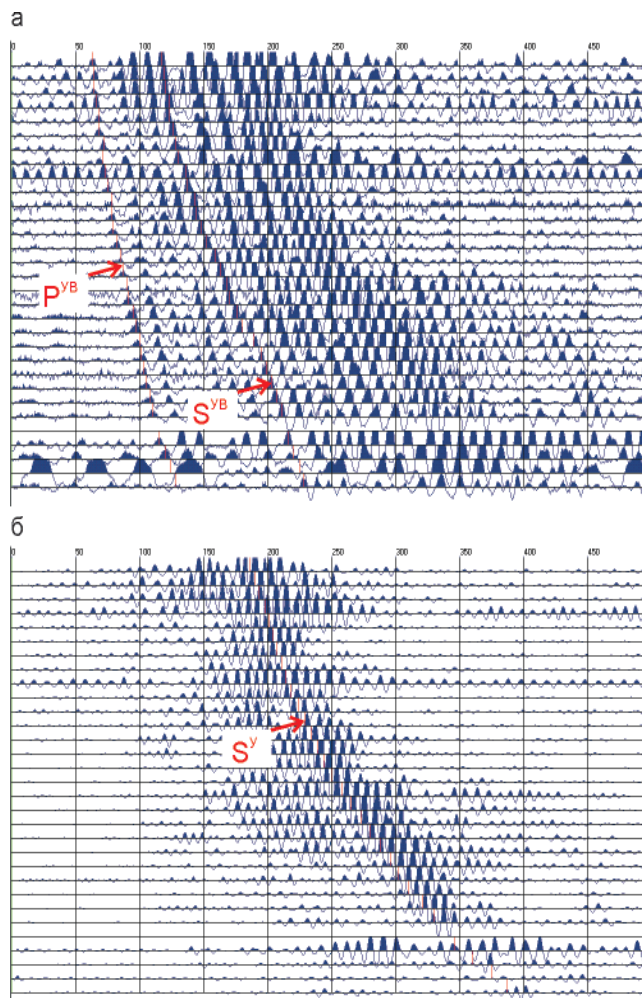


Рис. 4. Сейсмограмма ОТВ (ПВ30): а – открытый канал; б – полосовой фильтр 120–180 Гц

состоит из совокупности поперечных волн, распространяющихся в породах кровли и подошвы пласта. Протяженность цуга поперечных волн находится в пределах от 50 до 75 мс.

Угольный пласт, характеризующийся существенно более низкими значениями скоростей сейсмических волн по отношению к таковым в угле-вмещающих породах, может рассматриваться как волновод. При распространении сейсмических волн по волноводу формируется протяженный цуг колебаний, состоящий из ряда волн.

Зарегистрированная волна S^y (см. рис. 4, б) обладает следующими особенностями. Она не имеет четких первых вступлений и быстро меняет полярность по фронту распространения. Годограф может быть построен только как огибающая максимальных амплитуд цуга. Волна S^y отличается повышенной средней частотой сравнительно с таковой волн P^{yB} и S^{yB} . В нашем случае преобладающие частоты волн S^y находятся в диапазоне 120–170 Гц. Длительность цуга волн S^y составляет 25–40 мс. Значения скорости распространения волны S^y примерно в 1,4 раза ниже значений скорости поперечных волн в угольном пласте. Эти свойства позволяют отнести ее к каналовой волне волноводного типа, а определяе-



мую по ее годографам скорость рассматривать как групповую [3].

Методика обработки волнового поля

Методика включает этап прослеживания и опознания осей синфазности однотипных волн. Пикировка осей синфазности выделенных однотипных сейсмических волн выполняется с использованием программы «Seisviewer» (разработка ФГУП «СНИИГГиМС»). По всем полученным сейсмограммам строятся системы годографов (t_p^{yB} , t_s^{yB} и t_s^y) прослеженных однотипных волн (P^{yB} , S^{yB} , S^y), которые служат базой для получения двумерного изображения поля скоростей сейсмических волн.

Обработка системы годографов сейсмических однотипных волн выполнялась с помощью программы «Migratom». Результаты представлены в двух вариантах сейсмотомографических разрезов. В первом на разрезе показано двумерное распределение значений скоростей в прямоугольных ячейках. Минимальные линейные размеры прямоугольных ячеек определяются программой и зависят от плотности наблюдений (шага ПВ и ПП). Во втором поле значений скоростей изображается в виде изолиний, которые получены как линейная экстраполяция значений скоростей в прямоугольных ячейках.

Сейсмотомографическое моделирование

Для определения основных элементов интерпретации полученных сейсмотомографических разрезов (разработки подходов) проведены модельные расчеты. На рис. 5, а показана двумерная модель строения изучаемого участка среды с линейными размерами 300×300 м. В основном скоростное поле ($V_p = 2,2$ км/с) включено аномальное тело с линейными размерами 40×100 м и пластовой скоростью $V_p = 3,0$ км/с.

Теоретические сейсмотомографические разрезы для данной модели построены для четырех систем наблюдения. На рис. 5, б приведен сейсмотомографический разрез при равномерном (с шагом 10 м) расположении сейсмоприемников и источников на верхней, нижней и левой гранях изучаемой площадки. Искомый аномальный объект выделяется, но имеет неправильную форму, увеличенные относительно исходной модели размеры ($\approx 150 \times 100$ м) и отличается по значениям скоростей: в сейсмотомографическом разрезе $V_p = 2,24\text{--}2,45$ км/с, а во вмещающей среде – $V_p = 2,11\text{--}2,24$ км/с.

С целью повышения точности выделения аномального объекта предыдущая система наблюдений была дополнена тремя сейсмоприемниками, расположенными на правой грани модели. На сейсмотомографическом разрезе, полученном для такой системы наблюдений, точность выделения аномального объекта заметно улучшилась: его размеры составляют уже примерно 100×90 м, а

значения скоростей увеличились до 2,27–2,49 км/с (см. рис. 5, в).

Для случая, когда источники возбуждения и приемники сейсмических колебаний равномерно размещены на всех четырех сторонах площадки, на сейсмотомографическом разрезе достигается практически точное восстановление аномального объекта (см. рис. 5, г). Значения V_p во вмещающей среде составляют 2,17–2,24 км/с, т. е. близки к исходным.

Приведенные модельные расчеты сейсмотомографических разрезов позволяют видеть существенное влияние на восстановление скоростного строения среды используемой (выбранной) системы наблюдения. Наиболее точное восстановление скоростного строения ограниченного (замкнутого) участка среды достигается при равномерном освещении этого участка по его периметру. В остальных случаях можно рассчитывать лишь на некоторое «размытое» отображение формы аномальных объектов. При этом значение скорости в восстановленном аномальном объекте будет понижено (повышено) относительно такового в исходном.

Результаты сейсмических исследований

Сейсмотомографическая обработка на проходящих волнах послужила основой детального восстановления особенностей строения угольного пласта и углевмещающих пород по значениям скоростей V_p^{yB} , V_s^{yB} и V_s^y .

На сейсмотомографическом разрезе (рис. 6, а) $V_p^{yB} = 3,1\text{--}3,6$ км/с, что соответствует значениям скоростей продольных волн, распространяющихся по алевритопесчаным углевмещающим породам. В поле скоростей выделены два участка: первый характеризуется пониженными значениями скоростей (3,1–3,35 км/с), второй – повышенными (3,35–3,6 км/с).

На сейсмотомографическом разрезе (см. рис. 6, б) $V_s^{yB} = 1,4\text{--}1,9$ км/с, что соответствует значениям скоростей поперечных волн, распространяющихся по алевритопесчаным углевмещающим породам. В поле скоростей V_s^{yB} также можно выделить два участка: первый характеризуется пониженными значениями скоростей (1,4–1,65 км/с), второй – повышенными (1,65–1,9 км/с).

Различия в значениях скоростей V_p^{yB} и V_s^{yB} на участках I и II могут быть связаны с изменением литологического состава углевмещающих пород: повышенные значения на участке II могут указывать на увеличение песчаности (плотности) по сравнению с участком I.

Отношение скоростей V_s^{yB}/V_p^{yB} для обоих участков составляет 0,43–0,54 (см. рис. 6, в) и соответствует таковому для осадочных пород, залегающих на глубине 200–300 м. Это дополнительно подтверждает, что природа выделенных волн P^{yB} и S^{yB} определена правильно.

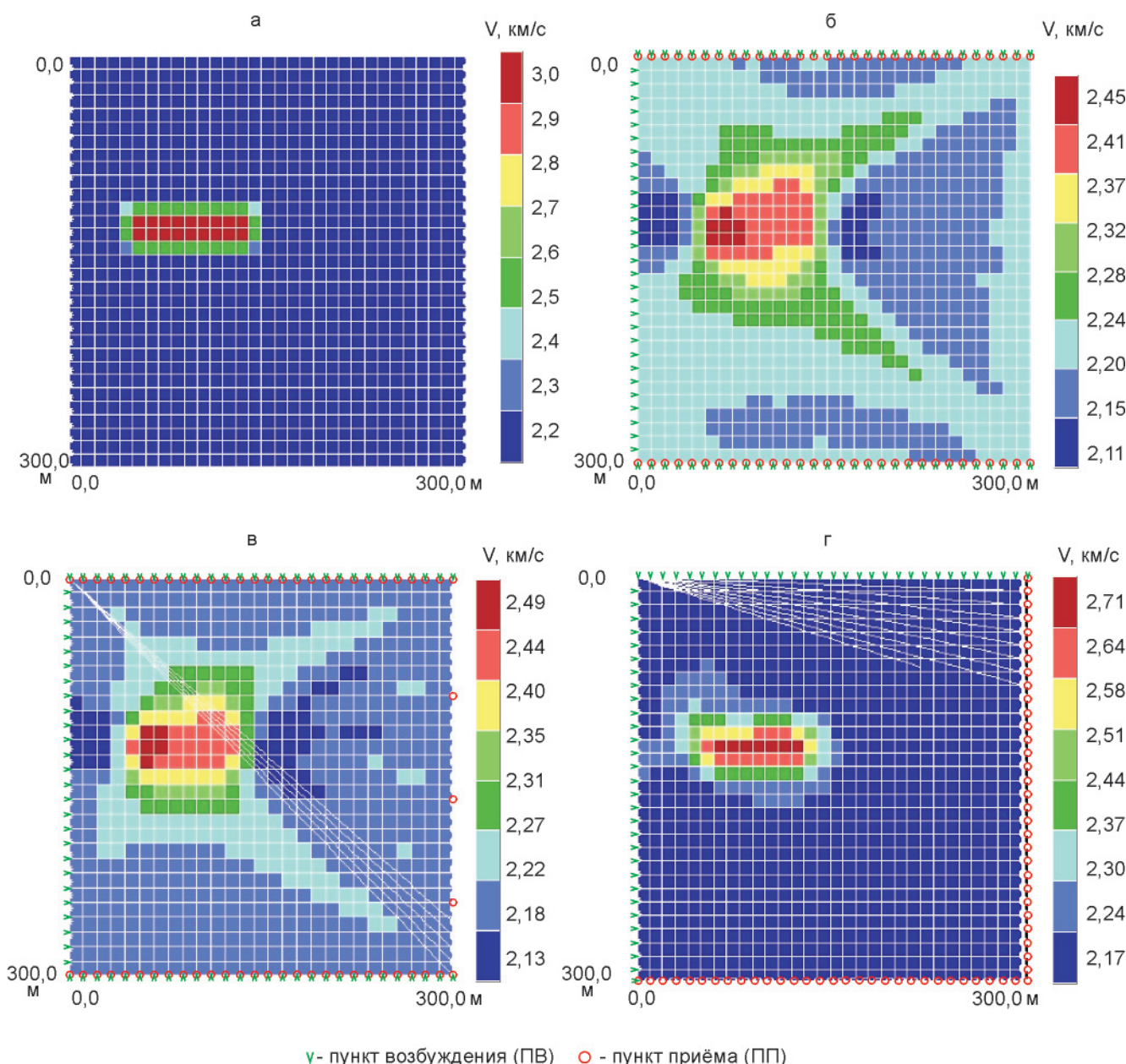


Рис. 5. Двумерная скоростная модель угольного пласта с включением высокоскоростной линзы (а) и сейсмотомографические разрезы с ПП и ПВ, расположенным: по трем (верхней, нижней и левой) сторонам площадки (б); по тем же сторонам площадки и дополненной тремя ПП по правой стороне площадки (в); по четырем сторонам площадки (г)

Сейсмотомографический разрез по значениям этого отношения также доказывает разделение углевмещающих пород на два участка. Их разграничительная линия фиксируется контрастной полосой повышенных значений параметра V_S^{yB}/V_P^{yB} (0,50–0,54), которая может указывать на наличие либо дизъюнктивной дислокации типа сдвига или малоамплитудного сброса, либо локальной зоны напряженного состояния среды (предразломное состояние).

На сейсмотомографическом разрезе по скоростям V_S^y их значения (1,1–1,3 км/с) могут быть соотнесены со значениями скоростей поперечных волн волноводного типа, распространяющихся по угольному пласту (рис. 7, а). В поле значений скоростей V_S^y выделяется высокоскоростной ($V_S^y \geq 1,25$ км/с) участок (пока-

зан на разрезе крапом). Можно предположить, что он соответствует прогнозируемому песчаному врезу в угольный пласт, вытянутому вдоль конвейерного штрека 2бис, и максимальное внедрение его в угольный пласт не превышает 50 м от него.

Учитывая выполненное моделирование и принимая во внимание, что использованная система наблюдения не является оптимальной, к прогнозу особенностей строения песчаного тела в лаве 2бис следует относиться с осторожностью.

Для углевмещающих пород с использованием известных формул могут быть рассчитаны также томографические разрезы по значениям коэффициента Пуассона (μ), модулей Юнга (E_q), сдвига (G) и объемной упругости (K).

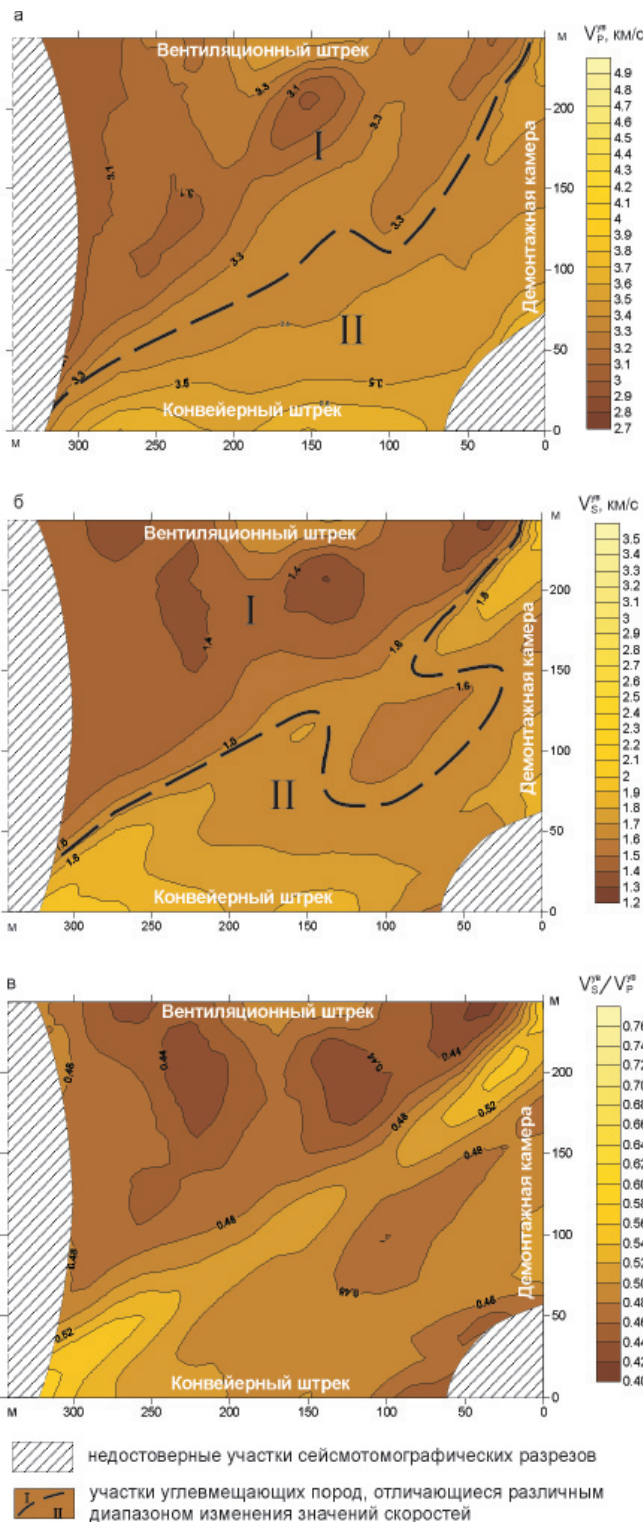


Рис. 6. Сейсмотомографические разрезы (интерполяционный вариант) для углевмещающих пород по скоростям продольных V_p^{yB} (а) и поперечных V_s^{yB} (б) волн и по их отношению скоростей (в)

На рис. 7, б приведен томографический разрез коэффициента Пуассона, рассчитанный с использованием формулы

$$\mu = \frac{1 - 2(V_s/V_p)^2}{2 - 2(V_s/V_p)^2}$$

Значения параметра μ на томографическом разрезе изменяются в пределах 0,28–0,38. В поле

значений μ выделяется узкая контрастная полоса пониженных значений (0,28–0,34), положение которой совпадает с полосой повышенных значений отношения V_s^{yB}/V_p^{yB} .

Выводы

Сейсмические исследования, проведенные в лаве одной из шахт Кузбасса способом просвечивания (на проходящих волнах), указывают на возможность детального восстановления особенностей скоростного строения угольного пласта и углевмещающих пород. На основе построенных сейсмотомографических разрезов можно выполнить прогноз особенностей геологического строения угольного пласта и углевмещающей среды, оценить их физико-механические свойства.

Следует особо отметить необходимость обоснованного выбора параметров системы наблюдения, принимая во внимание, что наиболее достоверные сведения в способе просвечивания на проходящих волнах могут быть получены только при равномерном освещении объекта по его периметру.

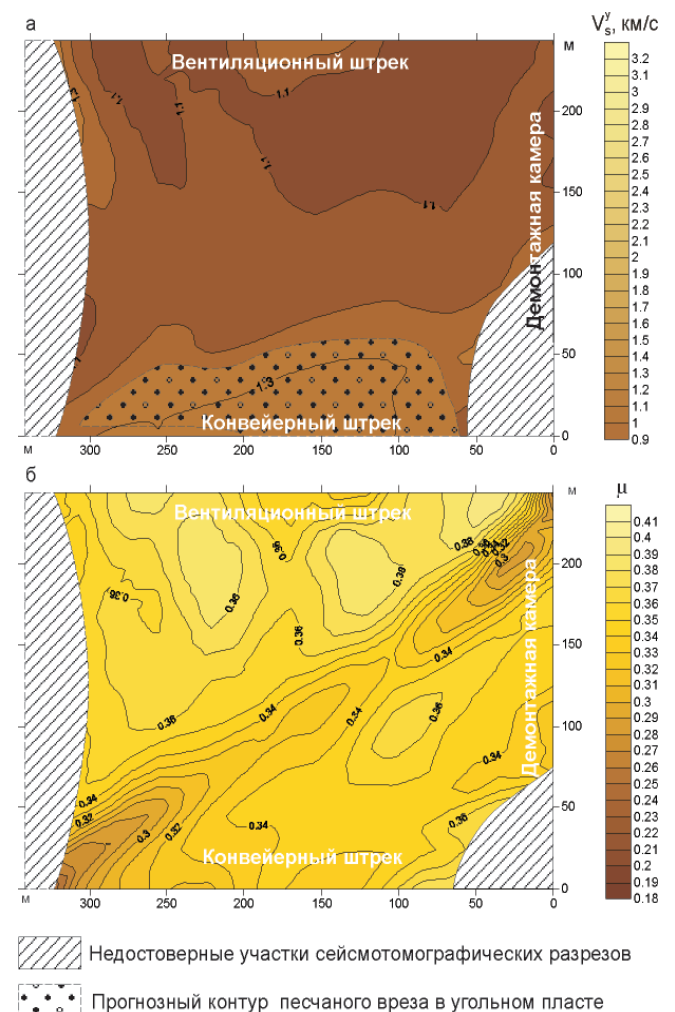


Рис. 7. Сейсмотомографические разрезы (интерполяционный вариант): а – по скоростям поперечных (волноводных) волн V_s^y , распространяющихся по угольному пласту; б – по коэффициенту Пуассона (μ) для углевмещающих пород



Выполненные исследования показали перспективность использования автономной сейсмической станции РОСА-А в подземных выработках (в условиях отсутствия спутниковых сигналов) при детальном инженерно-геофизическом исследовании с минимизацией рисков по охране труда.

Предлагаемый способ может способствовать улучшению технологии отработки угольных пластов, повысить безопасность угледобычи за счет опережающего прогноза механически ослабленных зон и зон повышенного метановыделения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Автономный** регистратор сейсмических сигналов и устройство автоматической настройки и коррекции тактовой частоты автономного регистратора сейсмических сигналов : Патент № 2366981 (RU) [Текст] / А. Н. Шмыков, О. М. Сагайдачная, А. В. Сагайдачный, А. С. Сальников. – Оpubл. 10.09.2009, Бюл. № 25.

2. **Базовые** характеристики сейсмического канала для регистрации слабых сигналов (на

примере автономной станции РОСА-А) [Текст] / О. М. Сагайдачная, А. С. Сальников, А. В. Вершинин [и др.] // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2010. – № 3.

3. **Левшин, А. Л.** Поверхностные и каналовые сейсмические волны [Текст] / А. Л. Левшин. – М. : Наука, 1973.

4. **Сейсмические** работы по просвечиванию угольных пластов с использованием автономных станций РОСА-А [Текст] / О. М. Сагайдачная, К. А. Дунаева, А. С. Сальников [и др.] // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2008. – № 4.

5. **Технология** сейсмотомографических исследований грунтов в околотоннельном пространстве [Текст] / Б. А. Канарейкин, О. М. Сагайдачная, В. Н. Курбатский, К. А. Дунаева // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2004. – № 2.

6. **Устройство** автономной регистрации сейсмических сигналов : Патент № 90223 (RU) [Текст] / А. Н. Шмыков, А. В. Вершинин, О. М. Сагайдачная [и др.]. – Оpubл. 27.12.2009, Бюл. № 36.

© А. С. Сальников, К. А. Дунаева, Б. А. Канарейкин, О. М. Сагайдачная, В. Г. Турчанинов, В. А. Чуринов, А. Н. Шмыков, 2011