



УДК 550.834:550.8(571.5-18)

ОСОБЕННОСТИ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ КУЗБАССА ПО МАТЕРИАЛАМ СЕЙСМОТОМОГРАФИИ НА ПРОХОДЯЩИХ ВОЛНАХ

Б. А. Канарейкин, К. А. Дунаева, О. М. Сагайдачная, А. С. Сальников

По сейсмическим материалам томографической обработки изучены особенности плотностной структуры угольных пластов на ряде шахт Кузбасского региона. Отмечен приоритет геодинамики в формировании внутренней структуры угольных пластов, ее дискретный (мелкоячеистый) характер и выраженная зависимость от степени дислоцированности углевмещающей среды и метаморфизма угля. Обосновано слоисто-мозаичное пространственное распределение метановых ловушек в угольных пластах.

Ключевые слова: сейсмотомографическая обработка, угольные пласты Кузбасса, скорость продольных, поперечных и каналовых волн, геодинамика.

FEATURES OF INTERNAL STRUCTURE OF THE KUZNETSK BASIN COAL BEDS BY SEISMIC TOMOGRAPHY ON TRANSIENT WAVES

B. A. Kanareykin, K. A. Dunaeva, O. M. Sagaydachnaya, A. S. Salnikov

In a number of mines of Kuznetsk Basin features of coal bed density structure are studied by seismic data with tomographic processing. A priority of geodynamics in forming of coal bed internal structure, its discrete (close-meshed) nature and marked dependence on dislocated degree of coal bearing strata and coal metamorphism have been noted. Lamellar-mosaic space distribution of methane traps in coal beds is proved.

Keywords: seismic tomography processing, coal beds of the Kuznetsk Basin, velocity of longitudinal, shear and guided waves, geodynamics.

С начала 1980-х гг. в промышленных масштабах ведется добыча метана на угольных месторождениях во многих странах мира. Так, по некоторым оценкам объем годовой добычи газа «углеметана» в США составляет 60–65 млрд м³, и углеметановые залежи из нетрадиционных давно переведены в разряд традиционных [18].

Кузнецкий угольный бассейн в настоящее время рассматривается не только как угольная база, но и как метановая [7]. По самым скромным оценкам, объем метана, содержащегося в угольных пластах только до глубины 1500 м, составляет около 13 трлн м³ [8].

Значительная часть метана в угольных пластах находится в связанном, сорбированном состоянии, что усложняет добычу и требует применения особых технологий. Но есть отдельные участки, где метан в свободном, газообразном состоянии: зоны трещиноватости, а также особые метанообильные зоны (суфляры), в которых содержание свободного метана на 1–2 порядка выше, чем в пластах «спокойного» залегания угля. Метанообильные зоны, как правило, представлены структурно измененными разуплотненными углями.

В предлагаемой статье по сейсмическим материалам исследованы некоторые вопросы латеральной внутренней структуры угольных пластов, в частности возможности выделения в угольных пластах метанообильных зон. Изучение латеральной структуры угольных пластов проводилось

способом вдольпластового сейсморассветывания на проходящих волнах в подземных выработках угольных шахт Кузбасса [11, 13]. Сейсмические материалы обрабатывались с использованием алгоритмов томографии [17].

Геологическое строение угленосных отложений Кузбасса

Кузнецкий бассейн рассматривается как синклиальная зона – область, претерпевшая длительный этап геосинклинального развития. Угленосные отложения верхнепалеозойской части разреза представлены толщами карбона и перми мощностью от 4 до 7 км. В продуктивных отложениях выделяют две серии: балахонскую ($C_{2-3}-P_1$) и кольчугинскую (P_2). В первой выделяется до 60 рабочих угольных пластов, каждый мощностью 1–10 м (суммарная 120 м), во второй – до 65 рабочих пластов (150 м) [4]. Углевмещающая среда представлена переслаиванием пластов песчаников, алевролитов и аргиллитов, мощности которых по разрезам изменяются в пределах от 1 до 50–60 м.

В тектоническом отношении угленосной толще свойственны складчатость и дизъюнктивная нарушенность, интенсивность которых увеличивается к окраинным частям бассейна. Современный геодинамический режим Кузбасса характеризуется развитием блоковых деформаций, обуславливающих малоамплитудные смещения угольных пластов, а также структур, формирующихся в обстановке интенсивного горизонтального и наклонного сжатия (малоамплитудных разрывов и флек-

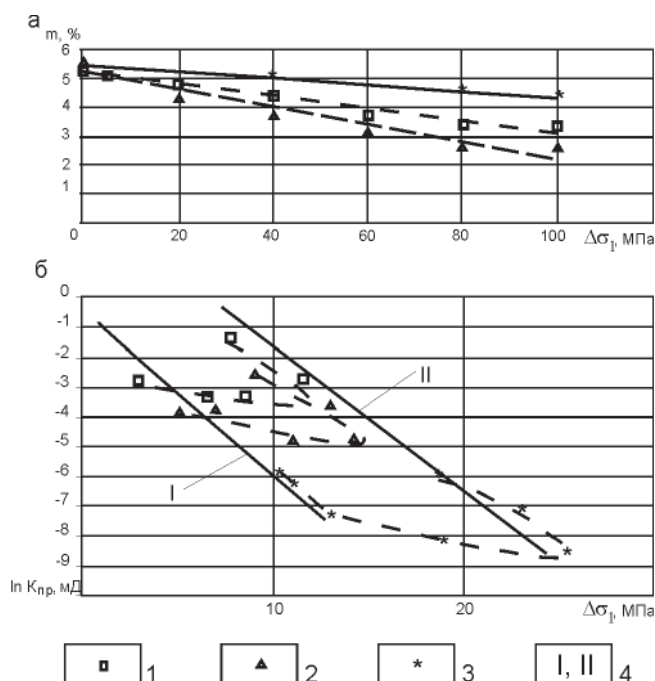


Рис. 1. Зависимость пористости и проницаемости углей от дифференциального напряжения $\Delta\sigma$: а – пористость, б – проницаемость (по материалам А. Т. Карманского [5])

Давление всестороннего сжатия σ : 1 – 2,5 МПа; 2 – 5 МПа; 3 – 10 МПа; 4 – осредняющие до предела прочности (I) и за пределом прочности (II)

сурных нарушений пластов – от микроскладок, не выходящих за пределы угольного слоя, до складок протяженностью десятки сотни метров) [1].

В шахтах Кузбасса значения скоростей продольных волн составляют для углей 2,23–2,50 км/с, для углевлещающих пород 3,0–4,0 км/с; поперечных волн – 1,7–1,9 км/с и 1,9–2,6 км/с соответственно. Плотность угольного пласта оценивается от 1,27 до 1,61 г/см³ [4]. В целом скорость продольных и поперечных волн линейно зависит от плотности угля, как и для многих других осадочных пород [10].

Отмечается существенная зависимость ряда физических свойств углей от напряженного состояния. Так, коэффициент пористости (m) углей линейно снижается в 2,5–3 раза при увеличении одноосного давления $\Delta\sigma$ от единиц до 100 МПа (рис. 1, а). Установлена сильная и достаточно сложная зависимость проницаемости $K_{пр}$ каменного угля от напряженного состояния. При изменении осевой нагрузки от единиц до 20 МПа значения $K_{пр}$ вначале резко снижаются (на несколько порядков до предела упругости). Уменьшение $K_{пр}$ по мере роста осевой нагрузки вызвано деформациями сжатия поровых каналов и микротрещин. При дальнейшем росте напряженного состояния $K_{пр}$ увеличивается (см. рис. 1, б) в результате образования новых трещин отрыва по реализованным плоскостям сдвига [5].

Пористость и проницаемость – основные параметры, определяющие коллекторские и экраняющие свойства углей. Выраженная их зависи-

мость от напряженно-деформированного состояния среды позволяет предположить, что именно напряженно-деформированное состояние угля во многом определяет внутреннюю структуру угольного пласта, играет важную роль в формировании ловушек углеметана. По представлениям некоторых геологов-угольщиков, формирование метанообильных зон – результат проработки (катагенеза) угольных пластов и углевлещающих пород глубинными флюидными потоками, циркулирующими по зонам тектонических нарушений [14].

Экспериментальные работы по сейсмодосветиванию в угольных шахтах Кузбасса

Сейсмические исследования в шахтах Кузбасса проведены способом просветивания угольных пластов с использованием автономной сейсмической станции РОСА-А® [13]. Схемы реализованных систем сейсмических наблюдений приведены на рис. 2. Как правило, пункты возбуждения упругих колебаний располагались в вентиляционном штреке и монтажной камере, пункты приема – в конвейерном штреке. Возбуждение упругих колебаний в шахтах на всех участках осуществлялось путем удара кувалдой, шаг между пунктами возбуждения 5 или 10 м. Сейсмоприемники помещались в горизонтально пробуренные шпуров глубиной до 1–1,5 м с шагом между ними 5 или 10 м. Запись сейсмического материала выполнялась с интервалом дискретизации 1,0–0,5 мс.

На полученных сейсмозаписях выделены три группы волн, различающихся по кинематическим и динамическим характеристикам: по времени регистрации, волновой форме записи и преобладающей частоте (рис. 3, а, б). С использованием теоретических расчетов сейсмоакустических полей (лучевая схема для проходящих волн показана на рис. 3, в) эти группы были идентифицированы следующим образом:

- продольные боковые объемные волны $P^{УВ}$, распространяющиеся по вмещающим угольный пласт породам;
- поперечные боковые объемные волны $S^{УВ}$, распространяющиеся по вмещающим угольный пласт породам;
- волноводные (каналовые) волны $F^{У}$, распространяющиеся по угольному пласту.

Продольные боковые (преломленные) волны $P^{УВ}$ регистрируются в первых вступлениях. Боковые поперечные волны $S^{УВ}$, также преломленные, регистрируются в последующих (вторых) вступлениях.

Кроме того, при возбуждении колебаний в угольном пласте одновременно формируются преломленные волны, распространяющиеся в породах кровли и подошвы пласта. В угольных толщах Кузбасса породам кровли свойственна, как правило, более высокая скорость, поэтому в первых вступлениях должны наблюдаться пре-

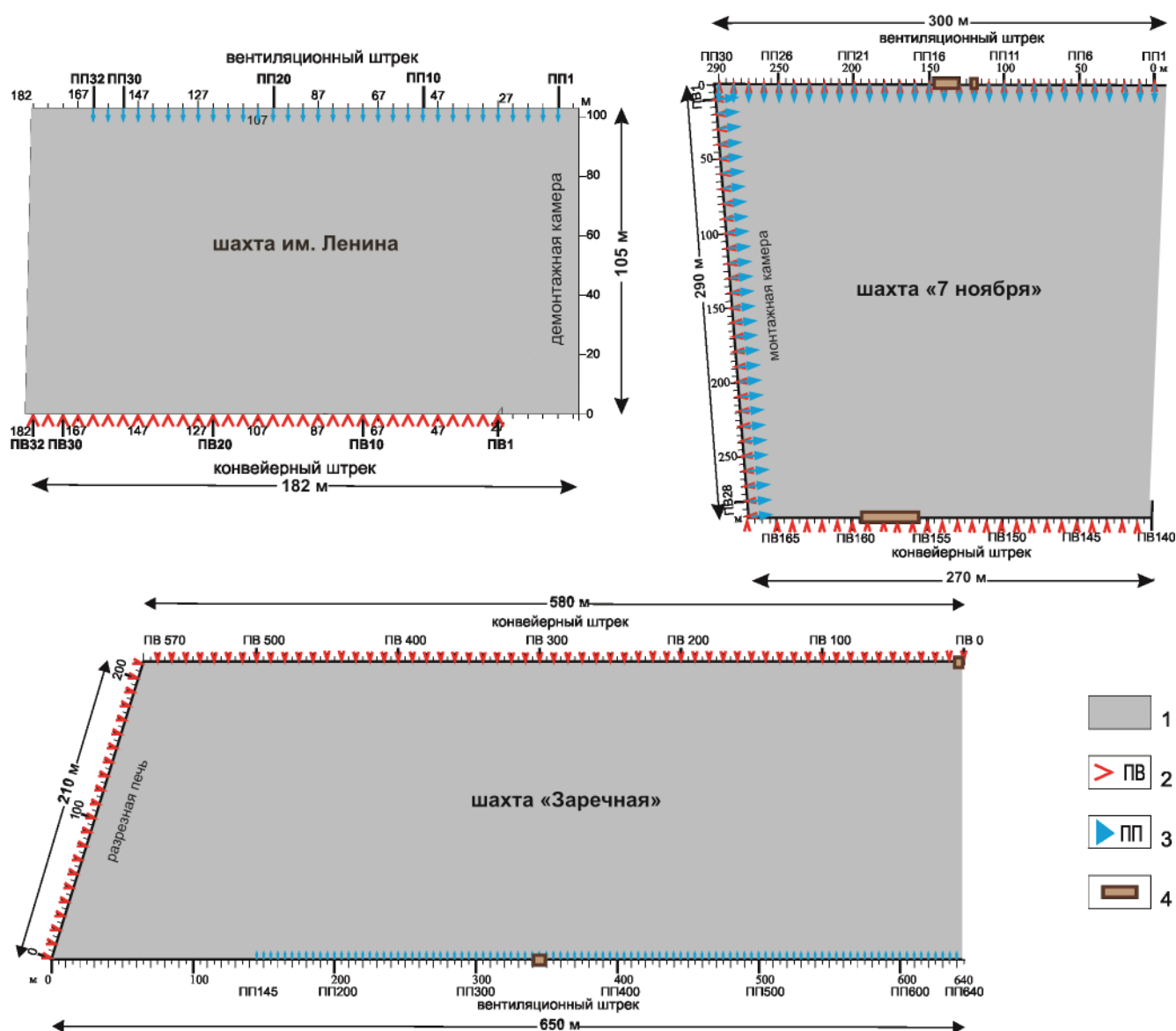


Рис. 2. Системы наблюдений на проходящих сейсмических волнах, реализованные в угольных шахтах Кузбасса
1 – угольный пласт; 2 – пункты возбуждения в штреке; 3 – пункты приема в штреке; 4 – наблюдаемое обнажение песчаного вреза

ломленные волны, распространяющиеся по указанному породам.

При распространении сейсмических волн по угольному пласту (волноводу) формируется протажный цуг колебаний – канальная волна. Зарегистрированная канальная волна F^y характеризуется следующими особенностями: нет четких первых вступлений, быстро меняются полярность и временная форма по фронту распространения. Наилучшая прослеживаемость канальных волн F^y на сейсмограммах в исследуемых лавах достигается при полосовой фильтрации в диапазоне 120–250 Гц (иногда и выше).

По всем полученным сейсмограммам строились системы годографов волн P^{yB} , S^{yB} , F^y (см. рис. 3, г), которые использовались для получения двумерных вдольпластовых сейсмотомографических разрезов по значениям параметра скорости. Сейсмотомографическая обработка материалов выполнялась на основе программы

«PROFIT» (автор И. Ю. Кулаков, ИНГГ СО РАН [17]).

В алгоритме PROFIT в качестве входных данных используются времена пробега рефрактированных и прямых волн. Схемы наблюдений – двумерные профили (2D-модели). Лучевое трассирование основано на итеративном изгибе луча для достижения минимального времени пробега (принцип Ферма). При применении этого алгоритма достигается абсолютная устойчивость в средах любой сложности (включая анизотропные), быстрая реализация при фиксированном количестве итераций. Томографические расчеты выполняются с применением адаптивных сеток параметризации, устанавливаемых в соответствии с плотностью лучей. Инверсия производится методом LSQR.

Все приведенные далее сейсмотомографические построения соответствуют пятой итерации, размер между узлами сетки параметризации

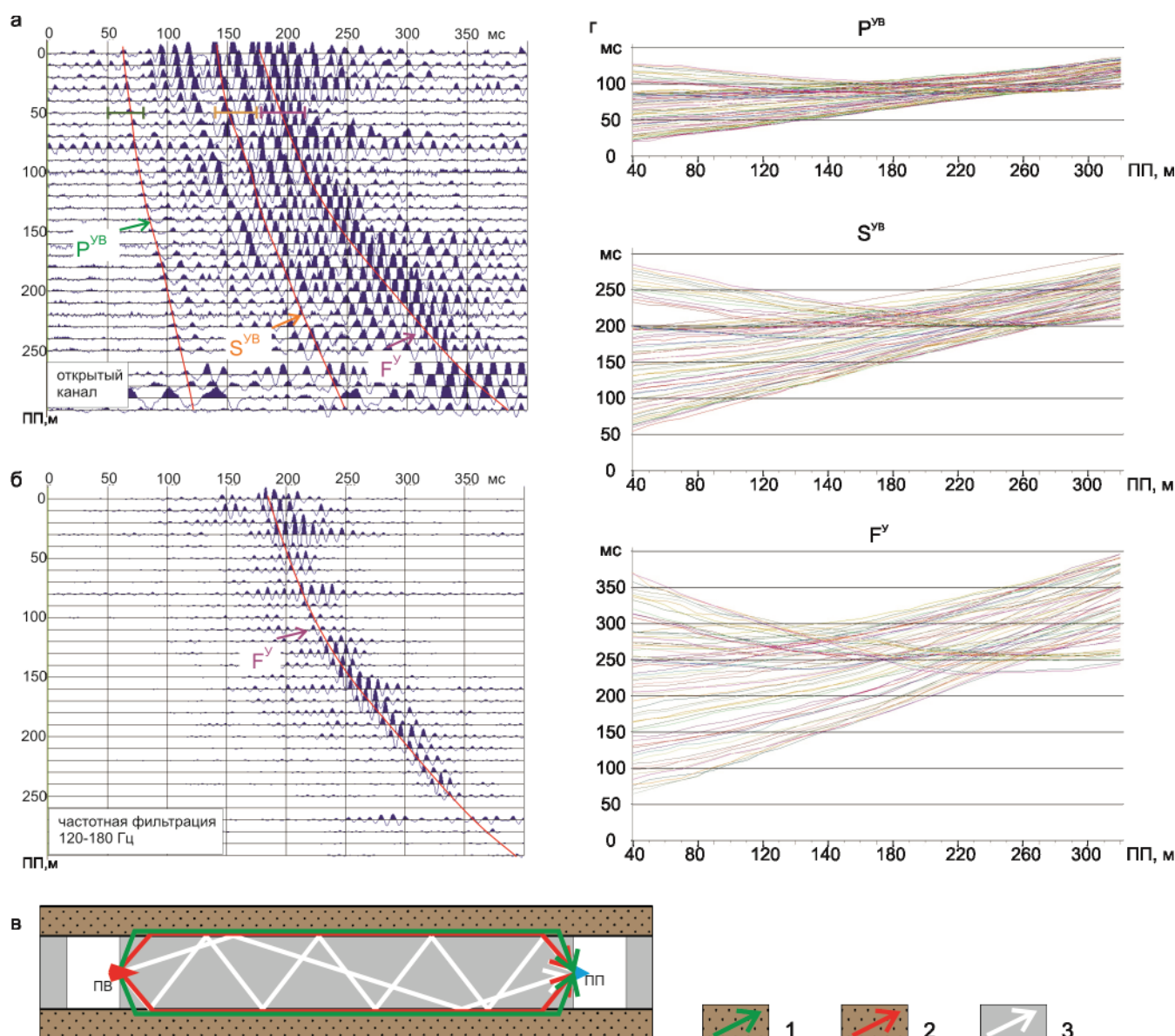


Рис. 3. Типичные сейсмограммы общей точки возбуждения (ОТВ) для проходящих волн: а – на открытом канале, б – после полосовой частотной фильтрации; в – лучевая схема для проходящих волн, г – системы годографов сейсмических волн

Траектория лучей распространения: 1 – боковых продольных волн P^{yb} , 2 – боковых поперечных волн S^{yb} , 3 – каналов волн F^y по угольному пласту

составлял 5–10 м. На всех подрисуночных подписях приведены параметры расчетов: скоростная двумерная модель, использованная на старте ($V_{ст}$), количество лучей, используемых в эксперименте (N), значения средних невязок до (dis_n) и после (dis_k) инверсии.

Модельные сейсмотомаграфические построения на проходящих волнах

Чтобы оценить точность восстановления строения среды, были выполнены модельные сейсмотомаграфические построения. В моделях рассматривались некоторые характерные особенности латеральной структуры угольных пластов. Трещиноватые зоны моделировались локальными линейными объектами с пониженной скоростью каналов волн. Результаты моделирования трещиноватых зон в угольном пласте представле-

ны на рис. 4. Как следует из рис. 4, б, даже при сложной конфигурации трещиноватых зон их отображение на сейсмотомаграфических разрезах вполне адекватно заданным моделям и слабо зависит от их латеральной толщины. Локальные скоростные аномалии с границами раздела I рода на сейсмотомаграфических разрезах отображаются градиентными зонами. Латеральные размеры локальной аномалии определяются с точностью ± 5 м. Ось восстанавливаемой аномалии в плане может совпадать с истинной осью или отклоняться от нее по латерали на ± 5 м. Латеральная разрешенность оценивается примерно в 8–10 м.

Значение скорости нормального поля, включающего локальную аномалию, восстанавливается с высокой степенью точности ($\pm 5\%$). Значения скорости в большинстве случаев оказываются заниженными для положительных локальных ано-

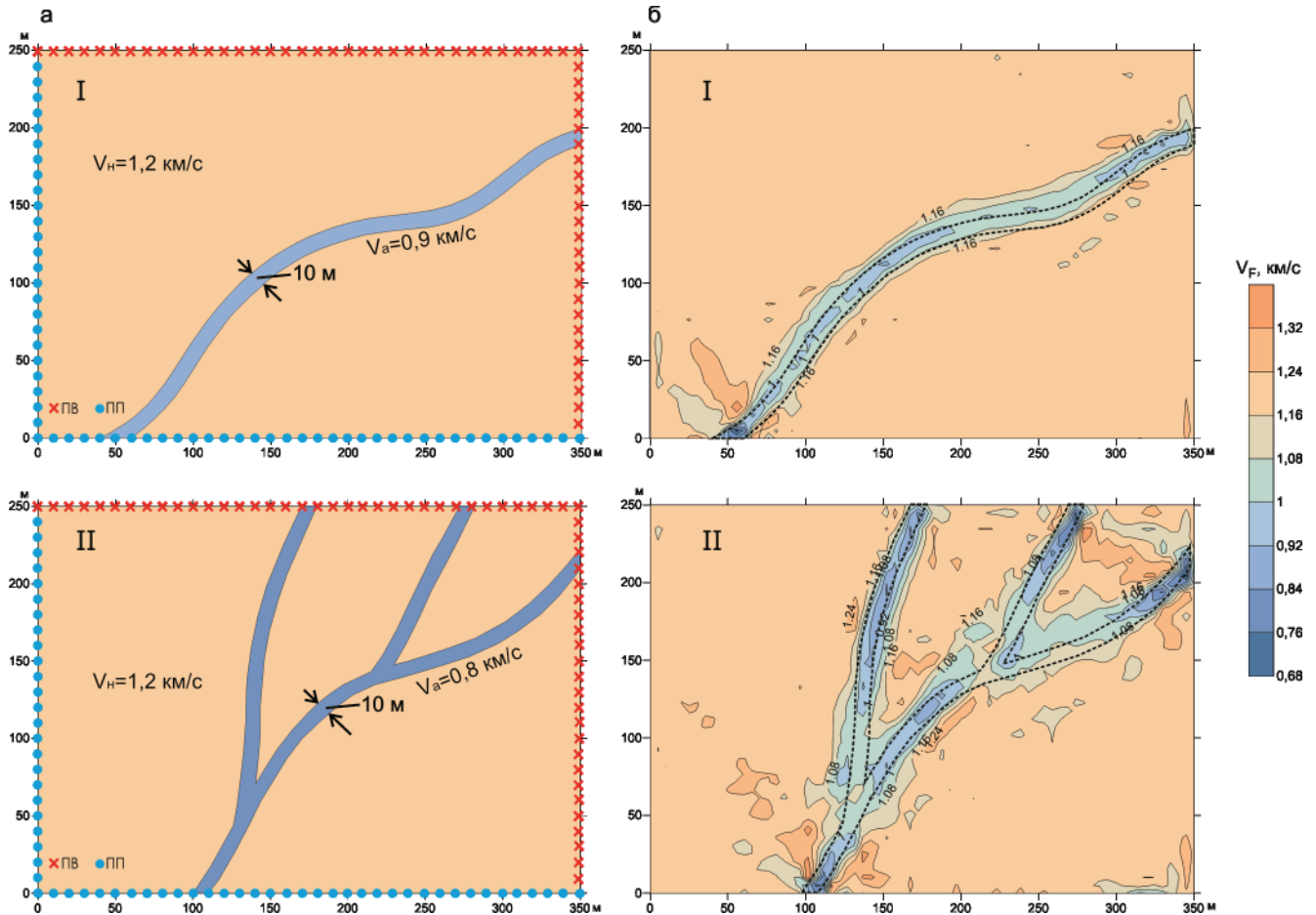


Рис. 4. Численное моделирование трещиноватых зон в угольном пласте: а – скоростные модели (I, II); б – восстановленные скоростные сейсмотомографические разрезы (I, II); $V_{\text{ст}} = 1,2$ км/с, $N = 3363$, $\text{dis}_H = 2,16$, $\text{dis}_K = 0,21$ – для верхней модели; $V_{\text{ст}} = 1,2$ км/с, $N = 3363$, $\text{dis}_H = 5,43$, $\text{dis}_K = 0,45$ – для нижней

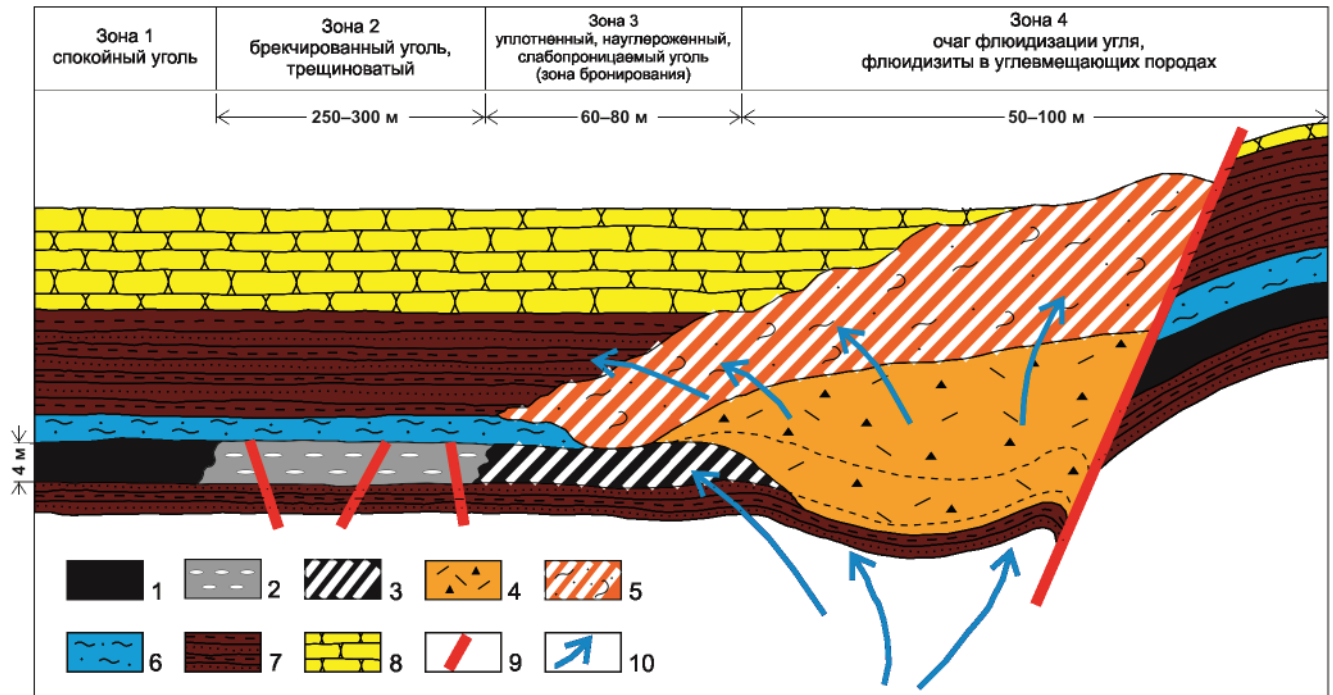


Рис. 5. Принципиальная схема строения и формирования метанообильной зоны в угольном пласте (по материалам В. Н. Труфанова [14])

Уголь: 1 – спокойный, 2 – брекчированный, 3 – уплотненный, слабопроницаемый («зона бронирования»); 4 – расштыбованный (очаг флюидизации угля); 5 – флюидизиты в углевмещающих породах; 6 – аргиллиты; 7 – алевролиты; 8 – песчаники; 9 – дизъюнктивные дислокации; 10 – направления движения глубинных флюидов

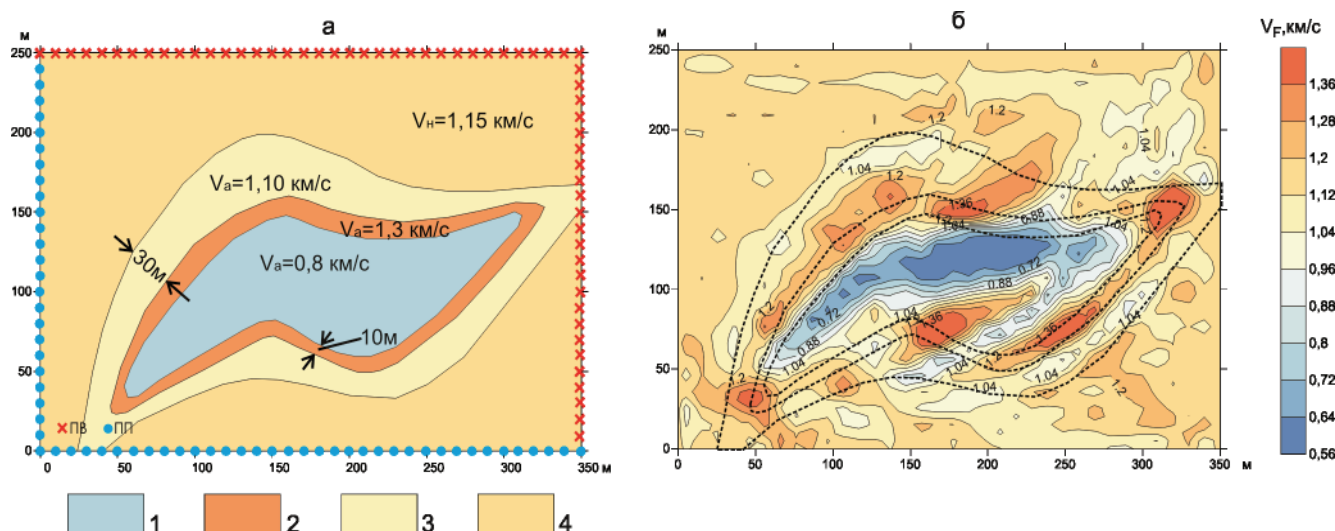


Рис. 6. Синтетическое моделирование метановой ловушки в угольном пласте: а – скоростная модель, б – скоростной сейсмотомографический разрез ($V_{ст} = 1,15$ км/с, $N = 3363$, $dis_n = 8,75$, $dis_k = 1,52$)

1 – метанообильная зона в угольном пласте; 2 – зона бронирования угля; 3 – зона брекчирования угля; 4 – спокойный уголь

малый и завышенными – для отрицательных. При этом чем менее контрастны значения скорости локальной аномалии и нормального поля, тем более точно восстанавливается значение скорости локального объекта.

В работе [14] обосновывается модель угле-метановой ловушки (рис. 5). Последняя включает в себя зону разуплотненного (расштыбованного) угля, окруженную зоной уплотненного угля (зона бронирования). Формирование ловушки подобного типа происходит в результате глубинной флюидомиграции с преобладанием в составе флюидов метана и углекислого газа. Результат моделирования такого типа метановой ловушки в угольном пласте показан на рис. 6. Ловушка аппроксимировалась локальной зоной разуплотненного угля, оконтуренной полосой уплотненного угля. Как видим, форма метановой ловушки (суфляра) в угольном пласте восстанавливается в несколько искаженной форме. Наиболее точно восстанавливаются конфигурация и значения скорости центральной части суфляра. Зоны бронирования и брекчирования угля отображаются фрагментарно. Значения скорости в этих зонах восстанавливаются с погрешностью ± 5 –10 %.

Результаты сейсмотомографической обработки экспериментальных наблюдений на проходящих волнах

Сейсмотомографическая обработка на проходящих волнах выполнена по материалам из пяти угольных шахт Кузбасса. В каждой шахте получены сейсмотомографические разрезы по значениям скорости V_p , V_s , V_f и отношению V_s/V_p . С применением известных соотношений сейсмических параметров с литологией, водонасыщенностью и напряженным состоянием среды по каждому участку исследований построены про-

гнозные геологические вдольпластовые разрезы угольного пласта и угле вмещающих пород.

Сейсмотомография угле вмещающей среды

Рассмотрим вначале результаты сейсмотомографии для проходящих боковых волн (продольных и поперечных), распространяющихся по угле вмещающей среде.

Шахта им. В. И. Ленина. На сейсмотомографических разрезах по параметрам скорости V_p и V_s отчетливо прослеживается сходство в распределении положительных и отрицательных зон (рис. 7, а, б). Значения V_p изменяются от 3,90 до 4,30 км/с; V_s – от 1,90 до 2,45 км/с. Конфигурация аномальных зон на сейсмотомографическом разрезе по параметру V_s/V_p примерно совпадает с очертаниями таковых по параметрам V_p и V_s (см. рис. 7, в). Отношение скоростей V_s/V_p изменяется от 0,46 до 0,62.

Латеральная геологическая модель угле вмещающей среды может быть сопоставлена с пластом песчаника, характеризующегося неоднородным строением (см. рис. 7, г). В средней части исследуемой площади выделяется линейная зона плотного песчаника (повышенные значения V_p , V_s и V_s/V_p) с поперечными размерами по латерали 35–45 м и протяженностью около 200 м. Эта полоса разграничивает области песчаника с повышенной влажностью (низкие значения V_s/V_p). На рис. 7 показано тектоническое нарушение типа сброса, выделенное по данным шахтной геологической съемки. Возможно, линейная зона уплотненного песчаника образовалась в результате повышенного напряженного состояния в каком-либо из крыльев сброса.

Шахта «7 ноября». Построенные сейсмотомографические разрезы по параметрам скорости V_p и V_s отличаются сложным взаимным распределением аномальных зон и разнообразным

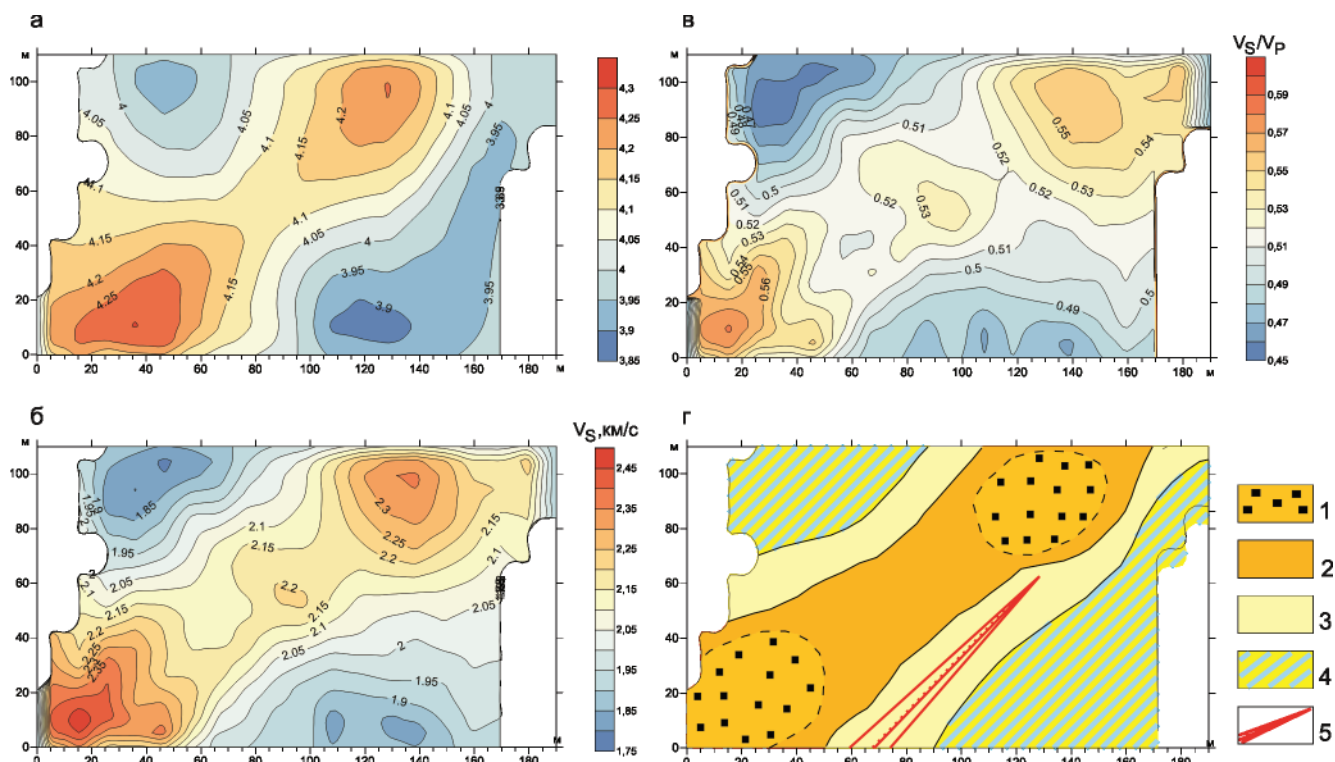


Рис. 7. Сейсмотомографические разрезы в угле вмещающей среде (шахта им. В. И. Ленина): а – по параметру скорости продольной волны V_p^YB , км/с ($V_{CT} = 4,0$ км/с); б – по параметру скорости поперечной волны V_s^YB , км/с ($V_{CT} = 1,9$ км/с); в – по отношению скоростей V_s/V_p ; г – латеральная геологическая модель

Песчаник: 1 – уплотненный, 2 – плотный (флюидизит), 3 – нормальной плотности, 4 – разуплотненный с повышенной влажностью; 5 – прогнозная зона разрывного нарушения по геологическим данным

их сочетанием (рис. 8, а, б). Значения скорости продольных волн изменяются от 3,3 до 3,9 км/с. В скоростном поле выделяется крупная полосовая положительная аномалия ($V_p = 3,65\text{--}3,9$ км/с). В правой и левой частях разреза картируются зоны пониженных значений V_p ($V_p = 3,3\text{--}3,6$ км/с). Линейная зона пониженных значений V_p в левой части разреза, скорее всего, обусловлена нарушением пород в результате проходки разрезной печи (левая граница участка) [4, 10]. Значения скорости поперечных волн изменяются от 1,4 до 2,5 км/с. Поле V_s характеризуется контрастной положительной аномалией, занимающей центральную и правую части разреза ($V_s = 2,2\text{--}2,5$ км/с), а в левой и нижней, как и для продольной волны, выделяются узкие полосы пониженных значений V_s (1,4–1,9 км/с).

Значения V_s/V_p на сейсмотомографическом разрезе изменяются от 0,3 до 0,7 (см. рис. 8, в). Конфигурация аномальных зон отношения V_s/V_p похожа на конфигурацию таковых в поле значений скорости поперечной волны V_s . Центральную и правую части разреза занимает крупная аномалия повышенных значений V_s/V_p (0,6–0,7). По контуру разреза фиксируются аномалии пониженных значений V_s/V_p (0,4–0,5).

Исследуемый угольный пласт перекрывается достаточно мощным (примерно 30–40 м) пластом песчаника. На данном участке в угле вмещающей толще можно выделить две крупные локальные аномалии. В центральной части разреза фиксиру-

ется зона песчаника с пониженными значениями V_p и повышенными V_s ; возможно, это газонасыщенный песчаник [10, 16]. В левой части разреза выделяется нарушенная трещиноватая зона, связанная с дизъюнктивной дислокацией. На участках, примыкающих к штрекам, установлены трещиноватые песчаники, скорее всего техногенной природы.

Можно считать, что в обоих исследованных шахтах угле вмещающая среда, представленная песчаниками, содержит относительно крупные неоднородности с линейными размерами около 40×200 и 100×150 м.

Латеральные модели угольных пластов

Шахта «Заречная». На сейсмотомографическом разрезе по параметру скорости каналовой волны значения V_F изменяются от 0,6 до 1,5 км/с (рис. 9, а), в основном 0,9–1,2 км/с. В центральной и левой частях разреза наблюдаются повышенные значения ($V_F = 1,1\text{--}1,4$ км/с), в остальной части преобладают пониженные ($V_F = 0,6\text{--}1,0$ км/с). На данном сейсмотомографическом разрезе отмечается большое количество малоразмерных аномалий как положительных, так и отрицательных.

Для оценки достоверности полученной картины распределения аномальных зон на рис. 9, б приведен сейсмотомографический разрез при увеличенном значении параметра сглаживания и неизменных значениях остальных параметров. Естественно, что при большем сглаживании не-

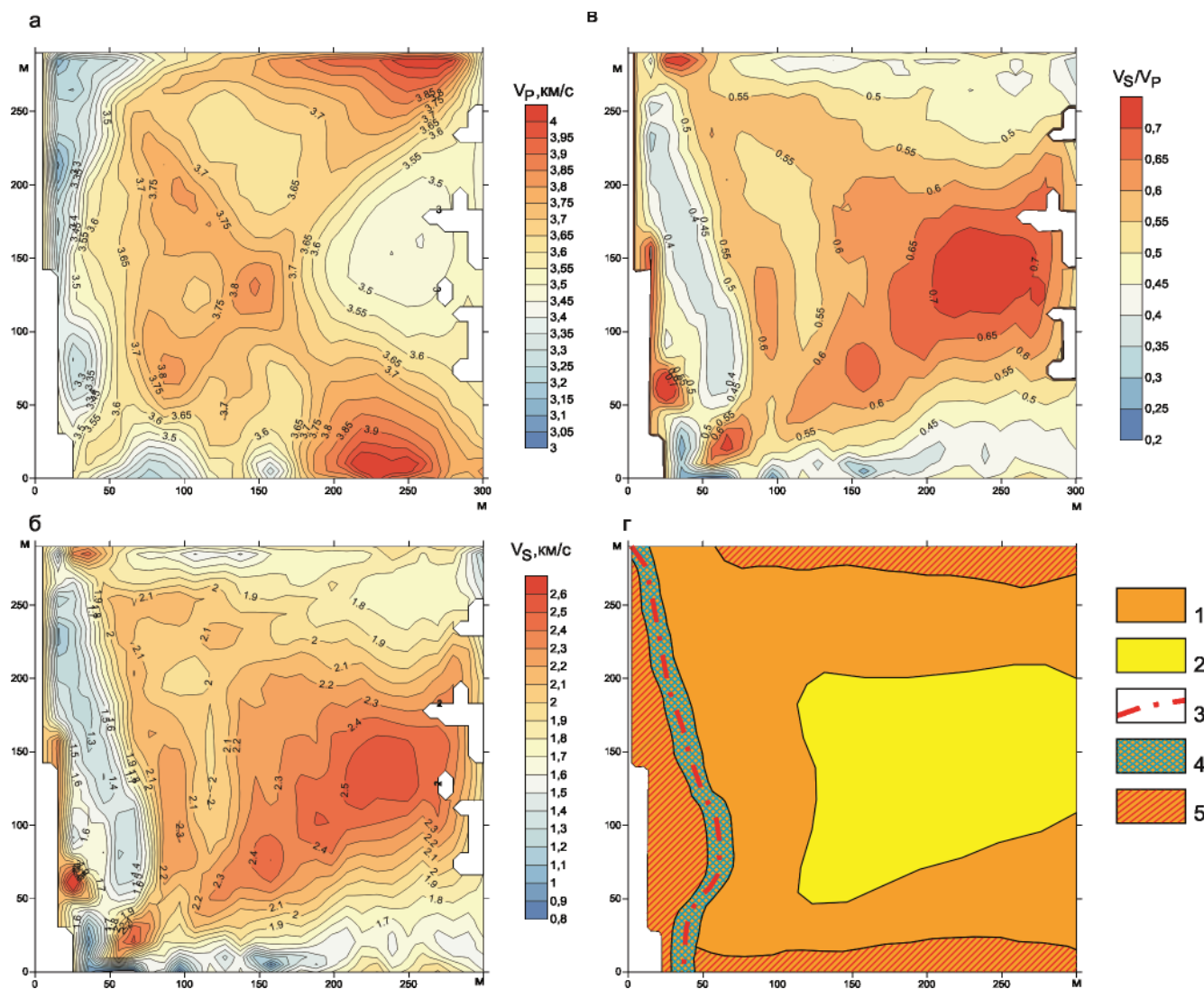


Рис. 8. Сейсмотомографические разрезы в углегазующей среде (шахта «7 ноября»): а – по параметру скорости продольной волны V_p^B , км/с; б – по параметру скорости поперечной волны V_s^B , км/с; в – по отношению скоростей V_s/V_p ; г – латеральная геологическая модель

1 – песчаник; 2 – песчаник уплотненный, газонасыщенный; 3 – дизъюнктивная дислокация; 4 – содизъюнктивная дислокация; 5 – нарушенный песчаник; $V_{ст} = 3,6$ км/с, $N = 2370$, $dis_H = 8,17$, $dis_K = 1,32$ – для продольной волны V_p^B ; $V_{ст} = 2,0$ км/с, $N = 2350$, $dis_H = 7,72$, $dis_K = 2,58$ – для поперечной волны V_s^B

которые малоразмерные аномалии оказались более размытыми или слились в единую аномалию. Восстановление латеральной геологической модели угольного пласта проводилось с использованием сейсмотомографического разреза (см. рис. 9, а).

Опираясь на особенности поля V_F , в латеральной геологической модели угольного пласта можно различить плотностные макро- и микро-неоднородности (см. рис. 9, б). К первым следует отнести две полосы плотного угля (в целом повышенные значения V_F) и две – с низкой плотностью (пониженные значения V_F). В каждой макроне выделяется большое число малоразмерных объектов (микрообъектов), характеризующихся аномально высокими и аномально низкими значениями V_F . Микрообъекты с аномально высокими значениями V_F можно считать наиболее уплотненными углями, а с аномально низкими – наиболее разуплотненными. Разуплотненные микрообъек-

ты находятся преимущественно в области влияния выделенных относительно крупных дизъюнктивных дислокаций. К вентиляционному штреку (верхняя граница модели) примыкает зона с повышенной разуплотненностью (раздробленностью) угольного пласта, которая связана с пересечением разнонаправленных дизъюнктивных дислокаций. Исследуемый участок угольного пласта в целом можно отождествить с мелкоблочной средой, рассеченной многочисленными дизъюнктивными дислокациями. Линейные размеры микроблоков от 10×10 до 40×40 м.

В обоих штреках в угольном пласте отмечены песчаные тела. К их выходам в конвейерном и вентиляционном штреках приурочиваются высокоскоростные блоки небольшого размера, но объединить их в одно тело (типа русловых песчаников) не представляется возможным.

Шахта «7 ноября». На сейсмотомографическом разрезе по параметру скорости каналовой

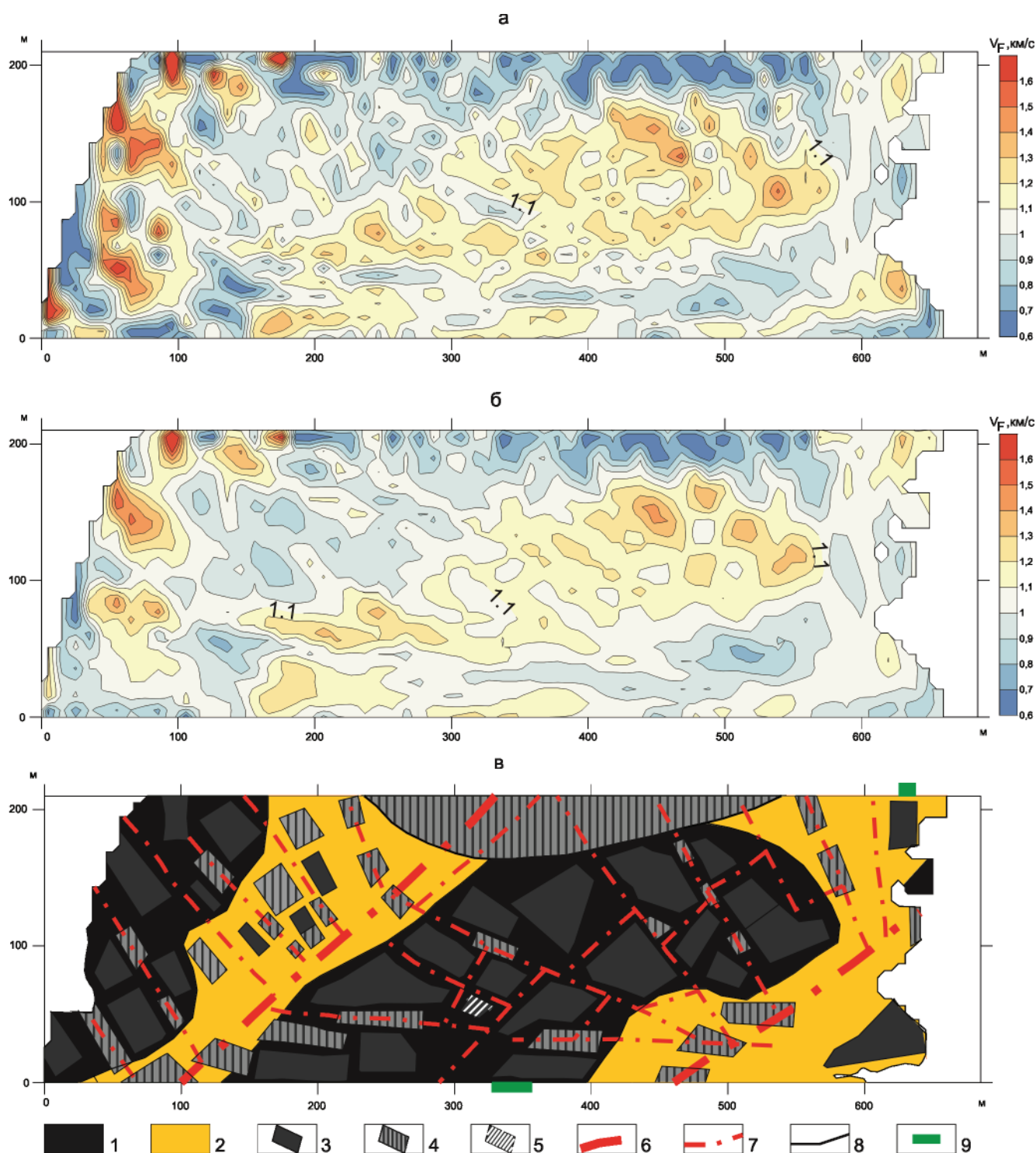


Рис. 9. Сейсмотомографические разрезы угольного пласта (шахта «Заречная») по параметру скорости канальной волны, км/с с параметром сглаживания: а – 20; б – 50; в – латеральная геологическая модель. $V_{ст} = 1,0$ км/с, $N = 7997$, $dis_n = 19,25$, $dis_k = 3,95$ – для параметра сглаживания 20; $V_{ст} = 1,0$ км/с, $N = 7997$, $dis_n = 19,25$, $dis_k = 3,79$ – для параметра сглаживания 50

Зоны угля: 1 – высокой плотности, 2 – низкой плотности; блоки угля: 3 – с повышенной плотностью (пониженной трещиноватостью), 4 – с пониженной плотностью (повышенной трещиноватостью), 5 – трещиноватые; дизъюнктивные дислокации: 6 – относительно крупные; 7 – прочие (межблочные); 8 – граница углей различной плотности; 9 – выходы песчаного тела в штреках

волны значения V_F изменяются от 0,6 до 1,5 км/с (рис. 10, а), главным образом $V_F = 0,8\text{--}1,2$ км/с. В поле значений V_F выделяется ряд крупных высоко- ($V_F = 1,0\text{--}1,4$ км/с) и низкоскоростных ($V_F = 0,7\text{--}0,9$ км/с) участков. Последние имеют

линейную конфигурацию и обусловлены присутствием дизъюнктивных дислокаций. Поле V_F , как и в шахте «Заречная», характеризуется высокой раздробленностью, содержит большое число ма-

лоразмерных положительных и отрицательных аномалий.

В латеральной геологической модели угольного пласта прослеживается несколько макроучастков угля с высокой и низкой плотностью (см. рис. 10, б). В каждой макроне выделяется большое количество микрообъектов с характерными линейными размерами от 20×20 до 30×60 м. Микрообъекты с пониженной плотностью располагаются в линейных зонах с низкой плотностью и, скорее всего, связаны с содизъюнктивными зонами. В макроне с высокой плотностью угля выделяются микроблоки с повышенной плотностью. Межблочные промежутки можно рассматривать как локальные фильтрационные каналы, обеспечивающие межблочную проницаемость угля.

Шахта им. В. И. Ленина. На сейсмотомографическом разрезе по параметру V_F установлены несколько линейных аномалий, ортогональных друг к другу (рис. 11, а). Некоторые из них согласуются с инструментально зафиксированной дислокацией надвига. Как и в предыдущих случаях, положительные аномалии V_F могут соответствовать высокоплотным зонам в угольных пластах, отрицательные аномалии – низкоплотным.

Латеральную геологическую модель угольного пласта отличает ячеистое, упорядоченное строение с ортогональным расположением цепочек микрообъектов. Линейные размеры отдельных ячеек от 30×80 до 40×80 м (см. рис. 10, б). Природу упорядоченного распределения разнотных зон можно объяснить складчатостью углевмещающих толщ. Характер распределения аномальных зон в латеральной модели напоминает морфологический рисунок наложенной складчатости [3].

Угленосные толщи в Кузбассе в меньшей или в большей мере собраны в складки. Сильнее складкообразовательные процессы развиты там, где угленосные толщи претерпели более высокую степень метаморфизма. Если в других описанных шахтах уголь находился на относительно низкой ступени метаморфизма (марки угля Г и Ж), то на шахте им. Ленина угольные пласты достигли более высокой стадии метаморфизма (К и О). Поэтому здесь складкообразование должно проявляться в более контрастных формах, в более упорядоченном расположении плотностных неоднородностей.

Особенности внутренней структуры угольных пластов Кузбасса

Сравнение латеральных моделей углевмещающей среды и угольного пласта показывает их существенное различие. Латеральной модели углевмещающей среды в сравнении с таковой угольного пласта свойственна относительно большая однородность. В ней удается выделить ограниченное число достаточно протяженных структурных элементов, таких как дизъюнктивные дислокации, содизъюнктивные трещиноватые зоны, зоны повышенной и пониженной плотности, зоны повышенной водо- и газонасыщенности.

Латеральная модель угольного пласта в целом более расчленена, характеризуется существенно большим набором составляющих ее структурных элементов. В условиях слабой дислоцированности углевмещающей толщи, низкой степени метаморфизма углей (марки угля Г, Ж) латеральная модель угольного пласта может быть отождествлена со слабо упорядоченной блочно-трещиноватой средой, расчленен-

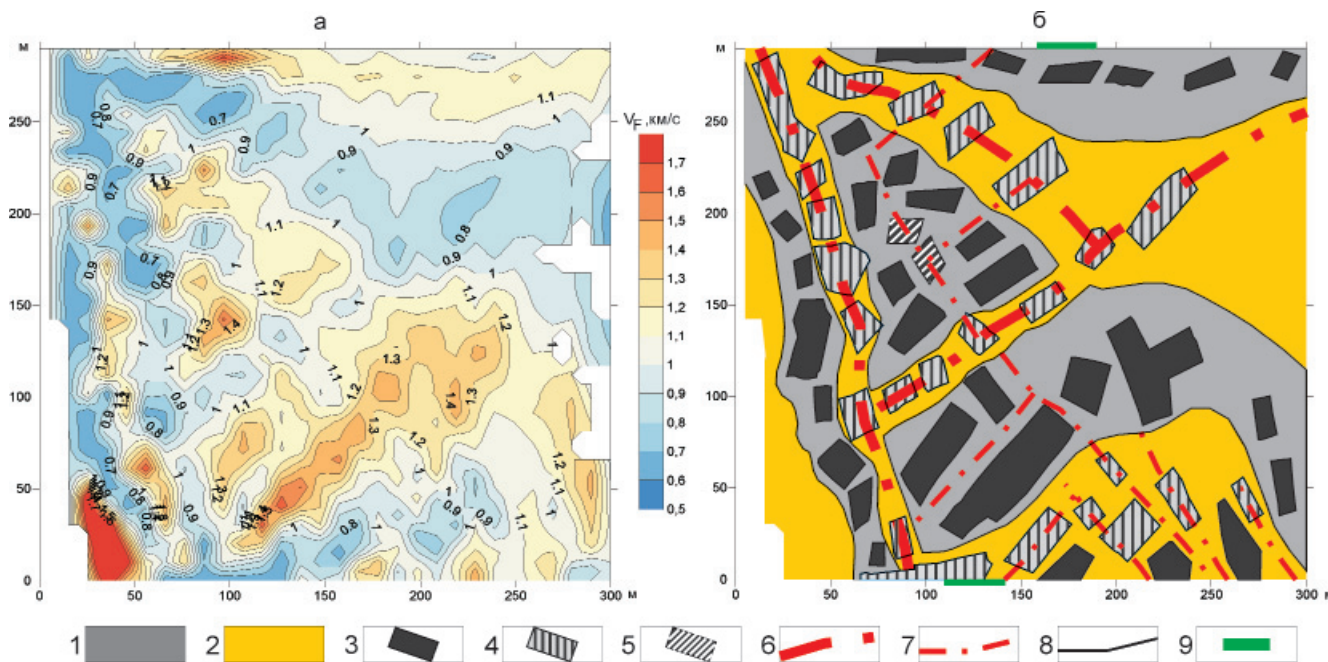


Рис. 10. Сейсмотомографический разрез угольного пласта по параметру скорости каналовой волны, км/с (а) и латеральная геологическая модель (б). Шахта «7 ноября»; $V_{CT} = 1,05$ км/с, $N = 2370$, $dis_H = 8,76$, $dis_K = 4,49$

Усл. обозн. см. на рис. 9

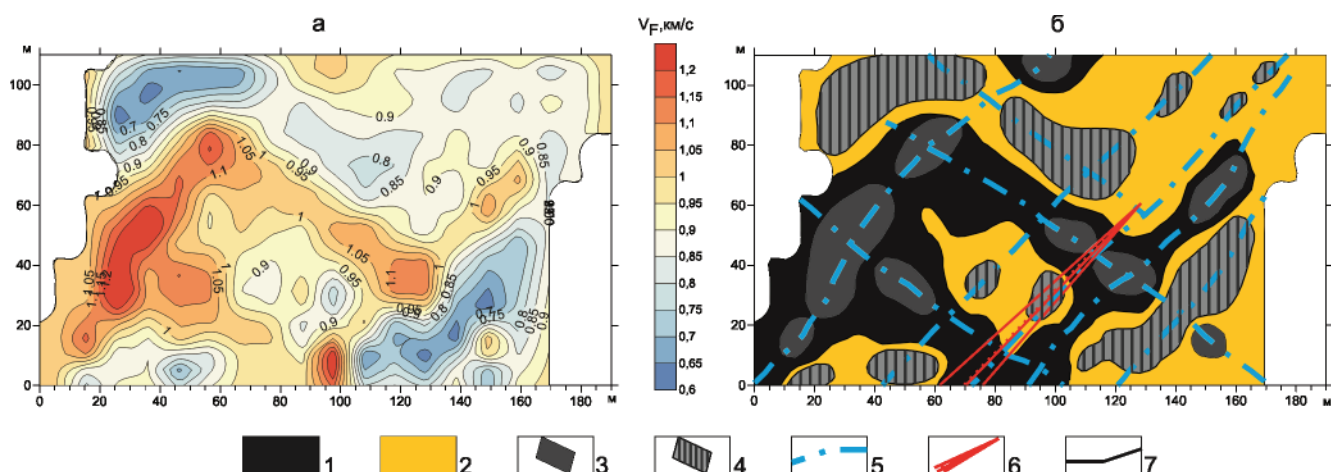


Рис. 11. Сейсмотомографический разрез угольного пласта по параметру скорости каналовой волны, км/с ($V_{CT} = 1,0$ км/с) (а) и латеральная геологическая модель (б). Шахта им. В. И. Ленина

Зоны угольного пласта: 1 – высокой плотности, 2 – низкой плотности; локальные участки угольного пласта: 3 – повышенной плотности (повышенной напряженности, пониженной проницаемости, пониженной трещиноватости), 4 – пониженной плотности (повышенной трещиноватости, пониженной напряженности и повышенной проницаемости); 5 – шарниры складчатых структур; 6 – прогнозная зона разрывного нарушения по геологическим данным; 7 – граница углей различной плотности

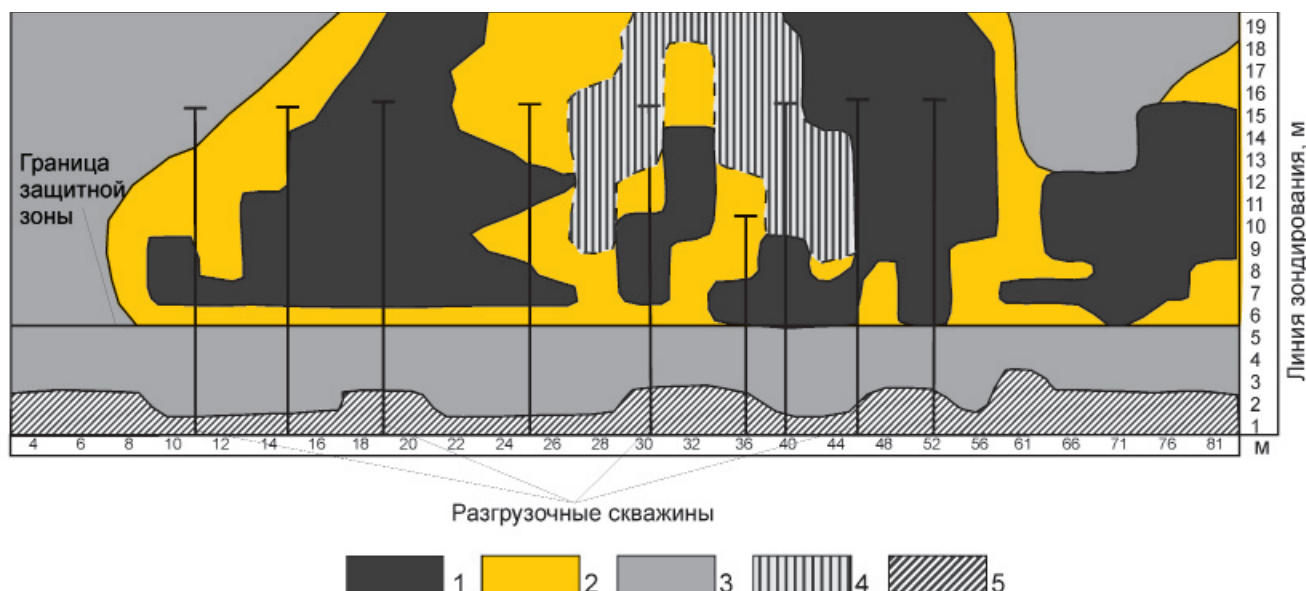


Рис. 12. Результаты прогноза напряженного состояния в бортах угольного пласта методом дипольного электромагнитного излучения. Шахта «Юбилейная» (по материалам Е. В. Костюкова [6])

Зона: 1 – повышенного напряжения (низкая проницаемость угля), 2 – высокого напряжения, 3 – переходная (спокойный уголь), 4 – низкого напряжения (высокая проницаемость, суффля), 5 – высокой трещиноватости угля техногенного генезиса

ной плотной сетью дизъюнктивных дислокаций. Складчатые процессы играют здесь подчиненную роль. Межблоковые дислокации следует рассматривать как трещиноватые зоны, как фильтрационные каналы. Выделяются также достаточно контрастные и протяженные линейные зоны, которые можно отождествить с дизъюнктивными дислокациями, а содизъюнктивные зоны рассматривать как угольные коллекторы, зоны повышенной проницаемости угля.

В условиях повышенной тектонической напряженности углеводородной среды, повышенной степени метаморфизма угля (марки угля К, О) в угольном пласте параллельно со складча-

тостью углеводородной толщи развивается направленный процесс его деформации, происходит переток угля из высоконапряженных зон в зоны пониженных напряжений [2, 9]. В результате деформаций формируются упорядоченно расположенные ячейки (микроблоки) уплотнения и разуплотнения, соответствующие повышенным и пониженным зонам напряжения в угольном пласте. В частности, в условиях всестороннего сжатия могут возникнуть системы куполовидных или подобных складок, а также наложенная складчатость с одновременным образованием ячеек повышенной и пониженной плотности [2, 12]. В этих условиях ячейки повышенной плотности угля бу-



дуг соответствовать участкам нагнетания угля (замкам складок), а пониженной – участкам его выжимания (крыльям складок). При благоприятных сочетаниях разуплотненных и уплотненных микроблоков возможно формирование углеметановых ловушек. Ловушка в этом случае – разуплотненная зона угля, оконтуренная уплотненной. Разуплотненные зоны в таких ловушках могут быть суфлярами, которые могут представлять повышенную опасность в отношении газодинамических явлений. Чем интенсивнее геодинамические нагрузки, тем более контрастными должны быть зоны повышенных и пониженных напряжений, тем больше вероятность образования углеметановых ловушек, тем выше должно быть давление газа в метанообильной зоне. Поэтому с глубиной частота встречаемости суфляров повышается, увеличивается количество опасных газодинамических явлений.

Подтверждением природы формирования углеметановых ловушек могут служить ранее выполненные работы в Кузбассе на шахте «Юбилейная» ($h_y \approx 3$ м), расположенной примерно в тех же горно-геологических условиях, что и шахта им. В. И. Ленина [6]. На рис. 12 представлен результат прогноза напряженного состояния угля по латерали в борту конвейерного штрека. В верхней части разреза на расстоянии 5–6 м от борта штрека выделяется сложнопостроенная высоконапряженная зона, которая обрамляет участок с нарушенной структурой и пониженной напряженностью. Этот участок – полость, заполненная газом, т. е. суфляром, подтверждается интенсивным газовыделением из разгрузочных скважин, вошедших в полость.

Тот же эффект отмечается на шахте «Первомайская» [15]. Геофизический мониторинг позволил установить чередование аномальных зон напряженного состояния углевлещающей толщи с зонами пониженных напряжений. Протяженность зон уплотнения составляет 200–250 м, разуплотнения – 800–1200 м.

Дискретность, мелкочаеистость поля напряжения углевлещающей среды и угольного пласта, возникающая при складкообразовании, определяет упорядоченную мелкочаеистую плотностную структуру угольного пласта и, как следствие, образует слоисто-мозаичную картину размещения метанугольных ловушек в угольных пластах. Это, видимо, одно из главных свойств угольных пластов в бассейнах геосинклинального типа, обусловленное особенностями геодинамики региона. Опираясь на данное свойство, можно предположить, что углеметановые ловушки формируются, вероятно, в каждом угольном пласте, отличаясь друг от друга размерами, степенью надежности боковых экранов (зоны бронирования), качеством емкостных свойств, газоемкостью центральной части ловушки (флюидизированная зона).

Выводы

1. Сейсмотомографический способ просвечивания углевлещающей среды по латерали на проходящих волнах в подземных выработках угольных шахт Кузбасса позволяет изучать латеральную плотностную структуру угольного пласта. Основные элементы его структуры – микробъекты повышенной и пониженной плотности, дизъюнктивные дислокации и содизъюнктивные разуплотненные зоны.

2. Латеральная плотностная структура локальных участков угольного пласта определяется в основном его напряженным состоянием, а характер этого состояния – особенностями тектонического развития Кузбасса как угольного бассейна геосинклинального типа, особенностями проявления пликативных и дизъюнктивных дислокаций.

3. В условиях слабой дислоцированности углевлещающей толщи и низкой степени метаморфизма углей (марки Г, Ж) латеральная модель угольного пласта может быть отождествлена со слабо упорядоченной блочно-трещиноватой средой, расчлененной плотной сетью дизъюнктивных дислокаций.

4. В условиях повышенной тектонической напряженности, повышенной степени метаморфизма угля (марки К, О) в углевлещающей среде и угольных пластах проявляются процессы складкообразования. В этих случаях в угольных пластах формируются упорядоченные ячейки уплотнения и разуплотнения. Когда же разуплотненные участки оконтуриваются зоной уплотненного угля, создаются условия для образования углеметановых газообильных ловушек.

5. Зоны уплотнения и разуплотнения угля – существенное свойство латеральной структуры угольного пласта в угольных бассейнах геосинклинального типа. Они обусловлены складчатыми процессами углевлещающей толщи и формируют послойный каркасно-ячеистый характер размещения метанугольных ловушек в угольных пластах.

Авторы выражают благодарность д. т. н. И. Ю. Кулакову (ИНГГ им. А. А. Трофимука СО РАН) и К. Д. Волковой (ООО «ЛУГГАР») за сотрудничество и отдельные замечания при обсуждении материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Актуальность** геодинамических подходов к обоснованию перспективных площадей углеметановых месторождений [Текст] / Т. И. Лазаревич, П. Н. Поляков, С. В. Шаклеин [и др.]. – СПб. : ВНИМИ, 2006. – С. 106–322.
2. **Белоусов, В. В.** Экспериментальная тектоника [Текст] / В. В. Белоусов, М. В. Гзовский. – М. : Недра, 1964. – 119 с.
3. **Казаков, А. Н.** Деформации и наложенная складчатость в метаморфических комплексах [Текст] / А. Н. Казаков. – Л. : Наука, 1976. – 236 с.



4. **Карасевич, А. М.** Сейсморазведка при изучении метанугольного разреза [Текст] / А. М. Карасевич, Д. П. Земцова, А. А. Никитин. — М. : ООО «Центр информационных технологий в природопользовании», 2008. — 164 с.
5. **Карманский, А. Т.** Изменение коллекторских свойств углей под действием поля механических напряжений [Текст] / А. Т. Карманский, М. Д. Ильинов, А. А. Сальников. — СПб. : ВНИМИ, 2006. — С. 317–322.
6. **Костюков, Е. В.** Опыт выявления суффлярных зон на примере шахты «Юбилейная» [Текст] / Е. В. Костюков. — СПб. : ВНИМИ, 2006. — С. 331–336.
7. **Крейнин, Е. Ф.** Уголь как источник углеводородного сырья [Текст] / Е. Ф. Крейнин, С. Н. Лазаренко // Уголь. — 2012. — № 7. — С. 40–43.
8. **Лидин, Г. Д.** Газообильность каменноугольных шахт СССР [Текст] / Г. Д. Лидин. — М. : Наука, 1990. — 212 с.
9. **Панфилов, А. Л.** Геодинамические закономерности формирования углеметановых месторождений [Текст] / А. Л. Панфилов, Н. И. Мишин. — СПб. : ВНИМИ, 2006. — С. 201–208.
10. **Пузырев, Н. Н.** Методы и объекты сейсмических исследований [Текст] / Н. Н. Пузырев. — Новосибирск : Изд-во СО РАН НИЦ ОИГГМ, 1997. — 302 с.
11. **Сейсмический** способ выявления геологических неоднородностей в угольных пластах : Пат. 2455663 (RU) [Текст] / А. С. Сальников, О. М. Сагайдачная, А. В. Вершинин [и др.] // Заявитель и патентообладатель ФГУП «СНИИГТИМС», приоритет от 15.04.2011 ; опубликовано: 10.07.2012 Бюл. 19.
12. **Теория** складкообразования в земной коре [Текст] / Ж. С. Ержанов, А. К. Егоров, И. А. Гарагаш [и др.]. — М. : Наука, 1975. — 239 с.
13. **Технология** и результаты сейсмотомографических исследований на проходящих волнах в угольных шахтах Кузбасса [Текст] / А. С. Сальников, Б. А. Канарейкин, С. В. Долгова [и др.] // Технологии сейсморазведки. — 2012. — № 2. — С. 74–87.
14. **Углеводородная** флюидизация ископаемых углей восточного Донбасса [Текст] / В. Н. Труфанов, М. И. Гамов, В. Г. Рылов [и др.]. — Ростов-на-Дону : Изд-во ун-та, 2004. — 257 с.
15. **Харкевич, А. С.** Прогноз положения зон геодинамической активности угольных пластов геофизическими методами на шахтах Кузбасса [Текст] / А. С. Харкевич // Сб. науч. тр. ВНИМИ. — СПб., 2006. — С. 290–299.
16. **Ensley, R. A.** Comparison of P- and S-wave seismic data: A new method for detecting gas reservoirs [Text] / R. A. Ensley // Geophysics — 1984. — Vol. 49. — P. 1420–1431.
17. **Koulakov, I. Ur.** Finding a realistic velocity distribution based on iterating forward modeling and tomographic inversion [Text] / I. Koulakov, H. Kopp, T. Stupina // Geophysics. — 2011. — Vol. 186. — P. 349–358.
18. **Stevens, S. H.** Technology spurs growth of U. S. Coalbed methane [Text] / S. H. Stevens, J. A. Kuuskraa, R. A. Schraufnagel // Oil&gas journal. — 1996. — Vol. 94, N 1. — P. 56–62.

© Б. А. Канарейкин, К. А. Дунаева,
О. М. Сагайдачная, А. С. Сальников, 2013