

DOI: 10.17073/2500-0632-2018-4-21-33

**Анциферов А.В.** (Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела (РАНИМИ), Донецк, ДНР)

**Глухов А.А.** (Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела (РАНИМИ), Донецк, ДНР)

**Туманов В.В.** (Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела (РАНИМИ), Донецк, ДНР)

**Сон Д.В.** (Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела (РАНИМИ), Донецк, ДНР)

**Оленюк С.П.** (Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела (РАНИМИ), Донецк, ДНР)

### Об алгоритме сейсмической томографии при прогнозе геологических нарушений угольных пластов

Описан алгоритм обработки данных сейсмического просвечивания, позволяющий по системе критериев распознать тип и оценить характеристики геологических аномалий. В рамках алгоритма выполняются процедуры создания паспорта профиля, расчета амплитудных спектров, спектров скоростей, фильтрации, построения годографов. Далее выполняется расчет кинематических и динамических параметров в выделенных скоростных окнах и статистическая обработка. Основными процедурами алгоритма являются томографическое восстановление параметров волнового поля в плоскости выемочного столба, выделение и интерпретация аномальных зон с использованием критериев прогноза определения типа нарушения. Показано, что томографию в плоскости выемочного столба целесообразно проводить в скоростных окнах выделенных волновых пакетов последовательно для основных информативных параметров. Анализ распределения скорости максимума модуля амплитуды обеспечивает высокую точность в плане выделения участков. Данный параметр характеризуется относительной независимостью от случайных факторов. Анализ отклонений характерной частоты волнового пакета является ключевым фактором, позволяющим судить не только о наличии нарушения, но и о его типе. Учет распределения амплитуд волновых пакетов характеризуется высокой точностью в плане выделения аномальных участков, однако его использование осложнено зависимостью от множества случайных факторов. Другие параметры обладают значительно меньшей информативностью и могут быть использованы как вспомогательные. Алгоритм реализован в программном обеспечении, способном автоматизировать наиболее трудоемкие операции. Его использование проиллюстрировано на примере анализа и интерпретации результатов сейсмических исследований на участке лавы 37К10-В ш. Кузембаева (Казахстан).

*Ключевые слова:* шахтная сейсморазведка, сейсмическое просвечивание, сейсмическая томография, волновые пакеты, каналовые волны, амплитудно-частотная характеристика

#### Введение

Процесс добычи угля является одним из наиболее сложных по сравнению с разработкой других полезных ископаемых. Он связан с решением множества проблем, возникающих под влиянием самых разнообразных факторов, главным из которых являются горно-геологические условия, от которых зави-

сят рентабельность производства, применяемые технологии, эффективность и безопасность труда. Встречи геологических нарушений при отработке угольных пластов приводят не только к экономическим потерям, но и являются причиной аварийности и травматизма. Поэтому заблаговременный достоверный прогноз

горно-гелогических условий залегания угольных пластов чрезвычайно актуален.

Шахтная сейсморазведка является одним из самых эффективных методов опережающего прогноза геологических нарушений. Ее основы достаточно подробно изложены в ряде работ [1–8]. В [1–3] рассмотрен «классический» вариант на базе использования каналовых волн. В монографиях [4, 5] дан подробнейший анализ многоволнового подхода. В ряде публикаций рассмотрены вопросы формирования волновых полей в типичных для различных угольных бассейнов условиях [9–12]. Дан анализ влияния резкости акустических границ на формирование сигнала [9], рассмотрены вопросы формирования волновых полей на угольных пластах сложного строения и на сближенных пластах [10, 11]. В работе [12] рассмотрены особенности применения сейсморазведки в условиях угольных бассейнов Украины, России, Казахстана. Целый ряд работ посвящен теоретическим и практическим аспектам обнаружения геологических нарушений разных типов [13–14], а также методическим вопросам проведения сейсмических экспериментов [15–19]. Среди современных зарубежных работ также следует упомянуть публикации, связанные с определением распределения мощности угольного пласта в плане исследуемого участка [20–21], основанные на анализе дисперсионных зависимостей [22].

Однако основной проблемой является сложность распознавания типа аномалий и их характеристик.

В данной статье описан алгоритм обработки данных сейсмического просвечивания (МСП), позволяющий по системе критериев распознать тип и оценить характеристики аномалий. Алгоритм реализован в программном обеспечении, позволяющем автоматизировать наиболее

трудоемкие операции. Его использование проиллюстрировано на примере анализа и интерпретации результатов МСП на участке лавы 37К10-В ш. Кузембаева (Казахстан). Работа выполнена в рамках оказания научно-технической помощи специалистам геомеханической службы УД АО «АрселорМиттал Темиртау».

### **Алгоритм сейсмической томографии**

Определение типа и характеристик нарушений при использовании МСП производится на основе анализа распределения отклонений кинематических, динамических и спектральных параметров волнового поля от их фоновых значений в плоскости исследуемого участка выемочного столба.

Основными процедурами поэтапной обработки материалов сейсмических исследований МСП являются:

- создание паспорта профиля;
- предварительная обработка (расчет амплитудных спектров, спектров скоростей, фильтрация);
- анализ волнового поля (скоростной, спектрально-временной, построение годографов);
- расчет кинематических и динамических параметров в выделенных скоростных окнах;
- статистическая обработка;
- томографическое восстановление параметров волнового поля в плоскости выемочного столба;
- выделение аномальных зон с использованием критериев прогноза нарушения;
- интерпретация выделенных аномальных зон.

**Создание паспорта профиля представляет собой описание геометрии и характеристик системы наблюдений**

В результате процедуры заполнения паспорта профиля для каждой сейсмоторассы в автоматическом режиме создает-

ся этикетка, содержащая информацию о том, в каком пункте возбуждения (ПВ) расположен источник колебаний, каким сейсмоприемником (СП) принят, какая компонента волнового поля регистрировалась и под каким углом к направлению распространения волны. Система наблюдений визуализируется в специальном рабочем окне программного обеспечения (рис. 1).

Целью предварительной обработки являются определение структуры волнового поля и идентификация природы волновых пакетов.

По принятым в обработку сейсмотрассам рассчитываются обобщенные спектры скоростей. Следует рассчитывать спектры как для всего набора сейсмограмм в целом, так и по отдельным наборам, соответствующим различным зонам исследуемого участка выемочного столба. На спектре выделяются локальные максимумы. Часть из них прослеживается только на отдельных выборках сейсмотрасс, часть – на большинстве. Четко выраженные, повторяющиеся от набора к набору максимумы, соответствуют основным волновым пакетам. Их необходимо анализировать совместно с геологическими разрезами по горным выработкам. Положение максимумов

увязывается со значениями скоростей распространения различных типов волн в слоях, слагающих геологический разрез.

Как правило, на обобщенном волновом спектре, рассчитанном по всем сейсмограммам, присутствуют только максимумы, соответствующие информативным волновым пакетам. Максимумы, вызванные случайными причинами, нивелируются. Кроме максимумов, об информативных волновых пакетах говорят пологие участки спектра. Их следует рассматривать как суперпозицию максимумов (рис. 2, а).

Спектр ограниченного набора сейсмограмм может выявить максимумы, соответствующие волновым пакетам, локально присутствующим на соответствующем участке волнового поля. С другой стороны, чем меньше число сейсмограмм, тем менее информативным становится спектр. Проявляются максимумы, вызванные случайными причинами (рис. 2, б), которые мешают анализу.

Опираясь на результаты расчета скоростного спектра, выбирают границы скоростных окон. Хотя строгого правила нет, рекомендуемые границы скоростного окна выбираются по уровню 0,7 от максимального значения по схеме, показанной на рис. 3.



Рис. 1. Визуализация системы наблюдений МСП на участке лавы 37К10-В ш. Кузембаева (Казахстан) в рабочем окне программного обеспечения. Показаны оконтуривающие лаву выработки, точки расположения ПВ и СП

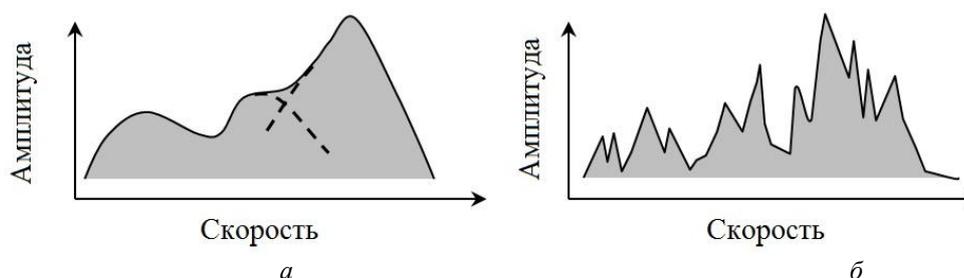


Рис. 2. Вид обобщенного скоростного спектра для большого – *a* и малого – *b* количества сейсмограмм

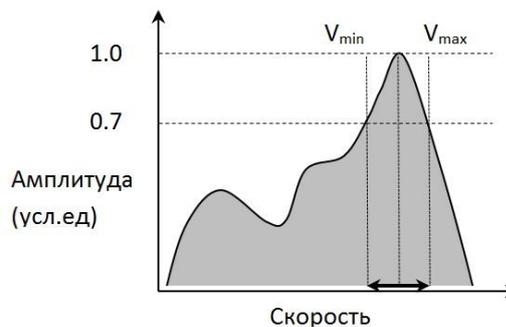


Рис. 3. Правило выбора скоростного окна:

$V_{\min}$  и  $V_{\max}$  – минимальное и максимальное значения скорости

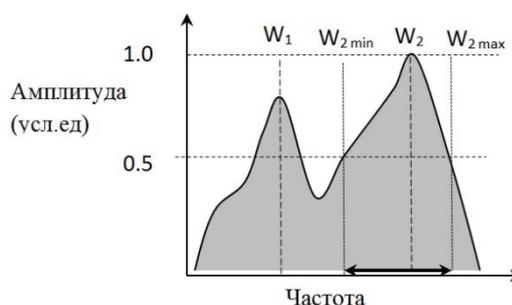


Рис. 4. Правило расчета ширины максимумов амплитудно-частотной характеристик:

$W_i$  – частоты пиков амплитуды,  $W_{i \min}$  и  $W_{i \max}$  – значения частоты для определения ширины максимумов

Далее в ходе предварительной обработки производится расчет амплитудно-частотных характеристик. Рассчитывается и анализируется обобщенный частотный спектр как всего набора сейсмограмм в целом, так и выборки, проведенных по отдельным участкам наблюдений, а также в выделенных скоростных окнах. По спектру определяются частоты максимумов амплитудно-частотной характеристики ( $W_i$ ), амплитуды максимумов амплитудно-частотной характеристики, ширина максимумов (строгого правила нет, в РАНИМИ принято определение ширины по уровню 0,5 от максимального значения, рис. 4).

Как правило, пики частотной характеристики можно сопоставить с определенными волновыми пакетами. Однако такое соответствие неоднозначно. Возможен вариант, когда различные волновые пакеты формируют один и тот же видимый максимум. При расчете частотной характеристики в выделенном скоростном окне соответствие однозначно.

Статистическая обработка проводится с целью определения нормального фона распределения кинематических и динамических параметров как волнового поля в целом, так и в выделенных скоростных окнах. Она включает построение эмпирических распределений следующих величин:

- скоростей распространения волновых пакетов;
- расположения максимумов огибающих волновых пакетов;
- максимумов модулей амплитуды волновых пакетов;
- значения максимума амплитудно-частотной характеристики;
- частоты максимума амплитудно-частотной характеристики.

Установлено, что на ненарушенных участках эмпирические распределения значений параметров, как правило, описываются законами распределения, близкими к нормальному, с вероятностью не ниже 0,90 [1].

Алгоритм томографического восстановления параметров волнового поля

в плоскости выемочного столба заключается в выполнении следующих основных операций:

- исследуемая область выемочного столба покрывается системой непересекающихся блоков конечных размеров, имеющих прямоугольную форму (рис. 5);
- значения параметров, измеренные и рассчитанные по каждому сейсмическому лучу, приводятся к одному расстоянию регистрации;
- в каждом фиксированном блоке рассчитывается среднее значение параметра волнового поля, определяемое как отношение суммы значений параметров, измеренных по лучам, проходящим через данный блок, к числу лучей, пересекающих этот блок.

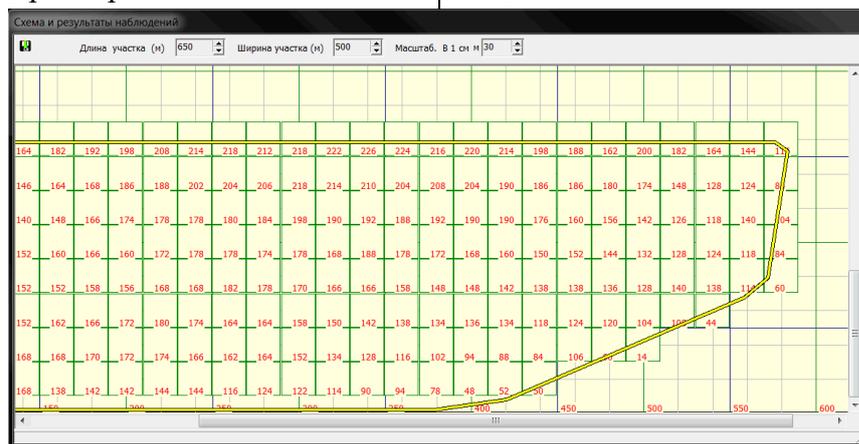


Рис. 5. Разбиение участка наблюдений на систему блоков. В каждом блоке отображается максимально возможное число пересекающих его сейсмических лучей

Уменьшение размеров блоков ведет к более точному восстановлению поля параметров. Однако необходимо производить разбиение на блоки таким образом, чтобы каждый блок пересекало не менее пяти-семи сейсмических лучей, то есть в каждом конкретном случае площадь блока будет зависеть от схемы проведения исследования.

Процесс *геологической интерпретации* не может быть автоматизирован, поскольку одни и те же изменения параметров сейсмического сигнала могут быть вызваны различными причинами. Программное обеспечение позволяет ав-

томатизировать процесс расчета параметров волнового поля, на основе которого производится интерпретация.

Анализ выполняется в несколько этапов:

- на томографических картинах для каждого из параметров выделяются локальные зоны отклонений от фоновых значений;
- каждая из локальных зон анализируется на возможные причины проявления;
- путем сравнения томографических картин производится сравнение локаль-



ных зон и выделение совпадающих участков;

- для каждого из участков по совокупности параметров производится геологическая интерпретация;

- при имеющейся априори информации о геологических нарушениях в зоне эксперимента производится уточнение геологической интерпретации.

Для наглядности рассмотрим пример реальной интерпретации результатов МСП на участке лавы 37К10-В ш. Кузембаева (Казахстан).

В процессе предварительной обработки на исходных сеймотрассах были выделены три информативных волновых пакета со скоростями первых вступлений приблизительно 3200–3400 м/с, 1350–1450 м/с и 1000–1100 м/с.

Первый волновой пакет – боковая продольная волна сжатия, распространяющаяся по вмещающим породам. Второй пакет по скоростному признаку можно уверенно считать каналовой волной, образованной волноводом «угольный пласт + аргиллит» [5, 10]. Последний волновой пакет – доминирующий – классическая каналовая волна. Диапазон частот от 100 до 500 Гц. На амплитудно-частотной характеристике проявляется пиком на 75–150 Гц (скорее всего, этот пик соответствует первой моде каналовых волн Лява и Рэлея) и характерным плато в области между 250 и 350 Гц (предположительно – вклад второй моды).

Среди параметров относительной независимостью от случайных факторов (различия в условиях возбуждения сигнала от ПВ до ПВ, различия в условиях контакта СП с породой, локальные неоднородности среды в зонах расположения ПВ либо СП, посторонние шумы) обладают только скоростные показатели вол-

новых пакетов. Поэтому с них следует начинать анализ.

На рис. 6 представлена томографическая картина распределения отклонений скорости максимума модуля амплитуды (ММА) пакета первой моды каналовых волн от фоновых значений на участке лавы 37К10-В ш. Кузембаева. На ней можно выделить несколько зон. Зона № 1 простирается вдоль выработки. Характеризуется понижением скорости ММА. Степень понижения тем больше, чем ближе к выработке точка. Максимальная степень отклонения около 15 % от фонового значения. Такое отклонение можно объяснить влиянием зоны трещиноватости, образовавшейся в породе в результате проходки выработки. В подтверждение такого предположения выступает градиентный характер изменения параметра при удалении от выработки. При анализе следует учитывать, что иногда подобные зоны (причем с разным знаком отклонения) могут формироваться по краям расчетной сетки при определенном размещении ПВ и СП ввиду специфики алгоритма расчета. Во-первых, в краевых зонах сейсмические лучи часто приходят с определенного направления, что не отвечает требованиям алгоритма томографии. Во-вторых, количество сейсмических лучей на блок может существенно отличаться от среднего по всем расчетным блокам.

Зона № 2 имеет ярко выраженную неправильную форму. Степень отклонения ММА от фонового значения достигает 20% и более. Такую зону однозначно следует рассматривать как область вероятного расположения нарушения. Значительное уменьшение скорости ММА в первую очередь позволяет говорить о дизъюнктиве, либо о зоне трещиноватости.

Зона № 3 выглядит как область с повышенной скоростью ММА. Однако

следует учесть тот факт, что фоновое значение параметра – некое среднее значение между минимальным и максимальным по участку наблюдений. За счет того что на участке наблюдений присутствует протяженная зона с сильным отрицательным отклонением ММА, уровень фона слегка отклонен в ту же сторону. Поэтому участки «чистого канала» проявляются как область, где ММА слегка сдвинут в сторону высоких скоростей.

Зона № 4. Локальный всплеск ММА в угловой точке – ярко выраженный краевой эффект алгоритма расчета томографической картины.

Практически при наличии любых нарушений скорость ММА отклоняется от фонового значения. Однако причины, степень и знак отклонения разные.

Уменьшение скорости ММА в зонах дизъюнктивов связано с дроблением пород в непосредственной близости от сместителя и разуплотнением в зоне трещиноватости. Можно говорить, что это факторы прямого, причем существенно, действия. Дизъюнктивы всегда (за редким исключением некоторых случаев малоамплитудной нарушенности на антрацитовых пластах) сопровождаются зоной трещиноватости. Поэтому зону трещиноватости, не сопровождающуюся

разрывом сплошности пласта, можно рассматривать как дизъюнктив с нулевой амплитудой. Гарантированно отличить методом сейсмопросвечивания дизъюнктив от зоны трещиноватости без разрыва не всегда представляется возможным.

Уменьшение скорости ММА в зонах утонений и размывов связано с увеличением частоты мод каналов волн за счет сужения волновода. Как правило, характер дисперсионных зависимостей каналов волн таков, что смещение ММА в область высоких частот сопровождается уменьшением скорости. Это факторы опосредованного и более слабого действия. Причем могут быть и варианты. Плотная замещающая порода в зоне размыва (например, песчаник) может вызвать некоторое увеличение скорости каналов волн. В результате воздействия разнонаправленных по действию факторов информативная ценность скорости ММА в случае утонений и размывов мала.

Далее согласно алгоритму анализа и интерпретации перейдем к анализу амплитудно-частотных характеристик. На рис. 7 представлена томографическая картина распределения отклонений характерной частоты пакета первой моды каналов волн от фоновых значений.

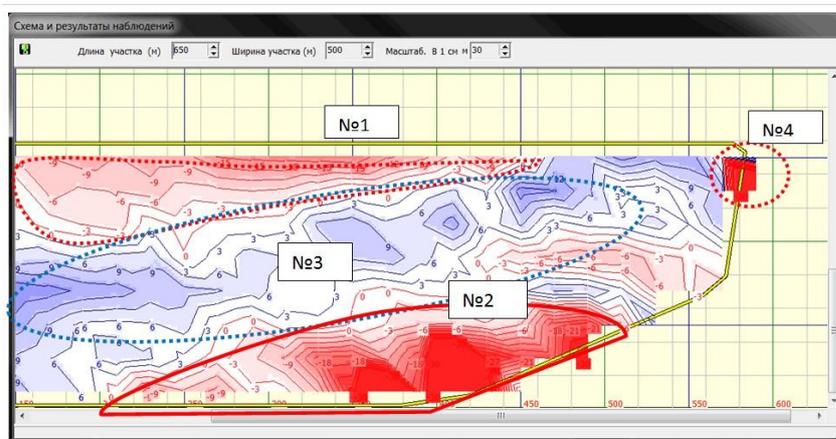


Рис. 6. Томографическая картина распределения отклонений скорости ММА пакета первой моды каналов волн от фоновых значений на участке лавы 37К10-В ш. Кузембаева

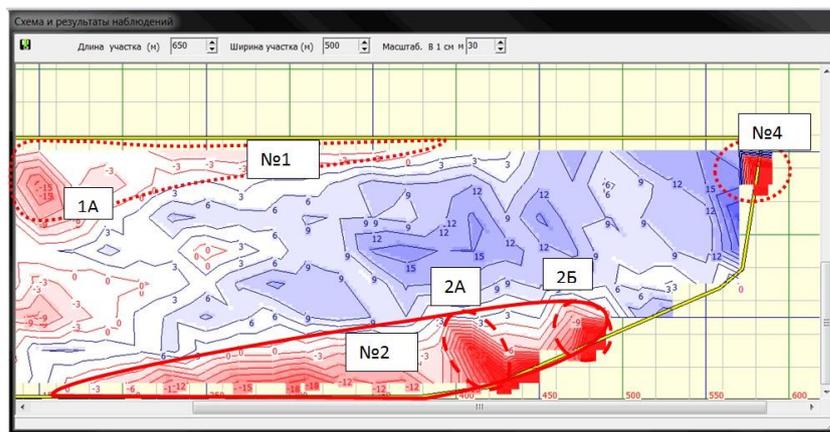


Рис. 7. Томографическая картина распределения отклонений характерной частоты пакета первой моды каналовых волн от фоновых значений на участке лавы 37К10-В ш. Кузембаева

Видно, что расположение зон отклонений частоты пакета первой моды каналовых волн от фоновых значений в целом соответствует зонам отклонений скорости ММА, что подтверждает неслучайный характер явления.

Сдвиг частотного диапазона мод каналовых волн в область низких частот является признаком наличия дизъюнктива либо зоны трещиноватости. По сути, тектоническое нарушение влияет на сигнал как фильтр низкой частоты. Даже если амплитуда нарушения равна 0, смещение частоты каналовых волн может составлять 10–20 Гц, что на практике вполне поддается регистрации. С другой стороны, одна и та же степень изменения частоты может соответствовать широкому диапазону возможных значений амплитуды дизъюнктива. За основу следует брать предположение о том, что падение частоты пропорционально амплитуде нарушения. Это верно в большинстве случаев.

В областях утонений и размывов наблюдается смещение частоты колебаний пакета каналовых волн в высокочастотную область пропорционально изменению мощности пласта. Это единственный достаточно надежный признак, позволяющий отличать утонения от иных типов нарушений. По этому признаку можно не только локализовать утонения,

но и оценить их амплитуду [1, 2]. Оценка будет тем более надежна, чем точнее выделен пакет каналовых волн. Для прогноза рекомендуется ориентировать эксперимент на возбуждение и прием волн Лява в виду строгой структурированности поля и высокой амплитуды.

Зона № 2, характеризующаяся существенным уменьшением частоты, выглядит как область множественных дизъюнктивов, амплитуда которых возрастает слева направо. В правой части зоны просматривается даже направленность двух (2А, 2Б) относительно высокоамплитудных нарушений. В зоне № 1 есть локальный минимум 1А. Но он не проявляется на томограмме отклонений скорости ММА.

Далее перейдем к рассмотрению распределения амплитудных характеристик волновых пакетов. Уменьшение амплитуды информативной волны по сравнению с фоновым значением является признаком вероятного присутствия практически всех типов аномалий. Однако значения амплитуд одних и тех же волновых пакетов даже для соседних ПВ и СП могут отличаться в разы по причине неодинаковых условий возбуждения/регистрации и воздействия иных случайных факторов. Статистическая обработка лишь частично решает данную проблему. Поэтому отклонение амплитуд

на величину до 25–30 % от фоновых значений считается малым для уверенного распознавания нарушения по данному признаку.

Обычно анализ изменения характеристик боковых волн любого типа не позволяет уверенно регистрировать дизъюнктивы и зоны трещиноватости в условиях Карагандинского бассейна [12]. Однако, если соответствующие волновые пакеты выделяются на сейсмограммах, их следует принимать в обработку и рассчитывать в соответствующих скоростных окнах томографические картины распределения информативных параметров волнового поля. В качестве примера на рис. 8 представлена томографическая картина распределения отклонений ММА пакета продольных боковых волн от фоновых значений на участке лавы 37К10-В ш. Кузембаева.

Сильное падение амплитуды боковой волны может быть связано с изменением характеристик вмещающих пород. Поскольку на шахтах Карагандинского бассейна практикуются сейсмические эксперименты с размещением системы наблюдений в верхней либо нижней частях мощных пластов, следует связывать это явление в первую очередь с изменениями свойств «ближайшей» вмещающей породы.

В качестве заключения необходимо отметить, что результаты обработки лавы 37К10-В подтвердили наличие в границах зоны № 2 множества дизъюнктивов амплитудой 0,2–0,5 м. Это подтверждает работоспособность разработанного в РАНИМИ алгоритма сейсмической томографии. Алгоритм также успешно апробирован при проведении сейсморазведки на других шахтах Украины, России, Казахстана.

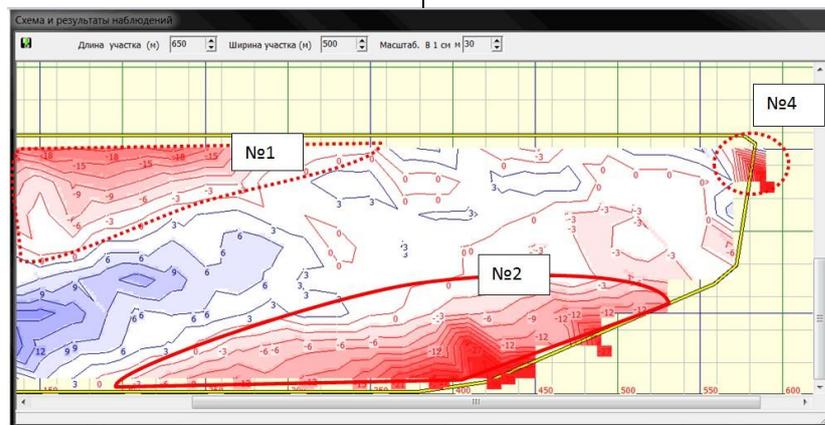


Рис. 8. Томографическая картина распределения отклонений ММА пакета продольных боковых волн от фоновых значений на участке лавы 37К10-В ш. Кузембаева

### Заключение

Таким образом, предлагаемый алгоритм обработки данных сейсмического просвечивания позволяет по системе критериев распознать тип и оценить характеристики аномалий. Томографию в плоскости выемочного столба целесообразно проводить в скоростных окнах всех информативных волновых пакетов для следующих параметров волнового поля:

- скорость ММА (обеспечивается высокая точность в плане выделения участков, относительная независимость от случайных факторов);
- частота ММА (практически единственный фактор, позволяющий судить не только о наличии нарушения, но и о типе);
- амплитуда ММА (высокая точность в плане выделения участков, зависимость от случайных факторов).



### Библиографический список

1. Dresen L. Seismic Coal Exploration, Part B, Seismics: Handbook of Geophysical Exploration, Section I. Seismic Exploration / L. Dresen, H. Rüter. – Pergamon, 1994. – 486 p.
2. Азаров Н.Я. Сейсмоакустический метод прогноза горно-геологических условий эксплуатации угольных месторождений / Н.Я. Азаров, Д.В. Яковлев. - М.: Недра, 1988. – 199 с.
3. Dresen L. Rayleigh - channel waves for the in-seam seismic detection of discontinuities / L. Dresen, S. Freystatter // Geophysics. – 1976. – Vol. 42. – Pp. 111-129.
4. Анциферов А.В. Теория и практика шахтной сейсморазведки / А.В. Анциферов. – Донецк: ООО «Алан», 2002. – 312 с.
5. Анциферов А.В. Математическое моделирование в шахтной сейсморазведке / А.В. Анциферов, А.А. Глухов. – Киев: Наукова думка, 2012. – 255 с.
6. Захаров В.Н. Сейсмоакустическое прогнозирование и контроль состояния и свойств горных пород при разработке угольных месторождений / В.Н. Захаров. - М.: ФГУП ННЦ ГП ИГД им. А.А. Скочинского, 2002. – 172 с.
7. Buchanan D.J. Coal geophysics / D.J. Buchanan, P.J. Jackson // In Geophysics Reprint Series of the Society of Exploration Geophysics. - 1986. - Vol. 6. – P. 275-385.
8. Regueiro J. Seam waves: What are they? / Regueiro J. // The Leading Edge. - 1990. - Vol. 19. - Pp 19-23.
9. Анциферов А.В. Влияние резкости акустических границ на формирование акустического сигнала при применении метода сейсморазведки / А.В. Анциферов // Физико-технические проблемы горного производства. - 2001. - Вып. 4. - С. 55-63.
10. Глухов А.А. Сейсмические волновые поля, регистрируемые на угольных пластах Донбасса при решении задач шахтной сейсморазведки / А.А. Глухов // Зб. наук. праць Національного гірничого університету. – 2006. – Т. 1. – № 26. – С. 65–74.
11. Глухов А.А. Физико-математические модели горно-геологических условий залегания угольных пластов / А.А. Глухов // Наук. вісник Національного гірничого університету. - 2003. - № 8. - С. 33-35.
12. Antsyferov A. Review of seismograms typical for an in-seam seismic technique in conditions of different coal basins / A. Antsyferov, A.O. Glukhov // Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining. Taylor & Francis Group. – 2014. – Pp. 61-64.
13. Глухов А.А. Прогноз геологических неоднородностей угленосного массива методами шахтной пластовой сейсморазведки / А.А. Глухов, А.И. Компанец, В.В. Трофимов, М.А. Педченко, В.А. Анциферов // Наук. пр. УкрНДМІ НАН України: зб. наук. пр. – 2010. – № 6. – С. 301–312.
14. Mason I. Fault location by underground seismic survey/ Mason I., Buchanan D., Boer A. // Institution of Electrical Engineers. - 1980. - Vol. 127. - Pp. 322–336.
15. Friedel Michael J. Mining applications of seismic tomography / Michael J. Friedel, Darel R. Tweeton, M.J. Jackson, J.A. Jossop, S. Billington // 62nd Annu. Int. SEG Meet. - 1992. - Vol. 4. – Pp. 58-62.
16. Waclawik P. Utilization of innovation of the ISS. In Seam seismic method at the CSM Mine / P. Waclawik, W. Schott // Gornicze zagrozenia naturalne. - 2011. - Vol. 2. - Pp. 517-524.
17. Шепе Ф. Исследование геологического строения пластов каменного угля сейсмическим методом с помощью аппаратуры SUMMIT II EX / Ф. Шепе // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 10. – С. 145-154.
18. Belisle J. In-seam GPR and 2-C seismic investigations at the Goderich / Jill Belisle, Robert R. Stewart // Ontario salt mine CREWES Research Report. In-seam techniques, 1996. - Vol. 8. – Pp. 351-355.
19. Lawrence M. Gochioco Advances in seismic reflection profiling for US coal exploration, Geophysics: The leading edge of exploration/ Lawrence M. // Consolidation Coal Company Library, Pennsylvania. - 1991. – Pp. 24-29
20. Schott W. On the quantitative determination of coal seam thickness by means of in-seam seismic surveys / W. Schott, P. Waclawik // Canadian Geotechnical Journal. - 2015. – Vol. 52. – Pp. 1-9.
21. Schott W. Investigation of seam thickness and seam splitting within a longwall panel by an in-seam seismic survey / W. Schott, K. Brandt // 22nd International Conference on Ground Control in Mining. – 2003. – Vol. 2. - Pp. 152-156.
22. Räder D. Calculation of dispersion curves and amplitude-depth distributions of Love channel waves in horizontally-layered media / D. Räder, W. Schott, L. Dresen, H. Rüter // Geophysical Prospecting. - 1985. – Vol. 33. – Pp. 80-86.



## “Gornye nauki i tehnologii”/ “Mining science and technology”, 2018, No. 4, pp. 21-33

<b>Title:</b>	About seismic tomography algorithm in the prediction of geological dislocations in coal seams
<b>Author 1:</b>	A.V. Antsiferov Republican Academic R&D Institute of Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying (RANIMI) 291, Chelyuskintsev str., Donetsk, DPR, 83004
<b>Author 2:</b>	A.A. Glukhov Republican Academic R&D Institute of Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying (RANIMI) 291, Chelyuskintsev str., Donetsk, DPR, 83004
<b>Author 3:</b>	V.V. Tumanov Republican Academic R&D Institute of Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying (RANIMI) 291, Chelyuskintsev str., Donetsk, DPR, 83004
<b>Author 4:</b>	D.V. Son Republican Academic R&D Institute of Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying (RANIMI) 291, Chelyuskintsev str., Donetsk, DPR, 83004
<b>Author 5:</b>	S.P. Olenjuk Republican Academic R&D Institute of Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying (RANIMI) 291, Chelyuskintsev str., Donetsk, DPR, 83004
<b>Abstract:</b>	An algorithm for processing of crosshole seismic survey data enabling recognizing the type and evaluate the characteristics of geological anomalies using a system of criteria is described. As part of the algorithm, the procedures for creating a line certificate, calculating amplitude spectra, velocity spectra, velocity response spectra, filtering operation, and travel-time graph plotting are performed. Then calculation of kinematic and dynamic parameters in the selected velocity gates and statistical processing are performed. The fundamental algorithm procedures are tomographic determination of the wavefield parameters in the extraction panel plane, selection and interpretation of anomalous zones using prediction criteria for determining the dislocation type. It is shown that it is advisable to perform the tomographic determination of the wavefield parameters in the extraction panel plane in the velocity gates of the identified wave packets in sequence for the main informative parameters. Analysis of the amplitude modulus maximum velocity distribution provides high accuracy in terms of identifying anomalous zones. This parameter is relative independent of random factors. The analysis of the wave packet characteristic frequency offsetting is the only key source allowing judge both presence and type of dislocation. Analysis of the distribution of wave packet amplitudes is characterized by high accuracy in terms of identifying anomalous zones. However, its use is complicated by the dependence on many random factors. Other parameters have much less information content and can be used as auxiliary ones. The algorithm is implemented in the software enabling automating the most labor-intensive operations. Its use was illustrated by the example of the analysis and interpretation of the seismic study findings in longwall 37K10-V of the Kuzembaev Mine (Kazakhstan).
<b>Keywords:</b>	mine seismic exploration, crosshole seismic survey, seismic tomography, wave packets, guided waves, amplitude-frequency response characteristic.
<b>References:</b>	1. Dresen L., Rüter H. <i>Seismic Coal Exploration</i> . Part B, Seismics: Handbook of Geophysical Exploration, Section I. Seismic Exploration. Pergamon, 1994, 486 p. 2. Azarov N.Ya., Yakovlev D.V. Seismoakusticheskiy metod prognoza gornogeologicheskikh usloviy ekspluatatsii ugolnykh mestorozhdeniy [Seismoacoustic Method to Predict Mining-Geological Conditions of Coalfield



- Development*]. Moscow, Nedra Publ., 1988, 199 p. In Russ.
3. Dresen L., Freystatter S. *Rayleigh-channel waves for the in-seam seismic detection of discontinuities*. Geophysics, 1976, vol. 42, pp. 111-129.
  4. Antsiferov A.V. *Teoriya i praktika shakhtnoy seismorazvedki* [Theory and Practice of Underground Seismic Exploration]. Donetsk, OOO Alan Publ., 2002, 312 p.
  5. Antsiferov A.V., Glukhov A.A. *Matematicheskoe modelirovanie v shakhtnoj seismorazvedke* [Mathematical Modeling for Underground Seismic Exploration]. Kiev, Naukova dumka Publ., 2012, 255 p. In Russ.
  6. Zakharov V.N. *Seismoakusticheskoe prognozirovanie i kontrol sostoyaniya i svoystv gornykh porod pri razrabotke ugolnykh mestorozhdenij* [Seismoacoustic prediction and monitoring of rock conditions and properties in development of coal deposits]. Moscow, A. A. Skochinsky Mining Institute, 2002, 172 p. In Russ.
  7. Buchanan D.J., Jackson D.J. *Coal geophysics*. In: Geophysics Reprint Series of the Society of Exploration Geophysics, 1986, vol. 6, pp. 275-385.
  8. Regueiro J. *Seam waves: What are they?* The Leading Edge, 1990, vol.19, pp. 19-23.
  9. Antsiferov A.V. *Vliyanie rezkosti akusticheskikh granits na formirovanie akusticheskogo signala pri primenenii metoda seismoprosvechivaniya* [Influence of acoustic contrast on acoustic signal shaping when using in-seam seismic survey technique]. *Fiziko-technicheskie problemy gornogo proizvodstva* [Physicotechnical Problems of Mining], 2001, i. 4, pp. 55-63. In Russ.
  10. Glukhov A.A. *Seismicheskie volnovye polya, registriruemye na ugolnykh plastakh Donbassa pri reshenii zadach shakhtnoj seismorazvedki* [Seismic wave fields recorded in coal seams of Donbass when solving problems of underground seismic exploration]. *Zb. nauk. prats Natsionalnogo girnychogo universytetu* [Proc. of the National Mining University], 2006, vol. 1, no. 26, pp. 65-74. In Russ.
  11. Glukhov A.A. *Fiziko-matematicheskie modeli gorno-geologicheskikh usloviy zaleganiya ugolnykh plastov* [Physico-mathematical models for mining-geological conditions of coal seam occurrence]. *Nauk. visnyk Natsionalnogo girnychogo universytetu* [Sci. Bull. of the National Mining University], 2003, no. 8, pp. 33-35. In Russ.
  12. Antsyferov A.V., Glukhov A.A. *Review of seismograms typical for an in-seam seismic technique in conditions of different coal basins*. Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining. Taylor & Francis Group, 2014, pp. 61-64.
  13. Glukhov A.A., Kompanets A.I., Trofimov V.V., Pedchenko M. A., Antsiferov V. A. *Prognoz geologicheskikh neodnorodnostej ugleporodnogo massiva metodami shakhtnoj plastovoy seismorazvedki* [Prediction of geological inhomogeneities in coal-rock mass by in-seam seismic survey methods]. *Zb. nauk. prats UkrNDMI NAN Ukrainy* [Transactions of UkrNDMI NAN Ukraine], 2010, no. 6, pp. 301-312. In Russ.
  14. Mason I., Buchanan D., Booer A. *Fault location by underground seismic survey*. Institution of Electrical Engineers, 1980, vol. 127, pp. 322-336.
  15. Friedel M.J., Tweeton Darel R., Jackson M.J., Jossop J.A., Billington S. *Mining applications of seismic tomography*. 62<sup>nd</sup> Annu. Int. SEG Meet., 1992, vol. 4, pp. 58-62.
  16. Waclawik P., Schott W. *Utilization of innovation of the ISS. In Seam seismic method at the CSM Mine*. *Gornicze zagrozenia naturalne*, 2011, vol. 2, pp. 517-524.
  17. Schepe V. *Issledovanie geologicheskogo stroeniya plastov kamennogo uglya seismicheskim metodom s pomoschyu apparatury SUMMIT II EX* [Investigation of coal seam geologic structure by seismic method using SUMMIT II EX system]. *Gorny informatsionno-analitichesky byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2012, no. 10, pp. 145-154. In Russ.



18. Belisle J, Stewart R. *In-seam GPR and 2-C seismic investigations at the Goderich*. Ontario salt mine CREWES Research Report. In-seam techniques, 1996, vol. 8, pp 351-355.
19. Gochioco L.M. *Advances in seismic reflection profiling for US coal exploration, Geophysics*. The leading edge of exploration, Consolidation Coal Company Library, Pennsylvania, 1991, pp. 24-29.
20. Schott W., Waclawik P. *On the quantitative determination of coal seam thickness by means of in-seam seismic surveys*. Canadian Geotechnical Journal, 2015, vol. 52, pp. 1-9.
21. Schott W., Brandt K. *Investigation of seam thickness and seam splitting within a longwall panel by an in-seam seismic survey*. 22nd International Conference on Ground Control in Mining, 2003, vol. 2, pp. 152-156.
22. Räder D., Schott W., Dresen L., Rüter H. *Calculation of dispersion curves and amplitude-depth distributions of Love channel waves in horizontally-layered media*. Geophysical Prospecting, 1985, vol. 33, pp. 80-86.