

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЛЕКСА ОБРАБОТКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ПРОГНОЗА ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА

А.В. Анциферов¹, А.А. Глухов¹

¹ Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела (РАНИМИ), Донецк, e-mail: glukhov1964@yandex.ru

Аннотация: Кратко описаны структура, алгоритмы и функциональные возможности и примеры использования разработанного в ФГБНУ «РАНИМИ» программного комплекса обработки и интерпретации результатов сейсмических экспериментов. Комплекс обеспечивает обработку и анализ данных сейсмических наблюдений, выполненных различными методами, среди которых сейсмическое просвечивание, методы отраженных волн и сейсмической локации впереди забоя горной выработки, метод дифрагированных волн, а также варианты комплексирования различных подходов. Описаны адаптированные графы обработки данных сейсмических наблюдений по методу эллипсов и методу общей глубинной точки для прогноза тектонических нарушений. Результатом работы рассмотренных процедур являются временные и глубинные сейсмические разрезы массива горных пород, схемы расположения тектонических нарушений, полученные при использовании методов отраженных волн и сейсмической локации, карты распределения параметров среды на участке экспериментов сеймопросвечивания и другая информация. Приведены примеры обработки результатов реальных наблюдений, выполненных методами отраженных волн и сейсмической локации, иллюстрирующие эффективность использования предлагаемых алгоритмов для прогноза разрывных тектонических нарушений.

Ключевые слова: сейсморазведка, сейсмическое просвечивание, сейсмическая локация, метод отраженных волн, метод эллипсов, сейсмические разрезы, обработка сейсмоданных, программное обеспечение.

Благодарность: Исследования проводились в ФГБНУ «РАНИМИ» в рамках государственного задания по теме «Разработка геолого-геофизической модели формирования аномальных скоплений метана на угольных шахтах в зонах динамического влияния разломов. Разработка физико-математических моделей процесса распространения и регистрации сейсмических волн, определение информативных параметров волновых полей, зональности радонометрической активности разломов и газоносности углей» (FRSR-2023-0007).

Для цитирования: Анциферов А. В., Глухов А. А. Использование комплекса обработки сейсмических данных для прогноза тектонических нарушений углепородного массива // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 11. – С. 126–138. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_11_0_126.

The use of seismic data processing package in prediction of tectonic disturbances in coal–rock masses

A.V. Antsiferov¹, A.A. Glukhov¹

¹ Republican Academic Research and Design Institute of Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Surveying (RANIMI), Donetsk, e-mail: glukhov1964@yandex.ru

Abstract: The article describes briefly the structure, algorithms, functional capabilities and application of a software package developed at ICM&MG for processing and interpreting seismic testing results. The software package allows processing and analysis of seismic observations carried out using different techniques including seismic sounding, reflected waves and seismic location ahead of mining faces, diffracted waves, as well as complexing of various approaches. The scope of the description encompasses the adapted graphs of seismic data processing using the properties of ellipse and the common depth point method for predicting tectonic disturbances. The result of the discussed techniques are the time and depth sections of rock masses, the layouts of seismic disturbances obtained using the methods of reflected waves and seismic location, the maps of the medium parameters in seismic sounding areas and other information. The case studies of processing of real-life observation data obtained by the methods of reflected waves and seismic location illustrate efficiency of the algorithms proposed for the prediction of faults.

Key words: seismic exploration, seismic sounding, seismic location, method of reflected waves, methods of ellipses, seismic sections, seismic data processing, software system.

Acknowledgements: The study was carried out at ICM&MG in the framework of the state contract topic «Development of Geological-and-Geophysical Model of Anomalous Methane Accumulations in Coal Mines in Faulting Impact Zones. Development of Physical and Mathematical Models of Propagation and Recording of Seismic Waves, Determination of Informative Parameters of Wave Fields, Zonality of Radon Activity of Faults and Gas Content of Coal», Topic No. FRSR-2023-0007.

For citation: Antsiferov A. V., Glukhov A. A. The use of seismic data processing package in prediction of tectonic disturbances in coal–rock masses. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(11):126-138. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_11_0_126.

Введение

Тектонические нарушения являются одним из основных факторов, усложняющих горные работы при подземной добыче угля. Их переход не только требует существенных затрат и сложных технологических решений, но и связан с повышенной опасностью проявления газодинамических явлений. В то же время подобные зоны являются потенциальными газовыми коллекторами, выявление которых представляет собой акту-

альную задачу. Ее решение возможно геофизическими методами, среди которых сейсмоакустический отличается высокой надежностью [1].

Наибольший опыт использования сейсмоакустического метода для прогноза геологических нарушений углепородных массивов накоплен в Российской Федерации [2, 3]. Кроме этого, он нашел широкое применение в КНР [4–7], Германии и других странах [8–10]. Среди направлений исследований — оценка

мощности угольных пластов по параметрам дисперсионных и спектральных характеристик регистрируемых волн [11–13], методы прогноза размывов, включений различной природы [14, 15], способы увеличения разрешающей способности метода [16], прогноз динамических явлений [17]. В последние годы возрастает интерес к разработке мониторинговых систем и соответствующих алгоритмов обработки информации, интегрированных в технологию добычи [18].

В РАНИМИ накоплен опыт разработки и использования современных методов сейсмоакустических исследований углепородных массивов. При решении практических задач наибольшую перспективу имеют методы отраженных волн (МОВ) и сейсмической локации впереди забоя (МСЛ) [19], поскольку используются на участках, куда еще не дошли горные работы. Кроме этого, в настоящее время широко применяется метод сейсмического просвечивания [20], а в качестве дополнительного инструмента сейсморазведки предложены основы метода дифрагированных волн [21].

В рамках проводимых в настоящее время в РАНИМИ исследований выполняются полевые геофизические, в том числе сейсмические, наблюдения. Для обработки и анализа сейсмической информации был усовершенствован разработанный ранее для решения задач шахтной пластовой сейсморазведки программный комплекс [22]. Применительно к его использованию адаптированы графы обработки сейсмической информации. Модификация расширяет сферу применения в направлении решения задач наземной сейсморазведки, а также при выполнении исследований в полевых выработках. В настоящей статье кратко описаны структура и возможности данного программного обеспечения, разработанные графы обработки сейс-

мической информации. Представлены примеры успешной апробации программного обеспечения и предлагаемых методик на реальных объектах.

Структура программного обеспечения и графы обработки сейсмической информации

Комплекс программ предназначен для обработки и интерпретации данных сейсмических экспериментов, выполненных методами сейсмического просвечивания (МСП), отраженных волн (МОВ), сейсмической локации впереди забоя (МСЛ), а также разработанным в ФГБНУ «РАНИМИ» методом дифрагированных волн (МДВ). При этом структура программного обеспечения обеспечивает возможность комплексирования подходов.

Программное обеспечение имеет блочную структуру. Три блока используются вне зависимости от решаемой задачи. Это блок чтения данных, ввода ситуационной основы и блок предварительной обработки сейсмограмм.

Чтение данных в обрабатываемую систему предусмотрено в различных форматах. Первоначально комплекс был ориентирован на использование сейсмозаписей в форматах Seg-Y и Seg-2, но в ходе доработок список форматов значительно расширен и на данный момент составляет более десятка вариантов.

Второй блок обеспечивает ввод в обрабатываемую систему геометрии участка наблюдений, контуров наблюдательных профилей, мест расположения пунктов возбуждения (ПВ) сейсмических колебаний и сейсмоприемников (СП). На этом этапе задаются соответствия ПВ – СП для каждой сейсмотрассы (процедура привязки). Алгоритм привязки удалось автоматизировать, поскольку подавляющее большинство методик проведения сейсмических наб-

людений опирается на регулярные схемы расстановки СП и ПВ. Для особых случаев предусмотрена привязка «вручную».

Третий блок обеспечивает предварительную визуализацию сейсмозаписей общего пункта возбуждения (ОПВ), оценку качества, отбраковку, первичную обработку. Важной частью первичной обработки является частотная фильтрация, применяемая для выделения полезной части сигнала и уменьшения влияния помех, а также для устранения пространственного алейсинга. Если частотные диапазоны полезной части сигнала и помех не накладываются, используются простые фильтры (фильтры высоких и низких частот, полосовой фильтр, полосо-заграждающий фильтр).

В случае, если для разделения сигнала и шума недостаточно простых фильтров, в системе предусмотрены разновидности процедур оптимальной фильтрации, которая минимально искажает сигнал при подавлении шума. Во-первых, это согласованные фильтры, применяемые с целью выделения на сейсмозаписях сигнала заданной формы. Критерием оптимизации служит соотношение максимальной амплитуды отфильтрованного сигнала и дисперсии отфильтрованного шума. Во-вторых, формирующие фильтры, обеспечивающие минимальное среднеквадратическое отклонение результата от сигнала заданной формы. Алгоритм базируется на решении уравнения Колмогорова–Винера. В-третьих, предсказывающие фильтры, которые позволяют вычислять последующие значения сигнала по предыдущим.

В четвертом блоке реализованы алгоритмы основного цикла обработки сейсмоданных в соответствии с выбранным методом проведения наблюдений. Разработаны различные графы обработки и широкий выбор обрабатываемых процедур.

Наиболее часто в практике РАНИМИ используется обработка данных сейсмических наблюдений МОВ по методу общей глубинной точки (ОГТ), а также МСЛ по методу эллипсов.

Оптимальный граф обработки по методу общей глубинной точки (ОГТ) начинается с сортировки сейсмотрасс по ОГТ, по принадлежности к одинаковому пункту возбуждения (ПВ) или сейсмоприемнику (ОПП). Далее выполняется фильтрация и нормировка сейсмических записей. Затем для всей линии профиля выполняется расчет вертикальных спектров скоростей и задаются законы изменения скорости в исследуемой плоскости разреза. На этой основе выполняется расчет кинематических поправок и суммирование по ОГТ с учетом вариаций угла наклона отражающих границ относительно линии профиля. Итогом данной операции являются временные и глубинные разрезы ОГТ. Затем на разрезах оператором выполняется выделение отражающих границ по присутствию на разрезах осей синфазности колебаний с амплитудой выше фона помех либо по наличию характерных гиперболических волн.

Наблюдаемые оси синфазности свидетельствуют о границах раздела породных слоев либо о протяженных разрывных тектонических нарушениях. Превышение амплитуды синфазных волн над помехами прямо пропорционально резкости соответствующих границ либо амплитуде смещения дизъюнктива. Присутствие гиперболических волн говорит о наличии нарушений локального характера.

Суть алгоритма обработки по методу эллипсов заключается в следующем. Годографы отраженных от нарушения волн проявляются на сейсмограммах в виде гиперболических волн. Для каждой отдельной сейсмотрассы точки отражений, которые соответствуют позиции на годографе,

располагаются вдоль эллипса с фокусами в местах расположения ПВ и СП.

Большая полуось эллипса равна $Vt/2$, а малая полуось равна

$$\frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{Vt}{2}\right)^2 - X^2},$$

где t — время вступления отраженной волны; V — средняя скорость на пути волны от ПВ к СП; X — расстояние между СП и ПВ.

Если по набору первых вступлений (либо синфазных максимумов) отраженных волн построить систему соответствующих эллипсов, то зона их сближения (пересечения) будет располагаться в области геологического нарушения. Если можно построить огибающую, то она будет задавать контур аномалии. Для достоверности сравниваются результаты, полученные при использовании волн сжатия (Р-волн) и волн сдвига (S-волн). Процедура построения системы эллипсов по заданным точкам годографов в программном обеспечении автоматизирована.

Окончательными результатами цифровой обработки данных являются временные и глубинные разрезы ОГТ, схемы расположения отражающих границ, схемы распределения параметров среды на участке эксперимента МСП и другая информация.

Результаты использования программного обеспечения и алгоритмов обработки сейсмической информации

Рассмотрим пример обработки результатов наблюдений, выполненных по схеме общей глубинной точки (ОГТ) из полевых выработок на шахте Казахстанская (газодренажный штрек 332Д6-3).

Прямолинейный профиль располагался по стенке газодренажного штрека 332Д6-3. Использовалась сейсмостан-

ция «SUMMIT II Ex» (Германия). Выполнялась регистрация двух компонент волнового поля. Первая (X) была ориентирована перпендикулярно стенке выработки, а вторая (Y) ориентирована вдоль штрека. На рис. 1, а для примера показана исходная сейсмограмма общего пункта возбуждения (X-компонента) на участке без нарушения. Здесь и далее в качестве иллюстраций приведены скриншоты обрабатывающих процедур. На сейсмограмме четко прослеживаются прямые продольные и поперечные волны.

Обработка сейсмических данных последовательно выполнялась на основе каждого из типов волн. Перед анализом волнового поля была применена процедура нормировки. При использовании продольных волн в качестве информативных с целью подавления поперечных волн выполнялась полосовая фильтрация с параметрами фильтра 250-500-600-800 Гц. При использовании поперечных волн продольные подавлялись фильтром с параметрами 30-50-200-250 Гц. Далее выполнялась предсказывающая фильтрация (деконволюция). Для примера на рис. 1, б приведена нормированная отфильтрованная сейсмограмма (подавлены продольные волны) после применения деконволюции.

На следующем этапе использовалось преобразование Гильберта и процедура выравнивания амплитуд сейсмических записей (АРУ). При выполнении АРУ на первом этапе производился выбор конкретного алгоритма и параметров процедуры. Программный комплекс частично автоматизирует данную операцию путем выполнения процедуры на выбранном для тестирования наборе сейсмограмм в заданном диапазоне вариаций параметров. Результаты для сравнения визуализируются в специальном рабочем окне. Параметры фильтрации для оптимального результата использу-

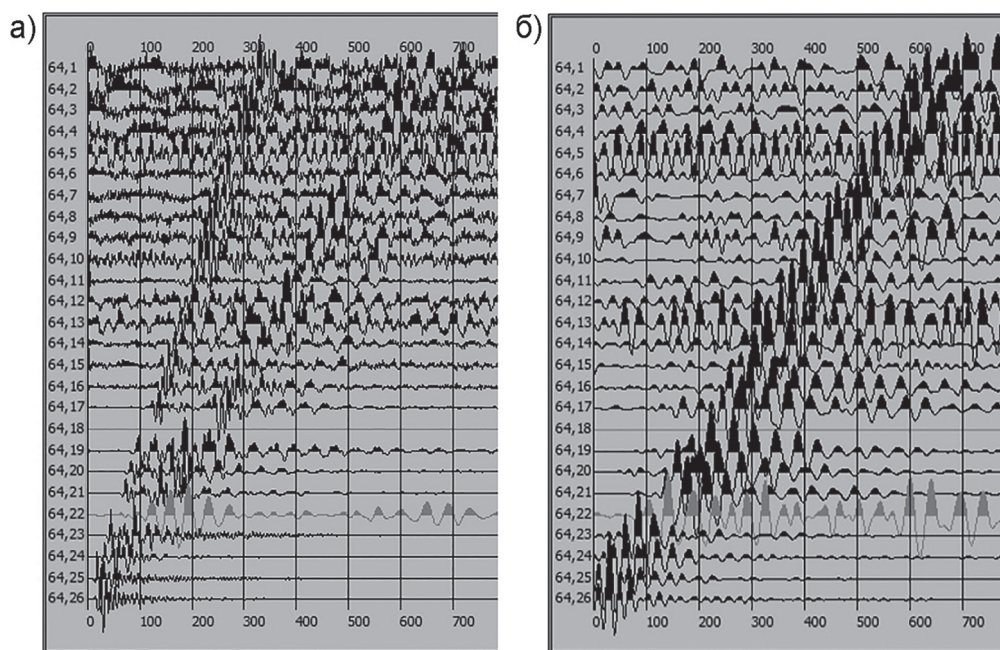


Рис. 1. Пример исходной (а) и отфильтрованной сейсмограммы (подавлены продольные волны) после применения деконволюции (б)

Fig. 1. An example of an initial (a) and filtered seismogram (longitudinal waves suppressed) after deconvolution (b)

ются далее при применении процедуры к заданному набору сейсмограмм.

Далее для различных участков профиля выполнялся расчет вертикальных спектров скоростей. Они необходимы для определения кинематических поправок, соответствующих однократно отраженным волнам.

Первая часть процедуры выполняется автоматически. Для каждого момента времени выполняется суммирование амплитуд сеймотрасс сейсмограммы ОГТ вдоль гиперболических траекторий, описывающих годограф отраженной волны, распространяющейся с заданной скоростью $V_{\text{ОГТ}}$. Операция выполняется на заданном диапазоне скоростей. В результате получается двумерный график зависимости амплитуды отраженного сигнала от $V_{\text{ОГТ}}$ и времени t . Максимумы амплитуды, по сути, свидетельствуют о наличии отраженной вол-

ны, скорость распространения которой совпадает с соответствующим расчетным значением $V_{\text{ОГТ}}$ гиперболы, вдоль которой выполняется суммирование.

Далее оператор по максимумам амплитуды вручную выбирает последовательность точек. На основе полученного графика выполняется расчет зависимости $V_{\text{ОГТ}}(t)$ и вычисление кинематических поправок.

В данном случае подбор скоростных законов производился как по сейсмограммам ОПВ после преобразования Гильберта (по мгновенным амплитудам), так и по отфильтрованным сейсмограммам ОПВ без применения данного преобразования. Соответственно на основе спектров были заданы скоростные законы $t_0(V_{\text{ОГТ}})$ (см. рис. 2).

На следующем этапе с использованием заданных скоростных законов выполнялось суммирование по ОГТ. Сум-

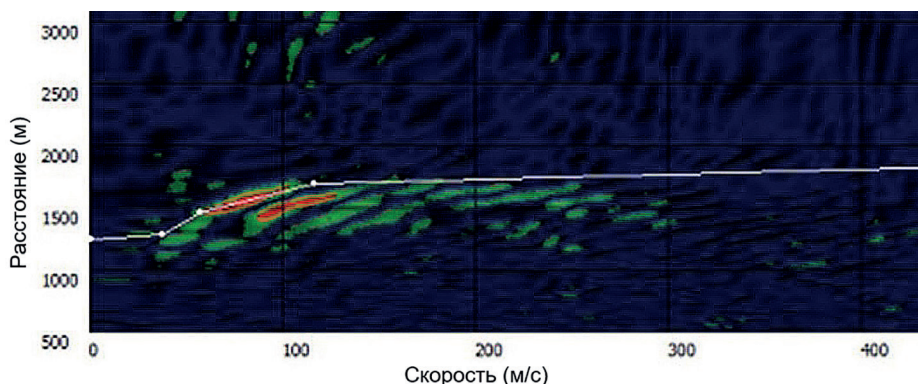


Рис. 2. Расчет вертикального спектра скоростей поперечных волн по отфильтрованным сейсмограммам общего пункта возбуждения

Fig. 2. Calculation of the vertical velocity spectrum for transverse waves from filtered seismograms of the general source point

марный временной разрез ОГТ на поперечных волнах представлен на рис. 3, а. Для сравнения на рис. 3, б показан суммарный временной разрез ОГТ, построенный с помощью программного комплекса RadExPro 2017.2.

На временные разрезы ОГТ, построенные с помощью разработанного в ФГБНУ «РАНИМИ» программного обеспечения, и на временные разрезы, полученные с помощью RadExPro, нанесены линии предполагаемых тектонических нарушений. Выделение отражающих границ на временных разрезах ОГТ выполнялось по признаку наличия на соседних сеймотрассах участков синфаз-

ных колебаний. Вполне очевидно совпадение большинства отражающих границ в обоих вариантах обработки.

Данный прогноз позднее был подтвержден результатами горных работ.

Для иллюстрации использования принципиально иного подхода рассмотрим пример обработки и интерпретации данных сейсмической локации на шахте «Саранская». Целью исследований был прогноз тектонической нарушенности углепородного массива из конвейерного штрека 81 К 10-3 №2.

Наблюдения были выполнены по стандартной методике с расположением двухкомпонентных СП на груди забоя и

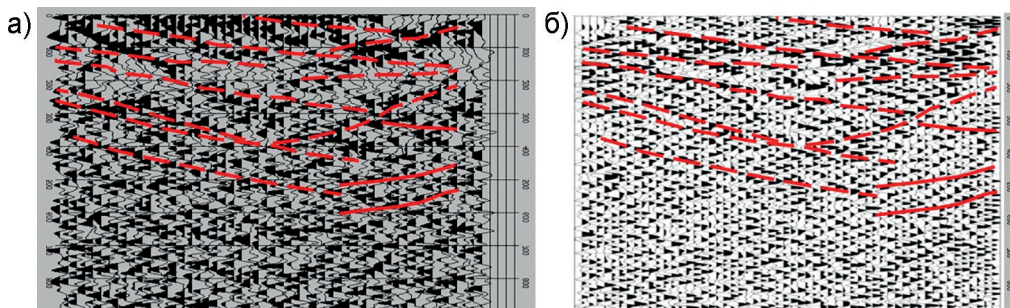


Рис. 3. Временные разрезы: полученные с помощью программных модулей обработки сейсмических данных (а); полученные с помощью RadExPro (б)

Fig. 3. Time sections: obtained using software modules for processing seismic data (a); obtained using RadExPro (b)

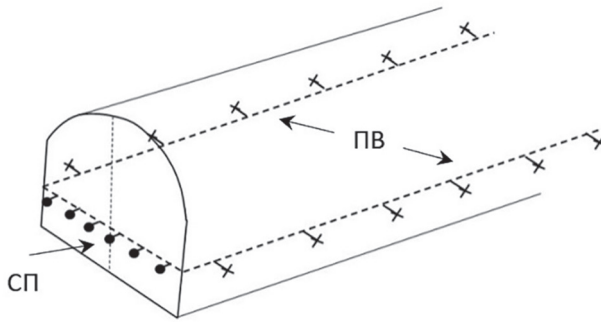


Рис. 4. Стандартная схема расположения системы наблюдений при использовании сейсмической локации

Fig. 4. The standard layout of the observation system when using a seismic location

расположением ПВ на правой и левой боковых стенках выработки (рис. 4).

Предварительная обработка выполнялась в том же порядке, как и в приведенном выше примере. Экспериментальным путем были выбраны оптимальные параметры полосы пропускания полосовых фильтров для выделения S- (120-160-240-320 Гц) и P-волн (240-300-420-560 Гц). Для улучшения корреляции отраженных волн к сейсмограммам применялись процедуры АРУ.

Исходные значения скорости поперечных и продольных волн для построения отражающих границ были получены по первым приходам прямых волн соответствующих типов и принимались равными 1420 м/с и 2705 м/с, соответственно. На разных участках зоны на-

блюдений значения скоростей несколько варьировались.

Далее на сейсмограммах ОПВ выделялись и маркировались годографы потенциально информативных волн. Эллипсы рассчитывались и визуализировались программным комплексом автоматически.

Критерием окончательного выделения предполагаемых тектонических нарушений принято точное или приблизительное совпадение отражающих площадок, прослеженных в последовательных циклах наблюдений по нескольким типам волн. Всего таких границ на участке наблюдений было выделено шесть. Еще две предполагаемые границы выделены только по одному циклу наблюдений по нескольким типам отра-

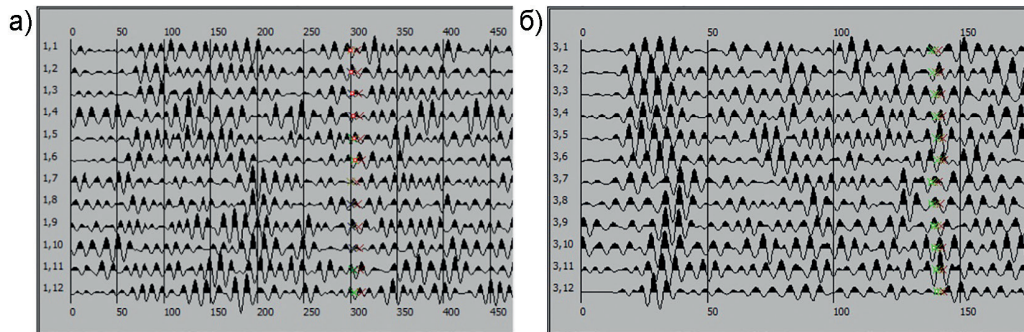


Рис. 5. Годографы отраженных поперечных (а) и продольных (б) волн

Fig. 5. Hodographs of reflected transverse (a) and longitudinal (b) waves

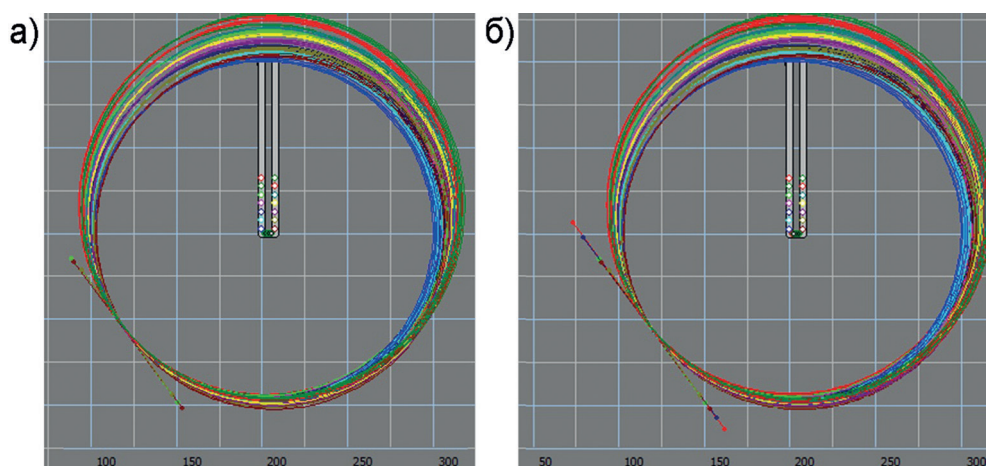


Рис. 6. Результаты построения отражающей границы при использовании отраженных поперечных (а) и продольных (б) волн

Fig. 6. Results of the construction of the reflecting zone using reflected transverse (a) and longitudinal (b) waves

женных волн. Возможно, в остальных циклах указанные границы не удалось проследить по причине высокого уровня помех. Тем не менее, по этой причине достоверность данных отражений расценивается как сомнительная.

На рис. 5 приведены годографы, а на рис. 6 — результаты построения одной и той же отражающей границы при использовании отраженных поперечных и продольных волн.

Данный прогноз также был подтвержден результатами горных работ.

Модуль обработки дает возможность отмеченные на сейсмограммах ОПВ маркеры проследить на сейсмограммах ОПП, убедившись таким образом, в правильности корреляции годографа отраженной волны. Но на практике при высоком уровне шумов на сейсмотрассах, перекрывающихся по частотам с полезным сигналом, легко можно принять кажущуюся корреляцию маркеров на сейсмограмме ОПП за корреляцию отраженной волны. Борьба с этой проблемой можно за счет увеличения соотношения сигнал/помеха путем использования оптимальных фильтров. При проведении исследований на период

возбуждения колебаний рекомендуется временно отключать, если это выполнимо, источники техногенного шума. Кроме этого, целесообразно увеличивать количество накоплений на каждом ПВ и энергию единичного воздействия за счет увеличения массы тампера.

Важной особенностью заложеного в программное обеспечение процесса обработки данных сейморазведки является его итеративность. В основе этого лежит необходимость последовательного улучшения результатов обработки путем уточнения параметров выполняемых процедур. Применительно к обработке материалов сейморазведки МОВ и МСЛ итеративность выражается в последовательном подборе параметров фильтрации (с целью более уверенного прослеживания полезного отражения и ослабления регулярных помех) и переборе скоростных законов суммирования (МОВ) и значений базовых скоростей (МСЛ). Оптимальность выбора параметров фильтрации и скоростных законов суммирования оценивается по отфильтрованным сеймотрассам, временным разрезам, изображениям отражающих границ.

Заключение

Разработанный в ФГБНУ «РАНИМИ» и усовершенствованный в ходе настоящих исследований программный комплекс успешно апробирован на реальных данных сейсморазведки. Обработывались сейсмические данные, полученные за последние годы в ходе натурных наблюдений. Модификация программного обеспечения расширила его сферу применения в направлении решения задач наземной сейсморазведки, а также при выполнении исследований из полевых выработок.

В ходе исследований разработан и автоматизирован оптимальный алгоритм обработки по методу ОГТ, содержащий процедуры сортировки сейсмотрасс, фильтрации и нормировки сейсмических записей, расчета вертикальных спектров скоростей и подбора скоростных законов, расчета кинематических поправок и суммирования по ОГТ с учетом вариаций угла наклона отража-

ющих границ относительно линии профиля. Показана целесообразность использования преобразования Гильберта перед подбором скоростных законов. Выделение отражающих границ производится по присутствию на разрезах ОГТ осей синфазности колебаний с амплитудой выше фона помех либо по наличию характерных гипербол дифрагированных волн.

Для обработки результатов сейсмической локации разработан и автоматизирован алгоритм построения отражающих площадок, прослеженных в последовательных циклах наблюдений по нескольким типам волн. Показано, что критерием выделения предполагаемых тектонических нарушений является совпадение таких площадок.

Данное программное обеспечение обеспечит геофизическим службам и специализированным организациям выполнение обработки и анализа результатов сейсмических исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dresen L., Rüter H.* Seismic coal exploration, Part B: In-seam seismics // Handbook of Geophysical Exploration. Pergamon, 1994, 486 p.
2. *Павлович Р. Э., Дучков А. А., Яскевич С. В.* Использование рассеянных волн от размыва угольного пласта для снижения рисков разработки // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. — 2023. — № 2(54). — С. 51–59. DOI: 10.20403/2078-0575-2023-2-51-59.
3. *Соколов С. В., Салтымаков Е. А., Кормин А. Н.* Комплексные геофизические исследования состояния углепородного массива в условиях Кузбасса // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2017. — № 2. — С. 66–70.
4. *Lu Jun, Meng Xinghun, Wang Yun, Yang Zhen* Prediction of coal seam details and mining safety using multicomponent seismic data. A case history from China // Geophysics. 2016, vol. 81, pp. 149–165. DOI: 10.1190/geo2016-0009.1.
5. *Hongliang W., Maochen G.* Seismic wave propagation in coal seams: Finite element modeling and field tests // International Journal of Mining and Mineral Engineering. 2014, vol. 5, no. 3 pp. 229–385. DOI: 10.1504/IJMME.2014.064482.
6. *Teng Jiwen, Li Songying, Jia Mingkui, Lian Jie, Liu Honglei, Liu Guodong, Wang Wei, Schape Volker, Feng Lei, Yao Xiaoshuai, Wang Kang, Yan Yafen, Zhang Wanpeng* Research and application of in-seam seismic survey technology for disaster causing potential geology anomalous body in coal seam // Acta Geologica Sinica. 2019, vol. 94, no. 2, pp. 199–211. DOI: 10.1111/1755-6724.14372.
7. *Cai Wu, Dou Linming, Cao Anye, Gong Siyuan* Application of seismic velocity tomography in underground coal mines. A case study of Yima mining area, Henan, China // Journal of Applied Geophysics. 2014, vol. 109, pp. 140–149.

8. Schott W., Waclawik W. On the quantitative determination of coal seam thickness by means of in-seam seismic surveys // *Canadian Geotechnical Journal*. 2015, vol. 52, pp. 1–9. DOI: 10.1139/cgj-2014-0466.

9. Waclawik P., Schott W. Utilization of innovation of the ISS method – in seam seismics at the CSM Mine // *Gornicze Zagrozenia Naturalne*. 2011, vol. 2, pp. 517–524.

10. Greenhalgh S. A., Masonz I. M., Sinadinovski C. In-mine seismic delineation of mineralization and rock structure // *Geophysics*. 2016, vol. 65, no. 6, pp. 1908–1919. DOI: 10.1190/1.1444875.

11. Zou G., Xu Z., Peng S., Fan F. Analysis of coal seam thickness and seismic wave amplitude. A wedge model // *Journal of Applied Geophysics*. 2018, vol. 148, pp. 245–255. DOI: 10.1016/j.japgeo.2017.11.013.

12. Hu Ze'an, Pingsong Zhang, Guangquan Xu Dispersion features of transmitted channel waves and inversion of coal seam thickness // *Acta Geophysica*. 2018, vol. 66, no. 5, pp. 1001–1009. DOI: 10.1007/s11600-018-0192-4.

13. Yin Haiyang, Chen Tongjun, Song Xiong, Xu Haicheng, Li Wan Methods for predicting the thickness of coal seams based on seismic attribute optimization and machine learning // *Coal Geology & Exploration*. 2023, vol. 51, no. 5, pp. 164–170. DOI: 10.12363/issn.1001-1986.22.10.0801.

14. Yang Xue, Pei Jia-Xue, He Shao-Yong, Jiang Xue-Feng, Xie Tian-Shou, Gao Jian-Jun Research on thin reservoir prediction method in the coal seam distribution area // *Geophysical and Geochemical Exploration*. 2020, vol. 2, pp. 406–406. DOI: 10.11720/wtyht.2020.1397.

15. Fangbo Chen, Jie Zhu, Jiabao Wang, Yang Yang, Ibrar Iqbal, Tianyu Zhang, Ping Li Seismic attribute analysis of coal seams intruded by magmatic rock // *Petroleum Science and Technology*. 2022, vol. 4, no. 15, pp. 1878–1897. DOI: 10.1080/10916466.2022.2033263.

16. Fubiao Wei, Jiangbing Sun, Xiangqin Xu Analysis of high-resolution seismic exploration in coalfield geological exploration methods // *Academic Journal of Engineering and Technology Science*. 2022, vol. 5, no. 9, pp. 1–7. DOI: 10.25236/AJETS.2022.050901.

17. Ройтер М., Крах М., Кислинг У., Векслер Ю. А. Разработка метода сейсмоакустического мониторинга динамических явлений в очистных забоях угольных шахт // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2021. – № 1. – С. 28–35. DOI: 10.15372/FTPRPI20210104.

18. Разумов Е. Е., Простов С. М. Основные принципы построения систем сейсмического мониторинга // *Горный журнал*. – 2021. – № 1. – С. 8–12.

19. Анциферов А. В., Глухов А. А. Об автоматизации обработки сейсмических данных при прогнозе геологических нарушений угольных пластов методами отраженных волн и сейсмической локации // *Труды РАНИМИ*. – 2018. – Т. 1. – № 21. – С. 99–106.

20. Анциферов А. В., Глухов А. А., Туманов В. В., Сон Д. В., Оленюк С. П. Об алгоритме сейсмической томографии при прогнозе геологических нарушений угольных пластов // *Горные науки и технологии*. – 2018. – № 4. – С. 1–11.

21. Глухов А. А. Алгоритм метода дифрагированных волн по прогнозу дизъюнктивов угольных пластов // *Журнал теоретической и прикладной механики*. – 2021. – № 1 (74). – С. 73–82.

22. Глухов А. А., Туманов В. В., Анциферов В. А. Автоматизация обработки данных сейсмо-разведочных работ методом общей глубинной точки // *Труды РАНИМИ*. – 2019. – № 8 (23). – С. 93–100. **ПЛАЭ**

REFERENCES

1. Dresen L., Rüter H. Seismic coal exploration, Part B: In-seam seismics. *Handbook of Geophysical Exploration*. Pergamon, 1994, 486 p.

2. Pavlovich R. E., Duchkov A. A., Yaskevich S. V. The use of scattered waves from coal seam erosion to reduce the risks of mining. *Geology and mineral resources of Siberia*. 2023, no. 2(54), pp. 51–59. [In Russ]. DOI: 10.20403/2078-0575-2023-2-51-59.

3. Sokolov S. V., Saltymakov E. A., Kormin A. N. Integrated geophysical research of coal measures conditions in the Kuznetsk Basin. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2017, no. 2, pp. 66–70. [In Russ].

4. Lu Jun, Meng Xinghun, Wang Yun, Yang Zhen Prediction of coal seam details and mining safety using multicomponent seismic data. A case history from China. *Geophysics*. 2016, vol. 81, pp. 149–165. DOI: 10.1190/geo2016-0009.1.
5. Hongliang W., Maochen G. Seismic wave propagation in coal seams: Finite element modeling and field tests. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*. 2014, vol. 5, no. 3 pp. 229–385. DOI: 10.1504/IJMME.2014.064482.
6. Teng Jiwen, Li Songying, Jia Mingkui, Lian Jie, Liu Honglei, Liu Guodong, Wang Wei, Schape Volker, Feng Lei, Yao Xiaoshuai, Wang Kang, Yan Yafen, Zhang Wanpeng Research and application of in-seam seismic survey technology for disaster causing potential geology anomalous body in coal seam. *Acta Geologica Sinica*. 2019, vol. 94, no. 2, pp. 199–211. DOI: 10.1111/1755-6724.14372.
7. Cai Wu, Dou Linming, Cao Anye, Gong Siyuan Application of seismic velocity tomography in underground coal mines. A case study of Yima mining area, Henan, China. *Journal of Applied Geophysics*. 2014, vol. 109, pp. 140–149.
8. Schott W., Waclawik W. On the quantitative determination of coal seam thickness by means of in-seam seismic surveys. *Canadian Geotechnical Journal*. 2015, vol. 52, pp. 1–9. DOI: 10.1139/cgj-2014-0466.
9. Waclawik P., Schott W. Utilization of innovation of the ISS method – in seam seismics at the CSM Mine. *Gornicze Zagrozenia Naturalne*. 2011, vol. 2, pp. 517–524.
10. Greenhalgh S. A., Masonz I. M., Sinadinovski C. In-mine seismic delineation of mineralization and rock structure. *Geophysics*. 2016, vol. 65, no. 6, pp. 1908–1919. DOI: 10.1190/1.1444875.
11. Zou G., Xu Z., Peng S., Fan F. Analysis of coal seam thickness and seismic wave amplitude. A wedge model. *Journal of Applied Geophysics*. 2018, vol. 148, pp. 245–255. DOI: 10.1016/j.japgeo.2017.11.013.
12. Hu Ze'an, Pingsong Zhang, Guangquan Xu Dispersion features of transmitted channel waves and inversion of coal seam thickness. *Acta Geophysica*. 2018, vol. 66, no. 5, pp. 1001–1009. DOI: 10.1007/s11600-018-0192-4.
13. Yin Haiyang, Chen Tongjun, Song Xiong, Xu Haicheng, Li Wan Methods for predicting the thickness of coal seams based on seismic attribute optimization and machine learning. *Coal Geology & Exploration*. 2023, vol. 51, no. 5, pp. 164–170. DOI: 10.12363/issn.1001-1986.22.10.0801.
14. Yang Xue, Pei Jia-Xue, He Shao-Yong, Jiang Xue-Feng, Xie Tian-Shou, Gao Jian-Jun Research on thin reservoir prediction method in the coal seam distribution area. *Geophysical and Geochemical Exploration*. 2020, vol. 2, pp. 406–406. DOI: 10.11720/wtyht.2020.1397.
15. Fangbo Chen, Jie Zhu, Jiabao Wang, Yang Yang, Ibrar Iqbal, Tianyu Zhang, Ping Li Seismic attribute analysis of coal seams intruded by magmatic rock. *Petroleum Science and Technology*. 2022, vol. 4, no. 15, pp. 1878–1897. DOI: 10.1080/10916466.2022.2033263.
16. Fubiao Wei, Jiangbing Sun, Xiangqin Xu Analysis of high-resolution seismic exploration in coalfield geological exploration methods. *Academic Journal of Engineering and Technology Science*. 2022, vol. 5, no. 9, pp. 1–7. DOI: 10.25236/AJETS.2022.050901.
17. Reuter M., Krach M., Kisling W., Veksler Yu. A. Wexler Development of the method for seis-moacoustic monitoring of dynamic phenomena in the treatment faces of coal mines. *Fiziko-tekhnicheskije problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2021, no. 1, pp. 28–35. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20210104.
18. Razumov E. E., Prostov S. M. Basic principles of building seismic monitoring systems. *Gornyi Zhurnal*. 2021, no. 1, pp. 8–12. [In Russ].
19. Antsiferov A. V., Glukhov A. A. On automation of seismic data processing in predicting geological disturbances of coal seams using reflected waves and seismic location methods. *Proceedings of RANIMI, Donetsk*. 2018, vol. 1, no. 21, pp. 99–106. [In Russ].
20. Antsiferov A. V., Glukhov A. A., Tumanov V. V., Son D. V., Olenyuk S. P. On the algorithm of seismic tomography in predicting geological disturbances of coal seams. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2018, no. 4, pp. 1–11. [In Russ].
21. Glukhov A. A. Algorithm of the diffracted wave method for predicting disjunctivities of coal seams. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2021, no. 1 (74), pp. 73–82. [In Russ].
22. Glukhov A. A., Tumanov V. V., Antsiferov V. A. Automation of seismic data processing using the common deep point method. *Proceedings of RANIMI, Donetsk*. 2019, no. 8 (23), pp. 93–100. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Анциферов Андрей Вадимович¹ – член-корреспондент

НАН Украины, д-р техн. наук,

научный руководитель, e-mail: ranimi@ranimi.org,

Глухов Александр Александрович¹ – д-р техн. наук,

старший научный сотрудник,

заместитель директора по научной работе,

e-mail: glukhov1964@yandex.ru,

¹ Республиканский академический научно-исследовательский

и проектно-конструкторский институт горной геологии,

геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела (РАНИМИ).

Для контактов: Глухов А.А., e-mail: glukhov1964@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A. V. Antsiferov¹, Corresponding Member

of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Dr. Sci. (Eng.), Scientific Supervisor,

e-mail: ranimi@ranimi.org,

A. A. Glukhov¹, Dr. Sci. (Eng.),

Senior Researcher, Deputy Director for Science,

e-mail: glukhov1964@yandex.ru,

¹ Republican Academic Research and Design Institute

of Mining Geology, Geomechanics, Geophysics

and Surveying (RANIMI), Donetsk.

Corresponding author: A. A. Glukhov, e-mail: glukhov1964@yandex.ru.

Получена редакцией 03.07.2024; получена после рецензии 28.07.2024; принята к печати 10.10.2024.

Received by the editors 03.07.2024; received after the review 28.07.2024; accepted for printing 10.10.2024.



НОВИНКИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ГОРНАЯ КНИГА»



Ненина А.

Угль, пылающий огнём.

Александр Александрович Скочинский

Биографический очерк к 150-летию со дня рождения

Год: 2024

Страниц: 164

ISBN 978-5-98672-583-3

УДК 82-9