

## Использование межскважинных сейсмических исследований при изучении угольных карьеров. The crosshole seismic reflection method in opencast coal exploration<sup>1</sup>

М. J. Findlay<sup>2,3</sup>, N. R. Goulty<sup>2</sup> и J. E. Kragh<sup>2,4</sup>

### Введение

При разведке угольных карьеров в Великобритании, бурятся скважины по густой сетке в целях обеспечения необходимой информации по количеству и качеству угольных запасов и геологической структуре. Обычно расстояние между скважинами 40-60 м, но оно может быть сокращено рядом с провалами или там, где имеются старые камерно-столбовые горные выработки. Даже несмотря на плотность скважин, невозможно обнаружить разломы со смещением менее 2-3 м, и они могут представлять собой опасность нестабильности при разработке карьера, что может быть особенно важно на границе участков. Также, оценки количества запасов угля можно улучшить, если более точно обнаруживать старые горные выработки.

Потенциал скважинных сейсмических съемок в приложении к этому вопросу обсуждался более детально в ранней работе (Kragh et al. 1991). В данной работе мы делаем сообщение о развитии межскважинного метода МОВ, с использованием разведывательных скважин в карьере, в целях получения сейсмического разреза между скважинами. В качестве источников применяются небольшие взрывные заряды, в качестве приемников - гидрофоны. Использование скважинных источников и приемников дает превосходное разрешение по сравнению с наземной сейсмической съемкой и ВСП; полоса частот обычно достигает 200-500 Гц.

Читатели, интересующиеся применением межскважинных съемок в целях выделения коллекторов углеводородов, отмечают, что условия окружающей среды для наших съемок были относительно нетребовательными: низкие температуры и гидростатическое давление в необсаженных скважинах при относительно близких разностях. При всем при том, результаты указывают на потенциал данного метода для глубинных съемок более крупного масштаба, проводимых в осадочных породах, там, где будут успешно распространяться даже более высокие частоты (например, Harris 1988).

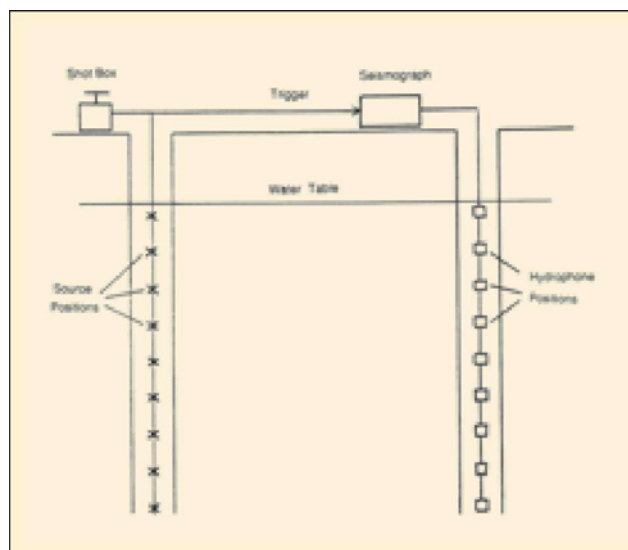
### Сбор данных

Группа из 12 гидрофонов с расстоянием между ними 2 м помещается в одну из скважин (Рис. 1). Небольшие взрывные заряды (один электродетонатор или детонатор с 15 г химического взрывчатого вещества) подрываются последовательно в соседних скважинах с интервалами 2 м. Покрывтие расширяется путем перемещения группы гидрофонов в приемную скважину и повторения последовательности возбуждений.

Сигнал запуска сейсмоприемников достигается путем обертывания провода на конец детонатора. При подрыве разрывается незамкнутый контур, что дает точную отметку момента. Необходимо, чтобы все точки приема и возбуждения находились ниже уровня грунтовых вод, чтобы обеспечить хороший акустический контакт с породой. Типичная сейсмограмма ОПВ показана на Рис. 2а.

Отклонение скважин от вертикали измеряется с помощью маятникового инклинометра. Это устройство работает в скважине внутри специализированной обсадки, которая выполнена таким образом, что наклоны можно измерять для двух перпендикулярных азимутов. Отклонение от вертикали в этих неглубоких скважинах обычно были незначительны (не более 3 м при самом глубоком положении источника или приемника), и соседних скважинах отклонения отмечаются в тех же диапазонах для сходных направлений.

Для того чтобы проиллюстрировать область наблюдения, которая может быть покрыта при таких съемках, положение точки отражения для взаимного положения источника и приемника для пары вертикальных скважин на расстоянии 50 м одна от другой показаны на Рис. 3.



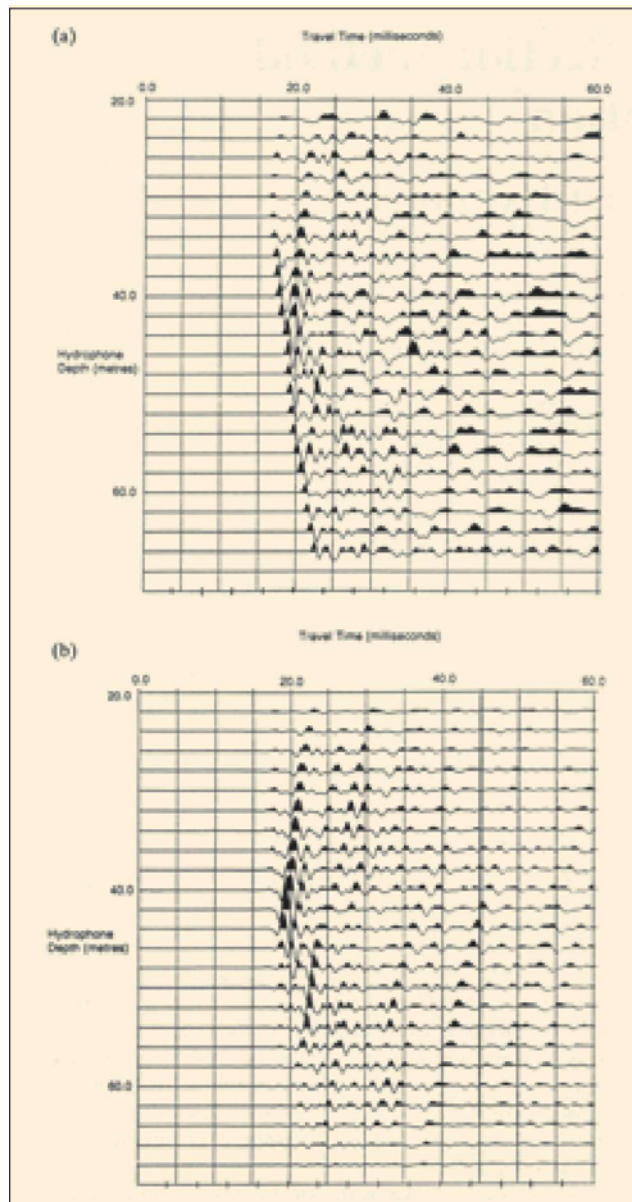
**Рисунок 1** Схематическая диаграмма полевой расстановки для сбора данных. Расстояния между скважинами обычно 30-60 м и расстояния между источниками/приемниками 2 м для диапазона глубин 40 м или более.

<sup>1</sup> Представлено на 52ой встрече EAEG, Копенгаген, май/июнь 1990.

<sup>2</sup> Department of Geological Sciences, University of Durham, South Road, Durham DH1 3LE, UK.

<sup>3</sup> Настоящий адрес: The Petroleum Science and Technology Institute, c/o Department of Petroleum Engineering, Heriot-Watt University, Research Park, Riccarton, Edinburgh EH14 4AS, UK.

<sup>4</sup> Настоящий адрес: Seismograph Service (England) Ltd, Holwood, Westerham Road, Keston, Kent BR2 6HD, UK.



**Рисунок 2** Сейсмограмма ОПВ от взрыва на глубине 30 м с гидрофонами в диапазоне глубин 22-66 м: (а) исходные данные с применением усиления с переходной зоной, пропорционального квадратному корню времени пробега; (б) показано поле восходящих волн на приемниках после разделения поля волн в  $f$ - $k$  области.

Эти положения были рассчитаны для постоянного поля скоростей в предположении горизонтальных границ. Они указывают на ту точку, где будет происходить отражение для лучей, которые выходят из источника в нисходящем направлении и падают на приемник в восходящем направлении (т.е. однократные отражения в поле восходящих волн). Диаграмму можно инвертировать, чтобы продемонстрировать покрытие поля нисходящих волн, включая однократные отражения от границ над положениями источников-приемников. Покрытие разреза простирается выше уровня грунтовых вод и ниже самого глубокого положения источников и приемников, хотя и с уменьшением мощности.

## Обработка данных

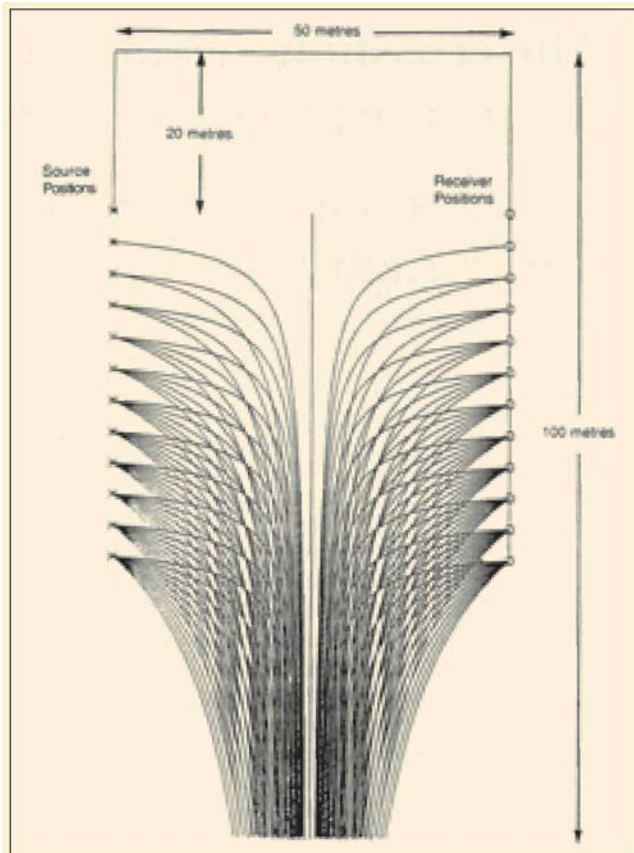
Краткая схема графа обработки представлена на Рис. 4. Прежде всего, производится разделение поля восходящих и нисходящих волн на приемниках путем фильтрации сейсмограмм ОПВ в области волновых чисел ( $f$ - $k$ ). Поле восходящих волн сейсмограммы ОПВ приведенной на Рис. 2а, показано на Рис. 2б. Можно выполнить мьютинг вступления прямой волны, до или после разделения поля волн. Включение прямых волн в процедуру разделения поля может привести к проблемам реверберации в фильтрованных данных, но для всех трасс, где присутствуют прямые волны, скажем, нисходящие и там где интересующие нас отражения являются восходящими, предпочтительно выполнять мьютинг после разделения поля волн с целью сохранения как можно большей энергии отраженных волн. Расстояние между приемниками должно быть меньше чем половина кажущейся длины волны по вертикали для того, чтобы избежать пространственного аляйсинга. Расстояние равное 2 м достаточно мало для полосы частот сигнала и поля скоростей в таких малоглубинных исследованиях.

Общей проблемой скважинных приемников являются трубные волны в данных. Мы наблюдали их в некоторых группах данных межскважинных наблюдений, там, где у них была более низкая полоса частот, чем у объемных волн. Иногда они выходят из вершины (или УГВ) и основания приемной скважины, а наиболее часто из глубинных областей угольных пластов. Вероятно эти оси синфазности генерируются путем взаимодействия прямых объемных волн с неоднородностями в приемной скважине. В наших данных, там, где наблюдались трубные волны, они хорошо подавлялись путем  $f$ - $k$  фильтрации.

Перед тем, как визуализировать данные, предпочтительно сделать форму импульса нуль-фазовой с плоским амплитудным спектром в интервале полосы частот полезного сигнала. Эффективные импульсы поля восходящих и нисходящих волн оцениваются отдельно из-за различий в короткопериодных кратных. В каждом случае предполагается, что импульс минимально-фазовый и рассчитывается по осредненной функции автокорреляции всех трасс по сейсмограмме ОПВ (с разделенным полем).

Преобразование ВСП-ОГТ (смотрите Dillon and Thomson 1984) использовалось для визуализации данных по точкам отражения в первой съемке подобного типа, которую мы обрабатывали (Goulty et al. 1990). Далее, мы применяли ту же методику для оптимизации поля скоростей перед миграцией. Хотя, ранее мы отказались от нее. Первоначальная оценка поля скоростей получается путем измерения вертикального времени в каждой скважине для интервала 2 м, и по томограмме времен пробега, полученной путем инверсии времен пробега прямых волн с помощью метода синхронного итеративного обращения (SIRT).

Разделенное поле волн для каждой сейсмограммы ОПВ мигрируется с использованием обобщенного интеграла Кирхгофа согласно Dillon (1990), который работает для аппроксимации в дальней зоне. К каждой трассе применяется усиление с переходной зоной пропорциональное квадратному корню времени пробега, вслед за чем производится спектральная коррекция, соответствующая предположению о 2D структуре. Лучи трассируются от каждой точки сетки разреза с целью отображения для каждого положения источника и приемника, и в соответствии с каждым рассчитанным временем пробега.



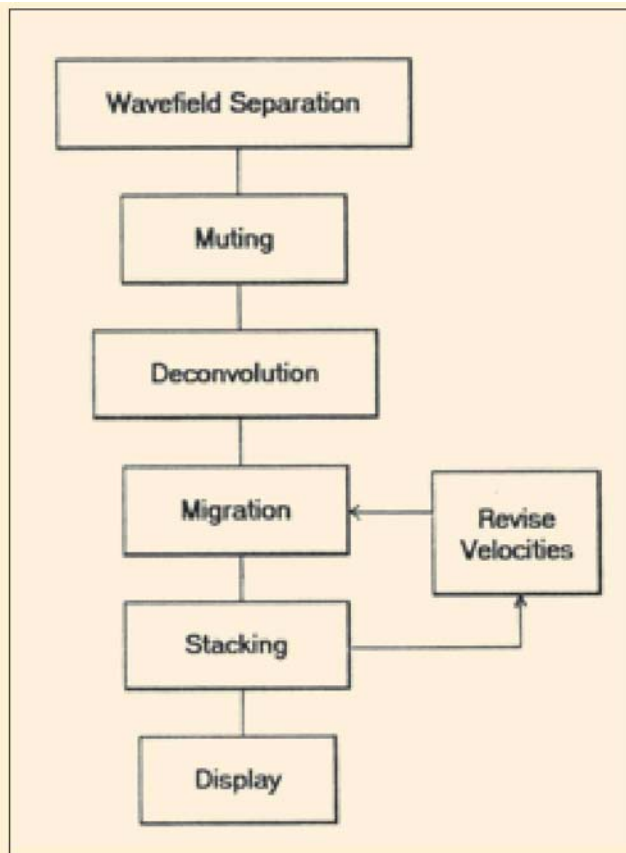
**Рисунок 3** Положения точек отражения для однократных восходящих отражений в межскважинной съемке типичных размеров. Для ясности показаны только положения источника и приемника на расстояниях 4 м.

Значения амплитуд суммируются для каждой 'точки дифракции' по апертуре, которая включает усечения  $\pm 22.5^\circ$ .

Мигрированное поле волн суммируется для получения одного разреза для восходящих отражений и одного для нисходящих отражений. Полярность разреза нисходящих отражений должна быть обращена, поскольку знак коэффициентов отражения меняется когда волна падает с противоположной стороны границы. Любые нестыковки при суммировании указывают на ошибки в поле скоростей, которое требуется модифицировать и процедуру миграции повторить. Затем мигрированные поля восходящих и нисходящих волн комбинируются в окончательный разрез.

### Результаты

Результаты двух съемок на разведочном участке в Йоркшире, Англия, представлены в данной работе. Одна идет через ненарушенный грунт а другая через зону с взбросами, при этом приблизительная вертикальная высота взброса оценивается в 25 м. В первой съемке, скважины находились на расстоянии 41 м. Детонаторы и гидрофоны были размещены с интервалами 2 м в соответствующих скважинах в интервале глубин 10-60 м. На рисунках 5a и b приведены суммированные, мигрированные разрезы нисходящего и восходящего полей волн. Принята нормальная полярность SEG, поэтому отражение от кровли угольного пласта показано черным.



**Рисунок 4** Схема обработки данных межскважинной сейсморазведки MOB.

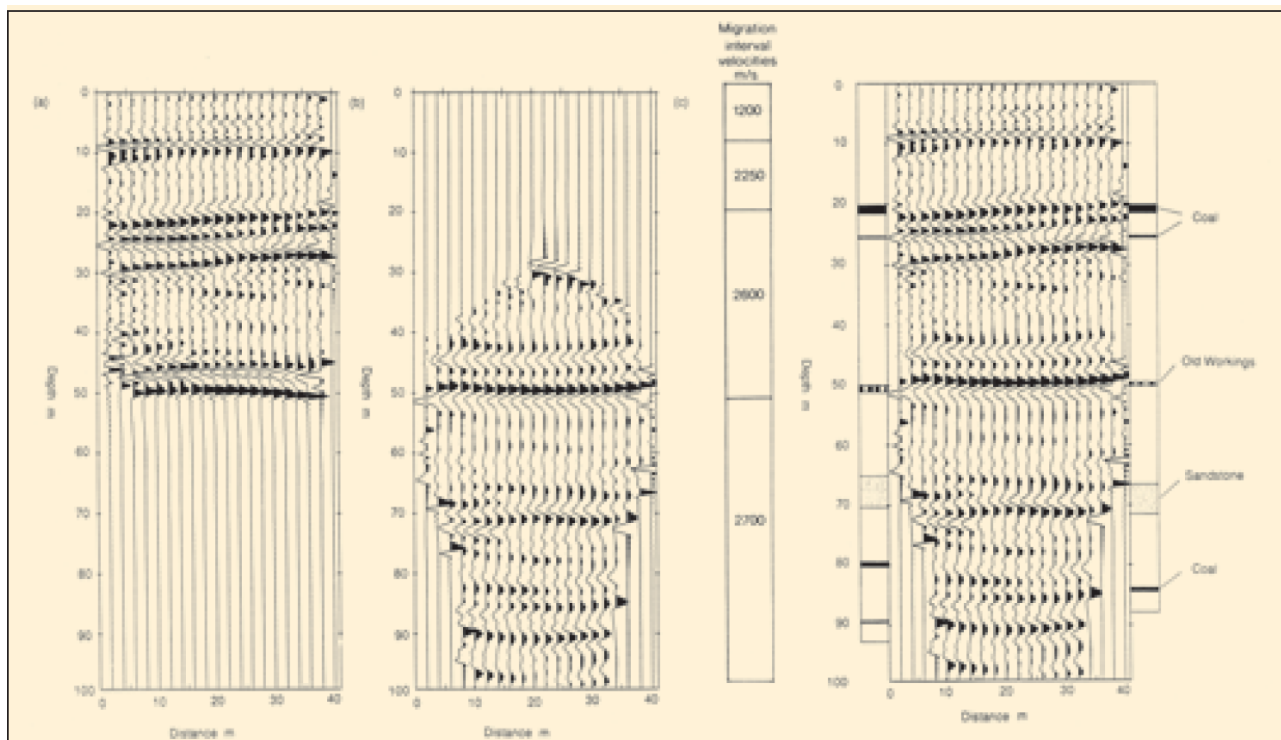
Очень трудно отрегулировать поле скоростей для миграции, так чтобы соответствовали перекрывающиеся части разрезов восходящей и нисходящей волн. Следовательно, уместно скомбинировать два разреза с использованием дополнительных косинусных переходных зон над зоной с низкой отражательной способностью для получения полного разреза Рис. 5с.

Угольные пласты дают сильные отражения в разрезе, хотя имеется высокоамплитудное отражение на границе грунтовых вод. Незначительные нестыковки по глубинам между темными пиками и кровлей угольного пласта указывают на то, что поле скорости было оценено не вполне идеально.

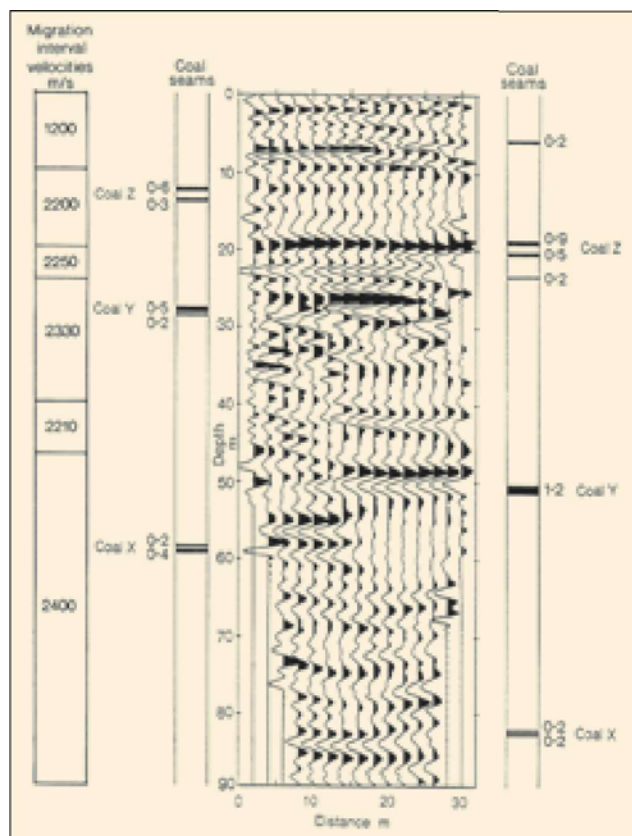
Наличие небольшого разлома между отметками глубин 70 и 80 м в скважине слева очевидно по отсутствию части разреза между толщей песчаника и соседним с ней пластом угля, который его подстилает. К сожалению, разлом нельзя пропикировать по сейсмическому разрезу, потому что он слишком близко от скважины, или из-за слабости прохождения сигнала через переработанный пласт на глубине 50 м. Использование более мощных зарядов могло бы помочь решить эту последнюю проблему.

Во второй съемке, скважины располагались выше 30м друг от друга. Детонаторы и гидрофоны помещались с интервалом 2 м при среднем диапазоне глубин 10-50 м. Мигрированный временной разрез, при комбинировании восходящих и нисходящих отражений, отображает зону разломов достаточно четко (рис. 6). Отражение от угольного пласта Z прослеживается по разрезу от скважины в правой части, и можно сделать вывод о разломе с вертикальным смещением 7 м





**Рисунок 5** Суммированные разрезы после глубинной миграции до суммирования по данным съемки: (а) поле нисходящих волн; (б) поле восходящих волн; (с) комбинированное поле восходящих и нисходящих волн. Поле скоростей, используемое для миграции, показано сбоку.



**Рисунок 6** Финальный разрез после глубинной миграции до суммирования съемки над областью взбросов. Поле скоростей, используемое при миграции, приведено сбоку.

на уровне этого горизонта, вблизи от скважины, расположенной слева. Более крупный разлом, с вертикальным смещением 15 м, пересекает скважину в левой части между угольными пластами Z и Y. Усечение отражений от угольного пласта Y по направлению вправо, и отражений от угольного пласта X влево в зоне разлома четко видны на данных.

#### Обсуждение и заключение

Наиболее важным этапом обработки была корректная оценка поля скоростей для последующей глубинной миграции до суммирования. Настройка скорости на одном интервале для перемещения одного отражающего горизонта обычно также требует регулировки остального поля скоростей. Поле скоростей в угольном пласте анизотропное, и нет сомнений, что будет необходимо ввести анизотропию для получения наилучших результатов. Мы проводили эксперименты с общей анизотропией 15%, при чем скорости были больше в горизонтальном направлении, чем в вертикальном, на что указывали данные вертикального времени и данные межскважинных измерений скорости прямой волны. Однако, результаты от этого не улучшились.

Мы смогли подавить трубные волны в наших данных путем применения фильтрации в f-k области, но они могли бы быть более доминантными, и поэтому представлять гораздо больше проблем, в других межскважинных данных. Например, Albright and Johnson (1990) наблюдали трубные волны в приемной скважине, которые генерировались трубными волнами в скважине-источнике и передавались между скважинами в виде канальной волны в пласте угля. Однако, наш опыт в северной Англии говорит о том, что не всегда можно генерировать каналовые волны в угольных пластах залегающих на глубине менее 100 м (Goulty et al. 1990), даже если есть такое желание для проверки непрерывности угольного пласта между скважинами!



*first break* том 25, июль 2007

Результаты говорят о том, что с помощью межскважинного сейсмического МОВ можно получить высокоразрешенные изображения угольных пластов. От угольных пластов мощностью в несколько десятков сантиметров можно получить высокоамплитудные отражения, а длины волн, присутствующие в разрезе, предполагают возможность обнаружения изолированных небольших разломов с амплитудой смещения около 1 м. Недостаток покрытия зон, располагающихся вблизи и непосредственно под скважиной является ограничением этого метода; однако, эта зона может быть освещена, используя сейсмический метод МОВ «из скважины на поверхность» (Kragh et al. 1991). Совместно с сейсмическими профилями «из скважины - на поверхность», метод межскважинной сейсморазведки на отраженных волнах должен быть полезным при исследовании угольных карьеров на предмет обнаружения небольших размеров на границах участков, которые могут представлять собой опасность при проведении выработки открытым способом. Его также можно использовать для обнаружения границ старых горных выработок между скважинами. Это может помочь улучшить оценку запасов участков в контексте разведки, и может быть более полезным при изучении участков под строительство гражданских сооружений. Межскважинные сейсмопрофили можно также получать под препятствиями, такими как строения или водные преграды, когда бурение и установка сейсмоприемников на грунт непрактично.

## Благодарности

Эта работа выполнена благодаря поддержке British Coal, DENI, NERC и SERC. Мы благодарим геологический персонал British Coal Opencast, особенно Mel Jones, за профессиональную помощь. Однако, мнения, наблюдения и заключения, приведенные в данной работе, принадлежат авторам, и не всегда совпадают с мнениями British Coal Corporation.

*Получено 16 июля 1991; принято в печать 27 августа 1991.*

## Ссылки

- Albright, J. N. and Johnson, P. A. 1990. Cross-borehole observation of mode conversion from borehole Stoneley waves to channel waves at a coal layer. *Geophysical Prospecting* **38**, 607-620.
- Dillon, P. B. 1990. A comparison between Kirchhoff and GRT migration on VSP data. *Geophysical Prospecting* **38**, 757-777.
- Dillon, P. B. and Thomson, R. C. 1984. Offset source VSP surveys and their image reconstruction. *Geophysical Prospecting* **32**, 790-811.
- Goult, N. R., Thatcher, J. S., Findlay, M. J., Kragh, J. E. and Jackson, P. D. 1990. Experimental investigation of crosshole seismic techniques for shallow coal exploration. *Quarterly Journal of Engineering Geology* **23**, 217-228.
- Harris, J. M. 1988. Cross-well seismic measurements in sedimentary rocks. 58th Meeting. Society of Exploration Geophysicists, Expanded Abstracts, 147-150.
- Kragh, J. E., Goult, N. R. and Findlay, M. J. 1991. Hole-to-surface seismic reflection surveys for shallow coal exploration. *First Break* **9**, 335-344.