

## Поиск полезных ископаемых

## Использование трехмерной сейсморазведки с высокой разрешающей способностью при разработке неглубоких платиновых месторождений

## Application of high-resolution 3D seismic to mine planning in shallow platinum mines

**Eric Gillot<sup>1</sup>, Mark Gibson<sup>2</sup>, Dominique Verneau<sup>1</sup> и Stephane Laroche<sup>1</sup> объясняют, каким образом трехмерная сейсморазведка смогла стать достойной альтернативой повсеместному бурению в рамках проекта по разработке месторождений платины.**

**З**а последнее десятилетие трехмерная сейсморазведка использовалась при разработке платиновых месторождений в Южной Африке. Трехмерная сейсморазведка не проводилась практически нигде, кроме Западного Бушвельда, где глубина извлечения руды составляет от 500 до 2000 м. Руда разрабатывается в основном при помощи вертикальных шахт, а также - в меньшей степени - наклонных шахт. В Восточном Бушвельде месторождения находятся ближе к поверхности, на глубине менее 400 м. Задача горнодобывающих компаний - получить трехмерные модели с высоким разрешением, с максимальной разрешающей способностью по вертикали на данной глубине разведки. Кроме того, затраты на геофизические исследования должны быть ниже, чем затраты на повсеместное бурение. Таким образом, на двух основных местах разработки в Восточном Бушвельде была проведена экспериментальная сейсморазведка.

## Изучение применяемых методов разведки

Компания CGG в 2001 г. произвела двумерную сейсморазведку на месторождении в Восточном Бушвельде при помощи взрывного источника и различных вибрационных источников. Несмотря на положительные результаты, требования горнодобывающих компаний не были выполнены. От взрывного источника отказались из-за его экономической нецелесообразности. Вибросейсмический источник воспроизводил результаты с неудовлетворительным качеством вследствие частотного состава, создаваемого используемыми вибраторами (такими, как M18) и сложности анализа статических поправок. Исходя из этого, было принято решение разработать новое поколение вибраторов Nomad 65, которые создают частоты до 250 Гц, и сосредоточиться главным образом на коррекции статических поправок. Поскольку двумерные исследования не обеспечивали требуемое заказчиком качество моделирования месторождения, было также решено направить усилия непосредственно на трехмерную сейсморазведку.

## Предполагаемая реализация метода

Для решения задач планирования и разработки месторождений компания CGG начала экспериментальное трехмерное исследование, целью которого являлись две основные задачи:

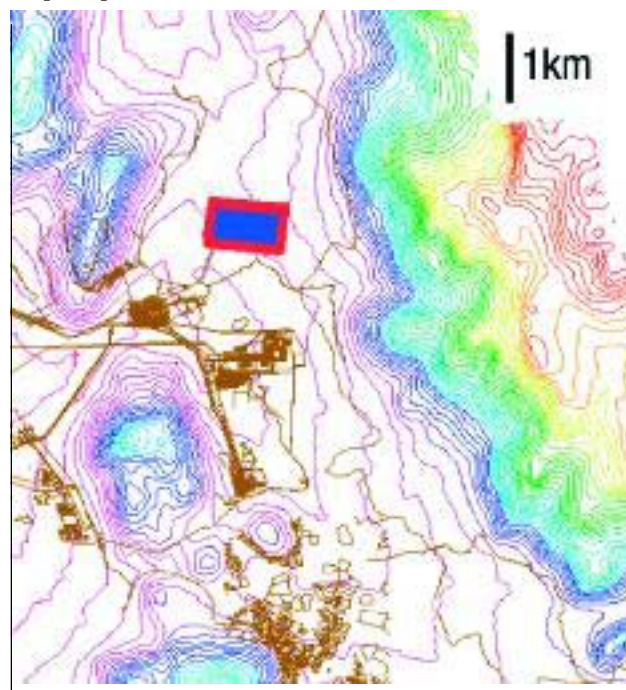
- Проверить экономическую целесообразность сейсмического метода проектирования разработки месторождения путем постепенного увеличения шага дискретизации таких параметров исследования, как расстояние между профилями, расстановка сейсмоприемников и т.д., при этом сохранить преимущество данного исследования с финансовой точки зрения по сравнению с более привычным методом повсеместного бурения.
- Собрать информацию о большом месторождении, в котором заинтересован заказчик и на котором можно незамедлительно приступить к проектированию разработки.

Участок, выбранный в качестве первого объекта (рис.1), расположен в долине с гидрографической сетью (донга), с выветренными породами, местами достигающими уровня норитового подстилающего основания. В круг задач входило получение высококачественного сейсмического изображения путем ввода сложных статических поправок, вызванных специфическими геологическими условиями на глубине до 50 м.

Основное рудное скопление, обнаруженное на этом участке - UG2 (мощность <1м). Он представляет собой моноклиналичную структуру высотой около 2 м и длиной около 30 м. Перед исследованием ставилась цель получить изображение на глубине от 100 до 400 м с углом падения 10° и проследить нарушения (разломы, флексуры и т.п.) рудных залежей металлов платиновой группы на глубине до 10 м.

## Проектирование

Размеры ячейки сетки, исходя из технических возможностей и экономической целесообразности, были выбраны равными 2,5 x 2,5 м.



**Рис. 1** Рельеф и место проведения исследования.

<sup>1</sup>CGG France, 1 rue Leon Migaux, F-91341 Massy cedex

<sup>2</sup>GSD, Z-45060

## Поиск полезных ископаемых

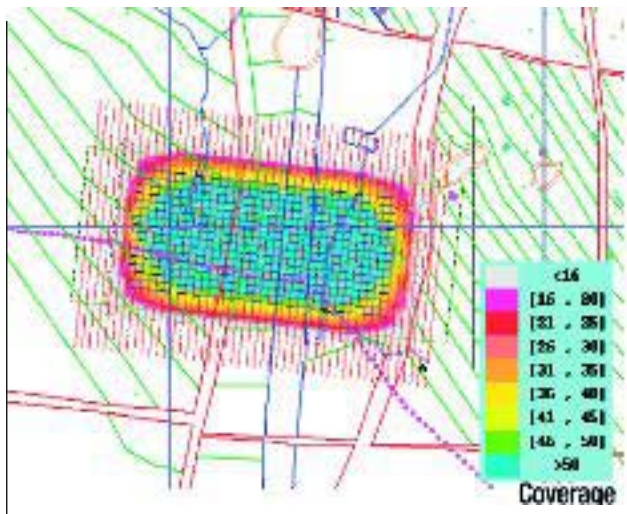


Рис. 2 Покрывание при удалении менее 300 м.

Расстояние между линиями приемников и вибраторов было установлено равным 20 м, поскольку малая глубина рудных скоплений определила необходимость небольших удалений (рис. 2).

### Проведение исследования

Съемка 3048 скоростных профилей (VP) осуществлена путем расстановки 16 линий, состоящих из 140 сейсмотрасс каждая. Вибратор №65 (Рис. 3) генерировал свип-сигнал в диапазоне от 40 до 250 Гц при 50% нагрузке, а также адаптированный свип-сигнал для компенсации потерь толкающего усилия, наблюдаемых при 100 и 150 Гц в отдельных пикетах по всей исследуемой территории во время предварительных исследований (рис. 4).

### Стандартная обработка

#### Ввод статических поправок

Предварительный ввод статических поправок был осуществлен методом общей линейной инверсии (GLI) трехмерного преломления волн, используемого для пикирования и интерпретации первых вступлений, и для ввода статических поправок была создана двуслойная приповерхностная модель (рис. 5). Ввод статических поправок на отдельном скоростном профиле показан на рис. 6.

#### Автоматический ввод неучтенных статических поправок

Ввод статических коротковолновых и длинноволновых поправок за поверхностные условия был осуществлен при помощи небольшого, неглубокого окна, соответственно неглубоким геологическим условиям.

#### Фильтрация в области FKx-Ky

В области FKx-Ky была применена пространственная фильтрация. Процесс проводился на пересекающихся выборках после восстановления амплитуд усиления и первичных статических поправок (рис. 7).

#### Анализ скоростей

Суммарный разрез, полученный на этом этапе, не обладает высокой чувствительностью к изменениям скорости; тем не менее, можно получить корректное суммарное изображение с немного неточным значением



Рис. 3 Вибратор Sercel Nomad 65 (26700 кН).

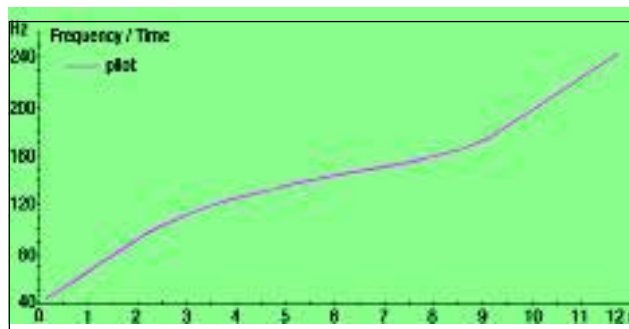


Рис. 4 Выбранное нарастание свип-сигнала после предварительных исследований.

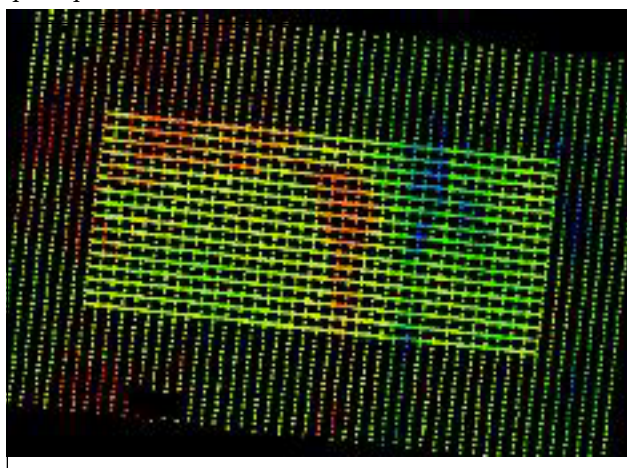


Рис. 5 Статические поправки, полученные методом GLI (статические значения варьировали от 2,6 до 35 мс).

скорости (приблизительно  $\pm 5\%$ ). На рис. 8 изображены суммарные разрезы с постоянной скоростью, шаг между разрезами составляет 600 м/с, они необходимы для визуальной регистрации изменений в суммарном разрезе.

Другая сложность вызвана мощностью выветренного пласта, которая может составлять до 50 м. Это довольно много по сравнению с исследуемой глубиной (100-300 м),



## Поиск полезных ископаемых

поэтому предполагается влияние скорости выветренного пласта на предельную эффективную скорость.

#### Частотный состав и разрез NMO

Определив функции скорости, типичную проблему растяжения NMO можно решить, введя очень точно функцию мьютинга. В данном случае эта проблема особенно актуальна ввиду малой глубины месторождения. Поэтому для определения сохранности высоких частот, крайне важных для обнаружения руды, было проведено испытание на синтетических данных.

Входная модель для данного теста – отраженный сигнал в наивысшей точке при 100 мс (времени пробега) и со скоростью 4500 м/с; импульс обладает полосой пропускания 30-200 Гц (см. сигнал голубого цвета на рис. 9).

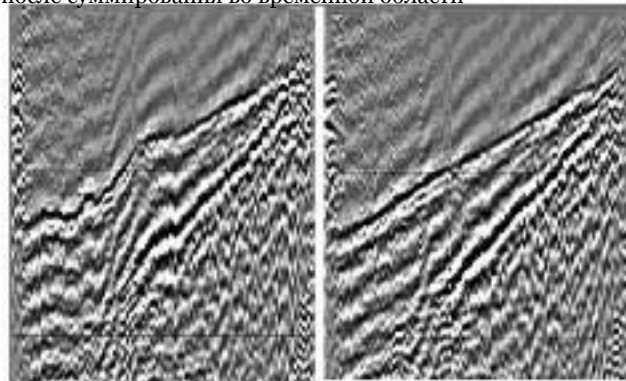
При NMO происходит растяжение удаленных сейсмотрасс (см. рис. 9, красная линия). Частотный состав трассы, смещенной на 240 м, снизился на 10 дБ при 200 Гц (это можно устранить простым «отбеливанием»). Полученный результат показан зеленым цветом на рис. 9.

Этот тест четко продемонстрировал, что потенциальная потеря разрешающей способности, вызванная NMO, не имеет критического значения в данном случае. Следует ожидать куда большего влияние выветренной приповерхностной области ввиду ее свойств поглощения высоких частот.

#### Миграция во временной области после суммирования сейсмических данных

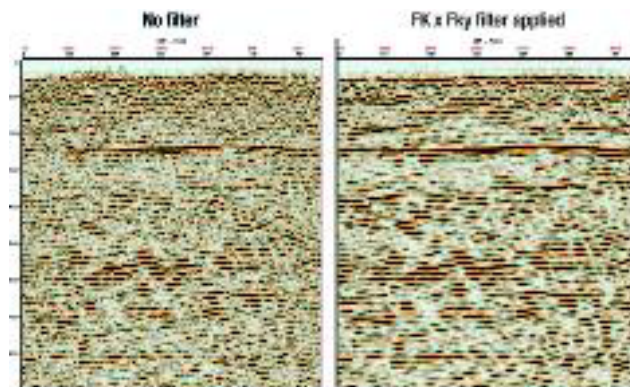
До миграции во временной области были опробованы и проверены различные методы обработки после суммирования для улучшения соотношения сигнал-помеха и увеличения частотного состава. Сюда входило линейное ослабление помех с применением трехмерного конусообразного фильтра FKx-Ky в области вдоль и поперек профиля, расчет затухания, и в завершение – усреднение энергетического спектра совместно с полосовым фильтром диапазона 60 – 180 Гц (изображение в центре на рис. 10).

Ввиду ограниченного размера трехмерной поверхности (750 м в длину) и высоких скоростей произошло обрезание оператора миграции для большинства данных ниже 300 мс. Поэтому к суммарному разрезу было решено применить миграцию после суммирования во временной области

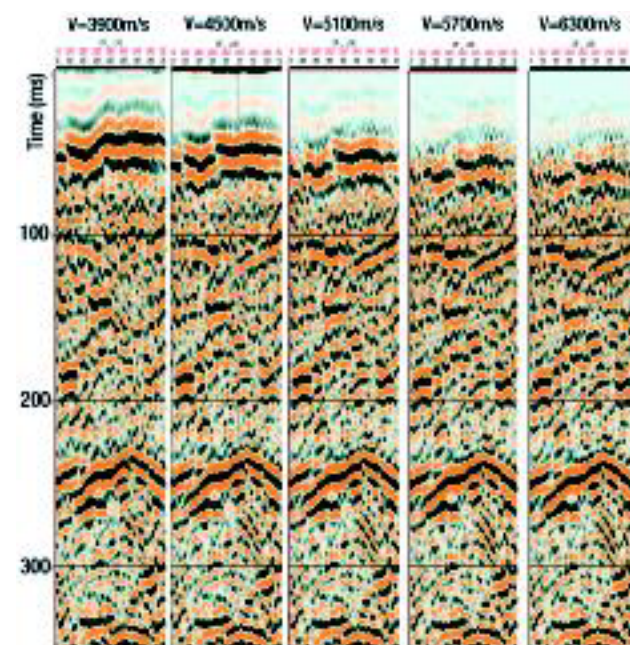


**Рис. 6** Необработанные данные ОПВ без применения статических поправок методом GLI (слева) и после применения метода (справа).

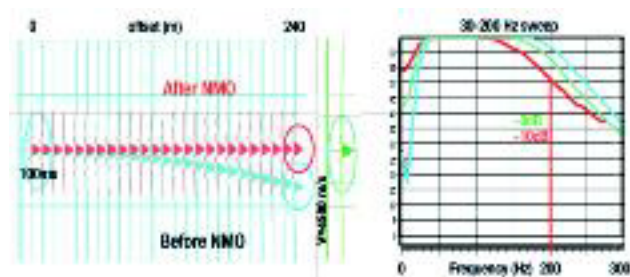
и подсчета затухания. После миграции были применено усреднение энергетического спектра (60-180 Гц) и динамическое выравнивание трасс ( $L=200$ мс).



**Рис. 7** Использование фильтра FKx-Ky на суммарном разрезе.



**Рис. 8** Развертка постоянной скорости для области по линии наблюдения.



**Рис. 9** Тест на сохранение высоких частот по синтетическим данным.



## Поиск полезных ископаемых

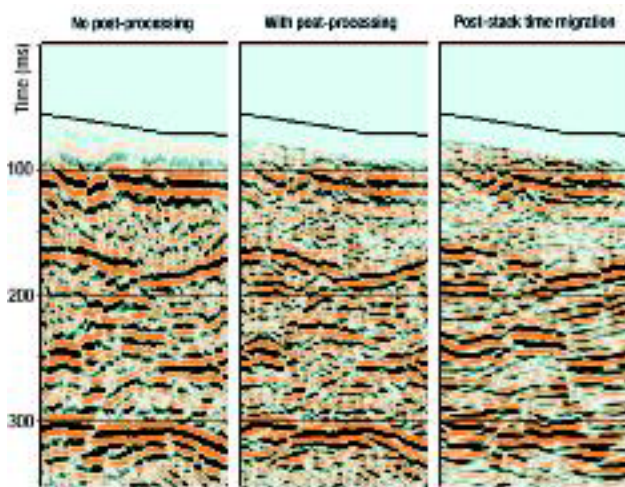


Рис 10 Окончательная миграция после суммирования.

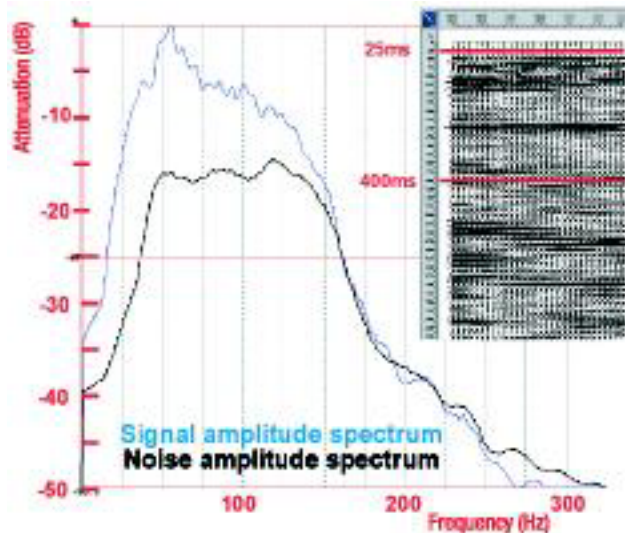


Рис 11 Спектр сигнала и шума в разрезе. Спектры были рассчитаны во временном окне 25-400 мс.

### Заключение

Чтобы получить трехмерную модель в случае нахождения объектов на таких малых глубинах важно правильно выбрать диапазон удалений и функции мьютинга с целью сохранения высоких частот. Соотношение между мощностью слоя выветренных пород и исследуемой глубиной высоко, что подразумевает, что скорость в слое выветренных пород скажется на скорости суммирования и миграционной предельной эффективной скорости.

Было получено довольно хорошее соотношение сигнал/помеха. На рис. 11 показан разрез NMO на центральном профиле 3D полигона и его спектр перед деконволюцией. Было произведено сравнение спектра суммирования со спектром шума и хорошее соотношение сигнал/помеха было отмечено до 150 Гц.

Данное 3D исследование рассматривалось в качестве ТЭО, результаты обработки показывают, что трехмерная сейсморазведка позволяет получить надежную

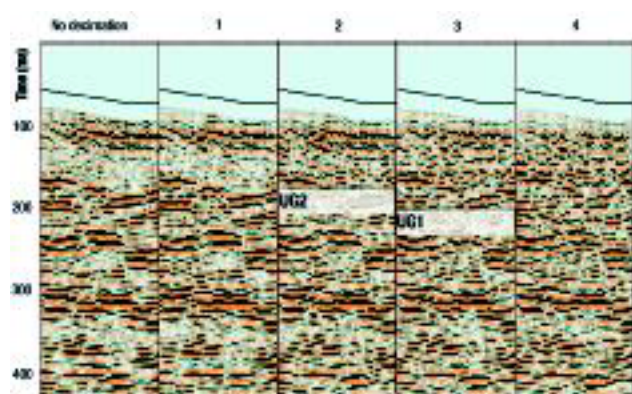


Рис 12 Миграция после суммирования с пост обработкой для полного набора данных (крайняя левая панель) и четыре типа прореживания (1 до 4: чем большая величина прореживания, тем больше его влияние).

структурную картину для неглубоких объектов (от 200 до 300 м ниже поверхности на первой тестовой площадке и до 50 м на второй тестовой площадке). Результаты геофизической обработки таким образом положительно соответствуют требованиям и ожиданиям заказчика.

### Увеличение шага дискретизации и миграция до суммирования

Второй стоящей перед исследованием задачей являлось повышение эффективности сейсмического метода. Дискретизация производилась по 4-м сеткам (каждая с размером ячейки 5 м x 5 м) и затем была произведена миграция после суммирования. С целью усовершенствования обработки, к одному из этих наборов была применена миграция до суммирования (PreSTM).

#### Шаг дискретизации

Изначально исследование было проведено с использованием большого количества источников и приемников. Целью увеличения шага дискретизации является получение окончательных результатов, идентичных по качеству (разрешению и структурной картине) полученным изначально, используя при этом меньшее количество исходных данных. Было произведено сравнение и, как показано на рис. 12, рудное тело UG2 на сравнительно небольшой глубине 230-330 м адекватно отображается с порядком 2, а UG1 на большей глубине 350 м удовлетворительно отображается с порядком 3.

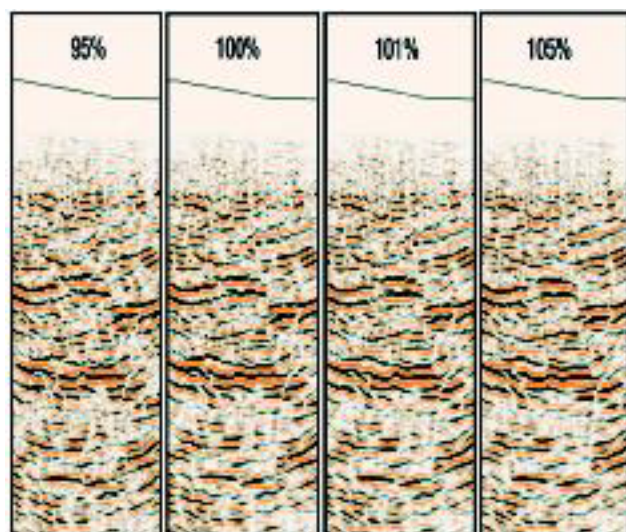
Разрежение 2 использовалось интерпретаторами для объектов, расположенных на глубине между 230 и 350 м, а поскольку данный интервал является наиболее перспективным в Восточном Бушвелде, для проведения миграции до суммирования было выбрано разрежение 2. Было решено оставить разрежение 3 для объектов, расположенных на глубинах больших 350 м. Разрежение 1 должно использоваться для объектов на меньших глубинах.

#### Временная миграция Кирхгофа

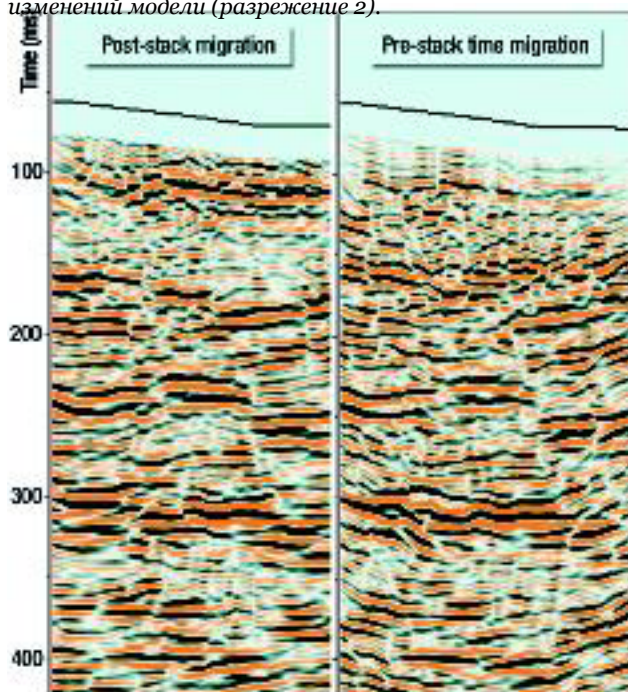
Разработанная CGG временная миграция Кирхгофа (также известная как TIKIM) была применена к данным до суммирования. В результате было получено мигрированное изображение, полученное из суммирования всех отдельных трасс.



## Поиск полезных ископаемых



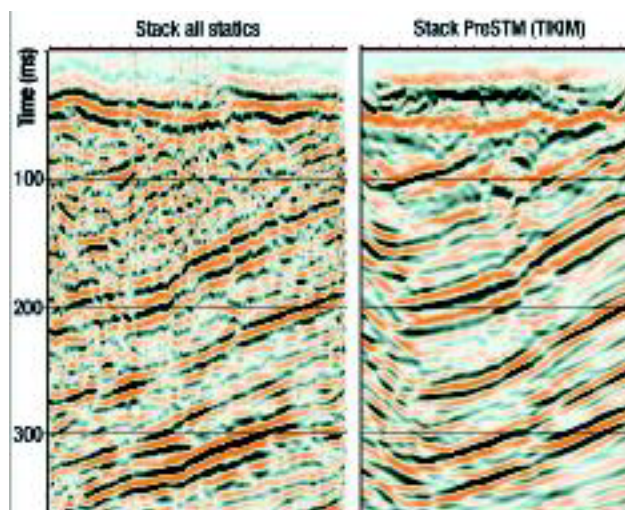
**Рис. 13** Миграция после суммирования с последующей обработкой для различных скоростных PreSTM изменений модели (разрежение 2).



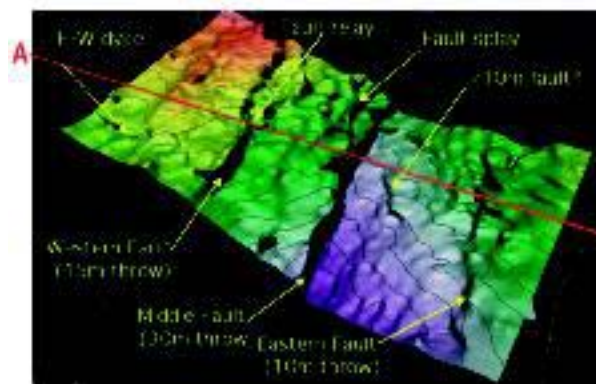
**Рис. 14** Сравнение разрезов с порядком децимации 2 между миграцией после суммирования (слева) и PreSTM (справа).

Для проведения скоростного анализа также возможно отдельно просчитать изображения, соответствующие различным классам удаления и различным вариантам скоростной модели.

Процедура PreSTM обычно состоит из двух частей. Вначале весь объем подвергается миграции с изначальным (суммирующим) полем скоростей. В результате получаются участки суммирования, полученные в результате суммирования мигрированных ОГТ с измененным ссылочным полем скоростей.



**Рис. 15** Линейное суммирование до (слева) и после (справа) полной PreSTM на менее глубоком втором рудном участке (UG2 на глубине менее 100 мс).



**Рис. 16** Изображение поверхности UG2 по данным миграции после суммирования.

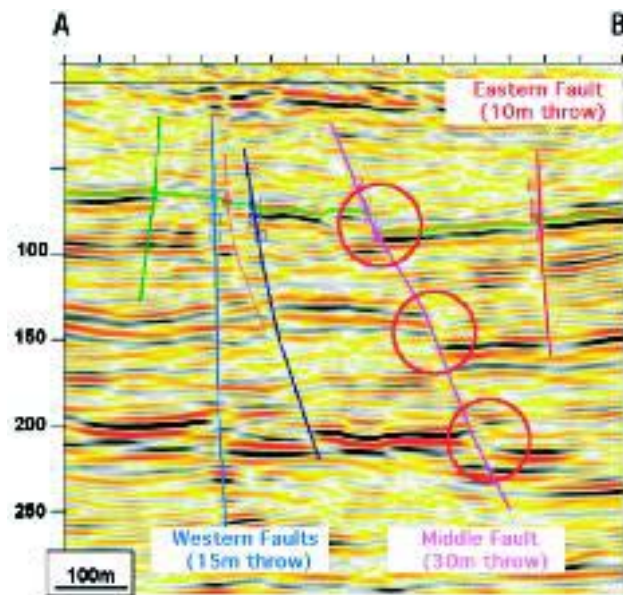
В данном случае изменения скорости производились по 1%, от 95 до 105% опорного поля скоростей (Рис. 13). Ознакомившись с результатами, заказчик решил выполнить PreSTM с 101% опорного поля скоростей, поскольку интерпретатор посчитал, что такое процентное соотношение дает наилучшее изображение со структурной точки зрения.

Такие же пост-миграционные параметры, что и при обработке после суммирования, использовались при выполнении процедуры PreSTM полного объема (Рис. 14 и 15).

### Интерпретация

Сразу после сбора данных, CGG предоставила заказчику изначальный объем сейсмических данных, используя миграцию во временной области при первом прогоне и данные после суммирования, выполненного в полевом центре обработки, чтобы предоставить клиенту возможность произвести интерпретацию непосредственно. Начальные результаты, полученные в результате миграции первого прогона (после суммирования) содержали структурную информацию (Рис. 16).

## Поиск полезных ископаемых



**Рис. 17** Временная миграция после суммирования (см. расположение на Рис. 16).

Временная миграция после суммирования сохранила (Рис. 17) высокочастотную информацию, позволившую обнаружить 8-метровые разломы, что соответствовало требованию заказчика. Тем не менее, такой четкой структурной картины, как после PreSTM (Рис. 18) получить не удалось – видны некоторые искажения (обведены красными кругами на Рис. 17).

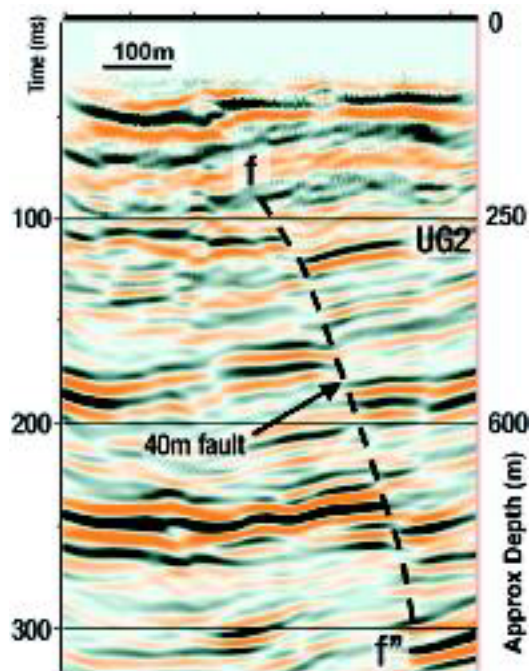
Теперь оба обработанных куба данных необходимо подвергнуть интерпретации.

### Заключительные выводы

Описанные выше 3D исследования доказали свою экономичность (разрежение 2 и 3) и геофизическую эффективность (разрежение от 1 до 3) подобных исследований на очень малых глубинах и их конкурентоспособность по сравнению с программами бурения при глубинах работ менее 150 м. Использование высокочастотного вибратора Sercel N65 в немалой степени способствовало успеху подобного мероприятия, кроме того одним из ключевых факторов успеха стал расчет точнейшей статической модели.

### Благодарности

Компания CGG хотела бы поблагодарить компании Anglo Platinum и Impala за предоставленное разрешение опубликовать эту информацию.



**Рис 18** PreSTM разрез по инлайну, на котором видно лучшее структурное отображение строения целевого объекта.