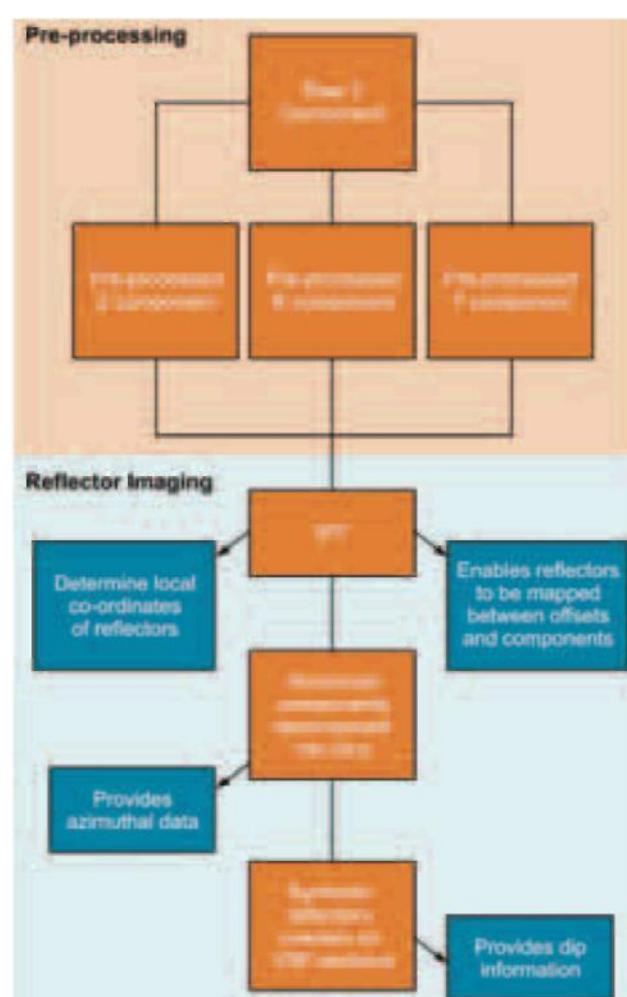


# Отображение трещин по данным ВСП для решения проблемы несоответствия масштабов наземной и скважинной сейсморазведки в случае трещиноватого карбонатного коллектора (VSP fracture imaging to bridge the well-to-seismic scale gap for a fractured carbonate reservoir)

**Steve Rogers,<sup>1</sup> Calin Cosma,<sup>2</sup> Peter Shiner,<sup>3</sup> Simon Emsley,<sup>4</sup> и Nicoleta Enescu<sup>5</sup>** обсуждают мощь технологии обработки данных ВСП, на примере трехкомпонентных данных для построения разреза сложно построенного коллектора, сложенного карбонатными породами.

Съемки по методике вертикального сейсмического профилирования (ВСП) выполняются для широкого круга задач изучения коллектора, которые включает в себя простые съемки, например съемка с целью определения скорости или сейсмокартаж (СК), и практические приложения, включая картаж и определение зависимостей время-глубина для корреляции скважинных данных с данными наземной сейсморазведки; калибровка данных акустического картажа и расчет синтетической сейсмограммы; построение двумерного и трехмерного разреза пород и отображение солевых структур, и AVO атрибутный анализ. Несмотря на то, что на сегодняшний день регистрация трехкомпонентных данных – это универсальный стандарт для съемок ВСП, горизонтальные компоненты часто остаются неиспользованными. Эта статья описывает результаты обработки данных ВСП по технологии, которая использует все три зарегистрированных компонента, позволяя отображать ключевые структурные особенности на двумерных наборах данных ВСП, что позволяет позиционировать разрывные нарушения и системы трещин в трехмерном пространстве.

Эта технология была применена к сложно построенному коллектору, сложенному карбонатными породами с разрывными нарушениями, который имеет иерархию элементов трещиноватости, образовавшуюся в результате нескольких фаз тектонических процессов (Emsley и др., 2002). Как правило, описание геометрии этих элементов трещиноватости включает в себя интеграцию особенностей, отображенных на скважинных данных, наряду с интерпретацией данных наземной сейсморазведки; эти данные имеют более низкую разрешающую способность, но большее пространственное покрытие. Комплексирование этих двух источников данных оказалось проблематичным по двум главным причинам. Интерпретация скважинных сейсмических данных, с высокой интенсивностью широко



*Рис. 1. Рабочий поток обработки данных ВСП для отображения трещин.*

<sup>1</sup> Golder Associates, 4260 Still Creek Drive Suite 500, Burnaby, BC V56 6C6, Canada.

<sup>2</sup> Vibrometric, Jaakonkatu 2, 01620, Vantaa, Finland.

<sup>3</sup> Shell Italia E&P, Via dei Due Macelli 66, 00187 Roma, Italy.

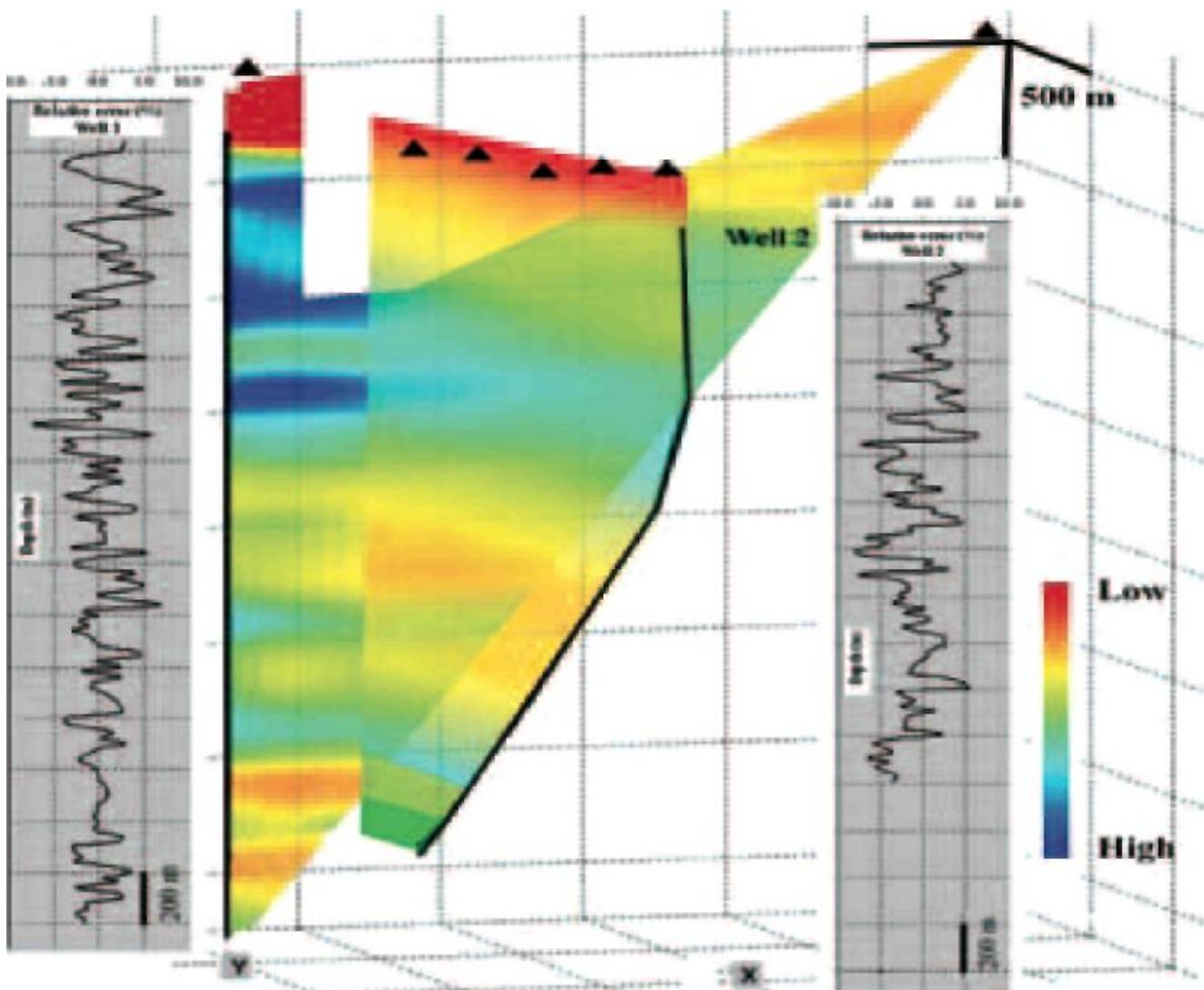
<sup>4</sup> Golder Associates (UK), Clyde House, Reform Road,

Maidenhead, Berkshire, SL6 8BY, UK.

<sup>5</sup> Vibrometric, 372 Richmond St W, Suite 119, Toronto, ON, M5V IX6, Canada.

распределенных трещин, была неясна в контексте большего масштаба особенностей на данных наземной сейсморазведки. Кроме того, часто низкое качество сейсмических данных делало трудной интерпретацию разрывных нарушений в масштабе сейсморазведки. Это привело к потере

## Скважинная сейсморазведка



*Рис. 2. Трехмерная геометрия наблюдений и воссозданные поля скорости Р-волны. Относительные погрешности определения скоростей вдоль скважин с помощью томографической инверсии показаны рядом со скважинами. Черные треугольники отображают положения источников возбуждения.*

достоверности результатов интерпретации нескольких разрывных нарушений или поясов трещиноватости по сейсмическим данным.

Чтобы заполнить этот промежуток масштаба между скважинными каротажными данными и данными поверхностной сейсморазведки, была опробована современная технология обработки данных ВСП для отображения сети трещин. Несмотря на то, что полоса частот данных наземной сейсморазведки и данных ВСП можно считать одинаковой, переобработка данных ВСП позволяет интерпретировать особенности, которые имеют промежуточный масштаб между скважинными данными и результатами интерпретации сейсмических данных. Это возможно главным образом благодаря более широкой полосе частот данных ВСП. В дополнение к отображению особенностей промежуточного масштаба, полная обработка всех трех компонент дает направленную информацию об осях синфазности отражений, позволяя разместить их в трехмерном пространстве. Это повышает качество структурной интерпретации и приводит к лучшему пониманию коллектора.

Сейсмические оси синфазности - это в общем случае литологические контакты, но они также могут быть вызваны разрывными нарушениями, поясами трещин и особенностями

растворения вещества, если они имеют достаточный размер и 'мощность' для создания достаточного контраста акустической жесткости для образования отражения. Минимальные физические размеры особенностей, которые могут быть отображены, являются функциями набора параметров, которые включают в себя полосу частот сейсмической энергии и скоростное строение среды, через которую распространяется сейсмический сигнал.

Обычно считается, что невозможно получить отражения от разломных/трещиноватых зон, когда они имеет место в одинаковых отложениях. Однако опыт этого и других работ показал - дело обстоит не так. Разломы и пояса трещиноватости часто описываются как относительно простые плоскости, но более реалистично может выглядеть пояс разрывных нарушений в виде сильно поврежденной зоны крупных трещин, ограничивающих, или распределенных вокруг плоскостей. У данной структурной модели может существовать малый, но вообще достаточный контраст акустической жесткости, для образования отражения.

Учитывая данный малый контраст сопротивления, не удивительно, что мощность отражений от разрывных нарушений и поясов трещиноватости в общем случае является малой. Поток процедур обработки, описанный ниже способен

## Скважинная сейсморазведка

выделить это рефлектоны для их точного расположения в трехмерном пространстве.

### Рабочий поток для отображения трещин по данным ВСП

Рабочий поток для отображения и позиционирования элементов трещиноватости и других элементов геологического строения в трехмерном пространстве (Cosma и др., 2003) показан на Рис. 1. Для реализации этой обработки, есть два требования к сбору данных, которые должны быть выполнены. Во-первых, полоса частот данных должна быть достаточно широкой и данные должны быть зарегистрированы трехкомпонентными датчиками. Эта методика отображения была первоначально разработана для гранитных отложений, где зарегистрированные данные содержали частоты в сотни Гц, в отличие от данных, описанных в данной статье, которые содержали частоты в диапазоне 5 - 60 Гц.

Вторая особенность сбора данных нужна для однозначного позиционирования найденных особенностей в пространстве. Для этого в данных должны быть достаточные выносы и азимуты определения направления рефлектора совместно с данными, зарегистрированными достаточным количеством приемников в скважине. При одном положении источника однозначное решение не может быть получено, поскольку геометрически может существовать несколько рефлекторов, дающих одинаковые отражения. Если данные были зарегистрированы при двух положениях источников, множественность вероятных решений сокращается до двух кратной неоднозначности. Однако, с введением

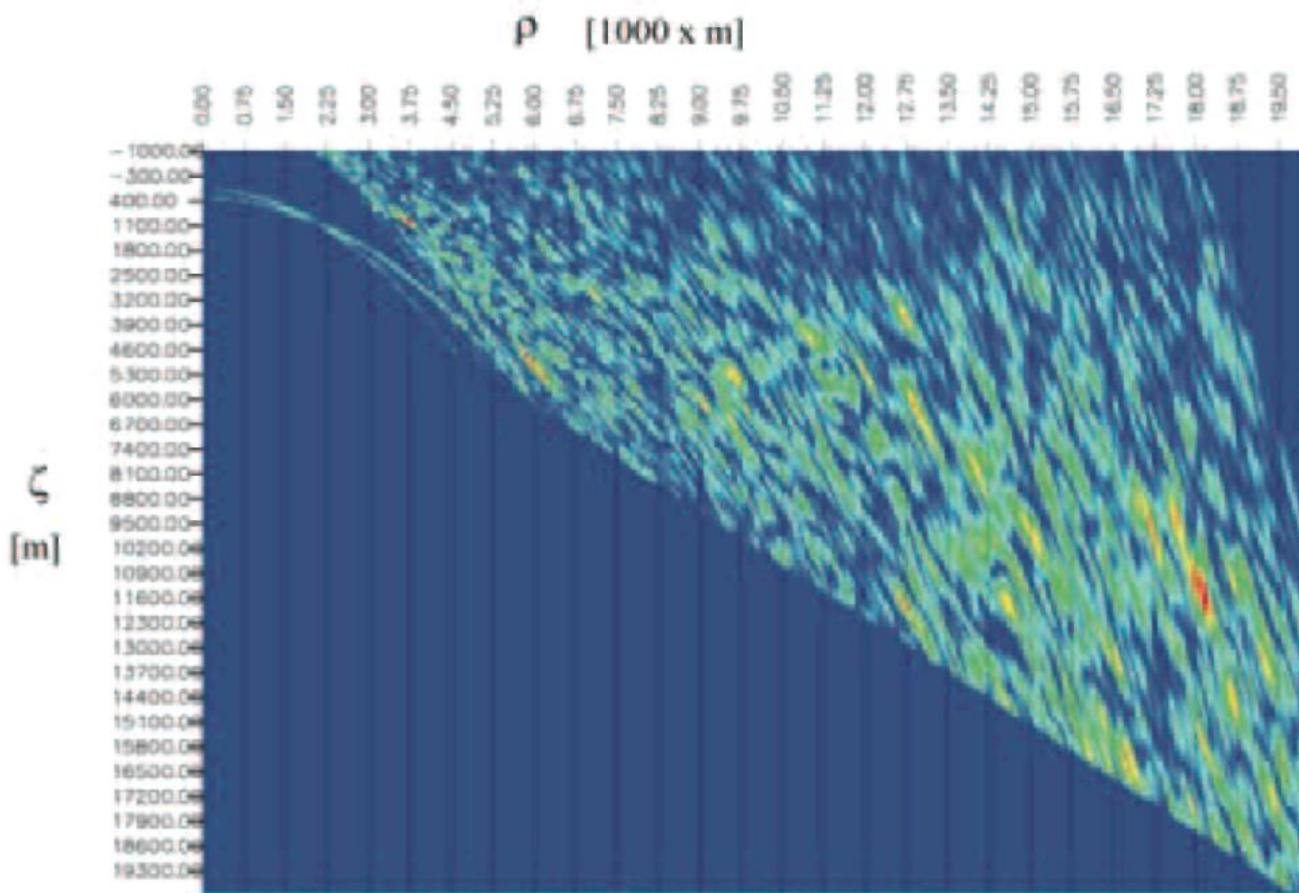
дополнительных положений источников, решение может быть единственным образом определено, и рефлектор может быть точно локализован в пространстве.

Методика отображения трещин была применена к восьми скважинам с 23 положениями источника в общей сложности (из которых пять было с вертикальным падением). Переобработка данных ВСП из скважин (и описанная более подробно для двух из них) была выполнена без априорной информации о возможных разрывных нарушениях. Цель состояла в том, чтобы локализовать значительные разломы в межскважинной области и дать геометрическую информацию относительно этих структур для её комплексирования с каротажными данными и с данными наземной сейсморазведки.

Данные ВСП были получены на поверхности земли с использованием источника типа Вибратор и кос трехкомпонентных геофонов с шагом между приемниками 20 м (уровни).

Данные были получены с помощью двух или трех установок Mertz 22 Vibroseis. Длительность использованного свип сигнала была равна 16 + 4 секунды, 8-64 Гц +24 дБ.

Данные из первой скважины (Скважина 1) были зарегистрированы на одном нулевом выносе и одном дальнем выносе от общей глубины скважины (TD) (общая глубина) до 70 м ниже стола ротора (RT). Положения источника были следующими: 72 м от устья скважины (нулевой вынос) и 2740 м от устья скважины ( дальний вынос). Данные из Скважины 2 были зарегистрированы от TD до 240 ниже RT. Данные были получены как при вертикальном падении (проекционное ВСП) для пяти положений источников, установленных на



**Рис. 3. Изображение наборов данных ВСП в области Rho-Zeta. Реальные рефлектоны переходят в яркие 'мнимые' пятна (желтые, оранжевые и красные).**

## Скважинная сейсморазведка

поверхности вдоль траектории ствола скважины. Геометрия этих двух скважин и положения пунктов возбуждения показаны на Рис. 2. Отношение сигнал-шум данных было высоким, качество необработанных данных было высоким и поэтому первые вступления были хорошо выделены. Полоса частот данных была узкой, что и ожидалось при использовании описанных выше параметров наблюдения.

Обработка данных была выполнена в два этапа. Начальная стадия предварительной обработки представляет собой относительно стандартную последовательность процедур, включая подготовку данных (редактирование и организация данных по различным компонентам, Z, X, и Y); выделение осей синфазности; вращение горизонтальных компонент (данные X компоненты врачаются для образования R (радиальной) компоненты в плоскости между скважиной и положением источника) и вращение данных Y компоненты для образования T (трансверсальной, поперечной) компоненты, ортогональной R компоненте; частотный анализ и фильтрация (5 – 60 Гц); определение скоростной модели; разделение волнового поля и удаление трубных волн и нисходящих P-и S волн; и наконец, амплитудную компенсацию и выравнивание.

Ключ к успеху во всей последующей обработке - точная скоростная модель, особенно в областях, где есть существенное скоростное изменение. Построение скоростной модели для каждой скважины было сделано с использованием ограниченной томографической инверсии, которая учитывала

анизотропию среды и использовала передискретизированные данные акустического каротажа, полученные в скважинах (Рис. 2). Погрешности восстановления скорости вдоль скважин были выражены как относительные погрешности в процентах между передискретизированными данными акустического каротажа и воссозданным полем скорости (Enescu и др., 2004). Относительные погрешности составили менее 10 %, со средними значениями в 0, что говорит о том, что основные тенденции изменения скорости в каждой скважине были определены правильно.

Как только предварительная обработка была закончена, главная фаза обработки данных была сделана. Она используется для отображения рефлекторов и создана для выделения и расположения основных рефлекторов в трехмерном пространстве, используя методику, известную как трехкомпонентное преобразование мнимой точки (ИПТ) (Cosma и Heikkilä, 1996, Cosma и др., 2003).

Первый шаг при отображении рефлектора должен увеличить отношение сигнал-шум так, чтобы слабые когерентные отражения стали идентифицируемыми и поддающимися толкованию. Поскольку коэффициенты отражения обычно низкие, рефлекторы не могут быть идентифицированы по одному амплитудному контрасту. Фазовая выдержанность - намного более чувствительная характеристика рефлекторов, но она должна использоваться внимательно. При отсутствии истинных осей синфазности в данных всегда есть некоторая степень когерентности, которая может выразиться в артефактах или побочных явлениях на разрезе (Cosma, 1995). Если качество данных недостаточно, это может привести к избыточно обработанным профилям.

Метод ИПТ позволяет определить как трехмерное положение, так и локальную ориентацию наблюденных рефлекторов, рассматривая каждую ось синфазности, как будто она была произведена мнимым источником, из которого сигнал распространялся к каждому приемнику по прямому пути. Как таковое, преобразование к мнимому пространству (область rho – zeta) преобразует отраженную энергию от данного участка рефлектора в мнимую точку, а тот же рефлектор отображается в ту же саму мнимую точку в различных компонентах и с различными выносами (Рис. 3).

В общем, это преобразование Декартовых координат в полярные, с центром системы координат в окрестности приемников, при этом rho является функцией радиального расстояния и zeta является функцией глубины. Изображение мнимого пространства позволяет локализовать (найти расстояние и глубину) рефлектора в пространстве в виде

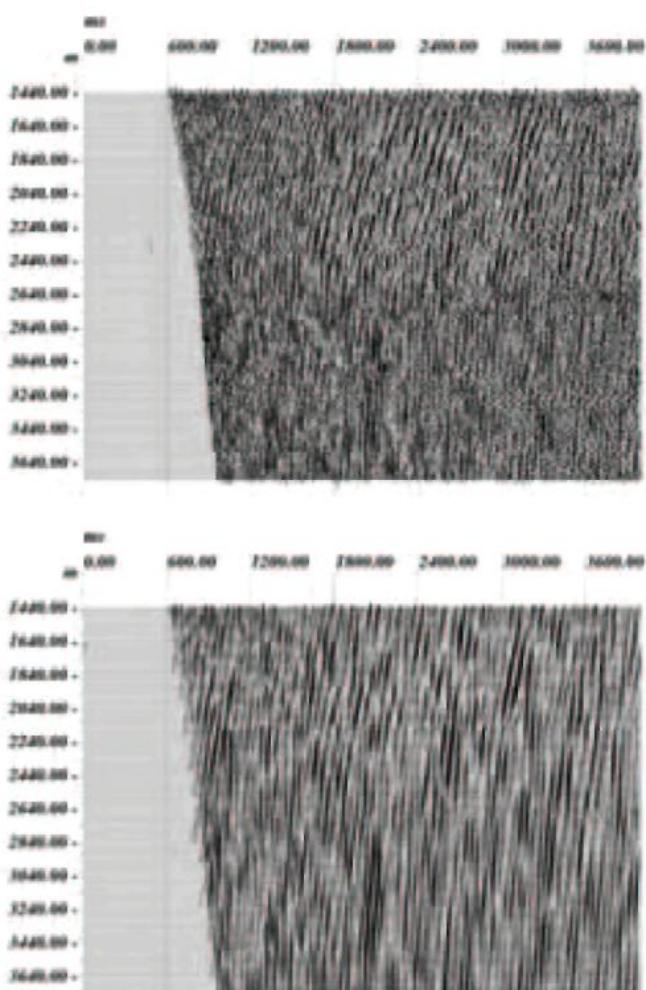


Рис. 4. Предварительно обработанные данные Z компоненты на дальнем выносе (сверху) и результат фильтрации IPT (снизу).

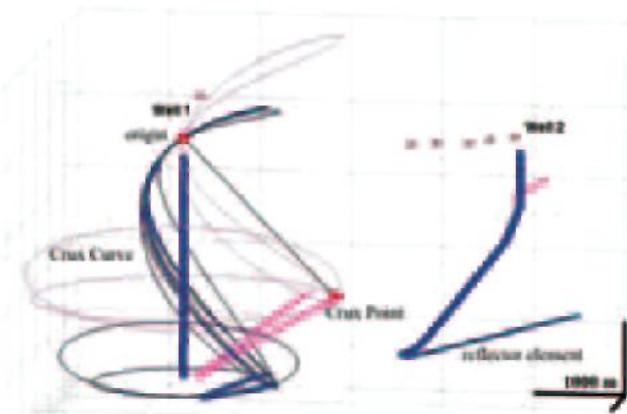


Рис. 5. Кривые неопределенности и результат интерпретации двух полого-западающих рефлекторов, представленный в трехмерном виде. Звездочками отмечены положения источников возбуждения.

## Скважинная сейсморазведка

ярких пятен на Рис. 3. Одним из действительных преимуществ методики IPT является то, что обратное преобразование является фильтрованной частью разреза, на которой выделены слабые рефлектоны и убрана некогерентная энергия. Это трудно сделать с помощью других методов и без удаления интересующих исследователя рефлектона.

На Рис. 4 показан пример результатов, полученных после обработки по методу мнимой точки, и показаны резкие отличия разрезов до и после фильтрации.

Обработка IPT используется для выделения и расположения рефлектона в пространстве. Дополнительные процедуры обработки дают информацию относительно ориентации (падение и простирание) рефлектона. Как только все сейсмические профили были отфильтрованы, информация относительно падения и простирания может быть получена по фильтрованным по падению наборам данных. Отражения от той же самой особенности интерпретируются по каждому разрезу; и соответствующие значения падения и простирания отображаются на стерео сетке в виде кругов, описывающих все возможные геометрические решения. Неизвестные падение и простирание, соответствующие плоскости рефлектона могут быть определены как точки пересечения этих кругов на стереографической проекции.

Эта методика может быть расширена для трехмерного случая с использованием интерактивной процедуры подгонки (Enescu и др., 2004). На Рис. 5 показан пример применения трехмерного метода к кластеризованным когерентным отражениям, которые, как предполагается, образовались из одной и той же области в пространстве. В этом анализе рассматривается точка затруднения, определяемая как длина перпендикуляра, проецированного на данную плоскость отражения от общего начала для всех профилей. Этот метод может использоваться для описания плоскости отражения. Там, где азимут падения не был определен однозначно, точка затруднения определяет местоположение в трехмерном пространстве, в котором от того же самого рефлектона образуется когерентная картина отражения. Соответствующие кривые затруднения, определенные по нескольким профилям пересекут/выделят ту же самую область пространства. Неизвестный азимут падения, соответствующий плоскости рефлектона определяется по точке пересечения нескольких таких кривых.

В процессе отображения рефлектона необходимо проявлять осторожность, поскольку неоднозначность может существовать при интерпретации по причине геометрии наблюдений, особенно в тех местах, где данные были получены только для двух выносов. Эту неоднозначность можно понизить, используя поляризационный анализ, в котором достоверная амплитудная информация является доступной. Рис. 6 поясняет поляризационный анализ и данные по одному разрезу ВСП при двух азимутах 060° (верхний разрез) и 120° (нижний разрез). В этом анализе используются все данные горизонтальных компонент и выполняется поиск мощности сигнала рефлектона. Разрезы на Рис. 6 ясно поясняют тот факт, что отраженная энергия образуется из одного особенного направления 060 градусов, и это дает последний кусочек информации для позиционирования рефлектона в трехмерном пространстве.

При достаточном изменении выносов источника и азимутов этих двух скважин, данные были обработаны и интерпретированы. В результате был получен диапазон элементов отражения межскважинной области (Рис. 7). Чтобы сделать эти выводы более пригодными для использования, была сделана дополнительная обработка в форме трехмерного кластерного анализа и подгонки. Геометрическая информация,

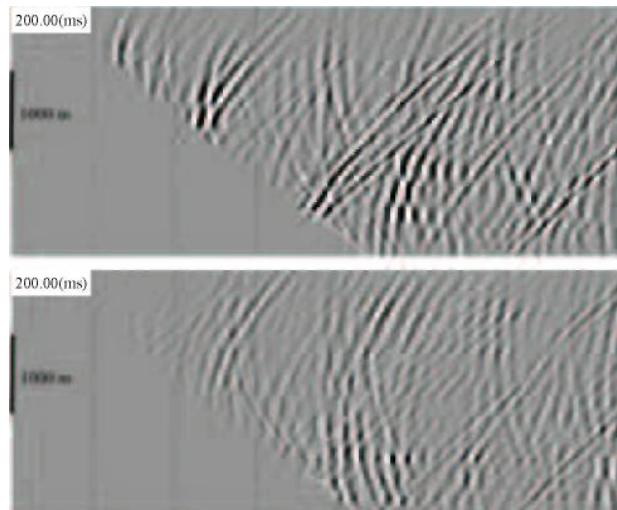


Рис. 6. Поляризационный анализ результата фильтрации IPT, 060 ° (верхний разрез), 120 ° (нижний разрез).

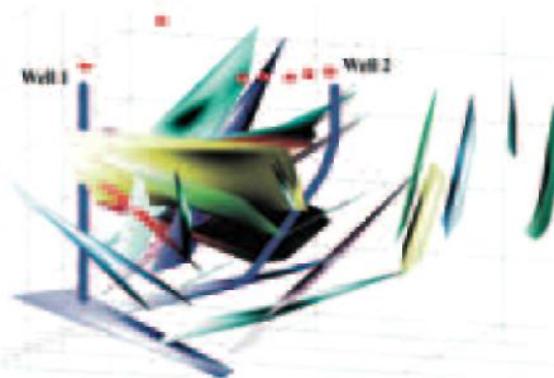


Рис. 7. Трехмерный вид интерпретированных рефлектона, найденных по данным из скважины 1 и 2.

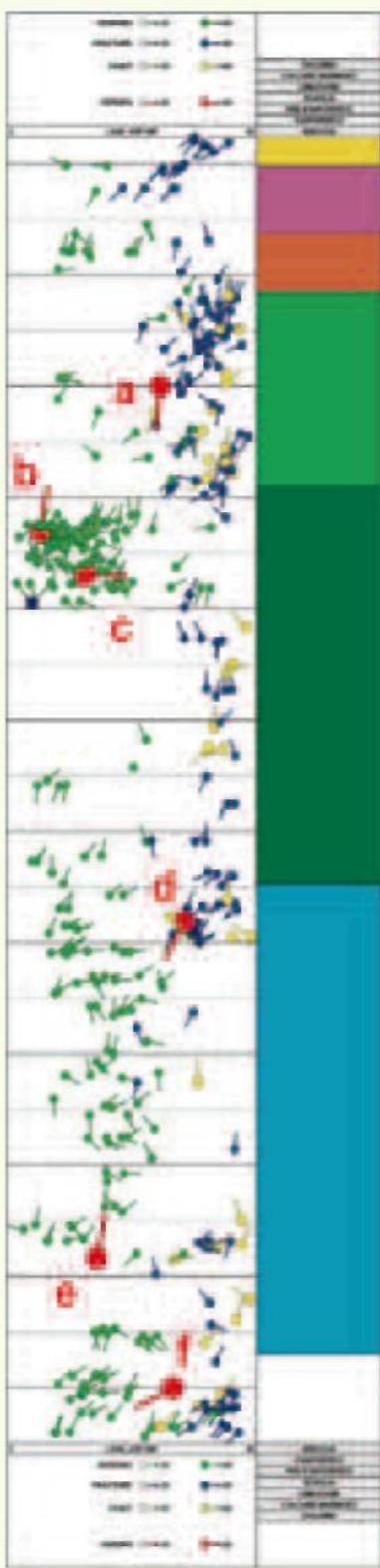
полученная от этой последовательности процедур обработки, дает полное описание геометрии рефлектона.

### Комплексирование результатов ВСП

Так, к чему привела обработка, которая не существовала прежде? Ответ - идентификация и ориентация множества рефлектона, не разрешенных по данным наземной сейсморазведки. Когда эти рефлектоны имели выдержанное пространственные и геометрические свойства, они интерпретировались как различные части одного и того же рефлектона или как группа рефлектона. Для общего понимания структуры и усовершенствования процесса изучения свойств коллектора, результаты обработки данных ВСП должны быть утверждены и интегрированы с другими источниками данных.

Для интеграции интерпретируемых по данным ВСП рефлектона с другой скважинной и наземной сейсмической информацией они были загружены в сейсмическую рабочую станцию для интерпретации. В тех местах, где рефлектоны по данным ВСП пересекали ствол скважины, их можно легко коррелировать с поясами трещиноватости, выделяемыми по результатам анализа данных скважинного сканера (Рис. 8).

## Скважинная сейсморазведка



**Рис. 8. Комплексирование рефлекто́ров по данным ВСП с результатом интерпретации данных скважинного сканера для одной из скважин.**

Сравнение рефлекто́ров ВСП с данными скважинного сканера позволило выделить два непротиворечивых класса ориентаций рефлекто́ров, имеющих место в пределах обоих наборов данных: полого залегающие плоскости,

интерпретируемые как особенности напластования и круто залегающие плоскости, интерпретируемые как разломы/трещины. Отображение ориентации рефлекто́ров ВСП и данных сканера демонстрирует сильное согласие этих двух наборов данных (Рис. 9). В тех местах, где круто залегающие рефлекто́ры ВСП пересекают ствол скважины, они соответствуют зонам интенсивной трещиноватости в масштабе ствола скважины. Это говорит о том, что разломы сейсмического масштаба фактически оказались оболочкой для сильно трещиноватой карбонатной породы. В результате изучения внутренней структуры этих разломов было выделено два отличающихся идентифицируемых стиля: узкие зоны интенсивной трещиноватости с большинством трещин, ориентированных параллельно разлому, выделенному по данным ВСП, а также широкий, разбросанный пояс трещин, связанный с развитием множественных наборов трещин, в основном ориентированных косо к разрывным нарушениям по данным ВСП. Это объясняет сложность интерпретации данных скважинного сканера с миллиметровым масштабом и трудность в нахождении соответствий между этими данными и результатами интерпретации данных поверхностной сейсморазведки.

Несмотря на то, что данная технология еще не была проверена на этом месторождении, ясное приложение отображающей методики имеет место. Идентифицированные рефлекто́ры по данным ВСП могут представлять собой гидравлически значимые разрывные нарушения, для которых нужно бурить новые скважины или боковые отводы от ствола скважины. Способность к успешному отображению разломов и поясов трещиноватости с минимальным вертикальным смещением также делает эту методику мощной.

### Выводы

До этого исследования и переобработки данных ВСП, сложность изображения распределения трещин в сейсмическом масштабе сбросовых нарушений, делала воссоздание крупномасштабной геометрии разрывных нарушений весьма проблематичным процессом. Интерпретация существующих данных совместно с комбинацией съемок ВСП значительно улучшила обзор структуры вокруг скважин, так же как и общую надежность полной интерпретации того, что является сложно построенным коллектором.

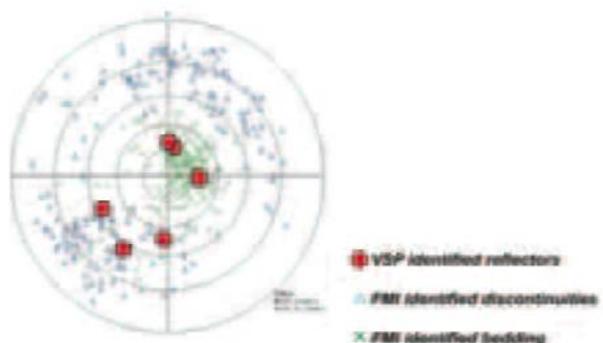
Один из ясных результатов этого исследования демонстрирует количество дополнительной информации, которое содержится в данных ВСП, особенно когда данные ВСП совместно обработаны. Большое количество наборов данных ВСП, которые были обработаны наряду с прямыми и с косвенными проверками, показало, что метод ВСП может быть мощным инструментом для определения положения и ориентации поясов трещиноватости в трехмерном пространстве при условии правильной обработки данных.

Данное исследование демонстрирует то, что новые или архивные наборы данных могут быть подвергнуты переобработке для получения существенного количества дополнительной информации и, там, где имеются наборы данных с неясной геометрией, сбор новых данных в соседних скважинах может сделать выполнимой обработку этих наборов данных в комбинированной трехмерной системе.

Эта современная методика обработки данных помогает комплексировать петрофизику и геофизику в задачах оценки свойств трещиноватого коллектора.

Дополнительно она представляет собой инструмент для комплексирования данных пластового наклонометра/сканера с сейсмическими данными. Методика применима не только для трещиноватых коллекторов, но и для решения более широкого круга задач.

## Скважинная сейсморазведка



**Рис. 9.** Стерео сетка, на которой приведено сравнение плоскостей по данным ВСП (большие красные кружки) и результата интерпретации данных каротажа (в масштабе скважины разломы/трещины показаны пустыми треугольниками, плоскости напластования показаны крестиками) для разреза коллектора в одной из скважин; используемые знаки относятся к плоскостям.

**Благодарности**

Авторы выражают свою благодарность компании Shell Italia E&P за разрешение на публикацию этой статьи и также хотят отметить существенное содействие Alessandra Beccacini из компании Shell.

**Ссылки на литературу**

Cosma, C. [1995] Characterization of subsurface structures by remote sensing. *Proceedings of the International Congress on Rock Mechanics (ISRM)*, Tokyo, Japan, 3, 1013 – 1021. Cosma, C. and Heikkinen, P. [1996] Seismic investigations for the final disposal of spent nuclear fuel in Finland. *Journal of Applied Geophysics*, 35, 151-157. Cosma, C., Heikkinen, P., Keskinen, J., and Enescu, N. [2001] VSP in crystalline Rocks - from Downhole Velocity Profiling to 3-D Fracture Mapping. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38, 843 – 850. Cosma, C., Heikkinen, P., and Keskinen J. [2003] Multi-azimuth VSP for rock characterization of deep nuclear waste disposal sites in Finland. In: D.W. Eaton, D.W., Milkereit, B. and Salisbury, M.H. (Eds): *Hard Rock Seismic Exploration*. SEG, 207-226.

Emsley, S. J., Beccacini, A., Cosma, C., Enescu, and Shiner, P. [2002] Fractured Reservoirs: using VSPs to bridge the scale gap between image logs and seismic. *EAGE 64th Conference and Exhibition*, Florence, Italy, Extended Abstracts, 296. Enescu, N., Cosma, C., Emsley, S. J., and Shiner, P. [2004] Illuminating 3D Fractured Reservoirs by Integrated Processing of 2D VSP and Vertical Incidence Data. *EAGE 66th Conference and Exhibition*, Paris, France.