

Многоволновая сейсморазведка (МВС)

Жгенти С.А., "ИНГЕО" - сервисный центр компании INPUT/OUTPUT, INC., г. Москва
Перегудов Ю.П., Petroleum Geology Research Institute, Ltd., Латвия
Кузнецов В.М., ВНИИгеофизика, г. Москва

Пока не поздно - это должен узнать каждый!!!

Принятые сокращения:

P - продольная волна, волна сжатия, compression wave, - распространяется по матрице горной породы и по её флюиду.

Самая быстрая, приходит первой (отсюда индекс, Premier). Самая высокочастотная (как правило). Смещение частиц породы при её распространении - в направлении распространения. Преимущественно регистрируется вертикально ориентированным сейсмоприёмником (Z).

S - поперечная волна, волна сдвига, shear wave, распространяется только по матрице горной породы.

Скорости маленькие, приходит после волны **P** (отсюда индекс, Second). Частоты низкие. Есть особенное свойство: поляризация. Смещение частиц породы при распространении этой волны перпендикулярно направлению распространения. Поскольку таких перпендикуляров к линии распространения (к сейсмическому лучу) в некоторой точке луча можно набрать целую плоскость - уточним:

волна **SV** (Vertical) луч и перпендикуляр к нему лежат в вертикальной плоскости **V**.

волна **SH** (Horizontal) перпендикуляр к лучу находится в горизонтальной плоскости **H**, ортогональной **V**.

Волна и её компоненты преимущественно регистрируются горизонтально ориентированными сейсмоприёмниками **X** и **Y**.

PS - обменная отраженная волна, результат смены типа при акте отражения: на границу падает **P**- волна, отражается вверх **S**- волна. Физически существует множество вариантов смены типа, и не только при отражении. Практически, т.е. для разведки, интереснее всего та схема, что указана здесь.

2D - двумерная сейсморазведка, оперирует линейными профилями, включая криволинейные, и сейсмические разрезы.

3D - трёхмерная, пространственная сейсморазведка, оперирует площадными съёмками и "кубами" данных.

4D - повтор 3D через некоторые интервалы времени, обычно - как мониторинг резервуара в ходе добычи.

1C - однокомпонентная регистрация, обычно, в стандарте с вертикально ориентированными сейсмоприёмниками (**Z**).

3C - трёхкомпонентная регистрация, обычно с **XYZ** ориентированными сейсмоприёмниками; здесь **XY** - ортогональные оси в горизонтальной плоскости.

X - радиальная компонента - направлена по профилю, от источника к приёмнику, для приёма волн **SV**.

Y - трансверсальная компонента - ортогональна к **X**, для приёма волн **SH**.

О чем речь

Многокомпонентная сейсмическая регистрация, т.е. измерения вертикальными и горизонтальными сейсмоприёмниками, более полно охватывает сейсмическое волновое поле, чем обычные одноэлементные (**1C**) методики. Здесь наилучшим образом регистрируются как продольные **P**- волны, так и поперечные **S**- волны различной поляризации. Специально регистрируется много волн различных типов и классов для последующей обработки и интерпретации - поэтому и **многоволновая сейсморазведка (МВС)**.

В последние годы **МВС** быстро развивалась, позволяя строить изображения (или отображения, ещё не установилась терминология - это новый термин для того, что видим на временных или глубинных сейсмических разрезах) обменных или **PS**- волн, которые используют идущую вниз продольную **P**- волну с обменом, со сменой типа - в самой глубокой точке проникновения - на восходящую поперечную (**S**-).

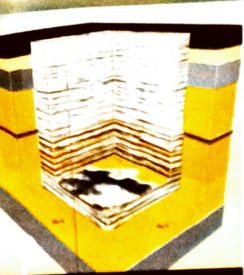
Проектирование PS- съёмки похоже на то, что делается для стандартных сегодня продольных волн, только следует принимать во внимание асимметрию пути луча **PS**- волны. Асимметрия эта есть результат различной скорости сейсмической волны: на пути вниз - скорость продольной волны, на пути вверх - скорость поперечной волны. Кроме того, обменные волны лучше прослеживаются в другом диапазоне удалений и для них важны другие волны-помехи. Сейсмические источники в съёмках **PS** используются обычные, как в **1C** съёмках на продольных **P**- волнах. Каналов регистрации с особыми сейсмоприёмниками - в три раза больше при регистрации **XYZ**. Для обработки **МВС** в составе стандартного матобеспечения (**FOCUS**, **ProMax**) существуют специальные программы. Получаемые при этом разрезы **PP**- аналогичны тем, что получают в стандартных работах **1C** на продольных волнах. Разрезы на обменных **PS**- волнах приближаются (иногда и превосходят) по качеству данные **1C** на **PP**- волнах.

Интерпретация использует **3C** наблюдения, как выполненные на поверхности (**2D 3C**, **3D 3C**), так и в скважинах (**3C ВСП**), а также данные ГИС. Работа с разрезами и "кубами" **PS** обеспечена процедурами в стандартных пакетах матобеспечения и особыми пакетами, и вообще она, сравнительно с обычной интерпретацией **PP**, более сложная.

Разрезы и кубы на разных волнах отображают различающиеся свойства геологической среды, поэтому их облик в принципе различен, даже при оптимальных для каждого типа волн условиях наблюдения. На этих различиях и строится интерпретация. Важнейшими этапами интерпретации являются:

- отождествление и привязка волн разных

МНОГОВОЛНОВАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА
МНЕНИЕ ПРОФЕССИОНАЛА



МНОГОВОЛНОВАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА МНЕНИЕ ПРОФЕССИОНАЛА

типов к одним и тем же геологическим объектам на глубине,

- сравнение параметров (скоростей, частот, времен и т.п.) волн разных типов.

По результатам этих этапов

- разделяют песчанистую и глинистую компоненты,

- опознают карбонаты,

- картируют поверхности, которые слабо контрастны на продольных волнах,

- строят изображения в газонасыщенных зонах,

- осуществляют мониторинг резервуаров;

- обнаруживают трещиноватые и напряженные породы и оценивают структуру порового пространства.

Развитие метода PS в его сегодняшнем виде заняло около 15 лет, но теперь вошло в коммерческую фазу.

Обоснование: зачем это надо

На несколько лет вперед главным методом исследования при поисках углеводородов останется съёмка на продольных отражённых P-волнах и по очень важным причинам, как то: среди всех упругих волн волны сжатия приходят первыми, обычно имеют высокое отношение сигнал/помеха, направление смещения частиц близко к линейному; они легко генерируются множеством источников, распространяются также и в морской среде.

Ожидается, что съёмка на продольных отражённых волнах будет доминировать среди методов исследований. Но уже уместны некоторые вопросы:

- Можно ли улучшить изображения на продольных волнах?

- Можно ли генерировать дополняющие или наращивающие изображения, дающие новую информацию о геологическом разрезе?

- Что делать, когда съёмка PP неинформативна?

Самый прямой ответ на эти вопросы: "попробуйте многокомпонентную регистрацию и анализ". При этом ожидается весомое улучшение сравнительно с данными PP-волн.

Сегодня уже есть организации, занимающиеся проектированием, сбором, обработкой и интерпретацией данных МВС. По углеводородной тематике есть много примеров успешного построения изображений PS и интерпретации.

Можно сравнить это с развитием сейсмики 3D на продольных волнах:

- концепция и ранние опыты 3D сейсмики появились в 1960-е годы;

- теория и обработка в основном были разработаны в 70-е;

- приложения - в 80-е.

Т.е. от концепции до всеобщей практики прошло около 20 лет.

Съёмка PS:

- предложена и опробована где-то в ранние 80-е,

- основы обработки были разработаны в поздние 80-е - ранние 90-е.

Предполагая, что эта методика "стоит на той же дороге", что и 3D, можно ожидать, что метод станет всеобщим в ближайшие несколько лет.

Можно поинтересоваться, почему многоком-

понентные, и особенно PS, методологии не применялись широко в прошлом. Тому есть множество причин.

3С сейсмоприёмники несколько лет назад ещё не были доступны в большом количестве. Они были требовательны в установке и подсоединении.

При регистрации требовалось каналов в три раза больше, чем обычно. Напряжение аналогового сигнала падало в длинных сейсмических косях, к тому же они работали как антенны для приёма промышленных помех.

Проектирование съёмок обменных волн плохо понималось, а на практике не было доступно матобеспечение проектирования.

Обработка PS- волн также была проблематичной, многое из теории обработки данных ещё не было разработано. Искривленная траектория луча относительно точки отражения PS-волны (из-за неравных углов падения и отражения) была главным камнем преткновения. Опять-таки не было разработано и доступно матобеспечение.

Интерпретация PS- данных была затруднена, т.к. мало проводилось скоростных картотажей на S-волнах и не было синтетических сейсмограмм. Сверх того, разрезы PP и PS изображали волновые события, относящиеся к одному и тому же отражателю, на различных временах! В конце концов, было ещё мало ясных примеров интерпретации. Иными словами, метод пребывал в его раннем детстве.

Однако теперь почти всё из этого изменилось. Появились в большом количестве цифровые 3С приборы (например, VectorSeis, производства Input/Output, Inc.). Сейсмический сигнал существует как цифровой от приёмника до записи на магнитный носитель в поле, ему не вредят аналоговые наводки и влияния, и реализуется недостижимая ранее точность регистрации. Канальность регистрирующих систем практически не ограничена. Материально-техническое обеспечение полевых работ стало более практичным, лёгким в применении. Одним словом, появилась промышленная технология 3-компонентной сейсморазведки. Есть программы проектирования съёмок PS. Обработку PS-данных осуществляют несколько коммерческих обработочных пакетов и подрядчиков как в России так и за рубежом. Трёхкомпонентное ВСП и картотаж на S-волнах проводятся более широко, и стал доступен интерпретационный софт, т.е. строятся уже впечатляющие примеры успешной интерпретации.

Так вот, если целью сейсмических исследований - в широком смысле - является создание трёхмерного изображения литотипа пород, их структуры и насыщения, то нам необходима **вся информация**, доступная из сейсмических методов. Достичь этого только с P-волнами нереально. На продольных волнах различные породы и типы насыщения могут иметь сходную реакцию отклика. Кроме того, некоторые поверхности просто могут иметь слабый коэффициент отражения на продольных волнах. Акустические свойства S-волн могут варьировать сильнее, и тогда становятся видны отражающие границы, невидимые для P-волн. Записывая PP- и PS-волны от одного взрыва, т.е. регистрируя, в частности, S-отражённую волну, получаем возможность определить свойства S-волны и использовать их в интерпретации. В соединении со свойствами P-волн становится возможным охарактеризовать строение пород, их тип и флюиды в них.

Как этого достичь

Можно попытаться применить информацию об S- волнах из МВС в давно практикуемой методике "прямых поисков" углеводородов: через анализ амплитуды в зависимости от удаления (AVO). Наши самые фундаментальные сейсмические измерения - времена сейсмических волн, но обычное AVO не даёт нам времён S- волн, а съёмки МВС дают. В обычном AVO надо делать сомнительные допущения об амплитуде и скорости S- волн, а в работах МВС мы их просто наблюдаем.

Есть и новые возможности анализа и интерпретации данных. Например, можно использовать изохроны PS- волн совместно с разрезом PP для получения отношения V_p/V_s - самого важного интерпретационного параметра в сейсмразведке. Само собой, всегда изучавшиеся соотношения частот, характеристики затухания увеличивают свою геологическую информативность при введении дополнительного сопоставления, по волнам разных типов (PP- и PS-). Совместное же использование данных по скоростям волн разных типов в разных направлениях позволяет определить коэффициенты анизотропии пластов.

Несколько слов об анизотропии. Следствием появления регулярных микронеоднородностей в породе (например, трещин) является проявление породой анизотропных свойств в зависимости геологических свойств от направлений. Пример - проницаемость. Поэтому физические свойства породы становятся тоже анизотропными - появляется анизотропия скоростей, а именно их мы измеряем. Анизотропия характеризуется типом и степенью. Тип связан с ориентацией трещин, степень - с их количеством. Всю эту информацию можно извлечь из многокомпонентных многоволновых данных. А именно она сейчас жизненно необходима геологам.

Также возможны и исполняются "чисто сдвиговые" сейсмические съёмки с использованием монотипных SS- волн. Эти волны удобны в привязке к геологическим объектам, и по ним легко работать с поляризацией, а это атрибут, весьма продуктивный в интерпретации. Вообще в таких работах напрямую измеряются параметры S- волн. Здесь применяются специальные сейсмические "сдвиговые" источники. С такими источниками можно возбуждать сейсмические колебания последовательно по направлениям X, Y и Z и получать 9C результат. Но стоят такие работы дороже, чем съёмка PS, а качество данных зачастую ниже. Причём по той же причине, из-за свойств S- волн:

- Сильное поглощение в верхней разуплотнённой части разреза, которую S- волны проходят два раза: на пути вниз и вверх.

- Очень низкие скорости, присущие S- волнам, предопределяют "грандиозные" величины статических поправок, которые очень трудно определить с приемлемой точностью.

С этими работами получается пока что так:

- ♦ В экспериментальном режиме точно стоит попробовать.

- ♦ В производстве - не всякий справится.

В работах на обменных PS- волнах вниз распространяется P- волна с малым поглощением в верхней части разреза, и только на пути вверх отражённой S- волны происходит указанное сильное поглощение. И общая величина статических поправок несравнимо меньше. Т.е. PS- съёмка - относительно недорогой, широко применимый и эффективный путь получения

информации об S- волнах. Хотя интерпретация PS "строга", приходится аккуратно разрешать неоднозначности.

Если знаем отражающие свойства PS, как можно их использовать? При этом получаем:

- Более детальные изображения на малых глубинах.

- Изображение промежуточных поверхностей со слабым акустическим контрастом на продольных P- волнах, но с существенными изменениями для S- волн.

- Построение изображений "сквозь" газовые "chimneys" (колонны газа, идущего с глубины), глинистые диапиры, грязевые вулканы.

- Помощь в интерпретации данных PP через анализ отношения V_p/V_s и корреляцию одноимённых горизонтов.

- Настройку обычного AVO анализа, а ещё лучше - построение алгоритмов "прямых поисков углеводородов" именно для многокомпонентных сейсмических записей.

- Исследование анизотропии, плотности и ориентации трещин.

- Калибровка "ярких пятен" на продольных волнах.

- Применение отношения V_p/V_s для прогноза литологии; например, чтобы определять соотношения глинистости и песчанистости.

- Построение изображений крутых разрывных нарушений.

- Мониторинг изменчивости резервуара.

За что платим

Самая дорогая часть процесса - **полевые работы** - удорожается незначительно:

- Точки взрыва и приёма распределены на профиле 2D или площади 3D практически так же, как и в обычной "сейсмразведке МОГТ", говоря языком сметно-проектной документации. Уточним: так же, как в стандартных работах хорошей детальности, где шаг источников и приёмников по профилю составляет обычно 25 м, а размер "бина" 3D 12.5x12.5 м.

- Стоимость топоработ соответственно не изменяется.

- Источники (например, дешёвые и производительные поверхностные источники Вибросейс) те же, хотя и работают более интенсивно.

- Хорошая современная система регистрации (например, производства фирмы Input-Output) практически не лимитирует количество регистрируемых каналов.

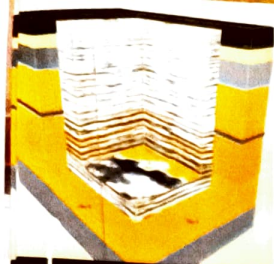
- Несколько особняком стоит проблема сейсморприёмников.

- Обычно на приёме на один канал работает т.н. "линейная группа" из 10-20 электродинамических приёмников на базе 10-20 м. Их все надо расставить на местности и заглубить, обеспечить "хороший акустический контакт с почвой".

- Для МВС есть хорошая разработка Vector-Seis: три (X,Y,Z) цифровых (по 24 бита) датчика ускорения в одной конструкции. Её не надо выравнивать, чувствительность датчиков не страдает, а только следует сориентировать по азимуту. Конструкция эта весьма мудрёная, в ней даже и технический вакуум есть: понижает собственные шумы, повышает чувствительность. Работы в поле с таким хитрым приёмником если "в сумме" не больше, чем раньше, но ... "как бы не полевая это работа, больно тонкая, рабочий разряд повыше надо".

На выходе съёмки PS получается утроенный

МНОГОВОЛНОВАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА МНЕНИЕ ПРОФЕССИОНАЛА



МНОГОВОЛНОВАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА МНЕНИЕ ПРОФЕССИОНАЛА

объем данных, сравнительно со стандартной сегодняшней сейсморазведкой.

- Как обычно, наблюдения вертикально ориентированными сейсμοприемниками (Z)

- Наблюдения горизонтально ориентированными приемниками. Таких два в каждой точке приема на профиле:

- с ориентировкой "вдоль профиля", т.е. вдоль линии взрыв-прием, т.н. радиальная компонента X,

- и под прямым углом к этой линии, т.н. трансверсальная компонента Y.

Из приведенного выше понятно, что обработка удорожается в процентном выражении более заметно. Здесь на входе - утроенный объем данных (X,Y,Z) против стандарта (Z). Их обработка не вполне независима, при обработке X,Y используются некоторые параметры из обработки Z. Поэтому не получится сразу взять высокий темп, работая с тремя массивами одновременно. Сначала надо получить окончательный результат Z обработки.

Из обработки X,Y,Z данные поступают на вход интерпретации. Качество материалов Y не всегда позволяет эффективно их использовать, зачастую работают только с двумя видами данных, X и Z. Т.е. интерпретация также удорожается сравнительно со стандартом.

Выполняется стандартная интерпретация Z, а затем - совместное рассмотрение X и Z, а желательно также и Y, с привлечением данных каротажа и керноотбора в скважинах на площади. Изучают анизотропию, оценивают трещиноватость. "Совместное рассмотрение" - это комплекс операций, выполняемых компьютером под управлением интерпретатора, вовсе не "глазение" на временные разрезы и каротажки. Смысл "рассмотрения" - дать заключение о коллекторских свойствах резервуара, о проницаемости и, в частности, о характере насыщающего флюида. В целом следует отметить, что обработчик и интерпретатор, работающие с материалами обменных волн, работают с большим количеством параметров и их взаимосвязей, нежели при стандартной методике ОГТ. Не так просто дать заключение о коллекторских свойствах и типе флюида.

Что предпочесть: 2D или 3D? 1C или 3C?

"У вас, у геофизиков, сам чёрт ногу сломит. Понапридумывали всякой всячины. А зачем? Только деньги выманиваете."

Представитель Заказчика

Никто не совершенен, геофизики - тоже.

Зачем автомобилестроители придумали сначала "Форд-Т", и только много лет спустя Мерседес 600? Зачем бурение было сначала ударно-канатным, и только потом роторным? Так же и у геофизиков: со временем всё больше D, всё больше C. Прогресс, однако. Становиться поперёк - себе дороже выйдет.

Посмотрим на изученность района. Стандартные работы 2D/1C уже были, наверняка. Стоит ли повторять? Скорее всего, структурная обстановка выяснена. И даже детально. Но с точностью 30 м. Значительные по амплитуде разрывные нарушения выявлены. И вообще... скважин прибавилось, сейсмическая структурная карта потеряла актуальность. Другие вопросы стали злободневными: разрывы сплошности малой амплитуды, фациальный состав и его изменения. Хорошо бы распространить хоть "по возможности", пусть и с меньшей детальностью - данные ГИС на площадь.

Чтобы найти "структурные мелочи", бестолку 2D/1C ставить, здесь 3D подавай: будет "полный

обзор" всей площади интереса, ничего не будет пропущено. Прежде всего, не будут пропущены нарушения малой амплитуды и незначительной протяжённости: с этой идеи 3D и начиналось. Другие достоинства проявились уже с опытом работ. Стали находить больше структур и ловушек, лучше их картировать, даже если они малы. В итоге возросла успешность бурения.

Ладно, 3D, но какой 1C или 3C?

Ну...

- 3C "поглощает" 1C, содержит его в себе 1C - всего лишь Z компонента трехкомпонентного приема. Правда, 3C подороже будет, и не так скоро.

Но...

- Скорость полевых работ не снижается. 1C результат не замедлится. Ждать придется 3C обработку и интерпретацию. Но это уже будет "сейсмика коллекторов", а не ставшая привычной "геометрическая", структурная сейсморазведка.

Так почему же 3C?

3C технологии (например, VectorSeis от Input-Output, Inc.) в сочетании с методикой 3D реализуют еще больший экономический потенциал, т.к. дополняют 3D изображения сведениями о коллекторских свойствах пород и типе насыщения. Применение МВС резко повышает эффективность сейсмического мониторинга (4D/3C), где отслеживаются изменения характеристик коллекторов в пространстве и во времени, т.е. в ходе добычи. Благодаря этому, стратегия разработки месторождения планируется точнее, с опорой не только на точечные промысловые данные.

Вот и весь ответ:

- ♦ Нужен "полный обзор" площади, без изъятов? Требуется наилучшее отображение приразломной области? Надо ставить 3D/1C.

- ♦ Нужна "сейсмика коллекторов"? Требуется характеристики флюида? Надо ставить 3D/3C.

Заключение

Всюду отчетливо прослеживается определенная логика, которая - с некоторыми преувеличениями - формулируется так:

Среди новых предложений нет таких, чтобы "за те же деньги больше информации".

Предлагается иное: за полуторную цену информации в 2-3 раза больше.

Если не соглашаться - просто очень надолго задержится реализация новой сейсмики с должными свойствами коллекторов. Ну, действительно:

- ♦ **Глубинность** сейсморазведки давно уже не проблема, это достигнуто обычной 2D/1C. А ведь были незабываемые споры: "зачем ОГТ аж на кратность 6, вполне бы 3-4 хватило". Сегодня оплачиваем кратность 48-96 без особых разговоров.

- ♦ **Детальность** структурного плана обеспечивает 3D/1C. На переходе от 2D к 3D произошло существенное (около 3-х раз) удорожание работ. Но сегодня все заказывают 3D в больших количествах и без ропота по поводу цены: потому что есть толк. Хотя это все еще структурная сейсморазведка.

- ♦ Авот с коллекторами... увязли, и без многоволновой сейсмики 3D/3C не во всех районах "выбраться из болота" сможем. Сейсморазведка коллекторов - следующий шаг, это уже многоволновая пространственная сейсморазведка, т.е. 3D/3C. Ожидаемое удорожание работ - 1,5-2,0 раза, а рост эффективности - на порядок: решаются принципиально новые задачи, фактически реализуются предельные возможности метода.

Только 3D/3C позволяет получить 3-х мерное изображение структуры горных пород, определить их коллекторские свойства, оценить насыщение и тип флюида.