

## Исследования многокомпонентного векторного поля: действительно ли они эффективны?

### Acquisition and application of multicomponent vector wavefields: are they practical?

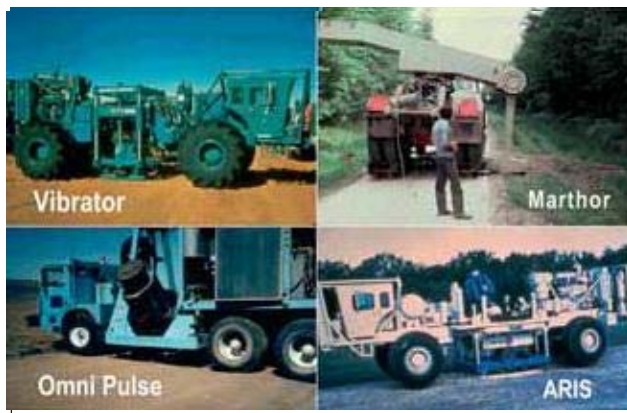
Гайсер (J. Gaiser)<sup>1</sup> и А. Струдли (A. Strudley)<sup>2</sup>

Наши возможности получать и обрабатывать многокомпонентные векторные поля (МКВП) еще никогда не достигали такого высокого уровня. Мы располагаем оборудованием, которое может производить высококачественные измерения, а современные графы обработки позволяют выделить основные горизонты. Несмотря на это, внедрение метода МКВП для разведки и добычи ставит перед нами вопрос: "Эффективен ли он?" В данной статье мы попытаемся дать ответ на этот вопрос, проследив историческое развитие и современное состояние метода МКВП и рассмотрев дополнительные возможности применения этой технологии помимо общепринятых исследований по Р-волнам.

#### Историческое развитие метода МКВП

Попытки практического применения поперечных волн (S-волн) осуществляются на протяжении уже более 25 лет. Все началось с внедрения групповых наземных источников S-волн компанией Сопосо (Энслей (Ensley), 1984). Вибраторы SH-волн (рис. 1) были применены на 6 участках для проверки возможностей обнаружения углеводородов, в частности – газовых аномалий типа "яркое пятно". Но эти данные оказались достаточно плохого качества, частично из-за азимутальной анизотропии, и, возможно, из-за неучтенной статистики по S-волнам. Бум активности по генерации S-волн пришелся на 1980-е годы при разработке импульсных источников типа ARIS (ARCO Impact Source, азимутально-изотропный источник), Omni Pulse (Bolt airgun - пневматический источник SH-волн) и Marthor (источник SH-волн типа "падающий груз", марка IFP). Про такие источники справедливо было замечено, что они являются причиной своей собственной "смерти". Конечно, они помогли нам многое понять о природе S-волн. Но ни один из них не смог стать действительно эффективным для практического использования. Даже развившиеся недавно вибраторы полного сейсмического сигнала не нашли широкого применения. На протяжении всего времени развития этих источников, благодаря использованию метода циклического сканирования Alford (1986) для характеристики трещиноватости, улучшилось наше понимание азимутальной анизотропии. Академический консорциум продолжает использовать S-волны для определения литологического состава.

К концу 1980-х возрос интерес к рассмотрению Р-волн в качестве источника S-волн. Частично это пришло из метода вертикального сейсмического профилирования (ВСП). На рис.2 показан пример волнового поля (по Iverson et al. (1989)), где Р-волна генерирует S-волну (PS-волны) соизмеримой амплитуды. В то же время были сделаны также большие успехи в усовершенствовании оборудования и обработке (Гаротта (Garotta), 1986).



**Рис. 1** Источники S-волн разрабатываются в нашей отрасли более 25 лет. Вибраторы SH-волн впервые были применены на 6 точках компанией Сопосо. Бум активности по воспроизведению S-волн пришелся на 1980-е годы при разработке импульсных источников типа Marthor (источник SH-волн типа "падающий груз", марка IFP), Omni Pulse (Bolt airgun - пневматический источник SH-волн) и ARIS (ARCO Impact Source, азимутально-изотропный источник). Но ни один из них не смог стать действительно эффективным для практического использования. Даже развившиеся недавно вибраторы полного сейсмического сигнала не нашли широкого применения.

В начале 1990-х Беппе (Berg) и др. (1994) осуществили эксперимент SUMIC (Subsea Seismics – подводный сейсмический), который показал, что интенсивные S-волны могут генерироваться и под водой и помогают выделять объекты при наличии газовых облаков, затеняющих Р-волны. Хотя они ошибочно полагали, что S-волны образуются как нисходящие волны, генерируемые на морском дне, в индустрии быстро пришло понимание того, что эти превращения осуществляются на отражающих поверхностях и могут быть использованы для различных целей. Этот эксперимент породил огромный интерес к PS-волнам как на суше, так и в водных условиях, после чего был предложен целый ряд потенциальных возможностей применения метода МКВП на шельфе. Позже мы вернемся к описанию конкретных примеров использования этого метода на практике.

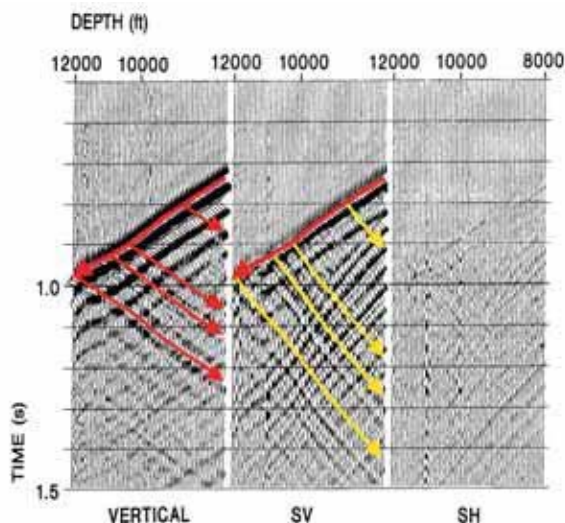
#### Полевые работы

С точки зрения анализа оборудования, очевидно, что в нашей отрасли найден практичный источник S-волн: это знакомое нам волновое поле продольных волн. ВСП доказывает эффективность этого метода при генерировании S-волн (рис. 2), а экспериментально

<sup>1</sup>WesternGeco, 1625 Broadway Suite 1300, Denver, Colorado, 80202, USA.

<sup>2</sup>WesternGeco, Schlumberger House, Gatwick, W. Sussex, RG5 0NZ, UK.

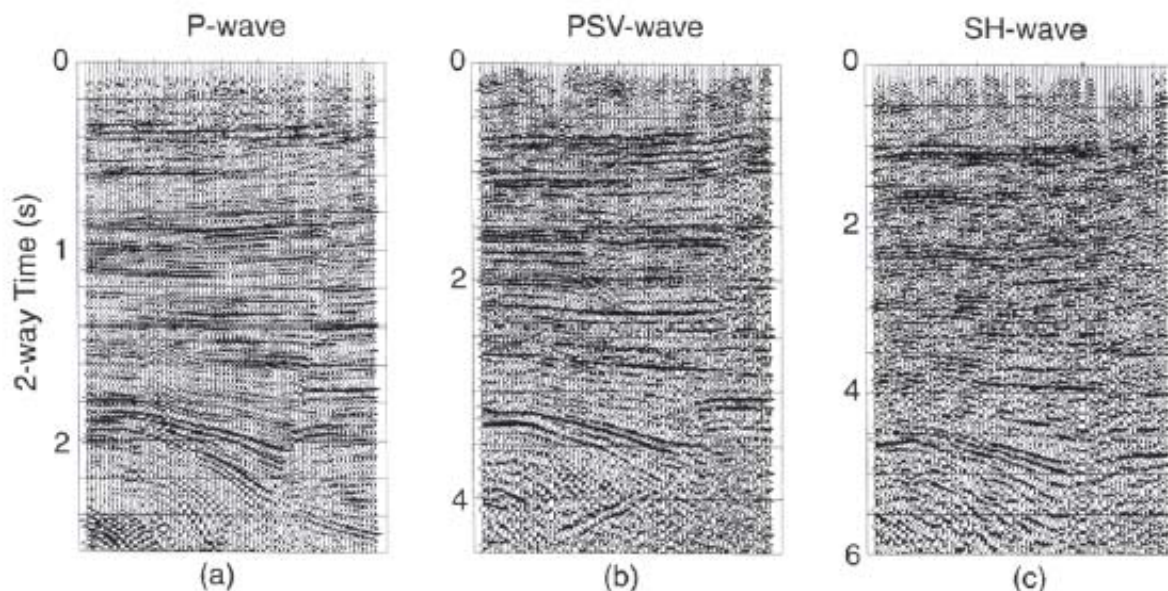
спектр PS-волн шире, а соотношение сигнал/шум выше, чем при регистрации только S-волн (рис. 3). Источники S-волн преимущественно применяются в исследовательских целях. В США всего одна компания предлагает коммерческие услуги по использованию S-волн. С другой стороны, в течение последних 7 лет пятью ведущими подрядчиками было получено и обработано порядка 200 съемок по всему миру с использованием PS-волн.



**Рис. 2** К концу 1980-х интерес к P-волнам как к источнику S-волн значительно возрос. Частично это произошло благодаря развитию ВСП, поле которого показано здесь. P-волна порождает S-волну (отражение SV желтого цвета), которая имеет амплитуду, соизмеримую с отражениями P-волны (восходящие оси синфазности красного цвета на вертикальной компоненте). Взято у Иверсона (Iverson) и др. (1989).

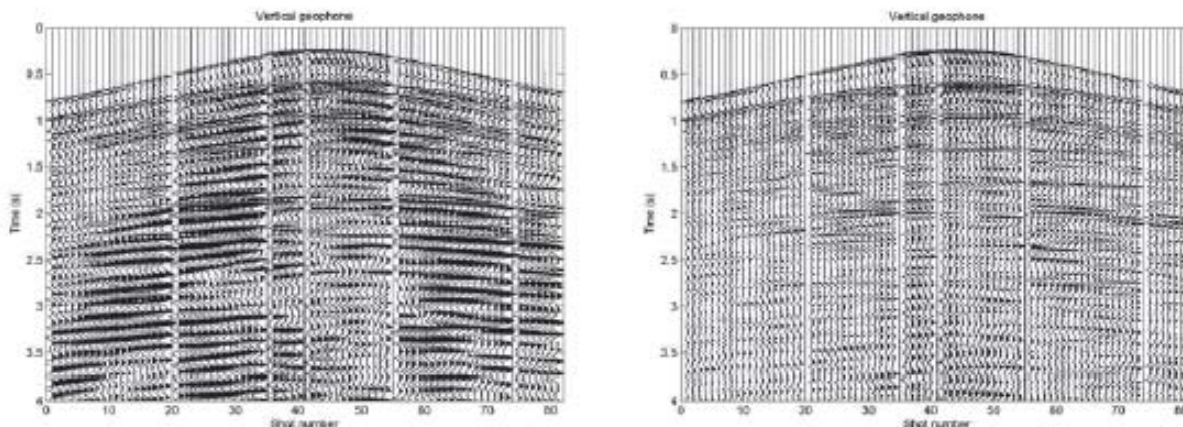
Измерительные системы продолжают постоянно развиваться; в последнее время на рынке были предложены новые наземные ЗС, морские донные сейсмоприемники (OBS) и кабели (OBC) 4С. Все развитие направлено на улучшение качества данных и увеличение количества каналов (что необходимо, т.к. ЗС приемники приводят к трехкратной потере кратности в доступных каналах с соответствующим снижением эффективности). Акселерометры для регистрации МКВП применяются в последнее время в основном для решения проблемы ограничения спектра со стороны низких частот, связанным с применением сейсмоприемников-велосиметров. Запатентованный дизайн корпуса датчика для морских систем наблюдения на много повысил точность векторных измерений (например, Kragh и др., 2004).

Q-Seabed – пример систем следующего поколения, которые смогли повысить соотношение сигнал/шум и точность векторных измерений при регистрации S-волн. Это глубоководная кабельная система, использующая инклинометры, подвешенные не карданным способом 4С акселерометры и соединительные устройства для каждой станции. На рис. 4 можно видеть пример улучшения стыковки данных и повышения векторной точности. Слева показана типичная сейсмограмма общей глубинной точки для вертикального датчика с цилиндрическим корпусом, а справа приемник расположен там же, на расстоянии 12.5м при этом четко видно положительное влияние соединительных устройств. На рис. 5 изображена типичная сейсмограмма общей глубинной точки с юго-восточной площади Камерон Мексиканского залива (GoM). Заметьте, что горизонтальные компоненты, X и Y, очень хорошо сбалансированы, а вертикальная Z имеет минимальный поперечный шум. В действительности, часть этой энергии относится к истинному вертикальному движению и также присутствует на волновом поле продольных волн гидрофона.



**Рис. 3** При многокомпонентной записи выявлено, что поле PS-волн (b) в целом имеет более широкий спектр и лучшее отношение сигнал/шум, чем поле S-волн (c). На рис. показано для сравнения поле P-, PSV- и SH-волн из данных по южному Техасу, где поле PSV-волн имеет лучшее разрешение, чем поле SH-волн. Гайзер (Gaiser) (1996).





**Рис. 4** Система Q-Seabed позволила улучшить векторную точность и повысить стыковку данных. В ней используются подвешенные не карданным способом 4C акселерометры и соединительные устройства на корпусе датчиков, имеющие выступающую форму, благодаря чему уменьшается движение материала пород под действием фронта волны. Слева показана типичная сейсмограмма общей глубинной площадки для вертикального датчика с цилиндрическим корпусом. Справа приемник расположен там же на расстоянии 12,5 м, можно видеть положительное воздействие соединительных устройств.

### Обработка

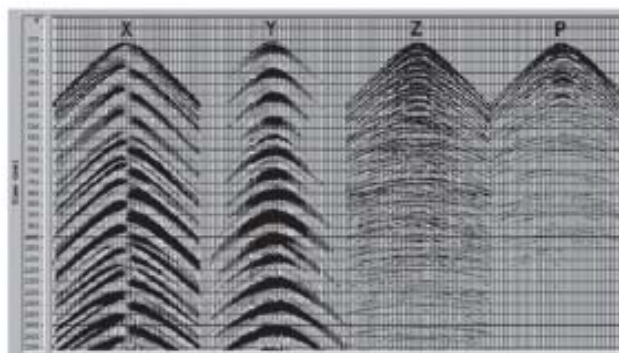
Обработка поля PS-волн несомненно стала неотъемлемой практической частью нашей индустрии, несмотря на сложность графа обработки по сравнению с Р-волнами. Огромные достижения были сделаны в этой области за последние несколько лет, в результате чего информативность S-волн стала сравнимой с Р-волнами в терминах отношения сигнал/шум и качества визуализации. Ключевыми решениями здесь были:

- фокусировка на энергии PS-волн, поле которых, по сравнению с методом, использующим источники S-волн, ограничивает сильные поперечные помехи и эффекты двойного лучепреломления нисходящих поперечных волн.
- Повышенное качество измерений в системах, описанных выше. В частности, снижение уровня поперечных помех на вертикальной составляющей, что отразилось на качестве поля PZ.
- Объединенная амплитудная инверсия поля Р- и PS-волн уменьшила неопределенности в расчете импеданса и плотности пород.
- Усовершенствованные процедуры визуализации поля PS-волн с использованием поправок за преломление и анизотропную миграцию до суммирования. Для PS-волн ввод поправок за анизотропию является обязательным (Кристиансен (Kristiansen) 2004).

### Применение

Один из практических и коммерческих способов применения PS-волн базируется на различии коэффициентов отражения Р- и S-волн для резервуаров класса II. Здесь, низкие коэффициенты отражения на маленьких углах падения дают границы пластов, еле заметные на суммированных разрезах по обычным Р-волнам, а наоборот, коэффициент отражения S-волн может быть сильным и успешно применяться для картирования резервуара.

Хорошим примером служит площадь Альба (Alba) в Северном море, где продуктивные песчаники не заметны на суммированных разрезах по обычным Р-волнам, а разрез по PS-волнам дает четкий контраст импедансов с окружающими глинами (рис. 6). Эти 4C-3D данные площадью 67 км<sup>2</sup> получены зимой 1998 г. объединенной



точности, максимальный шум. Можно видеть, что горизонтальные компоненты, X и Y, очень хорошо сбалансированы, а вертикальная Z имеет минимальный поперечный шум. В действительности, часть этой энергии относится к истинному вертикальному движению и также присутствует на волновом поле продольных волн гидрофона.

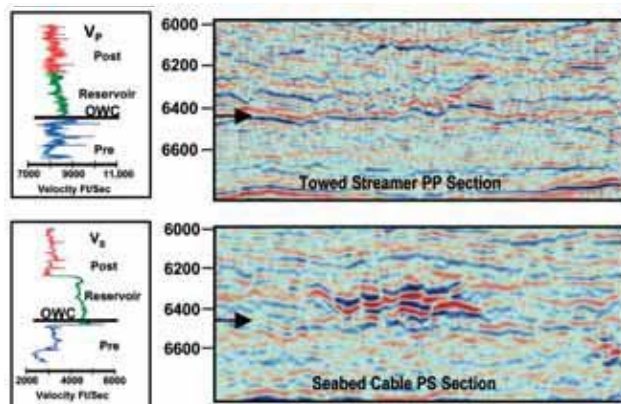
компанией Chevron and Alba. По данным PS-волн отбивается кровля резервуара, представленного нефтенасыщенными песчаниками. Скорость Р-волн одинакова для резервуара и вмещающих пород, в то время как скорость S-волн возрастает в нефтенасыщенных песчаниках. Это объясняется тем, что объемная плотность и модули всестороннего сжатия уменьшаются при переходе от вмещающих пород к коллектору, в то время как модуль сдвига остается постоянным.

Поле PS-волн указывает на то, что форма песчаного тела совершенно иная, нежели предполагалось ранее, и картирование этого тела может быть уточнено. Эти данные также позволили компании ChevronTexaco лучше понять эксплуатационные параметры некоторых действующих скважин. Что еще более важно, данные поперечного импеданса, измеренные по полю PS-волн 3D съемки OBC (рис. 7) сыграли решающую роль при

разработке и позволили достигнуть при бурении более сложных целевых объектов (10 красных линий), с последующим возрастанием ресурсов примерно на 100-200 млн. брл. нефтяного эквивалента (Уилкинсон (Wilkinson), 2003).

Бесспорно, не только PS-волны позволяют успешно интерпретировать данные. Из рис. 7 можно видеть, что поперечный импеданс по PZ-волнам, вычисленный с помощью AVO анализа, дает примерно такую же картину распределения свойств песчаного резервуара на площади Альба (Уилкинсон (Wilkinson), 2003). Результат не является неожиданным для нас, т.к. легко объясняется физически: Р-волна в AVO-анализе соответствует амплитудным эффектам второго порядка, связанным с амплитудой первого порядка PS-волны. Но здесь можно заметить не только сходства, но и различия. Вопрос заключается в том, возможно ли прийти к тем же результатам, связанным с разработкой и увеличением запасов, только по Р-волне, не используя съемку ОВС? К сожалению, в данном случае, ни AVO-анализ по Р-волнам, ни исследование поля PS-волн точно не увязывается со скважинными данными, поэтому мы не можем оценить, какой из способов более корректный. В любом случае, улучшенная характеристика резервуара, сделанная с помощью сейсмической инверсии как по Р-, так и по S-волнам (Уилкинсон (Wilkinson), 2003), снизила неоднозначность и уточнила расчетную модель.

Другой важной прикладной задачей, решаемой с помощью PS-волн, является распознавание аномалий типа "яркое пятно" для резервуаров класса III. В присутствии газа, Р-волны достаточно яркие, а PS-волны, наоборот, слабо заметны (Нам (Nahm) и Дюон (Duhon), 2003). Когда же PS-волны остаются яркими, это свидетельствует о литологических изменениях, а не о наличии газа. На острове Юджин и некоторых других областях Мексиканского залива применение этого свойства способствовало открытию десятков миллиардов футов<sup>3</sup> газа. И хотя вопрос о применении исключительно

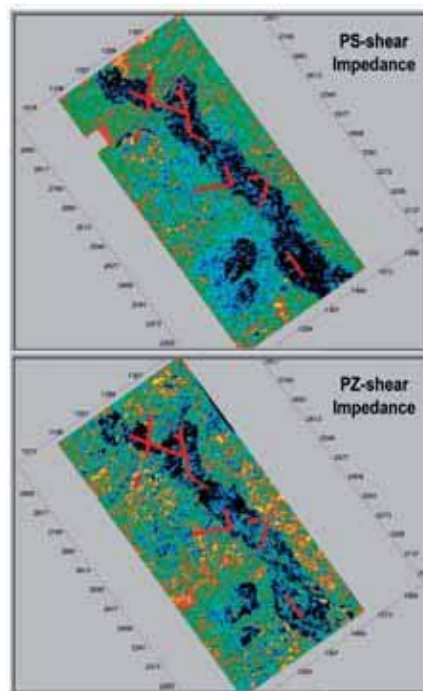


**Рис. 6** Плоская съемка (слева) в Северном море. Продуктивные песчаники почти не заметны на суммированных разрезах по обычным Р-волнам, а разрез по PS-волнам дает четкий контраст импедансов с окружающими глинами. По данным PS-волн отбивается кровля резервуара, представленного нефтенасыщенными песчаниками. Скорость Р-волн одинакова для резервуара и вмещающих пород, в то время как скорость S-волн возрастает в нефтенасыщенных песчаниках. Это объясняется тем, что объемная плотность и модули всестороннего сжатия уменьшаются при переходе от вмещающих пород к коллектору, а модуль сдвига при этом остается постоянным.

Р-волн по AVO-анализу остается открытым, исследования показали, что совместное использование инверсии по Р- и PS-волнам снижает неоднозначность определения импеданса и плотности коллектора (Малик (Mallick), 2000).

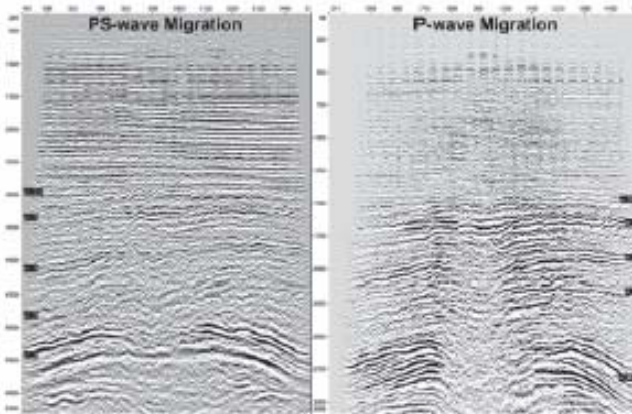
Одним из наиболее важных свойств PS-волн, позволяющим использовать их при интерпретации, является их относительная нечувствительность к флюидам. Этот факт позволяет применять их при картировании газовых областей, которые S-волны проходят, практически не изменяясь, в то время как Р-волны претерпевают значительные изменения. S-волны сыграли существенную роль при разведке десятков миллионов баррелей нефти и миллиардов м<sup>3</sup> газа в Северном море и Мексиканском заливе. В настоящее время, проекты по изучению PS-волн, потенциально могут повысить мировые запасы нефти на миллионы баррелей нефти и на триллионы футов<sup>3</sup> газа.

Ярким примером эффекта прохождения Р-волной газовой области может служить волновое поле, полученное на площади Валгалла в Северном море (рис. 8). Можно видеть, что амплитуда и время Р-волн заметно меняются (зона отсутствия отражений) по сравнению с PS-волнами. Естественно, это типичный пример случая, когда необходима глубинная миграция до суммирования.

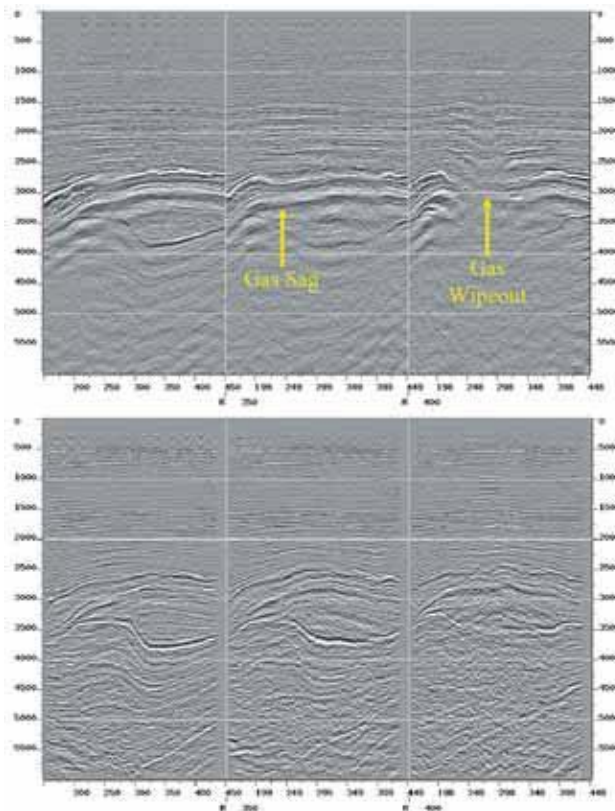


**Рис. 7** Данные поперечного импеданса (верхняя карта), измеренные по полю PS-волн 3D съемки ОВС позволили достигнуть при бурении более сложных целевых объектов (10 красных линий), что привело к увеличению ресурсов примерно на 100-200 млн. брл. нефтяного эквивалента (Уилкинсон (Wilkinson), 2003). Поперечный импеданс по PZ-волнам (нижняя карта), вычисленный с помощью AVO-анализа, дает примерно такую же картину распределения свойств песчаного резервуара на площади Альба. Улучшенная модель резервуара, сделанная с помощью сейсмической инверсии как по Р-, так и по S-волнам снизила неоднозначность и уточнила расчетную модель.





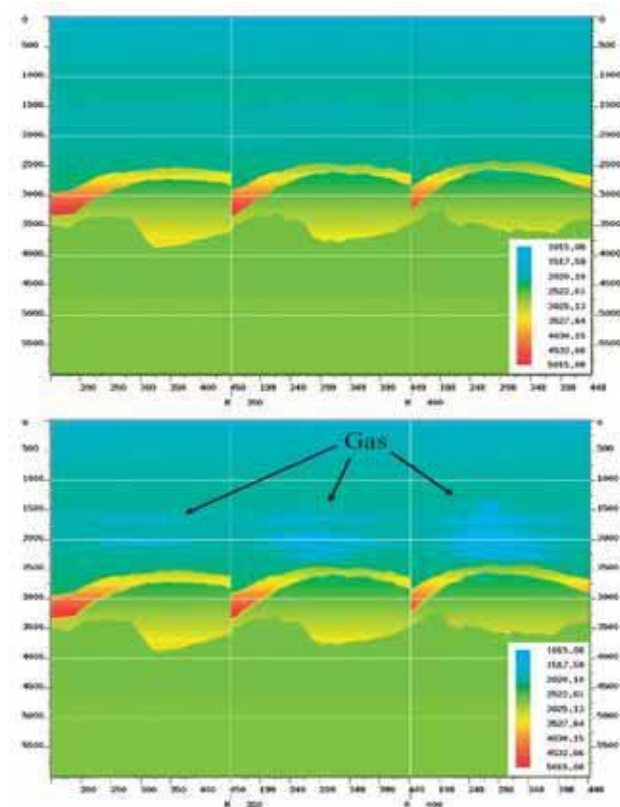
**Рис. 8** Сравнение обычных мигрированных разрезов по PS- и P-волнам через площадь Валгалла. Заметно, что поле PS-волн не подвержено влиянию газа по сравнению с полем P-волн и дает более устойчивую картину структуры.



**Рис. 9** Площадь Валгалла в Северном море. На верхнем изображении видно, что влияние газа вызывает потерю корреляции в поле P-волн. К этим данным применялись стандартные процедуры введения DMO поправок и миграции после суммирования. На нижнем изображении видно, что глубинная миграция до суммирования способна обеспечить получение качественного изображения поля P-волн в газовой области площади Валгалла (Деллингер (Dellinger) и др., 2001). Эти разрезы были получены при помощи тщательного построения скоростной модели с использованием скважинных данных и поля PS-волн.

Тем не менее, построение скоростной модели по P-волнам в таких случаях отнюдь не тривиальная задача (на самом деле эта проблема и дала толчок к развитию SUMIC компанией Statoil Research в 1994 г.). Очень полезным может быть использование PS-волн для ограничения параметров скоростной модели по P-волнам. Деллингер (Dellinger) и др. (2001), применяя этот метод, показали, что глубинная миграция до суммирования может дать лучшие результаты в газовых залежах Валгалла по сравнению с общепринятым методом DMO и глубинной миграции после суммирования, как показано на рис. 9. Эти разрезы были получены путем тщательного построения скоростной модели с использованием скважинных данных и поля PS-волн. На рис. 10 приведены для сравнения разрезы скоростей миграции до и после суммирования. И хотя заметны лишь небольшие изменения между этими изображениями, результаты миграции отличаются существенно.

Как и в случае резервуаров класса II, мы находим, что анализ PS-волн значительно увеличивает возможности интерпретации по P-волнам. Ключевым остается вопрос, насколько возможно обойтись без дополнительной информации, извлекаемой из поля поперечных волн. Задача глубинной миграции до суммирования по P-волнам становится очень сложной, если не использовать данные PS-волн. Деллингер (Dellinger) объясняет,



**Рис. 10** Сравнение разрезов скоростей миграции после (вверху) и до (внизу) суммирования на площади Валгалла. Несмотря на то, что заметна лишь небольшая разница между изображениями, результаты миграции отличаются существенно.

что "использование PS-волн похоже на подглядывание ответов в конце книги".

Применение S-волн основывается также на их свойстве не реагировать на изменения флюидонасыщения. В действительности, AVO-анализ по P-волнам также базируется на этой особенности, т.к. при ненулевых углах падения происходит распределение энергии между P- и S-волнами. Ключевым остается вопрос, насколько достаточно поле PS-волн дает дополнительной к AVO-анализу информации, чтобы оправдать лишние затраты на выполнение PS съемки. На сегодняшний день, кажется, что ответ, в общем, будет отрицательный; тем не менее, потребность перехода от качественного описания флюидонасыщения и литологии к количественным параметрам дает толчок к развитию этого метода.

Существуют и другие области применения анализа PS-волн, в которых он может оказаться выгодным и привести к приращению запасов и, возможно, более детальной характеристики резервуаров. Особо важным может стать использование времени прохождения и поляризационных свойств S-волн и двойного лучепреломления для характеристики трещиноватости (Ветри (Vetri) и др., 2003) и геомеханических рисков на мелководье. Олофсон (Olofsson) и др. (2003), а также Ван Док (Van Dok) и др. (2003) приводят примеры преломления S-волн на площади Валгалла и Экофиск в Северном море, в которых свойства быстрых S-волн, такие как ориентация и размах азимутальной анизотропии, прекрасно коррелируются на морском дне с донными отложениями и оказываются чувствительными к локальным вариациям напряжения. Другие немаловажные области применения, такие как сейсмомониторинг, предсказание давления, улучшенный AVO-анализ, расчет плотности и оценка рисков бурения находятся еще на начальном этапе развития.

Наконец, на площади Валгалла впервые произведен мониторинг методом МКВП (Барквед (Barkved) и др., 2004). И если эта технология окажется коммерчески выгодной, то ее роль в индустрии значительно возрастет.

## Заключение

В некоторых областях метод МКВП является конкурентоспособным методом, и стало очевидным, что наиболее удобным способом получения S-волн является поле P-волн. На рынке доступно несколько видов многокомпонентных систем регистрации данных. По всему миру произведено сотни съемок с записью поля PS-волн. Двумя наиболее важными точками приложения метода является определение свойств флюидонасыщения и литологии, а также прохождение газонасыщенных пород. Хотя P-волны иногда могут нести информацию о характере S-волн, очевидно, что поле PS-волн позволяет получить практические ограничения и снизить неопределенность при решении задач.

Огромный потенциал представляет собой развитие таких областей применения метода как определение трещиноватости, предсказание давления и оценка рисков бурения. И та дополнительная информация, которую можно извлечь из МКВП оправдывает увеличение стоимости полевых сейсмических работ и может открыть новые перспективы использования этой технологии.

## Благодарности

Мы хотим поблагодарить Дэйва Уилкинсона (Dave Wilkinson) из ChevronTexaco за плодотворные дискуссии и предоставленный материал из проекта Альба. Также мы благодарим компанию BP за разрешение показывать данные изучения площади Валгалла и Джо Деллингера (Joe Dellinger) за выражение своих взглядов на развитие метода МКВП.

## Ссылки

- Alford, R.M. [1986] Shear data in the presence of azimuthal anisotropy: Dilly, Texas. *56<sup>th</sup> SEG Annual International Meeting, Houston, Expanded Abstract, S9.6*, 476-479.
- Barkved, O.I., Kommedal, J.H., and Thomsen, L. [2004] The Role of Multi-component Seismic Data in Developing the Valhall Field. *66<sup>th</sup> EAGE Conference and Exhibition, Paris, Eo40*.
- Berg, E., Svenning, B., and Martin, J. [1994] SUMIC - A new strategic tool for exploration and reservoir mapping. *56<sup>th</sup> EAGE Conference and Exhibition, Vienna, G055*.
- Dellinger, J., Clarke, R., and Whitmore, D. [2002] P and C-wave depth imaging at Valhall field. *FORCE Seminar, Stavanger: 4C/OBS data processing and interpretation - old myths, new insights*.
- Ensley, R.A. [1984] Comparison of P- and S-wave seismic data: A new method for detecting gas reservoirs. *Geophysics*, **49**, 1420-1431.
- Gaiser, J.E. [1996] Multicomponent Vp/Vs correlation analysis. *Geophysics*, **61**, 1137-1149.
- Garrota, R.J., and Granger, P.Y. [1988] Acquisition and processing of 3-Cx3-D data using converted waves. *58<sup>th</sup> SEG Annual International Meeting, Anaheim. Expanded Abstracts*, 995-997.
- Iverson, W.P., Fahmy, B.A., and Smithson, S.B. [1989] VpVs from mode-converted P-SV reflections. *Geophysics*, **54**, 843-852.
- Kragh, E., Vigner, A., Buizard, S., Strommen-Melbo, A., Horne, S., Robertsson, J., Combee, L., Iranpur, N., Goujon, N., Gaiser, J., Caprioli, P., Muyzert, E., and Martin, J. [2004] Vector Fidelity Characterization of a Marine Multi-component Acquisition System. *66<sup>th</sup> EAGE Conference Exhibition, Paris, P293*.
- Kristiansen, P., Fowler, P., and Mobley, E. [2004] Anisotropic Kirchhoff prestack time migration and velocity model building in multicomponent processing. *74<sup>th</sup> SEG Annual International Meeting, SEG, Denver, Expanded Abstracts, MC 2.2*.
- Mallick, Subhashis [2000] Waveform inversion of converted wave data. *62<sup>nd</sup> EAGE Conference and Exhibition, Glasgow, C49*.
- Nahm, J. W., and Duhon, M.P. [2003] Interpretation and practical applications of 4C-3D seismic data. East Cameron gas fields, Gulf of Mexico. *The Leading Edge*, 300-309.

- Olofsson, B., Probert, T., Kommedal, J.H. and Barkved, O.I. [2003] Azimuthal anisotropy from the Valhall 4C 3D survey. *The Leading Edge*, **22**, 1228-1235.
- Van Dok, R.R., Gaiser, J.E., and Byerley, G. [2003] Near-surface shear-wave birefringence in the North Sea: Ekofisk 2D/4C test. *The Leading Edge*, **22**, 1236-1242.
- Vetri, L., Loinger, E., Gaiser, J., Grandi, Andrea, and Lynn, H. [2003] 3D/4C Emilio: Azimuth processing and anisotropy analysis in a fractured carbonate reservoir. *The Leading Edge*, **22**, 675-679.
- Wilkinson, D. [2003] Imaging the Alba reservoir with PS-waves from OBC data and AVO processing of PZ and PP data. *AVO Workshop, 73<sup>rd</sup> SEG Annual International Meeting, Dallas*.