

Цифровые акселерометры и их влияние на сейсморазведку

Мужно Д., Череповский А.В., SERCEL, г. Москва

Введение: от групп геофонов к цифровым акселерометрам

При традиционной сейсморазведке для регистрации упругих колебаний применяются группы сейсмоприемников, и электрические сигналы на выходе сейсмоприемников, соединенных в одну группу, суммируются. Как известно, этот прием обеспечивает ослабление случайных помех, повышение отношения сигнал/помеха и статистически хороший контакт приемников с грунтом, а также повышает чувствительность, что важно при регистрации слабых целевых отражений. Недостатки группирования так же хорошо известны: различная степень подавления волн-помех в зависимости от направления источника-приемник (если группа не изометричная, что редко осуществляется на практике); ослабление высоких частот вследствие статики внутри группы; ослабление полезного сигнала на больших удалениях вследствие неперпендикулярности выхода лучей на поверхность наблюдений [1, 3]. Это объясняет, почему геофизики двигались в следующих направлениях:

- **К одиночным датчикам:** при постепенном увеличении количества регистрируемых каналов, в нашей отрасли одновременно наблюдалось применение все меньших групп сейсмоприемников с целью неискаженной регистрации не только сигнала, но и регулярных помех. При этом повышение отношения С/П достигалось на более поздней стадии сейсморазведочного цикла – на этапе обработки данных. «Одиночным датчиком» может служить как одиночный сейсмоприемник, соединенный с аналого-цифровым преобразователем (АЦП), так и группа сейсмоприемников, установленных «в точке». Преимущества сейсморазведки с одиночными датчиками очевиднее, когда применяется и одиночный источник.
- **К цифровым датчикам:** традиционные сейсмоприемники генерируют электрический сигнал благодаря магниту, колеблющемуся относительно катушки. Аналоговый сигнал передается по проводам к АЦП, и затем дискретный сигнал записывается сейсмостанцией. Идея, которая реализуется в случае одиночного цифрового датчика – разместить чувствительный элемент и АЦП в одном корпусе для повышения компактности и надежности регистрирующего оборудования. Одновременно можно исключить помехи, связанные с передачей аналогового сигнала по проводам (наводки, взаимные влияния). Поскольку на выходе такого датчика сигнал имеет цифровой формат, то датчик и называется цифровым, хотя чувствительный элемент остается аналоговым. По существу, все цифровые датчики должны использоваться как одиночные, а их сигналы записываются как отдельные трассы.
- **К акселерометрам:** чувствительный элемент цифрового датчика может быть измерителем скорости колебаний частиц грунта (велосиметром) или ускорений (акселерометром). Традиционный электродинамический сейсмоприемник является, в основном, велосиметром, поскольку генерируемое им напряжение пропорционально скорости колебаний частиц грунта на частотах, выше его собст-

венной частоты (например, 10 Гц). В то же время, такие сейсмоприемники функционируют как акселерометры на частотах ниже собственной частоты. Имеются сейсмоприемники, собственная частота которых находится за пределами сейсмического спектра (например, 200 Гц). Такие геофоны-акселерометры характеризуются более широким линейным амплитудно-частотным спектром в области ускорений, чем традиционные сейсмоприемники. Однако, их фазовый спектр непостоянен. Преимущество микро-электронно-механических систем (МЭМС) заключается в том, что их амплитудные и фазовые спектры линейны в широком диапазоне частот, от 0 Гц (постоянная составляющая) до примерно 800 Гц. Чувствительность вплоть до 0 Гц не является необходимой для регистрации сейсмических данных, но это свойство важно для определения направления силы тяжести, по которому рассчитывается наклон датчика и выполняется автоматический пересчет записанных данных к вертикали.

• **К трехкомпонентным датчикам:** все трехкомпонентные (3С) цифровые акселерометры основаны на МЭМС, что обеспечивает им отличные характеристики и компактность чувствительных элементов. На начальном этапе применения МЭМС-акселерометров основной интерес к этим датчикам на рынке был связан с удобством регистрации полного волнового поля (PP + PS + возможно, SS) и с возможностью улучшения сейсмических изображений среды на обменных (PS) волнах. Позднее использование цифровых 3С-датчиков было также сфокусировано на получении более высококачественных данных на продольных волнах (PP) путем применения поляризационной (векторной) фильтрации поверхностных волн и других волн-помех, а также благодаря корректировке угла установки датчиков.

Таким образом, «цифровой датчик» – это не только одиночный датчик, конструктивно объединенный с АЦП. В большинстве случаев это трехкомпонентный МЭМС-акселерометр и именно такие датчики будут рассматриваться ниже.

Этап тестирования: раскрытие возможностей цифровых датчиков

Целью первых тестовых съемок с цифровыми датчиками было продемонстрировать, что они – по крайней мере – так же хороши, как традиционные сейсмоприемники, или лучше. Цифровые датчики часто устанавливались бок о бок с геофонами, но почти никогда это не было сравнением один к одному. Все параметры смешивались: точечная регистрация против группирования, аналоговая регистрация против цифровой, велосиметры против акселерометров, МЭМС против электродинамических датчиков и трехкомпонентные приборы против одноканальных приборов. Такое смешение не позволяло установить однозначно преимущества того или иного параметра. Таким образом, эти тесты были скорее сравнением новых методик регистрации сейсмических данных с традиционными методиками, но не всегда результаты были обнадеживающими.

• **Отсутствие наводок:** одно из явных преимуществ

ществ этих новых датчиков - полностью цифровая передача сигнала от приемника к регистратору. Это обеспечивает хорошую защиту от электромагнитных наводок, например, вблизи линий электропередач. Это преимущество было убедительно показано при ранних тестах: наводки частотой 50-60 Гц отсутствовали при применении цифровых датчиков. Конечно, помехи на этих частотах все равно могут наблюдаться, но если они вызваны акустическими сигналами от насосов, моторов и т.д.

Низкие частоты: ожидалось, что цифровые датчики обеспечат существенное расширение регистрируемого сигнала в сторону более низких частот (5 Гц и ниже), что очень важно как для улучшения изображений среды, так и для более надежного определения коллекторских свойств. В большинстве случаев результаты были разочаровывающими, особенно при взрывных исследованиях. На низких частотах (НЧ) редко наблюдались существенные различия между аналоговыми сейсмоприемниками и цифровыми датчиками. Причина заключалась в том, что взрывной источник зачастую генерирует высокоамплитудные низкочастотные поверхностные волны (от 2-4 Гц), в то время как доля НЧ (ниже 10 Гц) в объемных упругих волнах очень небольшая. Однако, при съемках с очень низкочастотными свип-сигналами или с более тщательно спланированными взрывными скважинами были получены записи с полезной информацией, содержащей НЧ вплоть до 5 Гц.

Высокие частоты: сейсмограммы ОПВ, полученные с цифровыми датчиками, часто выглядят предпочтительнее, чем такие же сейсмограммы с группами геофонов с точки зрения высоких частот (ВЧ). Причиной может быть статика внутри групп геофонов, которая ослабляет высокочастотную часть спектра. В действительности, основная причина амплитудно-частотных различий на исходных записях, зарегистрированных двумя типами датчиков, - это увеличение чувствительности МЭМС-акселерометров на 6 дБ/окт (при постоянном значении скорости). Записи с цифровыми датчиками обычно теряют преимущества в области ВЧ после процедуры интегрирования. Кроме того, эти различия нивелируются после деконволюции сжатия и суммирования по ОГТ. Что касается окончательных разрезов, то вертикальная разрешенность с цифровыми датчиками часто лучше, чем с (большими) группами геофонов, особенно на относительно небольших временах регистрации (до 1,5-2 с) и если шаг между одиночными цифровыми датчиками был сокращен. На относительно больших временах регистрации (>2 с) преимущества цифровых датчиков невелики или даже отсутствуют из-за высокого уровня помех и более низкой чувствительности одиночных цифровых датчиков к слабым отражениям.

Случайные помехи: как известно, большие группы сейсмоприемников являются эффективным средством подавления случайных помех (например, группа из 36 приемников давит случайные помехи в 6 раз). Естественно, что одиночные цифровые датчики не ослабляют случайные помехи при регистрации упругих колебаний, и записи с цифровыми датчиками характеризуются более низким отношением С/П. Для повышения глубинно-

сти исследований с одиночными цифровыми датчиками необходимо уменьшать шаг наблюдений (и следовательно, кратность суммирования) по сравнению с шагом между группами сейсмоприемников.

Регулярные помехи: поверхностные волны имеют высокие амплитуды на записях с одиночными цифровыми датчиками из-за отсутствия группирования. Чтобы эффективно подавить такие низкоскоростные помехи на этапе обработки, рекомендуется регистрировать их без алейсинга, и интервал между цифровыми датчиками должен быть не больше $L = V_a / 2F_a$ (где V_a - кажущаяся скорость волн-помехи, F_a - частота волн-помехи). Однако, для наблюдений с небольшим шагом между точками приема (5 м или меньше) может потребоваться очень большое количество каналов. Другой способ подавления волн-помех, не связанный с плотностью наблюдений, возможен при регистрации данных трехкомпонентными цифровыми приборами. Это поляризационная (векторная) фильтрация, базирующаяся на предположении, что поверхностные волны имеют эллиптическую поляризацию и распространяются радиально от источника к приемникам. Если эта помеха регистрируется на двух компонентах (с 90°-ным фазовым сдвигом), то можно выполнить взаимную корреляцию трасс и адаптивно вычесть помеху. Таким образом, волн-помехи можно подавлять индивидуально на каждом трехкомпонентном пункте приема (ПП). Когда этот метод эффективен, шаг между ПП не определяется пространственным квантованием волн-помех. Это хорошая иллюстрация того, что регистрация полного волнового поля может быть полезна для повышения качества данных на продольных (Р) волнах.

Подводя итоги, мы можем сказать, что одиночные цифровые датчики регистрируют как полный сигнал, так и весь спектр помех. Но частотный состав будет шире по сравнению с группами аналоговых сейсмоприемников и результирующие сейсмические изображения среды должны иметь более высокое качество.

Один важный урок, который мы извлекли из выполненных тестов цифровых датчиков, относится к зашумленным площадям с глубокими целевыми объектами, где одиночный акселерометр не в силах заменить (большую) группу традиционных сейсмоприемников. Шаг наблюдений с цифровыми датчиками нужно сокращать в несколько раз, но, к счастью, не до величины шага между отдельными сейсмоприемниками в группах. Если сравнивать с линейными группами сейсмоприемников, то мы полагаем, что шаг между одиночными цифровыми датчиками должен быть не больше, чем половина интервала между центрами групп, но не меньше, чем двойной интервал между отдельными сейсмоприемниками в группе.

Производственный этап: регистрация полного волнового поля с высокой плотностью и разрешенностью

После этапа тестирования, который занял несколько лет, одиночные цифровые датчики получили признание и стали использоваться в производственных съемках, доказывая определенные преимущества этого подхода к регистрации сейсмических данных. С точки зрения технологичности, их низкое энергопотребление, небольшой вес и интегрированности (меньшее количество разъемов и соединений) очень выгодны, особенно при выполнении полевых

МВС: НОВЫЕ РЕШЕНИЯ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

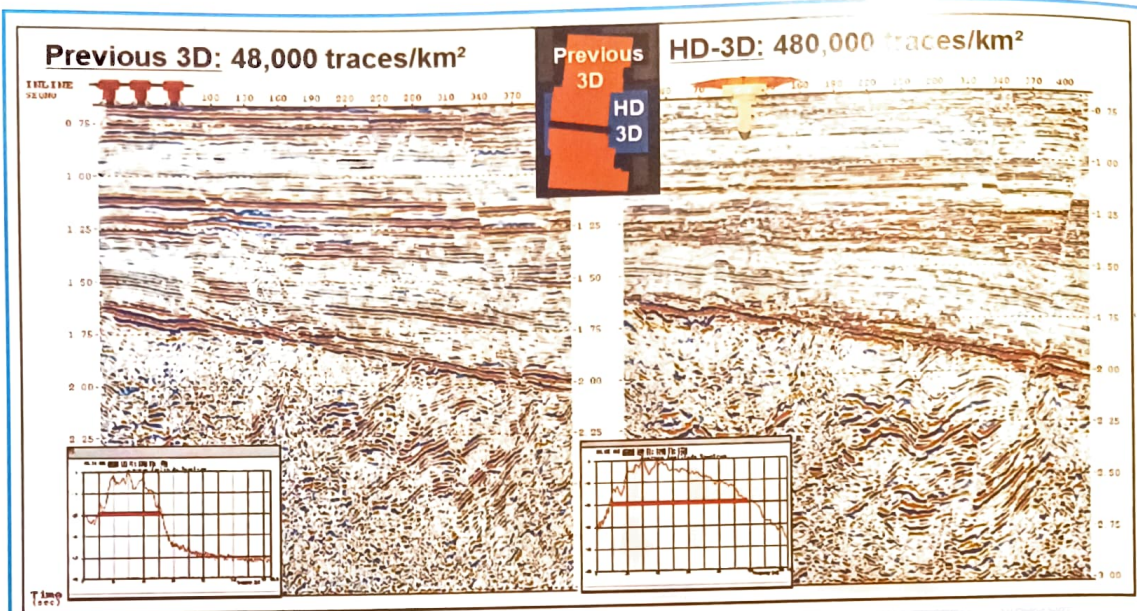


Рис.1: Сравнение результатов двух перекрывающихся съемок: старой съемки с низкой плотностью наблюдений и группами геофонов (слева) и новой съемки с высокой плотностью наблюдений и цифровыми датчиками (справа).

работ с применением вертолетов. Цифровые датчики полностью совместимы с современными регистрирующими кабельными и бескабельными системами (такими как 428XL и UNITE) и не требуют никакой специальной адаптации. Они могут использоваться даже в комбинированных приемных расстановках, состоящих из обычных АЦП, соединенных с аналоговыми сейсмодатчиками, и однокомпонентных (1C) или трехкомпонентных (3C) цифровых датчиков. Возможен контроль качества таких сейсмограмм в реальном времени, путем сравнения трасс, записанных сейсмодатчиками и вертикальной компонентой цифровых датчиков, приведенной (интегрированной) к скоростям. Большие съемки 3Д в Китае уже выполняются сейсмодатчиками, располагающими до 15000 трехкомпонентных цифровых датчиков. Это передовой край технологий наземной сейсморазведки, при которой для

обеспечения высокой плотности трасс (до 3.5 млн. на кв. км), высокой пространственной и вертикальной разрешенности (бин 10×10 м), и часто для сбора многоволновых данных применяется очень большое количество каналов.

С геофизической точки зрения, цифровые датчики обеспечивают высокую точность восстановления вектора колебаний и учет угла установки (автоматический пересчет к вертикали). Мы приводим три успешных практических примера применения одиночных цифровых датчиков:

- ВНК по результатам съемки 3Д с высокой плотностью: ограниченная вертикальная разрешенность сейсмических данных – основной камень преткновения для идентификации неоднородных тонких коллекторов и для привязки сейсмических горизонтов к скважинам. При использовании сверхмногоканальных

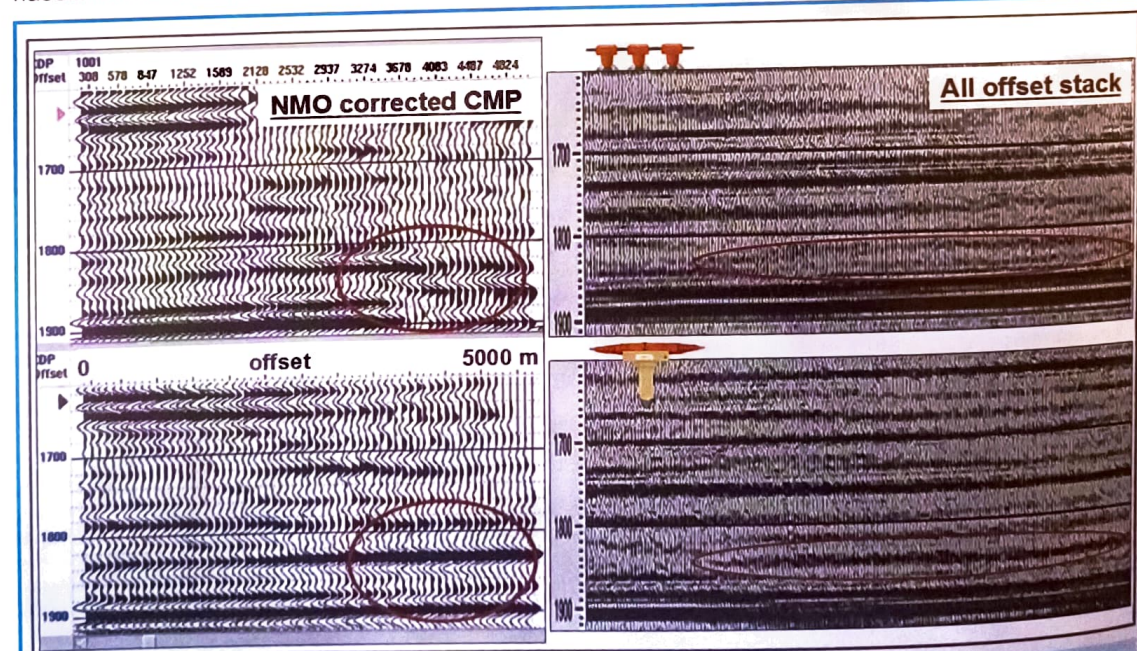


Рис.2. Сравнение сейсмограмм с введенными кинематическими поправками (слева) и соответствующих суммарных разрезов (справа). Верхние изображения получены с группами геофонов, а нижние – с одиночными акселерометрами.

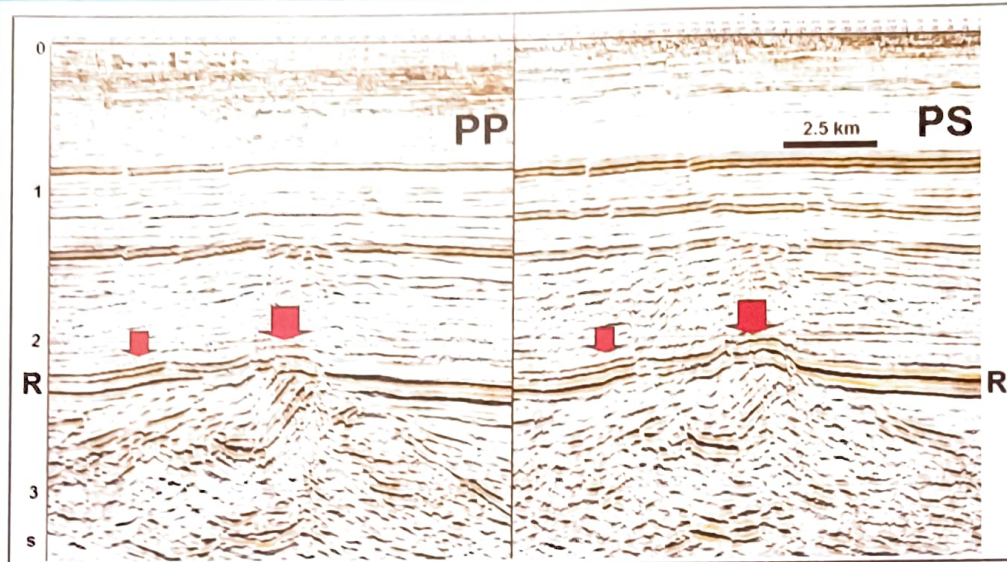


Рис. 3. Сравнение мигрированных разрезов на продольных волнах (слева) и обменных волнах (справа). Амплитуды отражения от кровли коллектора, обозначенной красными стрелками, гораздо выше на разрезе обменных волн.

регистрирующих систем и одиночных цифровых датчиков можно сохранить ВЧ сейсмических данных и одновременно повысить отношение С/П. На северо-западной окраине Джунгарского бассейна компания PetroChina выполнила сравнение (рис. 1) результатов старой съемки 3Д с низкой плотностью наблюдений и группами сейсмоприемников (по 36 штук) с шагом 50 м с результатами съемки 3Д с высокой плотностью наблюдений (площадью 100 кв.км) и цифровыми однокомпонентными датчиками DSU1 с шагом 20 м. Плотность наблюдений при новой съемке составила 480000 трасс/кв. км, что в 10 раз выше, чем при старой съемке на этой площади [2]. Мы видим, что вертикальная разрешенность существенно повысилась на временах до регионального несогласия, а

отношение С/П повысилось ниже этой границы. На уровне подошвы третичного коллектора (1,2 с) новые сейсмические данные позволили уточнить протяженность «ярких пятен», связанных с ВНК, контролируемым малоамплитудными разломами.

Маломощные газонасыщенные коллектора, выделяемые по методике AVO: практика показывает, что цифровые датчики позволяют получить более уверенные данные для AVO-анализа во всем диапазоне удалений. В случае возрастания амплитуды отражения с удалением (AVO-аномалии класса 3), применение цифровых датчиков позволяет сохранить «яркие пятна» на суммарных разрезах и выделить газонасыщенные коллектора. Сулижское месторождение газа в бассейне Ордос – это самое большое низкосернистое место-

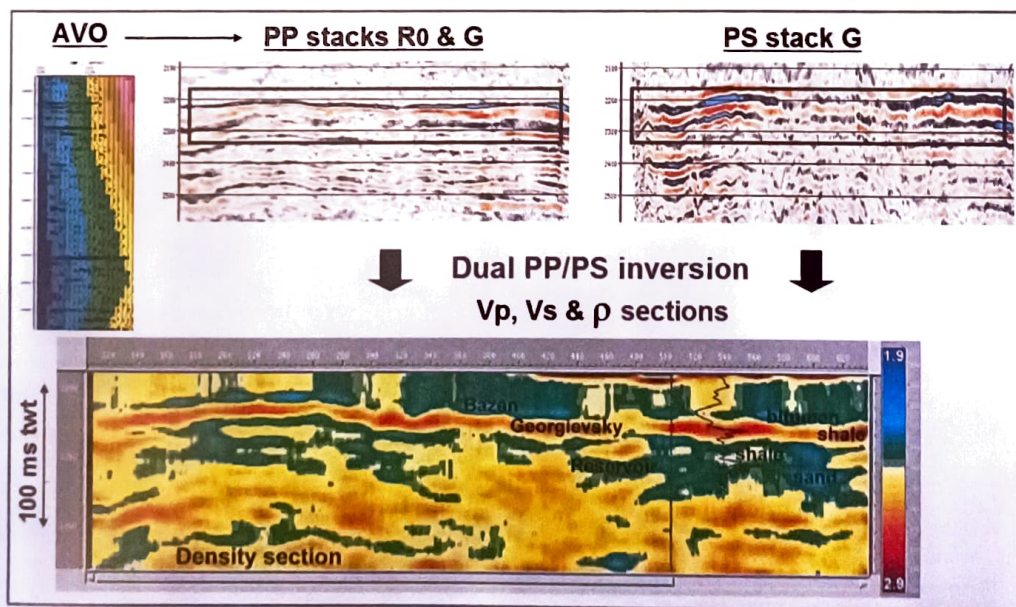


Рис. 4. Результаты совместной инверсии на продольных (PP) и обменных (PS) волнах. На плотностном разрезе (внизу) уверенно прослеживаются низкоплотная баженовская свита и высокоплотная георгиевская свита.

МВС: НОВЫЕ РЕШЕНИЯ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

рождение газа в Китае. Коллектор здесь представлен неоднородным чередованием маломощных флювиальных песчаных тел, не выделяемых по данным обычной сейсморазведки. Из-за небольших запасов газа в каждом пласте и относительно большой глубины (3300 м), процент успешного бурения был недостаточен высоким (62%) для экономичной разработки месторождения. Необходимо было прибегнуть к методам прямого обнаружения газа. Был отстрелен опытный профиль с цифровыми датчиками с шагом 10 м, - вместо обычных групп сейсмоприемников по 36 штук, - и на сейсмограммах удалось сохранить полезную информацию до удалений 5000 м. Было установлено, что амплитуда отражения от коллектора значительно возрастает с удалением (рис. 2). Такие данные не были получены с группами сейсмоприемников [5]. После обработки данных, включавшей AVO-анализ, суммирование дальних трасс и упругую инверсию, прямое обнаружение газа стало возможным. Эта же методика полевых работ была распространена на тысячи погонных км профилей с одиночными датчиками. В результате, процент успешного бурения скважин возрос до 94,4%. Это позволило компании PetroChina утроить добычу газа на данном месторождении в 2007 году - от 1,3 до 4 млрд. кубометров.

Маломощные газонасыщенные коллектора, выделяемые с помощью совместной PP-PS инверсии: качество обменных волн (PS) значительно повысилось благодаря использованию трехкомпонентных цифровых датчиков по сравнению с аналоговыми трифонами, а стоимость полевых работ снизилась. Хотя частотный состав и отношение С/П хуже, чем у данных PP, их сравнение стало более простым. После глубинной привязки отражений с помощью скважинных данных, была выполнена совместная PP-PS инверсия до суммирования, чтобы разграничить эффекты от флюидонасыщенности и литологии. Рядом с гигантским нефтяным месторождением Дачинг в 2002 году было открыто газовое месторождение Кингшень. Глубокозалегающий коллектор (3500 м) состоит из неоднородных вулканокластических формаций. Потенциал данных 3С был проверен путем полевых тестов вблизи разведочных скважин Хушень-1 и -6, которые прошли три газонасыщенных коллектора (мощностью 20-50 м). На мигрированных разрезах (рис.3) газонасыщенные отложения можно было выделить только по различиям в амплитуде отражения от кровли газонасыщенного коллектора: более слабая амплитуда на PP-разрезе и более сильная амплитуда на PS-разрезе. Совместная инверсия до суммирования позволила выделить до шести пластов и определить их упругие параметры (V_p , V_s и ρ). Высокое значение параметра γ ($V_p/V_s = 1,8$) использовалось для картирования слоев сланцев, которые дробят вулканокластические формации. Положительные значения флюидного фактора в кластических отложениях использовались для выделения газонасыщенных пластов и определения их сложной геометрии в межскважинном пространстве. Результаты интерпретации подтвердились по двум добывающим скважинам, не использованным при инверсии.

Плотностной разрез по результатам совместной PP/PS инверсии: возможности взрывной многоволновой сейсмики 2Д/3С в Западной Сибири были протестированы компанией Тюменнефтегеофизика (ныне ОАО «Интегра-Геофизика») [4]. Были получены высококачественные разрезы на PP и PS волнах, позволившие уверенно выполнить совместную инверсию двух типов сейсмических данных. В результате был построен плотностной разрез (рис. 4), на котором уверенно прослеживаются маломощные геологические Баженовская свиты, а также выделены перспективные перспективные зоны с пониженной плотностью (в правой части плотностного разреза).

Многочисленные опубликованные практические примеры убеждают, что цифровые датчики обладают потенциалом повышения вертикальной разрешенности, расширяя спектр записи как в сторону НЧ, так и ВЧ. Кроме того, данные с цифровыми датчиками лучше сохраняют амплитуды отражений и обеспечивают высококачественную регистрацию обменных волн, что дает возможность повысить качество сейсмических изображений среды и уточнить расчет коллекторских свойств.

Выводы: каково будущее цифровых датчиков?

Цифровые датчики, спустя 10 лет после своего появления, занимают не больше 5% рынка (в количестве пунктов приема) и все еще относятся к высокотехнологичной нише. Эти датчики, ставшие стандартными для многоволновых (3С) съемок и точечной регистрации, обладают характеристиками, позволяющими улучшить сейсмические изображения среды и точнее определять коллекторские свойства. Однако, если не говорить о съемках 3С, цифровые датчики в обозримом будущем не вытеснят традиционные группы сейсмоприемников, по крайней мере на площадях с высоким уровнем помех или глубокозалегающими целевыми объектами (слабые отражения). Относительно высокая стоимость цифровых датчиков сдерживает их распространение. Но на сегодняшний день сейсморазведки с самым большим числом регистрируемых каналов (35000 и больше) оснащены трехкомпонентными цифровыми МЭМС-акселерометрами. Линейка этих датчиков ширится, и теперь они могут использоваться с кабельными и бескабельными регистрирующими системами в самых разнообразных условиях работ: от донных наблюдений на море и в переходных зонах до болот и гор на суше.

Литература

1. Череповский А.В., 2009, Пришло ли время отказаться от группирования в пользу одиночных приемников? Тезисы докладов 11-ой международной научно-практической конференции Геомодель-2009, Геленджик, 7-10 сентября 2009 г.
2. Li, J. et al., 2009, Advantages of point acquisition high density 3D using digital sensors: a case study from the Che99 well area of the Junggar basin (China): CPS & SEG meeting, Beijing: Expanded Abstract.
3. Mougnot, D., and Thorburn, N., 2004, MEMS based accelerometers for land seismic acquisition: is it time? The Leading Edge, p. 246-250.
4. Mougnot, Denis, and Volkov, George, 2004, Evaluation of digital accelerometer performance, Extended abstracts, 66th EAGE Conference & Exhibition, Paris, 7-10 June 2004.
5. Shi, S. et al., 2009, Seismic acquisition with digital point receiver and pre-stack reservoir characterization at China's Sulige gas field: The Leading Edge, p. 324-331.