Практическое применение полноазимутальной, высокоплотной наземной съемки в Алжире. Operational implementation of full-azimuth, high-density land acquisition survey in Algeria

На этом примере полевых исследований по сложному проекту 3D наземной сейсморазведки, Marc Girard* (Total), Denis Mougenot (Sercel), Christophe Paulet (Total), Athman Rhamani (Sonatrach), Jose-Juan Griso (Cepsa), и Youcef Boukhalfa (Enageo) демонстрируют как современные системы с большим числом каналов обеспечивают ранее недостижимую плотную пространственную дискретизацию, и широкоазимутальную регистрацию.

Длительное время наземная регистрация 3D ограничивалась несколькими каналами, которыми могла одновременно управлять регистрирующая станция. В результате, плотная пространственная дискретизация и широкоазимутальная регистрация были недоступными возможностями улучшения сейсмического изображения и получения свойств коллектора. При наличии новейших систем регистрации, скорости передачи данные возросли на такую величину, что современная наземная расстановка может охватывать несколько десятков линий, а также несколько тысяч каналов, а центральный блок может производить запись данных по плотной квадратной сетке активных станций в режиме реального времени. Съемка площадью 913 км^2 над газовым месторождением Irharen, в бассейне Timimoun, Алжир (Рисунок 1), превосходно демонстрирует практическое применение такой идеальной 3D геометрии на открытой пустынной местности. Регистрация данных выполнялась Enageo, от имени Total E&P Algeria и партнерами Sonatrach и Cepsa. Перед подрядчиком стояло несколько проблем поддержания высокой производительности источника и запись в реальном времени данных с большого числа станций. Это достигнуто при том, что за миллион часов работы 480 сотрудников в поле не было зафиксировано потерь времени.

Поскольку сокращение времени производственного цикла является критичным параметром как для клиента, так и для подрядчика, все больше сейсмических партий работает 24 часа в день, при условии, когда позволяют условия охраны среды и техника безопасности. В Алжире, сбор данных разрешен только в течение светового дня (10-11 часов). Поскольку выполнить съемку планировалось в течение пяти месяцев, до тех пор, пока не наступят жаркие летние месяцы, были применены продвинутые методики Vibroseis в целях ускорения работы. В среднем, за 152 дней работы на ежедневной основе, было отработано 1766 ПВ и зарегистрировано 12.7 млн. трасс. Эти цифры доказывают, что возможности оптимизации современной регистрирующей аппаратуры могут оказывать существенное воздействие на длительность, а следовательно и на стоимость крупных проектов 3D.

Область съемки покрыта преимущественно, плоской гравийной равниной с отдельными маленькими утесами и сухими долинами (рисунок 2). Эти приповерхностные условия создают ощутимый поверхностный шум N, тогда как сигнал S достаточно затухает. В результате, соотношение S/N ранее отработанных 2D профилей не было оптимальным для обнаружения и получения характеристик изменения пористости в пределах нижне-девонского многослойного обломочного коллектора (максимальная глубина 3000 м).

Целью этой 3D сейсмической съемки было не только улучшение сейсмических изображений (точная структурная модель 3D, разрешение ...) но также, благодаря азимутальным вариациям анизотропии, получение характеристик открытых трещин, из которых добывается газ (Tod et al., 2007). Это поясняет требования к полно-азимутальной дискретизации.

Широкоазимутальная геометрия для планирования съемки

Корректный анализ азимутальной анизотропии требует произведения возбуждения в центре квадратной расстановки в целях получения траектории лучей с изотропным распределением удалений как функции азимута (Yuh et al., 2005). В предположении о том, что у нас симметричная дискретизация по ПВ и ПП в двух перпендикулярных направлениях (Vermeer, 1998), задание геометрии расстановки возможно с использованием трех основных параметров:

1. 3000 м дальнее удаление, в целях обеспечения всей информации для целевых глубин для каждого азимута.
2. Номинальный размер ячейки 200 м x 200 м. Ячейка – это область, ограниченная двумя соседними приемными линиями и двумя соседними линиями возбуждения. Она была выбрана для того, чтобы удовлетворять требованиям ближних удалений (пикировка для моделирования и расчета статических поправок на основе данных МПВ, и построения изображений малоглубинных слоев).

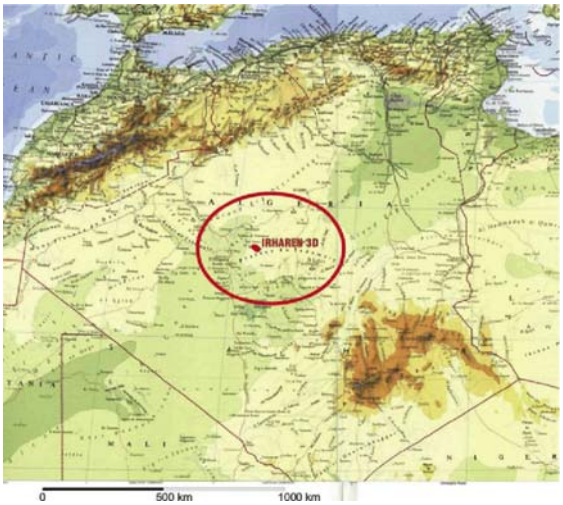

Рисунок 1 *Расположение бассейна Timimoun в центральной части Алжира.*

* *Mard.girard@total.com.*

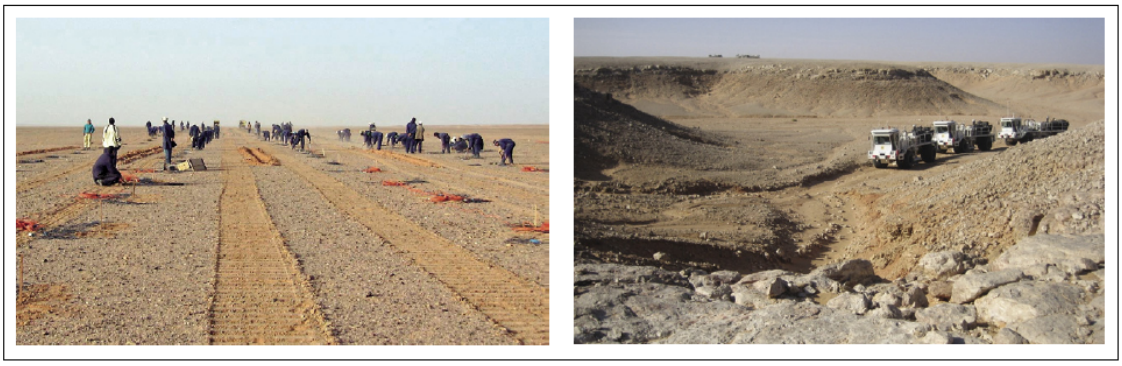

Рисунок 2 Развертывание расстановки на гравийной равнине (слева). Две группы вибраторов на пересохшем русле (справа).

3. Интервал между трассами и ПВ 25 м. Этот пространственный шаг дискретизации был выбран после теста децимации, выполненного на профиле 2D на этапе технического обоснования. Этот тест показал, что дискретизация 50 м достаточна для получения удовлетворительного структурного изображения пологопадающей области. Однако интервал 25 м обеспечит более четкий разрез импедансов и более надежную интерпретацию сейсмических атрибутов. Результирующий размер бина был 12.5 м x 12.5 м, и соответствующая плотность трасс до суммирования - 1,440,000 трасс/км^2 (6400 бинов /км^2 x 225 кратность), что эквивалентно самой высокой плотности, достигаемой в некоторых съемках на Ближнем Востоке;

Результирующая активная приемная расстановка имела площадь 6 км x 6 км = 36 км^2 и включала 30 линий и 240 станций (7200 живых каналов, Рисунок 3). Каждая станция включала полевой АЦП, подсоединенный к двум расстановкам из 6 сейсмоприемников, соединенных последовательно. Запись с шагом дискретизации 4 мс требовала наличия нескольких поперечных кабелей для передачи всех этих данных, в реальном времени на центральный блок системы регистрации Sercel 408UL.

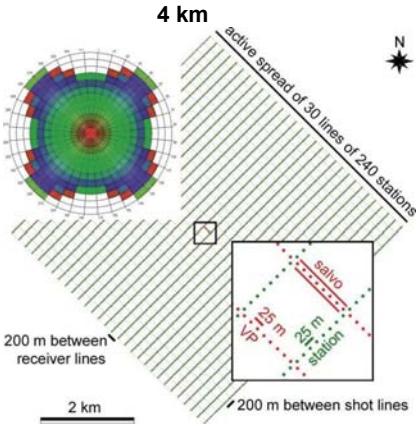

Рисунок 3 *Геометрия активной расстановки и соответствующая роза-диаграмма. Благодаря тому, что расстановка имеет форму квадрата, а дискретизация по ПВ и ПП было симметричным, азимутальное распределение траектории лучей изотропно.*

Что касается источника, число вибраторов в группе (три вибратора Nomad-65), длительность свип-сигнала (8 с) и тип (линейный 8-72 Гц) и число свипов (1) на ПВ были оптимизированы согласно предыдущим тестам 2D, выполненным в 2003. Геометрия приемника и источника были спроектированы в целях подавления влияния линейного шума в записи.

Практическое применение: супер-расстановка

Один источник в центре активной расстановки из 7,200 каналов будет способен только на осуществление вибрирования на восьми ПВ (с интервалом между приемными линиями 200 м, с шагом между ПВ 25 м) в направлении кросслайн, пока не потребуется активация новых приемников (Рисунок 4). Чтобы избежать повторного формирования линий, что уменьшает производительность, была применена новая функция системы регистрации 408UL, называемая супер-расстановкой. Супер-расстановка охватывает несколько последовательных элементарных активных расстановок. Все каналы супер-расстановки передаются на центральный блок. Сортировка выполняется перед тем, как будет производиться запись на ленту в целях сохранения только трасс, соответствующих активной расстановке, как это задается в файлах SPS.

Для съемки Irharen, суперрасстановка строилась таким образом, чтобы производить вибрирование в течение светового дня без заложения новых станций. Поскольку по контракту требовалось 14,000 станций, закладывались и активировались заранее три дополнительных линии. Это давало возможность источнику производить 32 ПВ в ряд (один залп) в направлении кросслайн. Имеющиеся дополнительные станции использовались для того, чтобы продливать длину приемных линий. Каждый раз добавлялось восемь дополнительных каналов (т.е. 200 м на линию) ко всем приемным линиям, что обеспечивало возможность перемещать источник на следующую линию вибрирования и выполнять новый залп и т.д. В окончательной конфигурации суперрасстановка состояла из 33 линий по 360 приемников (11,880 каналов), что давало возможность производить возбуждение на 1440 ПВ (45 залпов по 32 ПВ) без перемещения расстановки, что близко к числу ПВ, которые требуется отрабатывать в среднем ежедневно (1766 ПВ).

На ежедневной основе, сама супер-расстановка перемещалась вдоль линии возбуждения для обеспечения коридора регистрации (молния), длина которого является одной из сторон участка съемки (Рисунок 5).

www.firstbreak.org © 2008 EAGE

Затем три молнии накладывались одна на другую в целях покрытия всей области съемки. Для обеспечения полной кратности по инлайну, последовательные молнии накладывались с шириной наложения, соответствующей половине длины приемной линии (3000 м). Это можно осуществить либо путем повторения возбуждений в зоне, лежащей вне активной расстановки или путем заложения новых каналов (120 дополнительных станций на линию) вовне сетки линий возбуждения. Первое решение было выбрано в целях избежать активации еще 33% дополнительных каналов (т.е. 3960 дополнительных каналов для суперрасстановки и соответствующих 7920 групп по шесть сейсмоприемников). Вместо этого, около 33% ПВ должны были быть продублированы между молниями (Рисунок 5). Поскольку 15 дополнительных залпов (т.е. 15 x 32= 480 ПВ) должны были отстреливаться за пределами сетки приемников, общее число ПВ, соответствующее фиксированной супер-расстановке, было установлено на 1440 + 480 = 1920 ПВ, что превышает обычную ежедневную производительность.

В среднем, ежедневно с супер-расстановки на центральный блок 408UL передавалось 21 миллион сейсмотрасс (11,880 каналов x 1766 ПВ), с использованием 3 параллельных поперечников (каждый емкостью 4000 каналов @ 4 мс). Из этого числа, производится контроль качества и запись в реальном времени на картридж (IBM 3592) 12.7 миллионов трасс (7200 каналов x 1766 ПВ), отобранных из файлов SPS, как трасс, принадлежащих активной расстановке.

Производительность источника: поочередное вибрирование двух источников

При работах с источником, запись инициируется группой вибраторов, как только они приводятся в режим готовности. Таким образом, производительность зависит от времени цикла, которое равно времени между запуском двух последовательных свип-сигналов. При заданных параметрах съемки, одна группа вибраторов может испускать свипы каждые 30 с, что соответствует 1200 ПВ/10 час. Поскольку регистрация активна только в течение времени свипа и времени прослушивания, большая часть времени транспортировки соответствует времени простоя (Рисунок 6). Используя второй набор вибраторов, есть возможность начинать свип во время этого простоя, тогда как происходит перемещение первой группы. Это поочередное возбуждение,

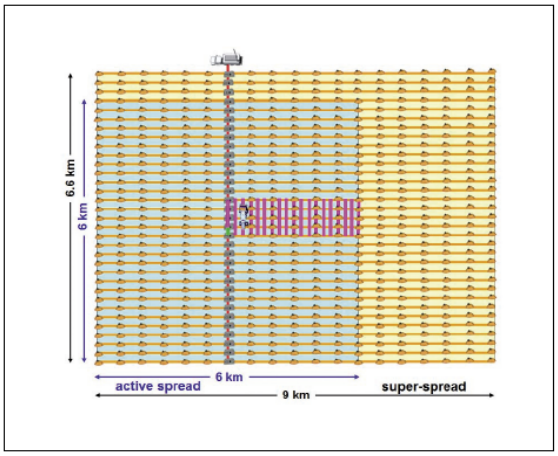

Рисунок 4 *Активная расстановка состоит из 30 линий по 240 ПП @ 25 м (общее число каналов 7200). В центре данной расстановки только на восьми ПВ (зеленый сегмент) можно производить возбуждение без прерывания на формирование новой линии. Супер-расстановка состоит из 33 линий по 360 ПП @ 25 м (общее число каналов 11,880). Фиолетовые сегменты соответствуют всем ПВ, на которых можно производить возбуждение с помощью супер-расстановки, оставаясь в центре активной расстановки.*

известное под названием *flip-flop* (как и для двух морских источников), делает возможным сокращение времени цикла до 20 с, что соответствует 1800 ПВ/10 часов, близкому к средней производительности съемки. Однако этот расчет предполагает, что нет задержек, которые могут случиться из-за наличия препятствий, поворотов между линиями возбуждения и перерыве в регистрации.

Используя три группы вибраторов можно сократить время простоя еще до 1 с. Каждая группа должна посылать свип точно в конце времени слушания предыдущей группы для обеспечения непрерывности записи. Время цикла становится близким к 13 с, и производительность 2770 ПВ/10 час возможна, в предположении, что в течение светового дня нет инцидентов или поворотов. В поле мы наблюдали, что добавление третьей группы вибраторов

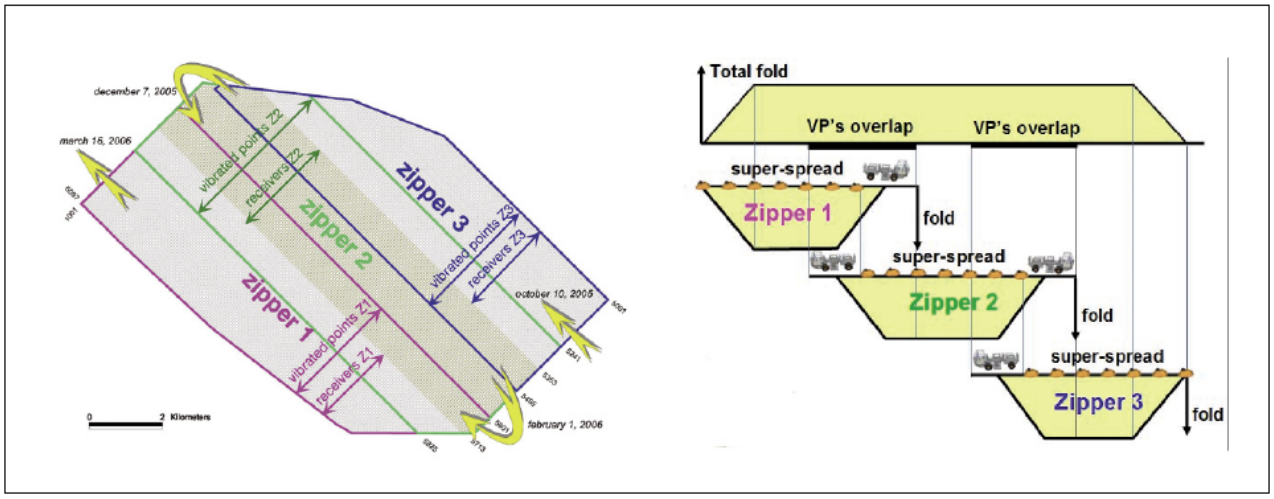

Рисунок 5 *Три наложенных молнии (слева) использовались для покрытия всей области съемки (913 км^2). Супер-расстановки в каждой молнии накладываются. Также накладываются ПВ, для достижения непрерывности кратности перекрытия (справа).*

© 2008 EAGE www.firstbreak.org

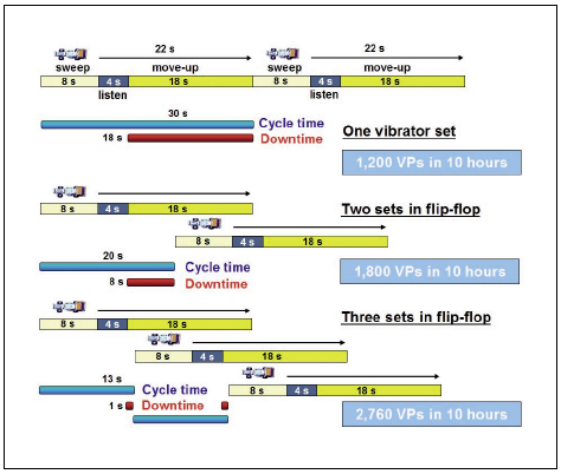

Рисунок 6 *Сокращение времени цикла и увеличение производительности при переходе с одной на три группы вибраторов в режиме переменного возбуждения. Время простоя – время без произведения записи. В поле три группы вибраторов были развернуты в целях достижения производительности, соответствующей максимальной производительности двух групп.*

как раз способна скомпенсировать задержки двух групп вибраторов, т.е. три группы в режиме попеременного возбуждения могут достигать максимальной производительности, соответствующей двум группам.

Во время съемки время цикла между двумя последовательными свипами непрерывно уменьшалось. С 18 с в самом начале, оно вскоре уменьшилось до 13 с путем тонкой настройки различных параметров (увеличения супер-расстановки, повтора эмиссии отметки момента (ТО), использования двух сверх высоких частот для минимизации интерференции, и т.д.). Наложенные *slip-свипы* были протестированы в конце съемки (Burger et al., 1999), но они не помогли существенно улучшить производительность источника, поскольку длительность *slip-time* изначально устанавливалась на значительно низком уровне.

Три группы вибраторов должны были перемещаться параллельно, каждая по линии возбуждения и интервалом 200 м. В направлении кросслайна они компенсировались двумя интервалами медлу линиями приема (400 м; Рисунок 7). В конце залпа длиной 800 м, одна группа должна была поворачивать по направлению к новой линии возбуждения на расстоянии 600 м. Поскольку это перемещение в 600 м могло занять несколько минут, смещение между группами давало возможность продолжать возбуждение двух групп пока третья группа производила поворот. В результате, общее число 268,479 ПВ за 152 дней эффективной производительности соответствует средней производительности 1766 ПВ в день, с максимумом 2400 ПВ. Это устанавливает новый рекорд средней производительности в час (176 ПВ/час) в режиме попеременного вибрирования.

Контроль качества в реальном времени

Пусть параметры съемки заданы, тогда качество сейсмических данных зависит от способа использования оборудования (позиционирование, установка, и т.д.) и соответствия спецификациям согласно контракту (шум, искажения, и т.д.). Несмотря что часть этих проверок выполнялась в поле (тестирование линии и сейсмоприемника) или в базовом лагере (сервисное обслуживание аппаратуры), большая часть из этих проверок выполняется станцией с использованием процедур в реальном времени.

Перед тем как производить отстрел, центральный блок выполняет проверку расстановки, включая передачу между кабелями, и характеристик инструментария (полевых АЦП и линейных блоков регистрации) а также групп сейсмоприемников. Шум расстановки также будет отображаться в непрерывном режиме (SeisMonitor)даже при отсутствии записи. Со стороны источника, радио (VHF) создает постоянную связь между электроникой вибратора (VE-432), установленной в регистрирующее устройство и каждым вибратором. Она используется для проверки соответствия излучаемого сигнала пилот-сигналу (фаза, пиковое усилие и искажение). После каждого ПВ и для каждого вибратора, результаты QC отправляются на регистрирующее устройство для идентификации аномальных тенденций, которые могут быть связаны со свойствами грунта или механическими проблемами, требующими технической профилактики. И в конце концов, ПВ, в том виде как они записаны на ленте в формате SEG-D, отображаются для визуального контроля и набор сейсмических атрибутов

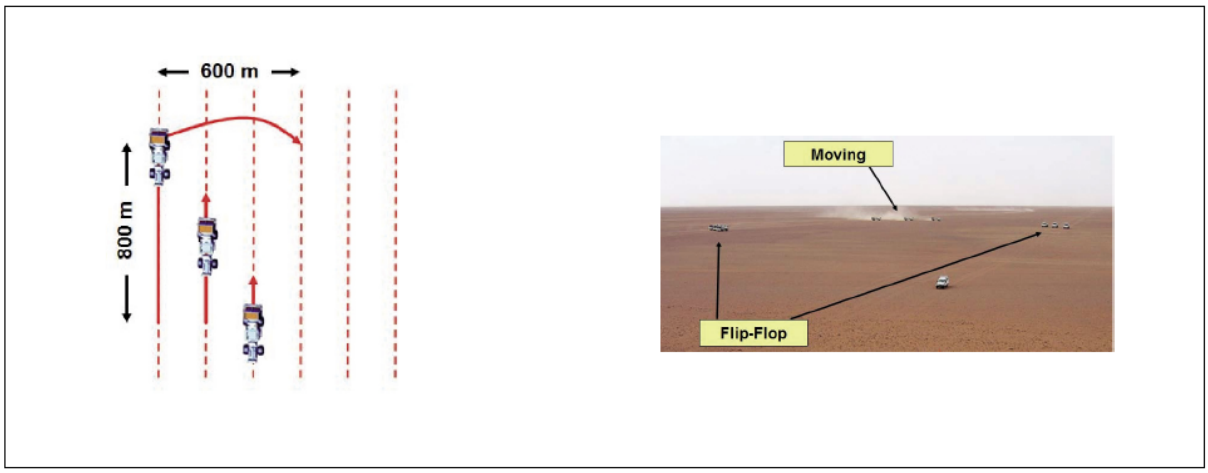

Рисунок 7 *Три группы вибраторов в режиме попеременного возбуждения располагаются с выносом по инлайну и кросслайну (слева). При такой конфигурации, если одна группа перемещается на следующую линию возбуждения, две другие все еще производят свиппирование (справа).*

www.firstbreak.org © 2008 EAGE

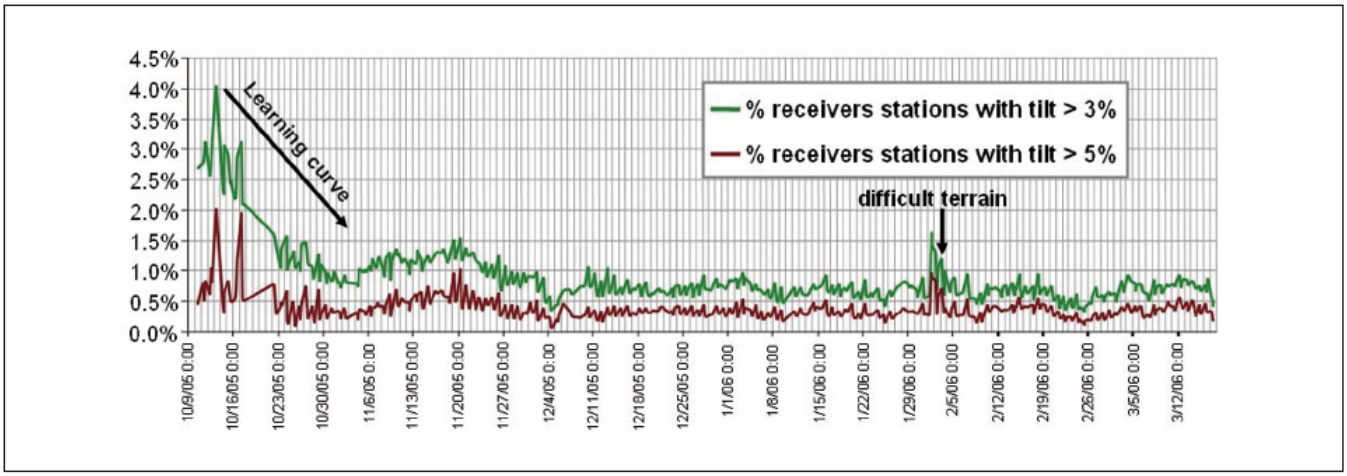

Рисунок 8 *Наклон сейсмоприемников, контролируемый путем анализа отклика с групп приемников относительно модели. Измеренные величины в процентах над моделью, в том виде, как их получают с регистрирующего устройства, являются хорошей оценкой качества установки приемников. Дневное уменьшение связано с переустановкой сейсмоприемников партией.*

(частотный состав, соотношение S/N, и т.д.) рассчитывается в реальном времени в программе QC (SQC-Pro).

Эти данные контроля качества не должны рассматриваться только как средство проверки соответствия техническим условиям. Они также обеспечивают информацию, которая может использоваться для улучшения понимания вариации данных (Lansley, 2006). Подобный анализ был выполнен из базового лагеря представителями клиента. Помимо ежедневных QC, они были уполномочены провести временной анализ в течение более длинного периода в целях лучшего выделения трендов. В примере приведен график теста наклона, который проводился многократно в течение дня. Если импульсная характеристика на одной точке приема превышает более чем на 3% ожидаемое значение, это значит, что один сейсмоприемник не установлен вертикально. Ежедневный график процентного соотношения тестов наклона, содержащих ошибки дает полезную информацию о партии (Рисунок 8). За исключением начала съемки, общее количество погрешностей - менее 1.5%, это указывает на особую тщательность рабочих при установке приемников, и длительности их обучающей кривой. Если говорить более детально, ежедневное уменьшение ошибок, благодаря переустановке, что свидетельствует об усердии членов бригады, которые постоянно исправляли неправильные станции.

Файлы VAPS (формат поддержки обработки атрибутов вибратора) для каждого вибратора также выводили на монитор их долгосрочные характеристики. Строились либо отдельные атрибуты свипа, или средние из атрибутов для различных вибраторов для ПВ. С помощью первого способа была возможность выделения аномалий, источником которых был один вибратор (Рисунок 9). С помощью второго способа выявлялись вариации, которые могли относиться к изменениям типа грунта, и можно было ввести поправки за приповерхностные условия, в предположении, что эти атрибуты соответствуют идентичным условиям на поверхности.

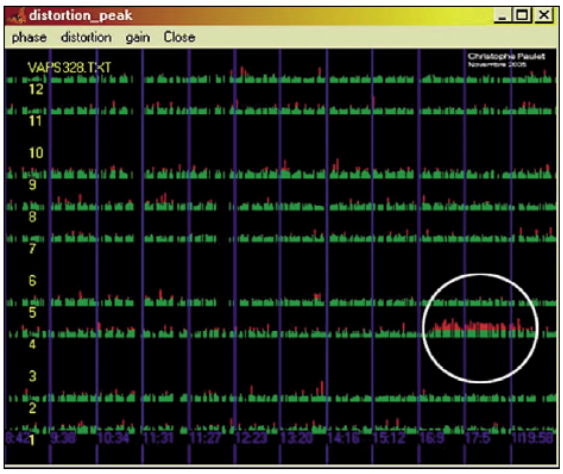

Рисунок ***9*** *По файлам VAPS, генерируемых электроникой вибратора, можно построить график пикового искажения в течение дня. Если аномалия проявляется на одном вибраторе, то проблема относится не к условиям грунта, а к механике данного вибратора. Вибраторы 3-6-10, которые не отображены - запасные вибраторы в каждой группе.*

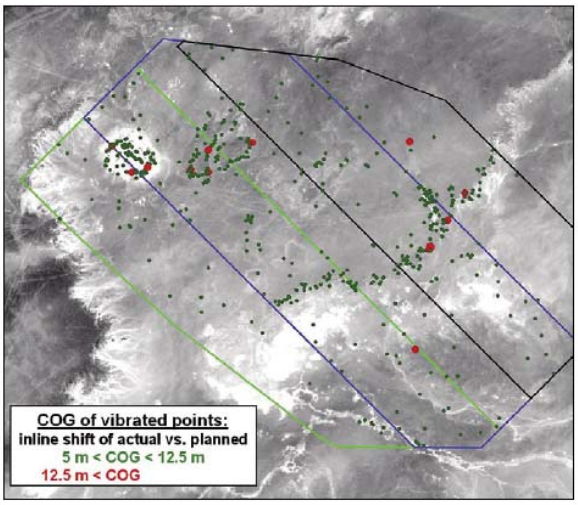

Рисунок 10 *Точность позиционирования вибраторов зависит от условий на поверхности и препятствий. Рисуются только аномальные смещения по инлайнам реального центра тяжести группы (COG) относительно запланированного. Связь с препятствиями (пересохшими руслами или небольшими холмами) очевидна.*

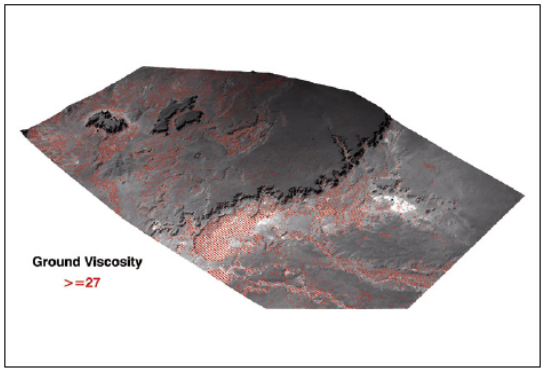

Рисунок 11 *3D изображение вязкости грунта (Gv>27) с привязкой к поверхности, определенной с помощью электроники вибратора для всех ПВ. Связь с топографией и типом грунта достаточно очевидна.*

Благодаря большому количеству данных и контролю качества, производимого партией ежедневно (12.7 млн. трасс, записываемых ежедневно, соответствует 51 Гб данных), представители клиента использовали географическую систему данных (GIS) для компиляции и анализа этих данных. Этот подход способствовал проведению всех типов мгновенного контроля на различных этапах съемки. Он также помог выделить географические тренды. Данные позиционирования, производительности вибраторов, и сейсмические атрибуты постоянно добавлялись в проект GIS.

Последовательно на разных этапах съемки создавались файлы позиционирования: пикеты движения в реальном времени, задаваемые топографами, схемы компенсации объездов, координаты вибратора в реальном времени, полученные на основе данных дифференциального GPS, и финальные координаты ПВ после проверки. Эти файлы, которые обрабатывались и записывались ежедневно в проект GIS, не только позволяли производить быстрый контроль расстояний между реальным и запланированным положением вибратора; они также обеспечивали тонкий анализ точности позиционирования вибраторов в реальном времени, связанной с условиями поверхности и препятствиями (Рисунок 10).

Область съемки представляла собой каменистое плато с простиранием СЗ и погружением ЮЕ, покрытое тонкими песками и гипсом. Местами, наблюдались протяженные уступы, высота которых увеличивалась в северном направлении (до 25 м; Рисунок 11). Два атрибута, непосредственно относящихся к механическим характеристикам грунта (жесткость грунта Gs и вязкость грунта Gv), автоматически определялись с помощью электроники вибратора в целях компенсации влияния грунта на усилие вибратора. Отношение Gs/Gv использовалось в непрерывном наборе данных для интерполяции скоростей в приповерхностной зоне, определенным по МСК (Al-Ali et al., 2003). Помимо очевидной связи Gs и Gv с топографией и с приповерхностными неоднородностями (Рисунки 11 и 12), было предложено при обработке данных съемки использовать это отношение для получения амплитудных поправок за неидентичность условий возбуждения-приема (например, энергия вибратора сильно затухает в местах обнажения гипса). На практике, этот детерминистский подход не оказался настолько удачным, как статистический подход, возможно из-за ограниченной репрезентативности средних значений Gs и Gv. Одной из причин может быть то, что только среднее значение по всей длительности свипа передается на регистрацию, а не значение на различных частотах (таким образом, и различная мощность грунта), определяемое электроникой вибратора.

Схожее построение выполнялось с использованием сейсмических атрибутов (сигнал и шум на ПВ), что было возможно благодаря стандартным файлам вспомогательных данных (ADS) SQC-Pro. Были отмечены удивительные корреляции. В качестве примера, амплитуда RMS линейного шума, автоматически рассчитанная в заданном окне для каждой записи, коррелируется с жесткостью грунта, представляющей условия контакта с грунтом: чем выше шум, тем ниже жесткость грунта (Рисунок 12). Другой интересный подход заключался в комбинированном использовании ArcView и SeiSee,

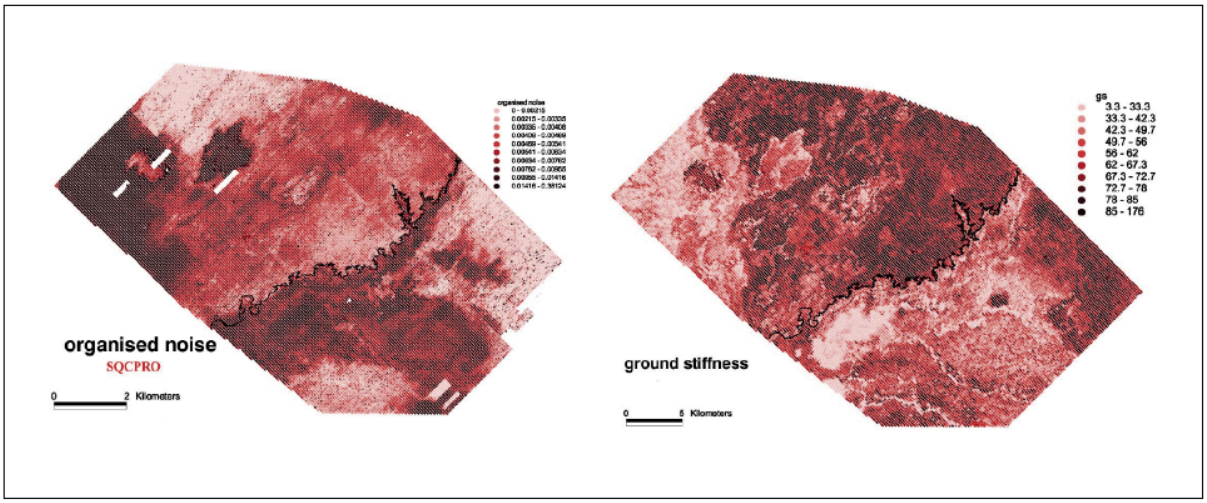

Рисунок 12 *Регулярный шум – это RMS амплитуда линейного шума, определенная автоматически с помощью программ контроля качества в реальном времени по каждому ПВ. Эти значения говорят об обратной корреляции с жесткости грунта Gs, определенной электроникой вибратора для всех ПВ.*

www.firstbreak.org © 2008 EAGE

программе просмотра файлов Segy, в целях отображения наиболее характерных ПВ путем нажатия на карту различных сейсмических атрибутов. Это обеспечило прямой визуальный анализ соответствия между типом грунта, сейсмическими данными и любым заданным атрибутом. Это также помогало избегать обычной распечатки каждого ПВ, что потребовало бы листов крупномасштабной бумаги общей высотой 27 м!

Заключение

Этот сейсмический проект демонстрирует, что есть возможность регистрировать полноазимутальные данные съемки высокой плотности 3D на открытых участках, используя новейшие системы регистрации, такие как Sercel 408UL, достигая уровня производительности и качества, отвечающих требованиям съемки. Эта съемка была разработана на основе четко определенных целей и с большим объемом сейсмических данных, полученных ранее. Она показала, что в случае если требуется симметричная дискретизация по ПВ и ПП, всякое увеличение со стороны источника (использование трех групп вибраторов в режиме попеременного возбуждения) должно компенсироваться существенным увеличением со стороны приемников (на 65% больше станций в супер-расстановке).

Управление съемками подобного типа, с высокой производительностью и большим объемом данных, демонстрирует преимущества набора программ ежедневного автоматического контроля качества. Эффективность этого набора существенно оптимизировалась посредством организации базы данных GIS по всем файлам позиционирования, сейсмики и атрибутам, которые были генерированы наземной партией.

Благодарности

Авторы хотят выразить признательность Total E&P Algerie и партнерам Sonatrach и Cepsa за разрешение на публикацию данной работы. Они также благодарят Jean-Marc Mougenot и Philippe Faure (главное управление Total) и Benoit Mouly (Total E&P Algerie) за техническую и оперативную поддержку.

Литература

Al-Ali, M., Hastings-James, R., Makkawi, M., and Korvin, G. [2003] Vibrator attribute leading velocity estimation. *The Leading Edge,* 400-405.

Burger, P., Duijndam, B. and Wasmuth, D. [1999] Marine production level in land 3-D seismic. *The Leading Edge,* 1170-1174.

Lansley, R.M. [2006] Quality control in modern recording systems, benefits beyond contract compliance. 6th *SPG Conference on Petroleum Geophysics,* Kolkata, Expanded Abstracts, 97-100.

Tod, S., Taylor, B., Johnston, R., and Allen, T [2007] Fracture prediction from wide-azimuth land seismic data in SE Algeria. *The Leading Edge,* 1154-1160.

Vermeer, G. J. O. [1998] 3-D symmetric sampling in theory and practice. *The Leading Edge,* 1514-1519.

Yuh, S., Paternoster, B., Faure, P., and Mougenot, J.M. [2005] Uncertainty analysis in azimuthal AVO inversion using stochastic modeling based on two seismic acquisition geometries. *75th SEG Annual Meeting,* Expanded Abstract, 226-229.