

Новые критерии и рекорды в наземной сейсморазведке

■ Череповский А.В., SERCEL, г.Москва

Время пересматривать критерии

Первый эксперимент по регистрации площадных сейсмических данных с использованием системы наблюдений «крест» был выполнен по заказу компании Еххон в окрестностях Хьюстона ещё в 1967 году. А первая коммерческая съёмка 3D была выполнена в 1972 году, в штате Нью-Мексико, компанией GSI (Geophysical Service). Коллективным заказчиком тогда выступила группа из 6 крупнейших американских нефтяных компаний, которые хотели проверить технологичность и практическую ценность трёхмерных сейсмических исследований. По сегодняшним меркам эту съёмку трудно назвать трёхмерной – скорее, это была серия «широких профилей». Полевые работы заняли не более одного месяца, но обработка массива данных из полумиллиона трасс заняла 2 года!

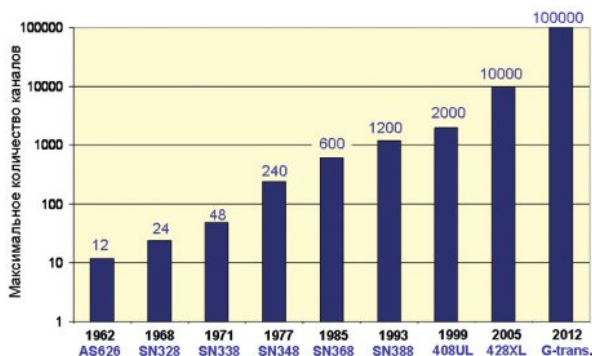
Тем не менее, данный проект стал важным этапом в развитии сейсморазведочной отрасли благодаря тому, что первые данные 3D продемонстрировали очень высокую информативность метода: они подтвердили оптимальное положение 9 добывающих скважин, объяснили наличие 3 сухих скважин и позволили выбрать точки заложения нескольких новых скважин. И в течение буквально одного десятилетия сейсмика 3D стала эффективным и экономичным инструментом оптимизации разведки и разработки месторождений нефти и газа.

Начавшийся в 80-е годы двадцатого века переход на трёхмерную сейсморазведку многие геофизики относят к третьей революции. А к первым двум революциям относят переход от сейсморазведки на преломлённых волнах к сейсмораз-

ведке на отражённых волнах (20-е и 30-е годы) и переход от аналоговой регистрации к цифровой регистрации (60-е и 70-е годы). Тогда мировыми лидерами в разработке сейсморазведочной аппаратуры были американские компании Texas Instruments и GSI, которые внедрили транзисторы, запись на магнитную ленту, и в 1961 году разработали первую цифровую регистрирующую станцию и ЭВМ для обработки сейсмических данных.

В эпоху реализации первых съёмок 3D в США большинство регистрирующих станций были 24-канальными и 48-канальные станции только начали появляться. Такая канальность сейсмостанций была недостаточной не только для съёмок 3D, но и для профилирования 2D, и долгие годы сейсмостанции приходилось «спаривать», то есть использовать в режиме ведущий/ведомый. В России так работали сначала с аналоговыми 24-канальными станциями СМОВ-0-24, а позднее – с цифровыми 96-канальными станциями Прогресс-2.

Таким образом, в 70-е и 80-е годы двадцатого века потребности отрасли были намного выше, чем технические возможности сейсмостанций, и эта ситуация продолжалась примерно до 1990 года, когда появились станции с максимальным количеством регистрируемых каналов 1000 и больше (Рис.1). Что касается нашей компании, то её удачной коммерческой разработкой, ставшей на многие годы одной из самых популярных регистрирующих систем во всём мире и в России, стала SN388 (1200 каналов максимум), выпущенная в 1993 году. В России до сих пор сохранилось технически исправное оборудование этой серии, и оно может использоваться для работ 2D.



▲ Рис. 1. Максимально возможное количество регистрируемых каналов (при одном поперечном кабеле в расстановке 3D) в логарифмической шкале – на примере сейсмостанций компании SERCEL.

На сегодняшний день самой популярной регистрирующей системой в мире и в России является 428XL, способная регистрировать до 100 тысяч каналов (при использовании 10 поперечных кабелей) с шагом дискретизации 2 мс. Но необходимо отметить, что эта регистрирующая система совместима с новым оптоволоконным поперечным кабелем Giga-Transverse, который позволяет передавать в реальном времени 100 тысяч каналов. Применение нескольких таких поперечных кабелей («хребтов») в одной приёмной расстановке даёт возможность регистрировать сотни тысяч каналов и делает реальностью регистрацию до одного миллиона каналов!

С появлением цифровых регистрирующих систем, способных записывать 1000 и более каналов, доля съёмок 3D стала быстро расти и геофизики стали вырабатывать и опробовать наилучшие приёмы работ, которые затем стали правилами и критериями. Вот некоторые из этих критериев [9]:

- 1) Данные должны иметь высокую кратность (по ОГТ);
- 2) Предпочтительно равномерное распределение удалений в бинах;
- 3) Узкоазимутальные системы наблюдений предпочтительны, поскольку они

дают более равномерное распределение удалений в бинах;

4) Полевые (исходные) записи должны иметь хорошее отношение сигнал /помеха (С/П);

5) Группирование источников и приёмников, как правило, необходимо для получения хорошего отношения С/П;

6) Чтобы получить хорошее отношение С/П, нужно минимизировать помехи в пределах приёмной расстановки во время работ.

Со временем возможности регистрирующих станций стали соответствовать запросам геофизиков-планировщиков съёмок 3D и намного превышать их. На сегодняшний день геофизики имеют возможность регистрировать сотни тысяч каналов, и новые аппаратно-методические решения заставляют пересмотреть критерии, ставшие общепринятыми в нашей отрасли и по-прежнему не подвергающиеся сомнению во многих регионах мира.

Плотность наблюдений

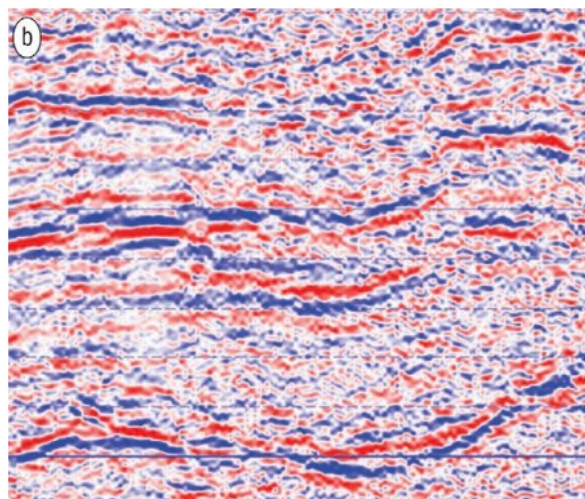
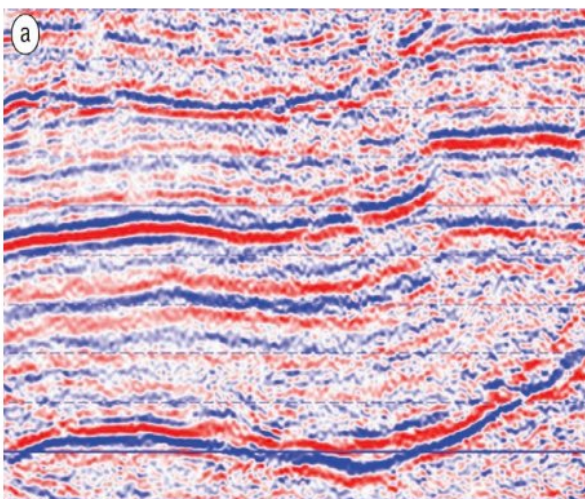
На ранних этапах применения сейсморазведки 3D большое внимание уделялось получению как можно более равномерного распределения удалений в бинах [9]. Этого можно было достичь даже с небольшим количеством регистрирующих каналов при относительно узкоазимутальных приёмных расстановках. Хотя широкоазимутальные расстановки не могут обеспечить равномерное распределение удалений в бинах, многие геофизики придерживались мнения, что именно широкоазимутальные расстановки позволят улучшить изображения изучаемых объектов даже в случае сложнопостроенных сред. Жаркие дебаты на эту тему продолжались многие годы, но они, фактически, были попыткой найти компромисс между узкоазиму-

тальными съёмками с хорошим распределением удалений в бинах и широкоазимутальными съёмками с плохим распределением удалений в бинах. С увеличением канальности регистрирующих станций и повышением плотности наблюдений, а также с изменением подходов к обработке широкоазимутальных данных, общепринятым критерием стало достижение хорошего распределения удалений в каждом из азимутальных секторов, на которые разбивается исходный массив данных для применения азимутально-зависимых процедур и алгоритмов.

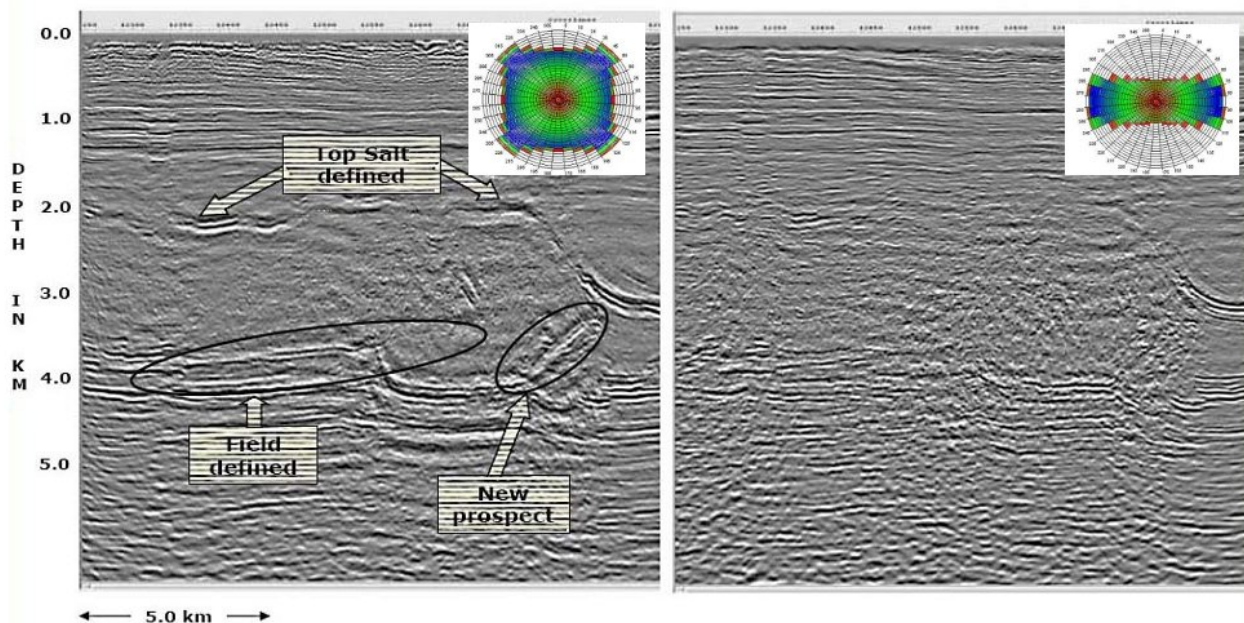
В конце 1990-х годов геофизики стали уделять больше внимания процессам построения изображений среды и алгоритмам миграции до суммирования. Стало очевидным, что качество изображения обеспечивает, в первую очередь, не кратность по ОГТ, а дискретность зарегистрированного волнового поля по удалениям и азимутам. Малькольм Лансли ещё в 2004 году обсуждал отказ от критерия «кратность» и замену его критерием «плотность трасс на кв.км» [8], приводя в качестве иллюстрации изображения среды разного качества (Рис.2), полученные при одинаковой

кратности суммирования, но с разным размером бина (то есть с разной плотностью трасс на кв.км). Широкие возможности новых регистрирующих систем позволили применить эту философию и сделать стандартными съёмки с высокой плотностью наблюдений во многих регионах мира, особенно на открытой местности в Северной Африке и на Ближнем Востоке. Но в регионах со сложными поверхностными условиями (лес, сельскохозяйственные угодья, промышленная инфраструктура) возможности повышения плотности трасс на кв.км ограничены...

На рис.3 сравниваются старые узкоазимутальные данные с плотностью трасс порядка 160000 трасс на кв.км с широкоазимутальными высокоплотными данными 2009 года, полученными в южно-оманском солянокупольном бассейне. Улучшение качества изображения связано как с широкой азимутальностью, так и с высокой плотностью наблюдения, и эти эффекты нельзя разделить друг от друга, поскольку обработка широкоазимутальных данных гораздо проблематичнее, если распределение удалений в отдельных азимутальных секторах нестабильное. Новые широкоазимутальные дан-



▲ Рис. 2. Вертикальные сечения мигрированных кубов данных с одинаковой кратностью суммирования (48), но с разным размером бина: слева – бин 55 x 55 футов (16,5 x 16,5 м), а справа – бин 110 x 165 футов (33 x 50 м).



▲ Рис. 3. Сравнение вертикальных сечений кубов данных, полученных при широкоазимутальных наблюдениях (слева) и при узкоазимутальных наблюдениях (справа). На изображении слева уверенно прослеживаются кровля и подошва соленосной толщи, а также выделяется межсолевой пропласток.

ные были получены с помощью мегапартии, обладавшей 25 тысячами каналов Sercel 428XL и группами геофонов по 12 штук. Шаг между пунктами приёма (ПП) был равен 25 м, а шаг между линиями приёма (ЛП) – 200 м. В этой вибропартии применялись 16 одиночных вибраторов, работающих по сетке пунктов возбуждения 50 x 50 м. Плотность трасс составила 6,4 млн. трасс на кв.км, что в 40 раз больше, чем в предыдущих съёмках в этой стране.

Обратим внимание, что не только в этой съёмке, но и во многих других примерах высокоплотных съёмок 3D на открытой местности расстояния между линиями возбуждения и пунктами возбуждения становятся одинаковыми, а понятие «линия возбуждения» стирается. Общепринятым термином для такой методики вибросейсморазведки становится «ковровый отстрел» (carpet shooting).

Точечные источники и приёмники

Когда сейсмограммы 2D были основным материалом, используемым интерпретаторами, отношение сигнал/помеха (С/П) на исходных записях имело очень большое значение. Даже после изобретения метода ОГТ (или ОСТ) сейсмограммы ОПВ часто подвергались и подвергаются той или иной обработке (пикировка первых вступлений для расчёта статпоправок, пикировка отражений для построения начальной скоростной модели и т.д.). Для повышения качества исходных данных повсеместно применялись большие группы геофонов, ослаблявшие как микросейсмы, так и волны-помехи, генерируемые источниками упругих колебаний. Но в то же время, группы геофонов ослабляли и сигнал, который мы хотели зарегистрировать [2, 3]. И по мере повышения плотности наблюдений – или сокращения интервалов между ПВ и ПП – от длинных групп стали отказываться во избежание их перекрытия.

Одновременно уменьшалось и количество приёмников в группах вплоть до одиночных датчиков, которые всё чаще применяются при высокоплотных съёмках 3D. Сравнительные преимущества различных типов сейсмоприёмников, которые могут применяться как одиночные, были подробно рассмотрены нами в настоящем журнале в предыдущих статьях [1, 4].

Поверхностные источники упругих колебаний, такие как вибраторы, всегда рассматривались как «слабые» источники (по сравнению со взрывами в скважинах). По этой причине вибраторы обычно использовались группами по 3-4 штуки. Более того, на каждой виброточке (ВТ) возбуждалось несколько свип-сигналов, которые затем накапливались (часто с применением весового суммирования – *diversity stacking*) для ослабления микросейсм и нестационарных помех. Однако, вертикальное накопление не всегда приводит к заметному повышению качества исходных данных. И вместо большого количества свипов на одной виброточке более продуктивным подходом может быть небольшое количество накоплений, но с меньшим шагом по площади работ. По такой методике производительность вибропартии будет выше, чем по стандартной методике. Однако, этот подход нельзя реализовать во взрывных партиях, где стоимость бурения взрывных скважин и их подготовки к взрыву достаточно высокая.

Таким образом, с повышением плотности наблюдений в вибропартиях наметился переход от применения групп вибраторов и вертикального накопления к применению одиночных вибраторов и одного воздействия на каждой ВТ. В материалах ежегодной конференции EAGE можно найти предварительные результаты обработки данных съёмки 3D

со сверхвысокой плотностью наблюдений, выполненной в Катаре в 2009-10 годах партией CGG с оборудованием Sercel 428XL [10]. Стоит подчеркнуть, что в этой стране обычная сейсморазведка с группами геофонов была достаточно хорошей для структурных построений и выбора точек заложения скважин. Однако частоты сигнала были ограничены диапазоном 10-50 Гц, что не позволяло выполнить количественный расчёт фильтрационно-емкостных свойств. Выполненные в 2008 году опытные работы подтвердили, что высокая плотность наблюдений с одиночными приёмниками и источниками может повысить верхнюю частоту сигнала до 100-110 Гц.

Эта съёмка в Катаре служит прекрасной иллюстрацией преимуществ новой методики наблюдений: точечные источники (одиночные вибраторы), точечные приёмники (одиночные геофоны), широкие азимуты, высокая плотность наблюдений. В действительности, вибраторы Nomad-65 использовались группами, но по методике HFVS (вибросейсморазведка высокой надёжности) с определёнными фазовыми сдвигами, что позволяло (на этапе обработки) разделить воздействия от каждого вибратора. Шаг ПВ и ПП был равен 7,5 м, и в естественном бине 3,75 x 3,75 м была достигнута кратность 504, а плотность трасс составила более 35 миллионов на кв.км. Заказчик этой рекордной съёмки, компания Qatar Petroleum, надеется, что уточнённая модель месторождения Духан позволит эффективно эксплуатировать его многие годы. Ожидается, что такая съёмка 3D станет стандартом для сейсмических исследований, выполняемых на стадиях разработки и эксплуатации месторождений нефти и газа.

Чтобы повысить интерес представителей нефтегазовых компаний к сейсмо-

разведке с высокой плотностью наблюдений и обосновать более высокую стоимость полевых работ, в компании Global Geophysical зарегистрировали торговую марку: “Reservoir grade survey” (буквально «съёмка резервуарного класса»). К таким съёмкам отнесены те, в которых плотность наблюдений не менее чем в 10 раз выше, чем в стандартных съёмках.

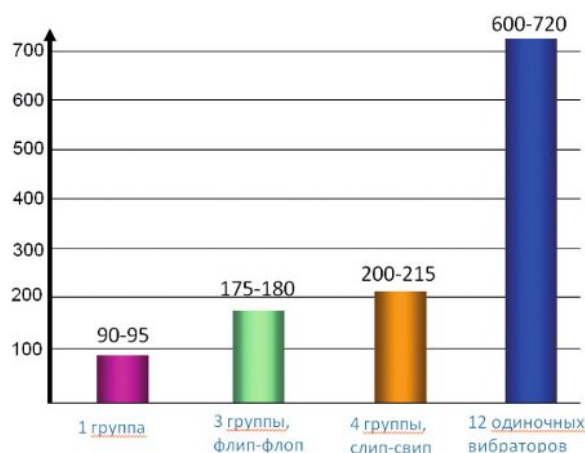
Обычно к съёмкам с высокой плотностью относят те, в которых количество трасс на 1 кв.км превышает 1 миллион, и на территории бывшего СССР на текущий момент выполнена только одна крупная съёмка такого класса (3,3 млн. трасс на кв. км): компанией «Азимут Энерджи Сервисез» (AES), подразделением компании «Геотек», в Казахстане на месторождении Карачаганак в 2009 году. Но там, после длительных опытно-методических работ, заказчик предпочёл круглые группы из 9 геофонов, а не одиночные датчики, из-за очень большой глубины исследований (5-6 км) и, соответственно, очень больших расстояний источник-приёмник (до 9 км). Для достижения средней производительности в 1700 ВТ/день применялись 4 группы по 2 вибратора по методике, переходной между поочерёдным возбуждением свип-сигналов (flip-flop) и перекрывающимися свип-сигналами (slip sweep). А именно, следующий свип-сигнал начинался через одну секунду после окончания предыдущего свип-сигнала, то есть во время прослушивания.

Эта новая съёмка на Карачаганак должна решить те задачи, которые не вполне решила съёмка 3D в 1999 году (с плотностью всего 64000 трасс на кв.км или в 50 раз меньше). Тогда относительно низкая кратность, низкое отношение С/П и низкие частоты не позволили уверенно закартировать подсолевые отложения и

оценить их коллекторские свойства. Поэтому результаты новой съёмки должны уточнить оценки запасов углеводородов и точки заложения новых скважин. Предварительная обработка показала, что можно ожидать скачкообразное повышение качества сейсмических данных на месторождении Карачаганак [6].

Высокопроизводительный вибротейс

С ростом плотности наблюдений и резким увеличением количества ВТ на кв.км появилась необходимость в соответствующем повышении производительности вибротейсических работ – от нескольких сотен ВТ в день до нескольких тысяч ВТ в день. Возможности повышения производительности за счёт применения нескольких групп вибраторов были не такими значительными, и отдача от приобретения подрядчиками большого количества вибраторов была недостаточной. Действительно, усреднённые оценки показывают, что переход от одной группы вибраторов к трём поочерёдно работающим группам вибраторов (flip-flop) повышает производительность работ не в 3, а только в 2 раза (Рис.4). В идеальных условиях 3 группы



▲ Рис. 4. Сравнение производительности вибротейс с различным количеством вибраторов и при различных методиках наблюдений.

поочерёдно работающих вибраторов могут обрабатывать до 175-180 ВТ/час.

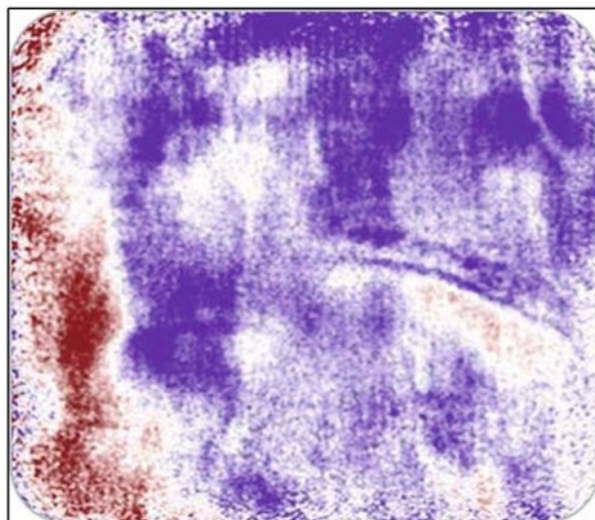
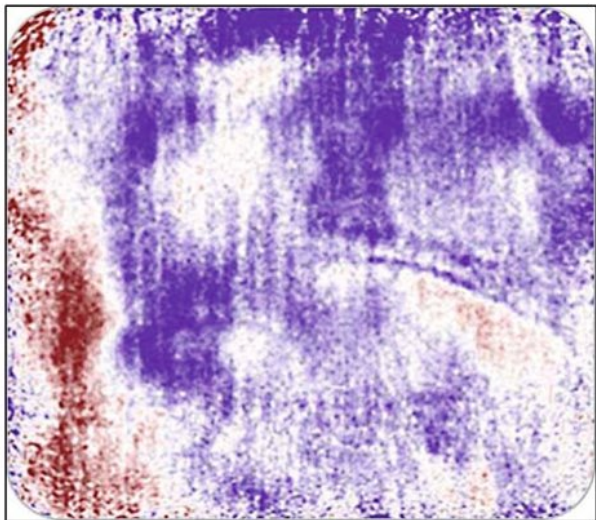
Ситуация улучшилась в 1996 году с изобретением метода перекрывающихся свип-сигналов (slip sweep). Этот метод был первым высокопроизводительным методом, позволившим экономично и быстро обрабатывать высокоплотные съёмки 3D. Цена повышения производительности при работах по методике слип-свип – зашумление индивидуальных виброграмм, отрезанных от исходных «материнских» записей, гармоническими помехами от соседних групп вибраторов. И необходимы специальные процедуры для прогнозирования гармоник и их подавления (вычитания). В идеальных условиях 4 группы работающих по методике слип-свип вибраторов могут обрабатывать более 200 ВТ/час. Однако, и такие показатели были недостаточными для обработки больших площадей с миллионами запроектированных ВТ за один-два сезона...

Настоящий рывок в производительности вибропартий (на открытой местности) произошёл, когда вибраторы стали работать как одиночные и без накапливания. Те же 12 вибраторов, которые тремя группами обрабатывали до 180 ВТ/час по методике флип-флоп, стали обрабатывать до 600-720 ВТ/час работая как одиночные по методике слип-свип. Несмотря на гораздо меньшую энергию, излучаемую на каждой ВТ, их большое количество на кв.км позволяет улучшить изображение среды, избавиться от отпечатка системы наблюдений (acquisition footprint) и значительно повысить верхнюю частоту сигнала благодаря лучшему сохранению высоких частот (Рис.5).

Позднее, для обработки очень больших разведочных площадей в 10 тысяч кв.км и больше, геофизиками компании

BP был внедрён метод независимого произвольного возбуждения свип-сигналов одиночными вибраторами (ISS – Independent Simultaneous Sweeping), при котором радиосвязь с вибраторами не является необходимостью, и они обрабатывают предписанные участки площади работ, как только выходят (по GPS) на соответствующие ВТ. По такой методике может использоваться любое количество вибраторов, и поломка одного из них мало влияет на ход работ. Рекорд, поставленный на Ближнем Востоке в апреле 2010 года при тестировании методики ISS с 18 одиночными вибраторами – около 45000 ВТ/сутки.

Эти и другие высокопроизводительные вибросейсмические методы требуют, чтобы регистрирующие станции обладали особыми возможностями: непрерывная регистрация потока данных (с условным разбиением на «полевые» виброграммы длительностью, например, 1 минута), запись в реальном времени большого числа каналов (100 тысяч и более). Для обеспечения высокой производительности вибропартии необходимо использовать супер-спред, то есть очень большое количество постоянно включённых каналов, охватывающих все те активные расстановки, которые соответствуют работающим на площади вибраторам. Очевидно, что при такой реализации высокопроизводительной вибросейсморазведки получают зашумлённые исходные записи с низким отношением С/П. И заказчик должен воспринять новую концепцию: хорошие виброданные – это не высокое отношение С/П на индивидуальных записях, а высокая плотность наблюдений, обеспечивающая отличное распределение удалений и азимутов. Заказчик должен быть готов к тому, что новые полевые данные могут иметь более низкое отно-



▲ Рис. 5. Сравнение горизонтальных срезов на времени 800 мс, полученные компанией CGG при использовании методики слип-свип: слева – четыре группы по 4 вибратора; справа – 14 одиночных вибраторов с вдвое меньшим интервалом между линиями возбуждения и между пунктами возбуждения.

шение С/П, чем прежние данные, полученные по стандартным методикам, но результаты обработки и окончательные изображения среды должны быть намного лучше. Большое количество публикаций на эту тему (из регионов Северной Африки и Ближнего Востока) убедительно поддерживает эту концепцию.

Помимо непрерывной записи очень большого количества активных каналов, регистрирующие системы высокопроизводительных вибропартий должны обладать и другими необходимыми функциями. Имеется в виду использование ГНСС (глобальных навигационных спутниковых систем). Поскольку точность определения координат ПВ и ПП необходимо повышать от 2 м при стандартных съёмках до 0,5-1,0 м при высокочастотных съёмках, эту точность могут обеспечить, например, двухчастотные GPS-приёмники в режиме кинематики в реальном времени (RTK). Опытно-методические работы на Ближнем Востоке показали, что сохранение высоких частот зависит не только от точечного

возбуждения и приёма и высокой плотности наблюдений, но и от точности определения координат пунктов съёмки [5]. С помощью RTK-GPS можно не только точно определять координаты виброточек, но и выводить вибраторы на следующие ВТ (без разбивки пикетов). Современная электроника вибраторов, такая как VE464, имеет возможность управлять 32-мя группами вибраторов по одному радиоканалу, что повышает общую производительность вибросейсмических работ.

Огромные массивы ежедневно регистрируемых данных (до 20-24 Тб в день), которые часто представляют собой «материнские записи» и которые невозможно в реальном времени разделить на «читаемые» индивидуальные записи – это новая ситуация, с которой сталкиваются операторы сейсмостанций и супервайзеры в мега-партиях. Если раньше эти специалисты отвечали за хорошее качество исходных записей и могли останавливать полевые работы при высоком уровне микросейсм и других помех, то теперь они отвечают, в

первую очередь, за соблюдение выбранных заказчиком технологий, а полевые записи могут быть недоступны для традиционного визуального или количественного анализа в кабине оператора. При регистрации десятков тысяч каналов на каждом пункте возбуждения с интервалом 10 секунд и меньше, оператор не имеет никакой возможности убедиться, что все трассы удовлетворяют заданным параметрам. Следовательно, регистрирующая система должна иметь программное обеспечение для автоматической проверки записываемого материала и уведомлять оператора о возможных проблемах на том или ином пункте возбуждения.

Заключение

На раннем этапе развития метода 3D были выработаны приёмы работ, которые затем стали правилами и стандартами, которыми все руководствовались на этапах проектирования и отработки съёмки 3D. В последние годы появились новые методики наблюдений, опирающиеся на расширенные возможности регистрирующих систем и всего сейсморазведочного оборудования. В результате, наши правила и стандарты, которые казались незыблемыми несколько лет назад, пересматриваются и меняются. Технологии будут развиваться и дальше, и геофизики будут придумывать новые инновационные аппаратурно-методические комплексы. И будут снова пересматривать правила и стандарты...

Литература

1. Мужно Д., Череповский А.В., 2009, Цифровые акселерометры и их влияние на сейсморазведку. – «Приборы и системы разведочной геофизики», Саратов, №04(30)/2009, с.18-22.
2. Череповский А.В., 2010, Пришло ли

время отказаться от группирования в пользу одиночных сейсмоприёмников? – «Геофизика», №3, 2010, с.22-28.

3. Череповский А.В., 2012, Сейсморазведка с одиночными приёмниками и источниками: обзор современных технологий и проектирование съёмок. – Образовательное турне EAGE, Москва, 133 с.

4. Череповский А.В., Мужно Д.А., 2013, Какой одиночный приёмник лучше? – «Приборы и системы разведочной геофизики», Саратов, №01(43)/2013, с.20-26.

5. Baeten G. and van der Heijden H., 2008, Improving S/N for high frequencies. – The Leading Edge, vol.27, p.144-153.

6. Eales M.H., 2010, Karachaganak 2009 3D Seismic Survey – A World Class Effort. – KazGeo-2010, Almaty, Kazakhstan, 15-17 November 2010.

7. El-Emam A., Al-Eidan A., and Al-Deen Kh.Sh., 2013, Single-sensor technology – the experience in Kuwait. – First Break, Vol.31, May 2013, p.71-74.

8. Lansley M., 2004, CMP fold: A meaningless number? – The Leading Edge, Vol.23, p.1038–1041.

9. Lansley M., 2013, Shifting paradigms in land data acquisition. – First Break, Vol.31, January 2013, p.73-77.

10. Seeni S., Al-Mohammadi J., Kermoal P., Sauzedde P., and Clow F., 2011, Dukhan 3D, Ultra High Density Full Wide Azimuth Seismic Survey – Transition Zone and Sabkha Acquisition. – 73rd EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2011, Vienna, 23-26 May 2011, Extended Abstracts.

Подробнее об авторе



Череповский
Анатолий Викторович

региональный геофизик
компании Sercel, к.т.н;