

Широкополосные технологии морской сейсморазведки: сравнение альтернатив

■ Ампилов Ю.П., МГУ им. Ломоносова, г. Москва

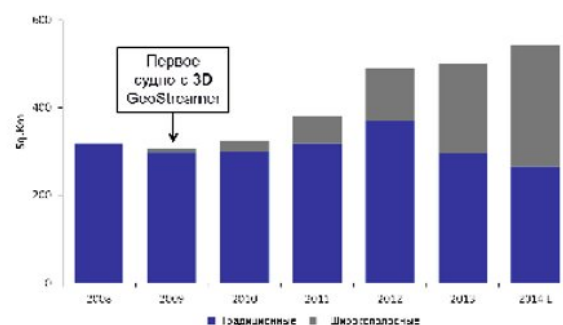
В статье рассмотрены основные конкурирующие технологии, позволяющие получить сейсмическую запись в широком диапазоне частот при морских исследованиях. Данные модификации сейсморазведки в настоящее время занимают уже около половины мирового рынка, в то время как на шельфе России они практически не применяются. Анализируются преимущества и недостатки каждого из методов. Делается вывод о предпочтении использования многосенсорных технологий в сравнении с другими решениями.

Введение

Первым и основным методом в геофизике является сейсморазведка, которая позволяет оценить структуру недр и вероятные места расположения ловушек, где могут находиться УВ. Современные методы динамической интерпретации по аномалиям отраженного сигнала нередко позволяют определить наличие нефти и газа в этих ловушках. Однако абсолютно точно этого предсказать нельзя. По крайней мере, традиционные методы морской сейсморазведки оставляют нам не так много возможностей для ответа на этот вопрос. Зачастую они помогают удовлетворительно выполнить лишь структурные построения, что не всегда достаточно для выбора оптимальных мест заложения поисковых и разведочных скважин.

Что касается морской сейсморазведки 2D, то она стала рутинным дешевым поисковым методом и в мировой практике применяется с каждым годом все меньше даже на поисковом этапе. В последние годы даже до бурения практикуют применение 3D сейсморазведки, поскольку она кратно информативнее 2D и весьма недорога в сравнении с морским бурением. При этом она позволяет свести к минимуму риск неуспешного бурения дорогостоящих скважин. Но и обычная 3D сейсморазведка при нынешних возросших технических возможностях представляется не таким эффективным инструментом, как, например, 10 лет назад.

В последние несколько лет в мире стали быстро развиваться так называемые методы широкополосной сейсморазведки (broadband seismic), информативность которых намного выше при сопоставимых или почти сопоставимых затратах на выполнение работ. И сегодня объем таких работ уже сопоставим или превышает объем традиционной 3D сейсморазведки (рис. 1).



▲ Рис. 1. Соотношение объемов широкополосной и обычной 3D-сейсморазведки на мировом рынке.

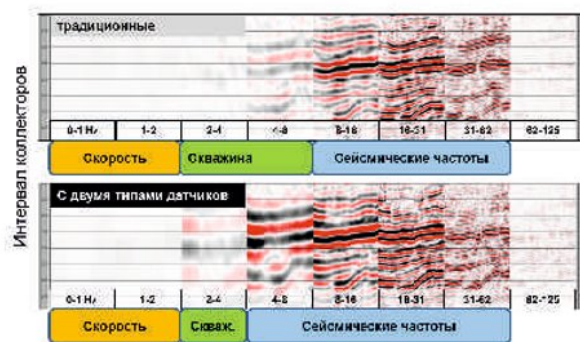
Этого не скажешь о России, где указанные технологии даже не запрашиваются на тендерах двумя главными держателями шельфовых лицензий: Роснефтью и Газпромом, при том, что такие методы позволяют значительно повысить вертикальную разрешенность сейсмозаписи, в отдельных случаях до 2–4 м против 10–20 м в обычной 3D сейсморазведке. Достигается это отнюдь не за счет повышения частоты дискретизации записи, которая на сейсмических частотах малоэффективна, а за счет специальных аппаратно-технологических решений с последующей

специальной обработкой. Известно и большое количество решений в обработке обычных сейсмоданных, выдаваемых авторами за “широкополосную” сейморазведку broadband, однако они не выдерживают серьезной экспертизы и зачастую оказываются весьма субъективными. В данном контексте мы также не рассматриваем возможности, так называемой геостатистической инверсии, позволяющей получить вертикальное разрешение разреза в первые метры при обычной дискретности сигнала в 2–4 мс. Речь идет лишь о нестандартных способах морских наблюдений с регистрацией дополнительной информации о сейсмических сигналах.

На очевидный вопрос о том, почему такой востребованной стала широкополосная сейморазведка, которая уверенно вытесняет обычную, невозможно найти простой ответ, кроме общих рассуждений о повышении вертикальной разрешенности. К тому же для этого, казалось бы, требуется расширение диапазона частот в верхнюю часть спектра. Однако это не так. Присутствие нижних частот зачастую даже более важно. Если продолжать качественные аналогии, то можно вспомнить, что идеальный дельта-импульс с нулевой длительностью имеет бесконечный спектр в обе стороны.

Второй аргумент по поводу низких частот уже чисто геофизический. В последнее время все большей популярностью в сейсмической обработке и интерпретации пользуются так называемые инверсионные преобразования, представляющие собой попытку восстановить акустический импеданс из сейсмозаписи, а через него выйти на подсчетные параметры месторождения [Ампиров, 2008, 2015; Ampilov, 2010; Baardman et al., 2010]. Для этого низкие частоты крайне важны. И если условные низкие частоты от 0 до 2–4

Гц можно получить из осредненных кривых интервальных скоростей, то в интервале 4–10 Гц приходится довольствоваться информацией, полученной при интерполяции по скважинам. Следовательно, при отсутствии большого количества скважин инверсию выполнить невозможно. Но если этот частотный интервал будет заполнен сейсмическими данными, тогда можно выполнять инверсию и при значительно меньшем объеме скважинной информации. По сути, скважины будут нужны преимущественно для калибровки результатов (рис. 2).



▲ Рис. 2. Сопоставление частотных диапазонов обычной и широкополосной сейморазведки.

Главным фактором в морской сейморазведке, препятствующим расширению диапазона регистрируемых сигналов, является дополнительное отражение-спутник от границы “вода – воздух”. Именно оно увеличивает длительность элементарного сигнала, а значит сужает его спектр. В настоящей статье мы не будем вдаваться в математические выкладки и попробуем объяснить ситуацию на качественном уровне.

Новейшие мировые технологии широко-полосной морской сейморазведки

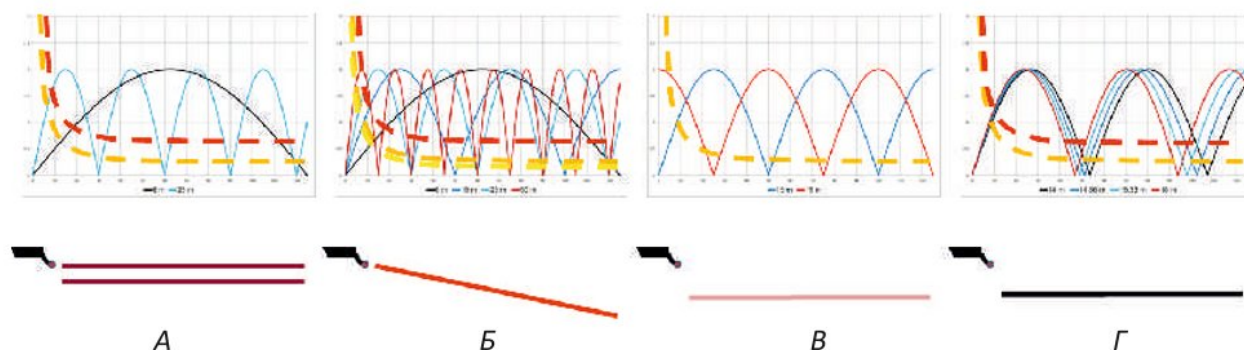
Поскольку мы ведем речь о частотном диапазоне, нам будет удобно сопоставлять различные методы по параметрам амплитудного спектра сигналов.

В морской сейсморазведке традиционную косу с датчиками давления буксируют обычно на глубине 6–8 м. При этом первый лепесток ее спектральной характеристики имеет нулевое значение на частоте 60–90 Гц (черная линия на рис. 3, а). Как видно из рисунка, и низкие, и высокие частоты в пределах этого лепестка регистрируются с минимальной чувствительностью и лишь средние частоты в районе максимума лепестка регистрируются нормально. Чтобы расширить диапазон частот, надо буксировать косу на заметно меньшей глубине, чтобы “ноль” лепестка ушел далее 100 Гц. Но тогда при малейшем волнении будут возникать серьезные помехи вблизи морской поверхности. А если наоборот, погрузить косу глубже, то “ноль” первого лепестка “придет” в область полезной записи 30–50 Гц, безнадежно испортив регистрируемую волновую картину. Например, если коса пойдет на глубине 25 м, то в пределах полезной записи будут уже четыре лепестка спектральной характеристики (синяя линия на рис. 3, а) вместо одного при 6-метровой глубине косы (черная линия на рис. 3, а). Понятно, что такая запись будет малоприспособной для обработки и последующей интерпретации.

Первый из рассматриваемых вариантов широкополосной технологии состоит в

том, чтобы объединить эти две записи, т.е. буксировать две косы на разных глубинах. Тогда “провальные” низкие и высокие частоты на черном лепестке (глубина 6м) будут обогащены в начале и конце интервала характеристиками от “глубокой” косы (25м). Мы получим шанс после соответствующей специальной обработки получить широкополосную запись с высоким разрешением. Такие системы применяются некоторыми компаниями, но, как видно из рисунка, это заметно усложняет морские операции даже в случае 2Dсейсморазведки. При 3Dсъемке со многими косами управлять такой сложной системой буксировки на двух уровнях почти невозможно, поскольку высока вероятность различных перехлестов и заметно снижается производительность. Поэтому в современных технологиях такие системы применяются очень редко.

Другим технологическим решением является буксировка косы в наклонном положении. Поскольку регистрирующие каналы в такой косе находятся на разной глубине, то и спектральная характеристика отдельных частей косы имеет “нули” в разных интервалах спектра при разном количестве “лепестков” в полезном частотном диапазоне (см. рис. 3, б). Этот вариант предпочтительнее предыдущего в плане трудоемкости морских работ и может быть



▲ Рис. 3. Способы расширения спектра сигнала: а – буксировка двух кос на разной глубине; б – буксировка косы в наклонном положении; в – коса с двумя типами датчиков (GeoStreamer); г – обычная коса на большой глубине (только обработка данных).

реализован и при 3Dсейсморазведке, хотя с наклонными косами работать несколько сложнее, чем с обычными горизонтальными. Такого рода идея заложена в известной технологии Broad-seis компании CGG. Но главным недостатком здесь является то, что высокое разрешение записи можно получить лишь на итоговом суммарном временном разрезе после сложной обработки. При этом получить отдельную многоканальную сейсмограмму с широкополосной записью до суммирования невозможно ввиду разности глубин каналов.

Третье широкополосное технологическое решение является самым “элегантным” и, как показывает практика, самым эффективным. Коса буксируется в обычном горизонтальном положении, и глубина ее погружения может быть любой – от обычных 6–8 м вплоть до 25 м и более при необходимости. При этом не происходит ухудшения качества материала в отличие от предыдущих случаев, когда могут быть “вырезаны” полезные частоты вблизи нулевых значений спектральной характеристики. Буксировка на повышенных глубинах позволяет оставаться на профиле и продолжать работы при высоте волн до 4–5 м, что значительно сокращает вынужденные простои по погодным условиям. Причина таких широких возможностей состоит в специальной

конструкции косы. В ней наряду с традиционными датчиками давления – гидрофонами – присутствуют и датчики вертикальной скорости смещения – геофоны. Если коэффициент отражения от свободной поверхности “вода–воздух” равен (-1) , т.е. сигнал от датчика давления меняет знак на обратный, то в геофоне обращения знака не происходит, так как коэффициент отражения для этой волны равен 1. Задержка отраженного от водной поверхности импульса одинакова в обоих случаях, а знаки их противоположны. Значит, при сложении сигналов от гидрофона и геофона первый импульс, соответствующий полезному отражению, усилится, а два противоположных по знаку импульса волны-спутника от границы “вода – воздух” при равной амплитуде взаимно уничтожатся (рис. 4). Разумеется, для этого должна быть произведена соответствующая обработка двух волновых полей, зарегистрированных разными системами датчиков. Спектральная характеристика косы для данного случая приведена на рис. 3, в, из которого видно, что нулевым значениям в “лепестках” гидрофона соответствуют максимальные значения в “лепестках” геофона. Таким образом получают требуемый широкополосный спектр. Данная технология разработана компанией PGS под названием GeoStreamer®.

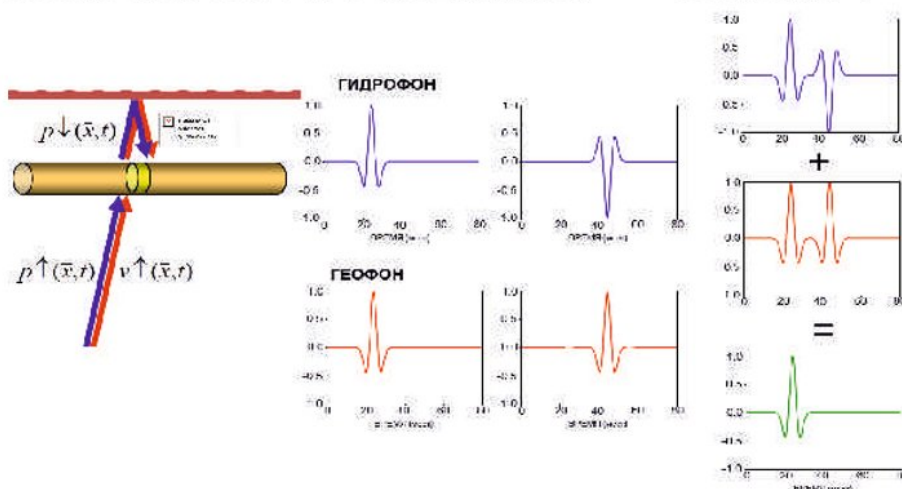


Рис. 4. Схема подавления волны-спутника в технологии GeoStreamer®.

Компания WesternGeco пошла дальше, разработав 4-компонентную косу, в которой наряду с традиционными гидрофонами имеются три геофона по взаимно перпендикулярным осям X , Y , Z , где X регистрирует компоненту скорости смещения вдоль профиля буксировки, Y – в горизонтальной плоскости перпендикулярно косе (X), Z регистрирует вертикальную компоненту скорости смещения, как и в GeoStreamer®. Технология получила название Izometrix (ранее известная как Nessie-6). Результаты опытных работ, представленные компанией WesternGeco на ежегодной конференции EAGE–2012 в Копенгагене, показали, что по оси X вдоль направления косы в значительной степени записаны шумы буксировки. Скорость смещения, записанная по оси Y , должна была помочь “интеллектуальной” интерполяции сигнала между реальными косами, т.е. создать виртуальные “синтетические” косы в промежутке наблюдений, чтобы повысить кратность и горизонтальное разрешение 3D данных. Однако первые экспериментальные данные по этой компоненте оказались неубедительными. В итоге рабочими остались те же две компоненты, что и в технологии GeoStreamer®. До сих пор по технологии Izometrix удалось наработать небольшие опытные объемы работ. Ею оборудованы пока лишь два судна. Вместе с тем по технологии GeoStreamer®, которая эксплуатируется в коммерческом варианте с 2008 г., уже наработано свыше 400 тыс. км² 3D и около 300 тыс. пог. км 2D. Это позволило открыть несколько значимых морских месторождений. С 2015 г. этой технологией оснащен весь флот PGS, поэтому получается, что на сегодня это фактически единственная широко апробированная в мировой практике технология широкополосной сейсморазведки, доказавшая на практике свою высокую

эффективность. Справедливости ради надо отметить, что компания Sercel недавно приступила к выпуску 4-компонентных морских сейсмокос Sentiel. Однако пока для нее не создано поддерживающего материального обеспечения для обработки, поэтому практические производственные результаты, по которым можно было бы судить об эффективности технологии, отсутствуют.

Что касается уже упомянутой технологии GeoStreamer®, то по комплексу показателей в производительности морских работ и геологических результатов, достигнутых в ходе масштабной апробации во всех регионах мира, она на сегодняшний день является бесспорным лидером в широкополосной морской сейсморазведке. В этой связи в следующем разделе статьи будет представлено несколько примеров ее использования.

Четвертая группа методов широкополосной сейсморазведки целиком представлена различными алгоритмами специальной обработки сейсморазведочных данных с традиционных морских кос, оснащенных только приемниками давления – гидрофонами. Как следует из вышеизложенного, для расширения спектра предпочтительнее буксировать косу на меньшей глубине, но для этого требуется, по возможности, полный штиль, чтобы соотношение сигнал – помеха было высоким. А такой погоды в некоторых районах не бывает вовсе. Иногда пытаются буксировать косы на неоптимальных глубинах до 15 м вместо 6–8 м (см. рис. 3, г). Как ни покажется это парадоксальным, в таком случае более предпочтительным будет беспокойное море с умеренным волнением. Тогда нулевые значения “лепестков” спектральной характеристики не будут жестко фиксированы на шкале частот, что позволит частично восстановить при обработке утраченные частоты. Однако в

контексте данной статьи мы не рассматриваем такие, чисто алгоритмические, решения для традиционной съемки, поскольку современные методы цифровой обработки позволяют получить почти любой наперед заданный результат. При этом объективные критерии его достоверности, как правило, отсутствуют, что позволяет считать такие методы крайне субъективными. Скорее, это попытка некоторых компаний “быть в тренде” запросов на широкополосную сейсморазведку, не тратя значительных средств на модернизацию. В ряде случаев при не очень высокой компетентности служб заказчика это срывает, поскольку формально финальные временные разрезы выглядят высокоразрешенными.

Ниже в табл. 1 приведены основные характеристики рассмотренных технологий широкополосной сейсморазведки и их модификаций. Обращает на себя внимание тот факт, что наиболее качествен-

ные и приемлемые результаты получают с помощью многокомпонентных кос (первая строка в таблице).

В табл. 2 этот факт подтверждается при сопоставлении геофизических параметров рассматриваемых видов съемок и возможностей геологического истолкования соответствующих результатов. Максимальное количество зеленых “галочек” имеется только в первой строке. В связи с этим далее рассмотрим дополнительные возможности “двухсенсорной” съемки с использованием технологии GeoStreamer®.

Технология сейсморазведки с двухсенсорной косой

Морская сейсмическая коса, изготовленная по технологии GeoStreamer®, внешне ничем не отличается от обычной, однако ее внутренняя “начинка” принципиально иная [Camboiset al., 2009; Dayetal., 2013]. В ней по всей длине распределены многочисленные гидрофоны и геофоны,

▼ Табл. 1. Технические характеристики основных методов широкополосной сейсморазведки

Методы	Буксирование	Подавление волн-спутников	Комментарии
Многокомпонентные косы: GeoStreamer, Nessie-6 (WG), Sentinel MS (Sercel)	Буксирование на глубине	Разделение волновых полей	Наиболее корректный и остроумный способ удаления волн-спутников приемника. Обычно используется в донных косах
Разноуровневый: DISCover (WG)	Буксирование на глубине и у поверхности	Ряд “провалов” в амплитудном спектре	Множество “провалов” получается до и после суммирования. Таким образом, требуется в 2 раза больше кос
Наклонные косы: Broadseis (CGG), ObliQ (WG)	Наклонное буксирование: от поверхности на глубину	Ряд “провалов” в амплитудном спектре	Множество “провалов” получается только после суммирования. Подавление волн-спутников до суммирования опирается на решения по обработке (ниже)
	Буксирование у поверхности	Усиление НЧ	Предполагает хорошее отношение сигнал – шум на низких частотах, несмотря на буксирование на малой глубине
Решения в области обработки: WiBand (GXT), Clari-Fi (TGS), SHarp (Dolphin), ...	Буксирование на глубине	Разделение частот	Предполагает, что в частотном “провале” есть некоторый сигнал. Предпочтительна плохая погода, поскольку размываются частотные “провалы”

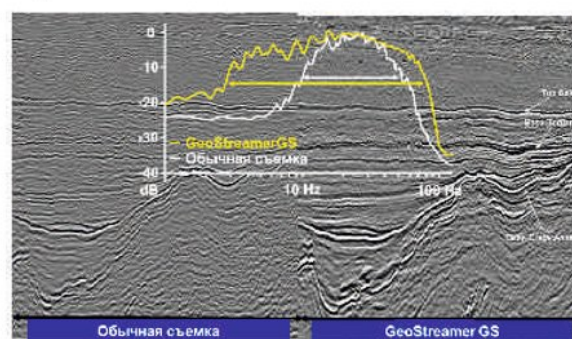
▼ Табл. 2. Сопоставление возможностей альтернативных методов широкополосной сейсморазведки.

	Развёртывание и обслуживание	Расширенный диапазон погодных условий	Усиление низких частот	Подавление волн-спутников после суммирования	Подавление волн-спутников до суммирования	Определение характеристик коллекторов	Совместимость с 4D	Разделение волновых полей
Много-компонентный	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Двух-уровневый	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✗
Наклонный	≈	✗	✓	✓	✗	✗	✗	✗
Обработка, коса у поверхности	✓	✗	✗	≈	✓	✓	✓	✗
Обработка, коса на глубине	✓	✓	✓	≈	✗	✗	✗	✗

что позволяет реализовать принцип подавления волны-спутника от свободной поверхности (см. рис. 4) и достичь квази-равномерной частотной характеристики в широком диапазоне (см. рис. 3, в). В качестве дополнительного операционного выигрыша мы получаем возможность работать в широком погодном окне при высоте волн до 4–5 м без потери качества материала. Напомним, это достигается погружением буксируемой косы на глубины 15–25 м, что невозможно сделать с традиционной косой. Значительное сокращение вынужденных простоев из-за погодных условий позволяет наряду с качеством повысить экономическую эффективность работ.

Отметим также, что кроме подавления волны-спутника в приемном устройстве такую же операцию желательно осуществить и в источнике. Для этого используется другое технологическое решение – GeoSource, а синхронное применение обеих технологий получило название GeoStreamer (GS). Совместный анализ

объединенной технологии – это тема отдельной статьи.



▲ Рис. 5. Пример сопоставления традиционной сейсморазведки и двухсенсорной технологии GeoStreamer® во временной и спектральной области.

На рис.5 приведен один из примеров сопоставления результатов обычной сейсморазведки и GeoStreamer®. Преимущества в качестве волновой картины бесспорны, а расширение спектра в область низких частот всего на 4–5 Гц добавляет целую октаву полезного частотного диапазона. Это революционным образом сказывается на качестве последующей сейсмической инверсии, для которой уже

не требуется как в обычных случаях столь детальной информации по многочисленным скважинам, как мы отмечали во введении.

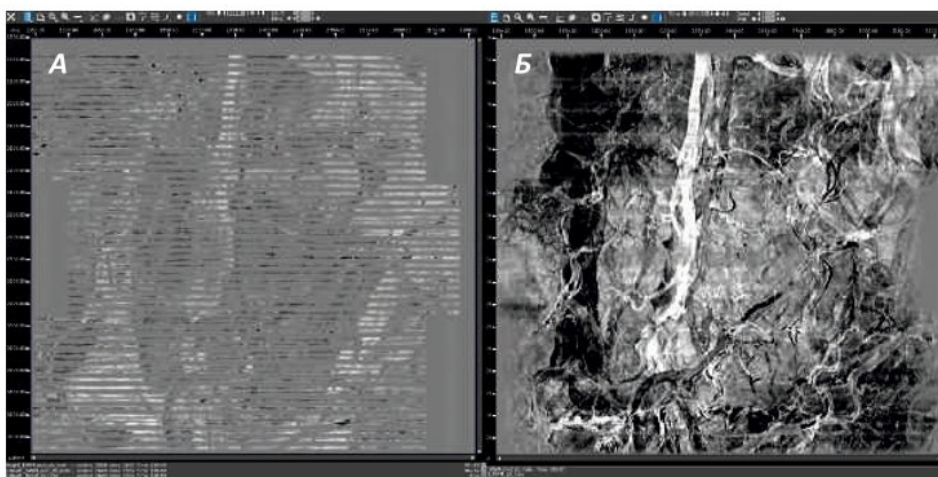
Наряду с традиционными задачами сейсморазведки применение двухсенсорной технологии позволяет решать еще одну очень важную задачу по детальному изучению скоростных характеристик и структурного строения верхней части разреза (ВЧР) до глубин в несколько сотен метров. Обычно такая задача решается с помощью специальной инженерной сейсморазведки. Но в случае с GeoStreamer® имеются дополнительные возможности. Используется эффект частично-кратных отраженных волн от придонных границ, которые для данной части разреза считаются полезными и позволяют “сгустить” систему наблюдений для этих уровней. Ведь при обычной съемке, рассчитанной на средние и большие глубины, ВЧР освещена недостаточно (рис. 6,а).

Наряду с малой кратностью наблюдений осложняющим эффектом является частотный диапазон колебаний, неоптимальный для ВЧР и не обеспечивающий надлежащего разрешения. Всех этих недостатков лишена двухсенсорная технология, с помощью которой удастся получить весьма привлекательный и

объективный результат в сравнении с обычной технологией (см. рис. 6,б). Следует отметить, что результат такого качества не уступает методам инженерной сейсморазведки и во многих случаях снимается необходимость проведения дополнительных сейсмоакустических исследований для выбора точек бурения и установки морских сооружений. Это чрезвычайно важно для морей Арктики с коротким безледовым периодом, где благодаря данной технологии можно сэкономить целый год, сокращая сроки ГРП.

Говоря о себестоимости работ с двухсенсорной технологией, следует отметить, что она сопоставима с обычной сейсморазведкой в части морских работ и немного выше в части обработки, поскольку используется два класса волновых полей. Но в общей суммарной стоимости работ это обычно не более 10 %. Зато очевидным образом улучшается качество и возрастает информативность сейсморазведки для решения геологических задач в сложных сейсмогеологических условиях.

Кроме перечисленных выше вариантов широкополосной сейсморазведки, в последнее время исследователи стали уделять значительное внимание мультиа-



▶ Рис. 6. Сопоставление временного среза для придонных отложений на уровне 120 мс при обычной технологии 3D (а) и технологии GeoStreamer® (б).

зимутальным (MAZ) и широкоазимутальным (WAZ) системам наблюдений, которые дают много дополнительной информации. Мы не можем уделить достаточно внимания этому, весьма важному для современной сейсморазведки вопросу. Это предмет отдельной статьи. Отметим лишь, что такие системы позволяют практически устранить зависимость результатов съемки 3D от направления отстрела профилей. Данный фактор особенно важен при наличии разноориентированных разрывных нарушений и заметной горизонтальной неоднородности и значимой анизотропии среды, что встречается довольно часто. Стоимость таких работ существенно выше, чем стандартной 3D-съемки, даже широкополосной, однако последующая экономия на бурении полностью оправдывает затраты на проведение данных работ. К тому же появившиеся в последние годы на мировом рынке современные сейсморазведочные суда, которые могут буксировать одновременно до 24 кос длиной по 12 км (рис. 7), способны существенно удешевить такие работы благодаря своей высокой производительности. Так, суда класса RamformS могут в благоприятных условиях выполнять свыше 1000 км² 3D в неделю, и такой рекорд был установлен еще в 2009 г. на шельфе Бразилии. А современные суда класса Titan заметно превышают и эти показатели.

В завершение отметим, что, к сожалению, ни одна из перечисленных технологий не под силу российским сервисным компаниям, а основные российские заказчики в лице Газпрома и Роснефти в тендерных условиях не предусматривают применение новейших технологий и систем наблюдений, делая ставку на минимальную стоимость работ. В резуль-

тате выполняемые сегодня на российском шельфе сейсморазведочные работы 3D по технологическим параметрам соответствуют тому уровню, который в мире был достигнут более 15 лет назад. Непредвзятым специалистам понятно, что такие работы морально устарели. А с учетом того, что поисковое, разведочное, а тем более эксплуатационное бурение на большинстве шельфовых участков будет задерживаться в новых условиях санкций и низких цен на нефть, следует понимать, что к моменту активного освоения придется все эти работы проводить заново, поскольку за это время технологии шагнут далеко вперед. Поэтому поговорка “Скупой платит дважды” применима к ситуации на российском шельфе в полной мере. На самом деле компаниям придется платить впоследствии еще гораздо больше. Ведь стоимость сейсморазведки 3D на огромной площади в 3 тыс. км²кратно меньше стоимости всего одной поисково-разведочной скважины. А в результате высококачественной сейсмики, проведенной на месторождении, таких скважин можно сэкономить несколько. К сожалению, нынешние финансисты в компаниях не думают об этом, ставя во главу угла текущие сиюминутные расходы. Между



▲ Рис. 7. Сейсмическая 3D расстановка типового судна класса Ramform S (компания PGS) в развернутом состоянии в масштабе карты Москвы.

тем экономии никакой нет. Напротив, без таких работ компаниям в совокупности придется тратить значительно больше.

Выводы

1. Широкополосные сейсмические технологии, очень быстро завоевывающие мировой рынок, остаются невостребованными в России.

2. Применение российскими компаниями устаревших западных технологий приведет к тому, что к моменту начала разведочного бурения полученные сегодня данные станут некондиционными, и многие работы придется повторить, особенно на тех объектах шельфа, которые будут осваиваться совместно с зарубежными партнерами. А таких объектов большинство ввиду полного отсутствия отечественных технологий добычи.

3. Среди разнообразия широкополосных сейсмических технологий очевидными преимуществами обладают те, которые основаны на многосенсорных косах. Наиболее апробированной на сегодняшний день в мире является двухсенсорная технология GeoStreamer (GS).

4. Для сокращения зависимости от зарубежных технологий требуется незамедлительно предпринять все меры для возрождения отечественной геофизики, в особенности в части оборудования и аппаратуры для производства работ на шельфе, которые в настоящее время подпали под санкции.

Литература

Ампиров Ю.П., От сейсмической интерпретации к моделированию и оценке месторождений нефти и газа. М.: Геоинформмарк, 2008. 429с.

Ампиров Ю.П., Сейсморазведка на российском шельфе // Offshore [Russia]. 2015. № 2 (8). С.26-35.

Ampilov Y.P., From seismic interpretation to modeling and assessment of oil and gas fields // EAGE Publ.BV. The Netherlands, 2010.

Baardman R.H., Verschuur D.J., van Borselen R.G.et al., Estimation of primaries by sparse inversion using dual-sensor data//SEG Denver. 2010. Ann.Meet. Exp. Abstracts, 3468–3472.

Cambois G., Carlson D., Jones C.et al., Dual-sensor Streamer data, acquisition QC and attenuation of seismic interferences and other noises: 71thEAGE Conference & Exhibition, 2009. X033.

Day A., Klüver T., Söllner W.et al., Wavefield-separation methods for dual-sensor towed-streamer data // Geophysics.2013.V. 78, N2.P. WA55–WA70.