

## Морская сейсморазведка

## Ограничения на ширину диапазона частот сейсмической записи в

## глубоководных районах

## Seismic frequency bandwidth constraints in deepwater survey locations

**Эндрю Лонг (Andrew Long),<sup>1</sup> из компании PGS Technology, Перт, Австралия и Иен Букан (Iain Buchan),<sup>2</sup> из PGS Exploration, Сингапур, опровергают распространенное мнение о планировании сейсморазведочных работ в глубоководных районах и утверждают, что, чтобы получить оптимальные сейсмические разрезы высокого разрешения, следует пересмотреть взгляды на связь между глубиной источника и приемника, а также другими параметрами системы наблюдений.**

**Р**езультаты работ на глубоководных участках обычно содержат значительное количество данных с низкими значениями добротности в связи с высоким затуханием за счет неупругих процессов.

Совместный эффект контраста свойств на границе водадно и сложной стратиграфии приводит к сужению спектра и ухудшению отношения сигнал/шум в данных съемки с поверхности.

Распространено заблуждение, что уменьшая глубины источника и косы, можно увеличить амплитуды на высоких частотах, расширить спектр и, тем самым, повысить горизонтальную и вертикальную разрешающую способность. Далее мы покажем, откуда произошло это заблуждение, и дадим количественную оценку тех факторов, которые на самом деле влияют на спектр сигнала при работах на глубокой воде.

Вообще говоря, любое решение о выборе глубины источника и косы при планировании работ является компромиссным между стремлением добиться максимально широкого спектра сигнала (что дают малые глубины источника и косы) и максимального отношения сигнал/шум в данных (что дают большие глубины источника и косы), при прочих равных условиях, с учетом источников шумов и ограничений на методику работ. Неудивительно, что из опыта сейсмических работ в глубоководных районах и в районах с высоким поглощением вытекает стремление поместить источник и косу на большую глубину, чтобы получить данные оптимального качества.

Из приведенного примера 3D работ в глубоководном районе близ Филиппин видно, что, для того, чтобы при обработке избежать появления артефактов и потери высоких частот, которые ухудшают как разрешение так и качество разреза, необходимо проводить съемку по сети с частым шагом как по профилям, так и между профилями. Далее, значительное увеличение количества трасс на единицу площади дает существенное улучшение качества изображения, отношения сигнал/шум и разрешения.

Верно ли утверждение, что при проведении морской 3D съемки с несколькими косами группы источников и косы следует размещать на очень малой глубине, чтобы получить максимально широкий полезный диапазон частот? Как показано далее, обычно имеется ряд довольно существенных препятствий, которые делают неоправданным размещение источников и кос на малых глубинах.

Мы начнем с рассмотрения детального исследования модели источника с точки зрения изменения амплитудной и частотной характеристики при различных глубинах источников и кос. В исследовании рассмотрены результаты на разных временах прихода с учетом и без учета неупругого поглощения в земле. Далее мы рассмотрим полевой пример 3D съемки в глубоководном районе близ Филиппин, на котором обсудим связи между глубиной источника и косы и другими параметрами системы наблюдений в контексте высокоразрешающей сейсморазведки.

Таким образом, мы покажем оптимальную 3D методику сбора данных с максимально широким диапазоном частот и с оптимальным отношением сигнал/шум, по которой можно как вести съемку, так и получать сейсмические разрезы.

## Методика и результаты моделирования источника

Детальное моделирование источника проведено с использованием собственных программ компании PGS. Для группы пневмоисточников с заданными параметрами (например, с объемом 50000 куб. см. - 3090 куб. дюймов - с шагом между группами 10 м, см рис. 1), волновая картина сигнала в дальнем поле, вертикально распространяющегося после отрыва от источника моделируется с параметрами:

- Глубина источников принимается от 4 м до 8 м с шагом 1 м;
- Глубина приемников принимается от 5 м до 11 м с шагом 1 м; предполагается, что приемник всегда по крайней мере на 1 м глубже источника (так обычно делают и на практике);
- Считается, что подключен 24-битный аппаратный фильтр Syntrak с параметрами 3/12 - 206/276 Гц/дБ на октаву), интервал между отсчетами 2 мс;
- Температура воды 28° C

Заметим, что в данном случае мы пренебрегаем направленностью источника и приемника, поскольку рассматривается только вертикально распространяющийся сигнал. Кроме того, рассчитанный сигнал пропускается через фильтр с добротностью (Q) 80 с эффективным двойным временем пробега 0,5, 1,0, 2,0, и 5,0 сек. Добротность 80 характерна для глубоководных районов всего мира.

После расчета всех возможных вариантов для каждого сигнала рассчитываются и нормализуются амплитудные спектры. При нормализации применяется общепринятый критерий «уменьшение на

<sup>1</sup> andrew.long@pgs.com  
<sup>2</sup> iain.buchan@pgs.com

## Морская сейсморазведка

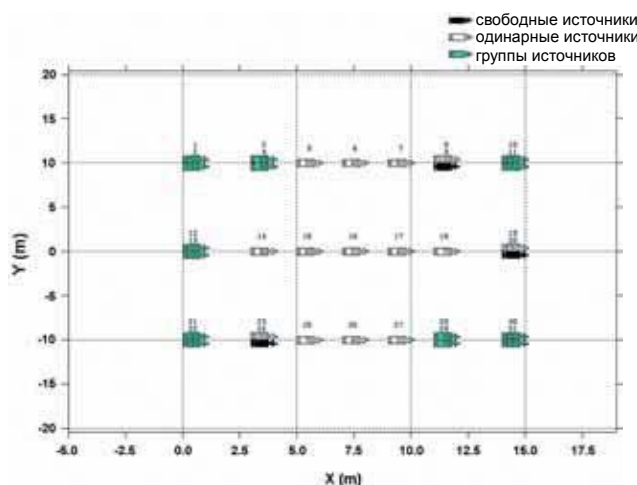


Рис. 1. Пример «типичной» группы пневмоисточников объемом 3090 куб. дюймов с шагом 10 м. Черным показаны свободные источники, зеленым – группы. Числа обозначают объем отдельных источников в куб. дюймах.

12 дБ», т. е. определяется частота, на которой амплитуда на 12 дБ меньше максимальной), и для каждого спектра вычисляются следующие параметры:

- Наименьшая частота («нижний срез»), где амплитуда на 12 дБ меньше максимальной
- Наибольшая частота («верхний срез»), где амплитуда на 12 дБ меньше максимальной
- Ширина спектра в октавах  $(\log_2 \frac{High-cut}{Lo-cut})$
- Отношение (в дБ) максимальных амплитуд для каждой пары «источник-приемник» к соответствующему значению (зависящее от двойного времени пробега) для выраженных в дБ.

$$20 \lg \frac{\text{амплитуда}_{\text{пара "источник-приемник" }}}{\text{амплитуда}_{\text{пара "источник на 4 м-приемник на 5 м" }}}}$$

Из рис. 2 видно, что, если пренебречь эффектами затухания, частоты верхнего и нижнего срезов для данной глубины косы близки и не зависят от глубины источника. С приближением косы к поверхности частоты нижнего и верхнего срезов возрастают. Далее, как видно на рис. 3, ширина диапазона частот также примерно постоянна для данной глубины косы и не зависит от глубины источника. Однако более заглубленные пары «источник-приемник» дают гораздо большие относительные амплитуды, чем мало заглубленные (источник на 4 м, коса на 5 м).

Рассмотрим далее влияние неупругого поглощения на частотах, типичных для глубоководных районов, на временах пробега 0.5, 1.0, 2.0, и 5.0 сек.

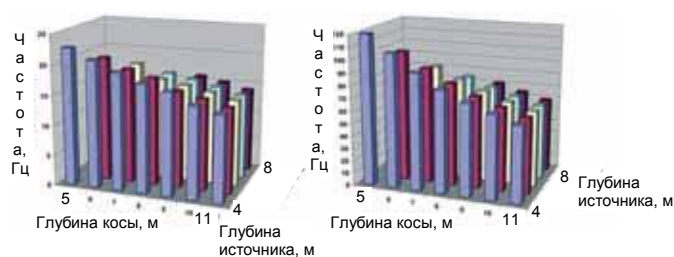


Рис. 2. Нижний (слева) и верхний (справа) срезы для различных глубин источника и косы, рассчитанные для источников, показанных на рис. 1. Поглощение не учитывается. Оценки даны по нормализованным амплитудным спектрам для вертикально распространяющегося сигнала после отрыва от источника по критерию «уменьшения на 12 дБ» от максимума спектра

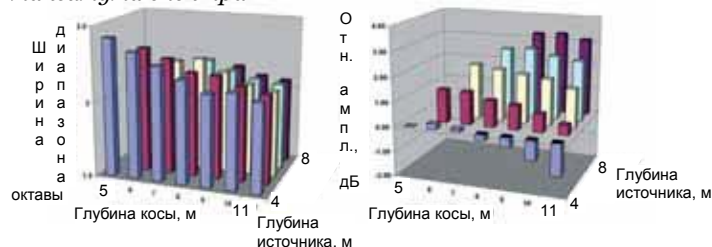


Рис. 3. Ширина диапазона (слева) и относительная амплитуда (справа) для различных глубин источника и косы, рассчитанные для источников, показанных на рис. 1. Поглощение не учитывается. Оценки даны по нормализованным амплитудным спектрам для вертикально распространяющегося сигнала после отрыва от источника по критерию «уменьшения на 12 дБ» от максимума спектра. Значения амплитуд нормированы на максимальную, соответствующую минимальной глубине (источник на 4 м, коса на 5 м) и выражены в дБ.

Как видно из рис. 4, на малом времени пробега 0.5 с увеличение глубины косы ведет к понижению частоты нижнего среза, а влияние глубины источника по большей части незначительно для данной глубины косы. На временах пробега, больших, чем примерно 1 с, частоты нижнего среза примерно одинаковы для всех глубин источника и косы на данном времени. С увеличением времени пробега частота нижнего среза в целом уменьшается. Точно также на малых временах пробега (0.5 с) увеличение глубины косы понижает частоту верхнего среза, а увеличение глубины источника лишь незначительно уменьшает эту частоту, и только при глубине косы менее 9 м (рис. 5). На больших глубинах глубина косы в основном не влияет на частоту верхнего среза. На времени пробега 1 с увеличение глубины косы понижает (относительно слабее, чем на 0.5 с) частоту верхнего среза, а влияние глубины источника на частоту верхнего среза также незначительно при всех глубинах косы. На временах около 2.5 с влияние погружения косы

## Морская сейсморазведка

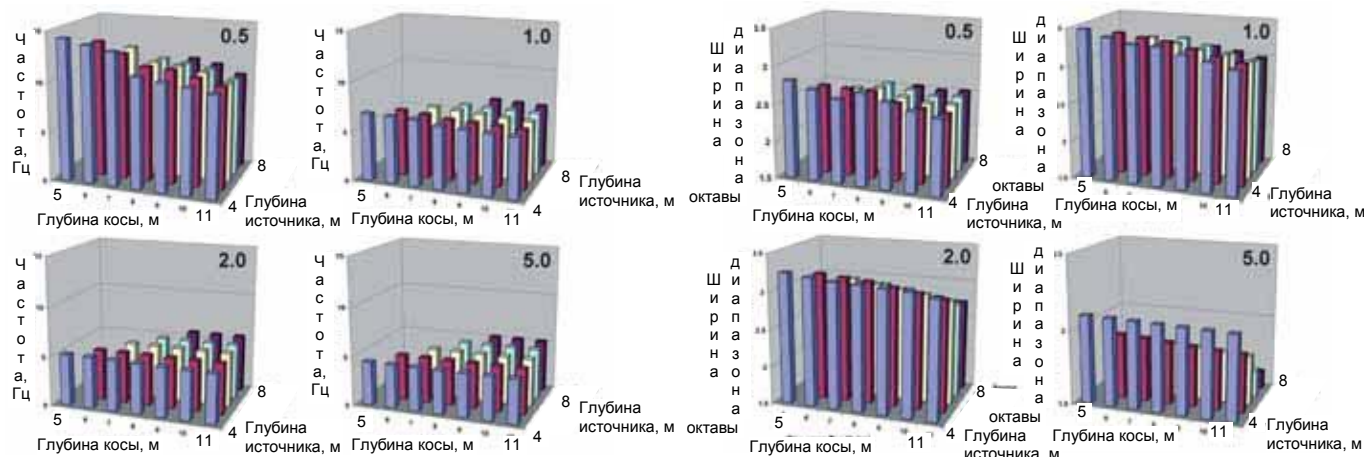


Рис. 4. Частоты нижнего среза для различных глубин источника и косы рассчитанные для источников, показанных на рис. 1 при добротности среды 80 на временах прибытия 0.5 (вверху слева), 1.0 (вверху справа), 2.0 (внизу слева) и 5.0 (внизу справа) сек. Оценки даны по нормализованным амплитудным спектрам для вертикально распространяющегося сигнала после отрыва от источника по критерию «уменьшения на 12 дБ» от максимума спектра.

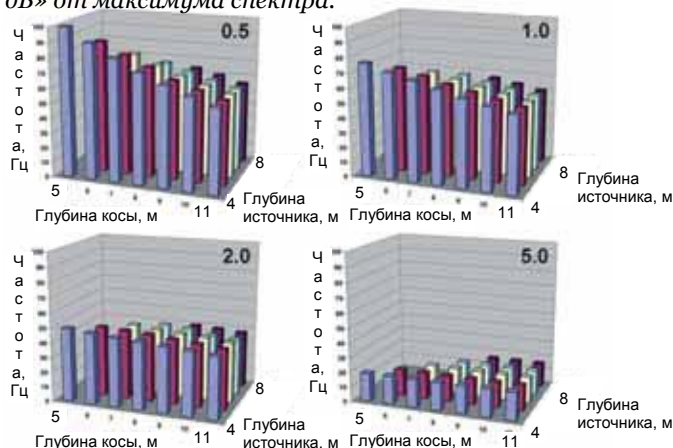


Рис. 5. Частоты верхнего среза для различных глубин источника и косы, рассчитанные для источников, показанных на рис. 1 при добротности среды 80 на временах прихода 0.5 (вверху слева), 1.0 (вверху справа), 2.0 (внизу слева) и 5.0 (внизу справа) сек. Оценки даны по нормализованным амплитудным спектрам для вертикально распространяющегося сигнала после отрыва от источника по критерию «уменьшения на 12 дБ» от максимума спектра.

становится почти незаметным, частота верхнего среза на данном времени одинакова для всех глубин источника и косы. В целом частота верхнего среза убывает с увеличением времени пробега.

Что касается ширины диапазона частот, то на всех временах пробега она уменьшается с увеличением глубины косы и/или источника (рис. 6). Ко времени пробега 5 с влияние глубины косы становится

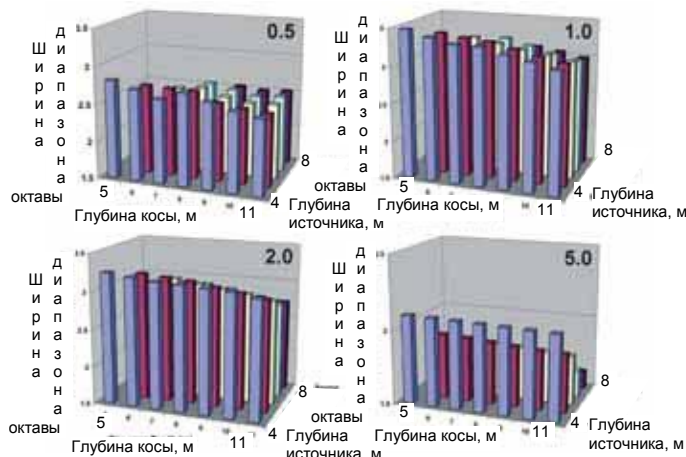


Рис. 6. Ширина диапазона частот для различных глубин источника и косы рассчитанные для источников, показанных на рис. 1 при добротности среды 80 на временах прихода 0.5 (вверху слева), 1.0 (вверху справа), 2.0 (внизу слева) и 5.0 (внизу справа) сек. Оценки даны по нормализованным амплитудным спектрам для вертикально распространяющегося сигнала после отрыва от источника по критерию «уменьшения на 12 дБ» от максимума спектра.

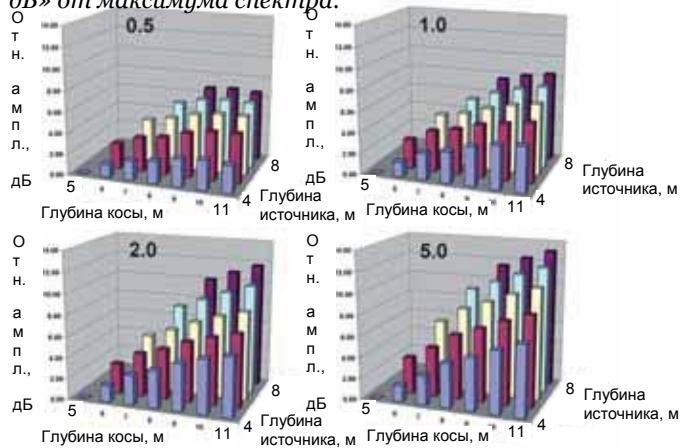


Рис. 7. Относительные амплитуды для различных глубин источника и косы, рассчитанные для источников, показанных на рис. 1 при добротности среды 80 на временах прихода 0.5 (вверху слева), 1.0 (вверху справа), 2.0 (внизу слева) и 5.0 (внизу справа) сек. Оценки даны по нормализованным амплитудным спектрам для вертикально распространяющегося сигнала после отрыва от источника по критерию «уменьшения на 12 дБ» от максимума спектра. Значения амплитуд нормированы максимальной, соответствующую минимальной глубине (источник на 4 м, коса на 5 м) и выражены в дБ.

незначительным, а увеличение глубины источника все еще создает заметное (хотя и ослабевающее) воздействие на ширину диапазона.

Для относительных амплитуд, как и ожидалось, наибольшие амплитуды достигаются при самых больших глубинах источника и косы, и наоборот (рис. 7). Этот эффект противоположен наблюдаемому для параметров, определяющих увеличение ширины диапазона частот.



## Морская сейсморазведка

С увеличением времени пробега относительное различие амплитуд для наименьшей глубины (источник на 4 м, коса на 5 м) и наибольшей глубины (источник на 8 м, коса на 11 м) увеличивается. При отсутствии затухания это различие составляет около 3 дБ, а на времени 5 с при наличии затухания достигает 13 дБ (разница 450%).

В целом уменьшение глубины источника и/или приемника приводит к расширению диапазона частот на всех временах. Однако возможность практического применения этого эффекта значительно снижается, в частности, при жестких природоохранных ограничениях и при наличии плавучих или неподвижных препятствий в районе съемки. Далее, отношения сигнал/шум в сейсмических данных все сильнее ухудшается с уменьшением глубины источника и/или косы. Отчасти это связано с состоянием морской поверхности, с естественными шумами и всеми проблемами движения судна и буксировки оборудования. Кроме того, свое воздействие оказывают ложные пункты возбуждения и приема связанные с взаимодействием однократно отраженной волны со всеми другими отражениями (кратными, преломленными, дифрагированными волнами, рассеянным шумом, и т. п.). Если бы удалось приписать этой «шумовой» составляющей записи фиксированную амплитуду, несвязанную с глубиной источника и косы (что не реально), то ширина диапазона частот с амплитудами выше «порога шума» стала бы существенным фактором при выборе глубин источника и косы.

Эти рассуждения, очевидно, подталкивают к размещению источников и кос на больших глубинах. На рис. 7 ясно видно возрастание амплитуд при увеличении глубины буксировки. Соответственно, возрастание амплитуды (однократных волн) при буксировке источника и/или косы на большей глубине улучшает соотношение сигнал/шум. Таким образом, при выборе параметров установки требуется найти компромисс между требованиями максимально широкого диапазона частот (малые глубины источника и косы) и хорошего отношения сигнал/шум (большие глубины источника и косы). Если амплитуда шума зависит от мощности источника, то разумно предпочесть меньшие глубины источника и косы. На практике шумы имеют множество форм, и их нельзя оценить количественно только по глубинам источника и косы, поэтому неудивительно, что опыт сейсморазведчиков в работах в глубоководных районах и в условиях сильного затухания заставляет размещать источники и косы чаще на больших глубинах, чем на малых, чтобы добиться оптимального качества данных.

### Другие соображения о диапазоне частот

Для решения обратной задачи сейсморазведки для акустических импедансов (Connolly, 1999) явно требуется наличие в данных мощной низкочастотной составляющей. Поэтому к малым глубинам источника и косы следует относиться с осторожностью, особенно при наличии на низких частотах шумов, забивающих слабую низкочастотную составляющую в однократно отраженных волнах.

Подавление сейсмических шумов особенно затруднено в глубоководных районах, поскольку источники шумов часто не лежат в плоскости разреза по линии наблюдений. Стандартные 2D фильтры при этом неэффективны и сужают и так ограниченный диапазон частот. Поэтому для удаления всех шумов следует применять «истинно трехмерные» алгоритмы обработки. Отсюда возникает жесткое требование высокой плотности наблюдений во всех направлениях и применения особых методик отработки профилей в ходе 3D съемки.

Ширина диапазона частот в сейсмической записи, получаемой в ходе морских работ, является сложной функцией глубины источника и приемника, трехмерных диаграмм направленности источника и приемника, особенностей аппаратуры и неизбежного неупругого поглощения в земле. Возможность построения сейсмического изображения высокого разрешения зависит от ряда факторов (Long, 2004), таких, как:

- качество «освещения» целевых объектов;
- частотный диапазон полевой сейсмической записи;
- густота 3D сети наблюдений волнового поля;
- природа трехмерных полей шумов и возможность их подавления в ходе обработки;
- точность 3D скоростной модели, применяемой в ходе обработки;
- размер окна, используемого при обработке и построении разреза;
- возможность сохранения ширины диапазона частот и отношения сигнал/шум на всем протяжении графа обработки, возможность минимизировать появление артефактов при обработке и построении разреза.

На эти рассуждения, разумеется, накладываются воздействия неоднородностей в земле, особенностей движения в ходе полевых наблюдений, и хронических болезней алгоритмов обработки. Из приведенного обзора следует, что физическое размещение источников и приемников является существенным моментом, влияющим на все последующие компоненты «высокоразрешающей сейсморазведки». В частности, использование частого шага как по профилю, так и между профилями, необходимо, чтобы избежать потерь высоких частот при обработке. Если какие-то данные осложнены аляйсингом (выше частоты Найквиста), то они либо будут потеряны при многополосной фильтрации и миграции, либо превратятся в шум, который засорит все данные, снижая и разрешение, и качество разреза.

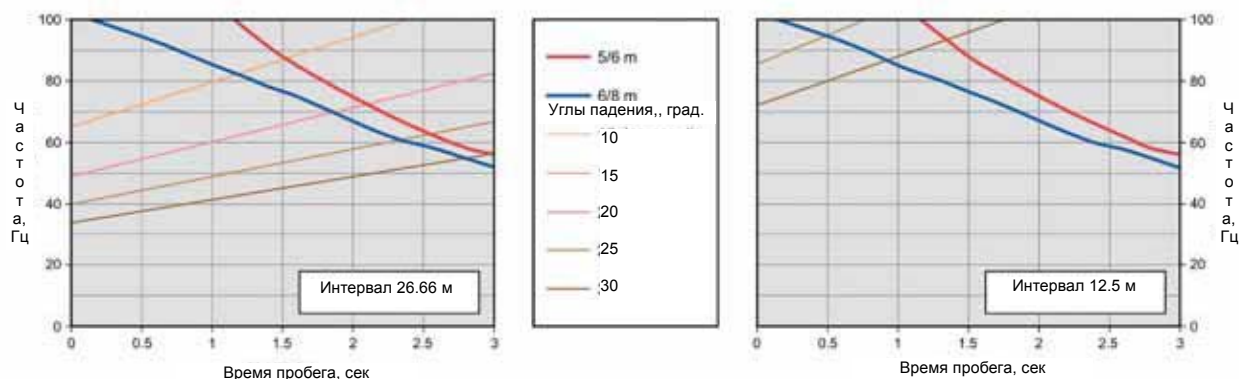
В 2002 г. PGS провела 3D съемки по густой сети (HD3D) на площади 1100 кв. км у берегов Филиппин. Карбонатный коллектор сложного строения виден на временах прихода около 3.2 с под очень неровным глубоким (850 м) дном моря, и перекрыт сложнопостроенным разрезом. По ранее полученным 3D данным не удалось получить удовлетворительных разрезов перекрывающей толщи, а многочисленные неясности строения низов коллектора затрудняли бурение и добычу.

## Морская сейсморазведка

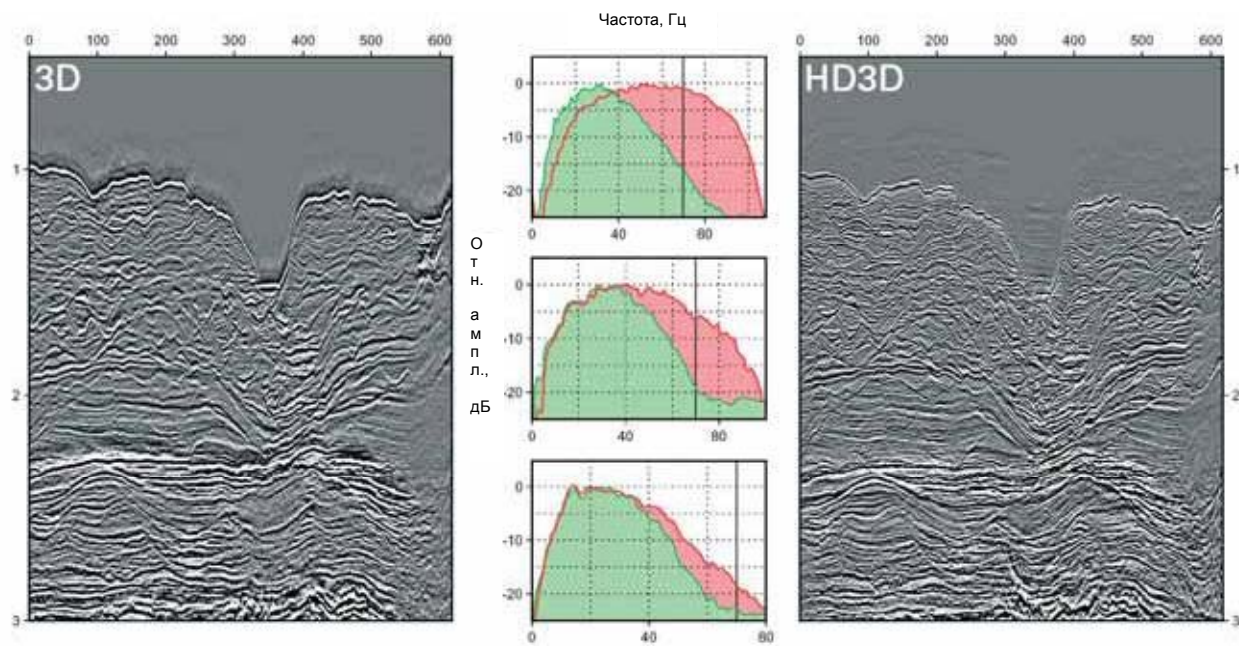
При планировании работ рекомендовано провести съемку встречными курсами вдоль простирания, с тем чтобы равномерно «осветить» глубинные целевые объекты, а шаг между профилями установить 12.5 м чтобы при обработке сохранить ширину диапазона частот, поскольку требовалось обеспечить частоты 70-80 Гц на уровне целевых объектов.

Плотность покрытия в этих работах по методике HD3D составила 691,000 трасс на 1 кв. км против 95,000 трасс на 1 кв. км в более ранних 3D работах.

Рис. 9 подтверждает предварительные оценки полезного диапазона частот, приведенные на рис. 8



**Рис. 8. Зависимость частотного состава расчетного сигнала от времени прихода для двух 3D исследований с различным шагом между профилями. Синим и красным показаны нижняя и верхняя границы (по уровню 18 дБ от максимума) диапазона для двух вариантов размещения источника и косы с учетом неупругого поглощения. Остальные линии представляют частоты Найквиста для разных углов падения границы. Более ранние 3D данные получены с источником на 6 м и косой на 8 м при шаге между профилями 26.66 м сильно искажены влиянием аляйсинга в большом интервале времен, что приводит к сужению диапазона частот и низкому качеству отражений от наклонных границ и локальных объектов. Напротив, более новые данные HD3D, полученные с источником на 5 м и косой на 6 м при шаге 12.5 м (справа) подвержены влиянию только поглощения в земле, т. е. имеют более широкий диапазон частот и высокое качество разреза. Подтверждение этих выводов см. на рис. 9.**



**Рис. 9. Сравнение данных и спектров данных (в окне 800 мс на малых, средних и больших временах для 3D данных по сети 13.33 x 26.66 м (слева; 95,000 трасс/кв. км) и данных HD3D по сети 6.25 x 12.5 м (справа; 691,000 трасс/кв. км). Частотный состав новых данных HD3D на разных временах определяется поглощением, а в более ранних 3D данных – пространственными частотами Найквиста (см. тж. рис. 8).**

## Морская сейсморазведка

С учетом оценки добротности по полевым данным, результаты моделирования волновой картины по проведенным и планируемым наблюдениям представлены так, чтобы показать зависимость поглощения от времени пробега. На рис. 8 видно, что при немного меньшей глубине источника и косы частота верхнего среза несколько повышается, но нужно быть осторожным, чтобы не потерять низкие частоты, то есть не сузить диапазон. Далее рассчитана зависимость частоты Найквиста от времени пробега для шага между профилями 12.5 м и 26.66 м, что соответствует фактически использованным при обработке этих данных при различных углах падения целевой границы

В целом из рис. 8 следует, что шага между профилями 12.5 м, приводит к аляйсингу лишь при наличии крутопадающих границ на малых временах прихода, и главной причиной сужения диапазона частот является неупругое поглощение в земле. Наоборот, при шаге 26.66 м аляйсинг наступает при меньших углах падения и на всем интервале до целевой границы, и ширина диапазон ограничена именно частотой Найквиста (наличием аляйсинга). Как и планировалось, новые данные, полученные по методике HD3D, дали значительное улучшение разрешения деталей разреза, проявленных в высоких частотах, в том числе в сложнопостроенной перекрывающей толще. На 70 Гц амплитуда новых данных на 15 дБ выше, чем у прежних (2001 г.).

Проведенный по окончании работ анализ влияния параметров системы наблюдений на частотный состав сигнала показал, что более половины улучшения по ширине диапазона получено за счет сгущения сети профилей. Другие факторы, такие как улучшение привязки, некоторой уменьшение глубины источника и косы, лучшее группирование источников, более новое оборудование и другие алгоритмы построения разреза, также внесли свой вклад. Тем не менее, главным моментом было то, что в новых данных HD3D не было шумов, связанных с обработкой и миграцией, а ширину диапазона частот полевой записи удалось сохранить на протяжении всего графа обработки.

Отметим также некоторое улучшение отношения сигнал/шум в данных 2002 г., несмотря на несколько меньшую глубину источника и косы. Это связано с семикратным повышением количества трасс на 1 кв. км, что, как аналитически показал Крей (Krey 1987, 2001), дало гораздо лучшие мигрированный разрез и отношения сигнал/шум.

### Заключение

При добротности среды около 80 изменения глубины косы приводят к изменениям нижнего среза на временах под дном моря менее 1 сек, но изменения глубины источника значения не имеют. Верхний срез подвержен влиянию изменений глубины косы на временах менее 2 с под дном (при средних глубинах целевого горизонта), но изменения глубины источника значения также не имеют. В этом случае может показаться необычным, что ширина диапазона мало зависит от изменения глубин источника и приемника при малых глубинах целевых горизонтов,

но довольно существенно снижается с увеличением глубины целевого горизонта, особенно с увеличением глубины источника (и гораздо слабее - косы). Наоборот, относительная разность амплитуд на минимальных (источник 4 м, коса 5 м) и максимальных (источник 8 м, коса 11 м) глубинах при наличии затухания значительно возрастает с ростом времен прихода. Как следствие, любые значения глубины источника и косы определяются, при прочих равных условиях, компромиссом между требованием максимально широкого диапазона частот (достигаемого на малых глубинах) и максимально высокого отношения сигнал/шум (достигаемого на больших глубинах). Неудивительно, что из опыта сейсмических работ в глубоководных районах и в районах с высоким поглощением вытекает стремление поместить источник и косу на большую глубину, чтобы получить данные оптимального качества.

Пример 3D работ из района Филиппин показывает, что физическое расположение источника и приемника является решающим фактором, влияющим на большинство составляющих «высокоразрешающей сейсморазведки». В частности, частый шаг наблюдений как по профилю, так и между профилями (т. е. сбор 3D данных по густой сети) необходим для того, чтобы избежать появления артефактов и потери высоких частот, снижающих как разрешение, так и качество разреза. Далее, увеличение количества наблюдений на 1 кв. км дает значительное улучшения качества разреза, отношения сигнал/шум и разрешения, перекрывая при этом некоторое снижение отношения сигнал/шум на малых глубинах источника и приемника. Таким образом, при планировании работ в глубоководных районах для получения максимальных разрешения и качества разреза следует делать две вещи: 1) оптимизировать глубины источника и приемника, и 2) оптимизировать пространственное расположение точек 3D съемки.

### Благодарности

Авторы благодарят компанию PGS Marine Geophysical за разрешение опубликовать эти результаты и примеры.

### Литература

- Connolly, P. [1999] Elastic impedance. *The Leading Edge*, **18**, 4, 438-452.  
 Krey, T. C. [2001] Attenuation of random noise in 2D and 3D CDP stacking and Kirchhoff migration, 3-D Seismic Exploration. *SEG*, 207-219.  
 Krey, T. C. [1987] Attenuation of random noise by 2D and 3D CDP stacking and Kirchhoff migration. *Geophysical Prospecting*, **35**, 135-147.  
 Long, A. [2004] Post-survey calibration of 3D seismic results to pre-survey modeling predictions. *The Leading Edge*, **23**, 10, 1035-1038.