

Улучшение глубинности и разрешения при использовании буксируемой косы с двумя типами приемников. Increased resolution and penetration from a towed dual-sensor streamer

David Carlson¹, Andrew Long², Walter Söllner¹, Hocine Tabti¹, Rune Tenngamh³ и Nils Lunde³ обсуждают теорию, лежащую в основе буксируемых кос с двумя типами приемников, которые разработаны Petroleum Geo-Services для работ на больших глубинах и получения данных без волн-спутников.

Датчик давления в буксируемой косе всегда записывает два поля волн, которые интерферируют одно с другим. Эти два поля волн – поле давления восходящих волн, которые распространяются непосредственно на датчик давления снизу и поле давления нисходящих отраженных волн, распространяющихся вниз от свободной поверхности (поверхности моря) непосредственно над косой. Таким образом, каждому зарегистрированному отраженному импульсу в традиционных морских косах сопутствует отражение-спутник от поверхности океана. Отраженный импульс нежелательно удлиняется, что сокращает временное разрешение. Следствием этого, как приведено на рисунке 1a (вертикальное распространение поля волн при нормальном падении), является то, что на частотном спектре волн-спутников на приемнике имеется серия «режекций». Частота «режекций» для отражений при нулевом угле всегда равна 0 Гц и целому кратному $V_w/2d$, где V_w – скорость звука в воде, а d – глубина приемника. Этот эффект фильтрации в данных на записи ограничил глубины буксирования косы до диапазона порядка 6-9 м. Большая глубина буксировки была бы более желательна, поскольку она могла бы улучшить запись более низких частот, помимо того, что сейсмические датчики были бы помещены гораздо ниже зоны, на которую влияют поверхностные шумы, вызываемые погодными условиями. Однако

это бы имело деструктивное влияние на более высокие частоты записанного сигнала, поскольку режекция спутников переместилась бы в сторону более низких частот (Рисунок 1a). Взаимоувязка между низкими и высокими частотами заставляет геофизика параметризовать съемки с косами в целях максимизации качества данных на одной целевой глубине, тогда как в жертву приносятся качество изображения на меньших или больших глубинах.

Уже давно было понятно, что путем измерения и записи сейсмических данных от совместно расположенных гидрофонов и датчиков скорости смещения, и путем правильной комбинации их сигналов, можно избавиться от волн-спутников (Schneider and Backus, 1964; Claerbout, 1976). Был предложен новый сплошной кабель для двух видов приемников, которые одновременно измеряют давление с использованием гидрофонов и вертикальную компоненту скорости смещения частиц с помощью датчика движения (Tenngamh et al., 2007). Для каждого типа измерений, отражения от поверхности воды (спутники) являются фильтром для данных (Рисунок 1b). В отличие от датчиков давления, датчики скорости являются направленными, поэтому поле скоростей нисходящих волн измеряется как поле, имеющее одинаковую полярность с полем скорости восходящих волн. Следовательно, как показано на Рисунке 1b, «режекции» спутника на приемнике для

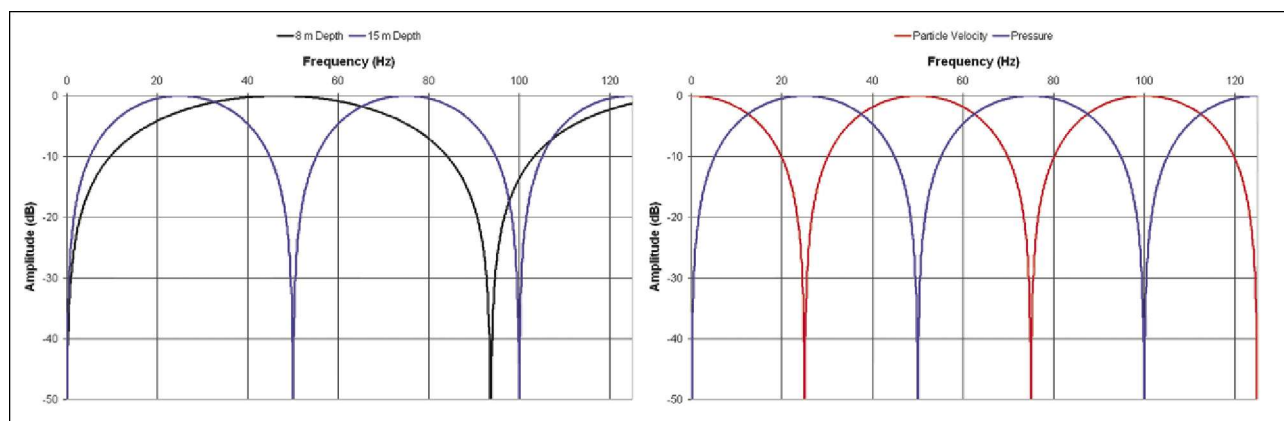


Рисунок 1 График в левой части отображает амплитудный спектр приемника для датчика давления, буксируемого на глубинах 8 м и 15 м. Предполагается, что поле волн распространяется вертикально (при нулевом угле падения). Черным обозначена глубина приемника 8 м, синим – глубина приемника 15 м. Рисунок справа отображает наложение амплитудного спектра датчиков давления и скорости смещения при глубине 15 м для отражения при нулевом угле падения. Синим обозначен спектр поля волн давления, красным – спектр поля волн скорости смещения.

¹ Petroleum Geo-Services, Осло, Норвегия. E-mail: dave.carlson.pgs.com.

² Petroleum Geo-Services, Перт, Австралия.

³ Petroleum Geo-Services, Хьюстон, США.

Морская сейсмозапись

датчика скорости все еще разделены целым кратным $V_w/2d$ но смещены на $V_w/4d$ относительно спектра гидрофона.

Перед тем как рассматривать данные двух типов датчиков необходимо отметить четыре момента:

- Пики и минимумы амплитудного спектра для данных давления дополняют пики и минимумы данных скорости (Рис. 1b).
- 'Правильное' суммирование данных скоростей смещения и давления подавит амплитуду волн-спутников (поле нисходящих волн от поверхности моря), которые идут вслед за каждой однократной волной, а минимумы амплитудного спектра будут убраны. Это относится ко всем углам падения, т.е. для всех удалений источник-приемник.
- 'Противоположное' суммирование даст нисходящие отраженные волны от поверхности моря, которые содержат информацию о состоянии моря, что очень полезно для последующей обработки, например для подавления кратных волн, связанных с поверхностью, как будет показано ниже.
- Разделение поля волн восстанавливает амплитуды низких и высоких частот, которые обычно отсутствуют на данных традиционной морской сейсмозаписи.

Рисунок 2 – простой синтетический пример, который концептуально демонстрирует суммарные разрезы для нулевых удалений для данных датчика давления и скорости смещения, полученных на косе с двумя типами приемников. Волна-спутник на приемнике, которая затрудняет интерпретацию относительно мощных интервалов, подавляется при суммировании, получают чистое изображение.

Преимущества измерения полей волн, как давления, так и вертикальной скорости смещения частиц, многочисленны.

Технически более привлекательно буксировать косу как можно глубже, там, где будут минимальными погодные помехи и шумы от работы, косами проще управлять, а глубинность сигнала для низких частот оптимизирована. Как показано ниже, доступность измерения скорости смещения частиц позволяет производить буксирование на глубине, и одновременное получение высокоамплитудных сигналов для низких и высоких частот – с улучшенным соотношением сигнал-шум (Carlson et al., 2007). Новая коса - бесшумная, сплошная коса, предназначенная для суровых условий работы и помогает получать данные без волн-спутников за один проход, при одной глубине косы. Поля восходящих и нисходящих волн можно экстраполировать и суммировать для реконструкции общего поля волн для любой требуемой глубины буксировки в целях повторения параметров любой существующей съемки, что позволяет производить сопоставление 4D данных, а также в качестве преимуществ дает улучшенные чистые изображения.

Теория косы с двумя типами датчиков

Если вертикальная компонента скорости смещения частицы измеряется совместно с полем давления, поле сейсмических волн можно разложить при обработке данных на восходящую и нисходящую компоненты давления и поле скоростей (e.g. Schneider and Backus, 1964; Claerbout, 1976; Barr and Sanders, 1989; Amundsen, 1993; Fokkema and van den Berg, 1993). Инверсию функции с режекцией на частотном спектре полностью минуют. Более того, форма поверхности моря не играет роли, а косу можно буксировать на любой глубине. Импульс источника можно также получить из данных, лишенных волн-спутников, что позволит применять мудреные процедуры подавления кратных.

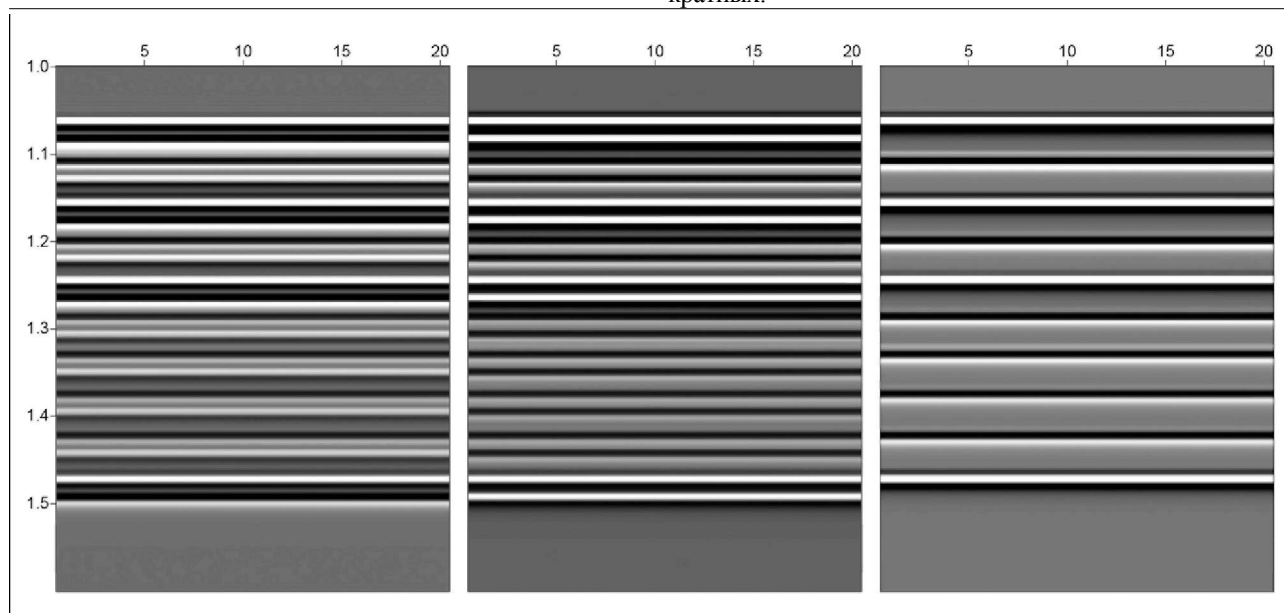


Рисунок 2 Концептуальный суммарный синтетический разрез нулевых удалений для датчика давления, скорости смещения, и суммированный для давления+скорости, соответственно. Время прихода однократной волны и волны-спутника при приемнике идентично для давления и скорости. Полярность первичного отражения идентично для давления и скорости, но полярность волн-спутников на приемнике противоположно. Суммирование подавляет волну-спутник на приемнике, которая имеется в данных для датчика давлений и скорости.

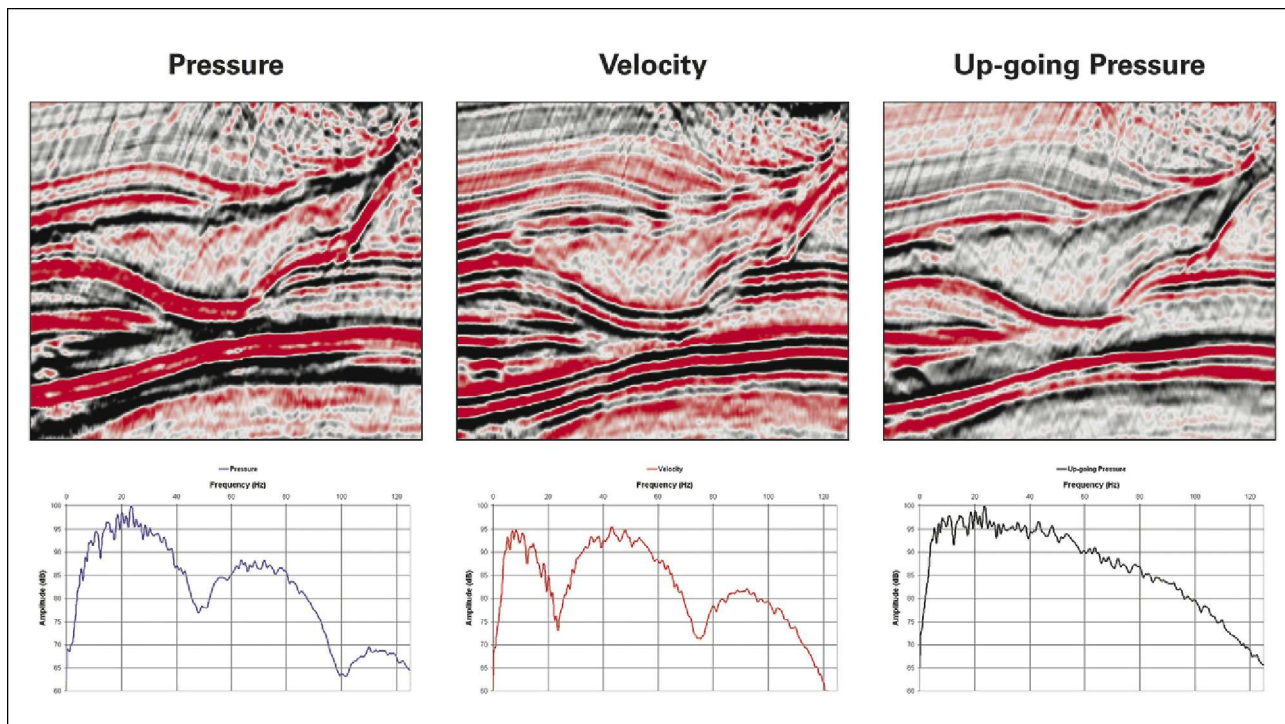


Рисунок 3 Сравнение немигрированных суммарных разрезов. Отметим дополняющий амплитудный спектр для давления и скорости смещения частиц (смотрите также Рис. 1). Изображения приведены слева направо, результат только для давления, только (вертикальной) компоненты скорости смещения, и восходящего поля давления (без волн спутников), полученного из полей давлений и скоростей смещения.

В частотно-волновочисловой области поля давлений восходящих и нисходящих волн связаны с давлением и вертикальной компонентой скорости смещения частиц следующим матричным уравнением:

$$\begin{bmatrix} U \\ D \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{\rho\omega}{k_z} \\ 1 & \frac{\rho\omega}{k_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ V_z \end{bmatrix},$$

где k_z – волновое число по вертикали, а положительная ось z направлена вниз.

Пример разделения по волновым числам показан на Рисунке 3. Этот пример взят из съемки с косой длиной 6100 м. Данные по давлению и скоростям смещения были записаны с помощью близкорасположенных датчиков на глубине 15 м. Извлечение поля давлений (без волн-спутников) для восходящей волны произведено в соответствии с принципами, описываемыми выше.

В однородной среде вертикальный градиент давления связан с вертикальной компонентой скорости смещения частиц V_z посредством уравнения движения:

$$\frac{dP}{dz} = i\omega\rho V_z,$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, а ρ – плотность.

В частотно-волновочисловой области, решением для вертикальной компоненты скорости смещения частиц будет:

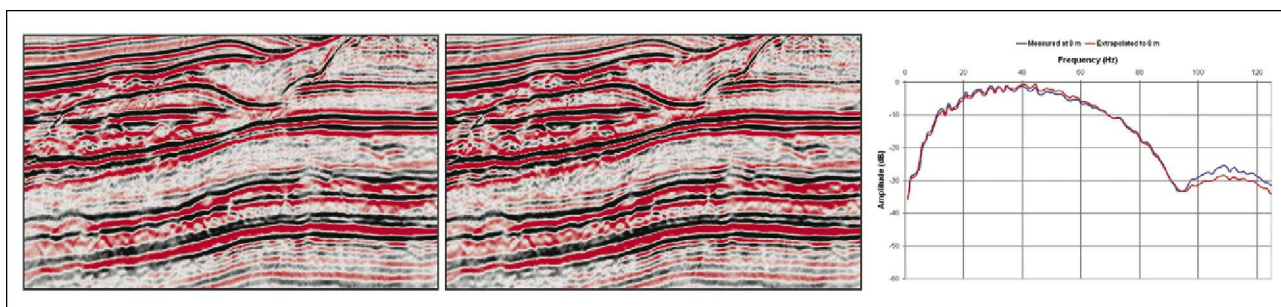
$$V_z(w, k_x, k_y, z) = -\frac{k_z}{\rho\omega} \left[\frac{\exp(-ik_z z) + \exp(ik_z z)}{\exp(-ik_z z) - \exp(ik_z z)} \right] \times P(\omega, k_x, k_y, z),$$

где k_x , k_y and k_z – две горизонтальных и вертикальная компоненты волновых чисел соответственно, а z – глубина положения приемника. Это уравнение действительно для плоской косы и ровной поверхности моря и подразумевает, что прямые волны были подавлены.

Примеры данных, приводимые в данной работе, соответствуют регистрации 2D, и следовательно при обработке данных было сделано предположение о 2D, однако распространить его на случай 3D обработки просто.

Сбор и обработка данных с двумя типами датчиков

Геометрия сбора данных с двумя датчиками, который описывается здесь, представляет собой первое успешное применение морской буксируемой системы с двумя типами датчиков. В эффективной архитектуре используется плотно расположенные группы датчиков давления и скорости смещения в косах с низкими показателями шума и сплошной заливкой с распределенной системой электроники и телеметрии на основе Ethernet технологии. Система обеспечивает существенное увеличение гибкости по глубине при буксировке косы, что позволяет вести непрерывную запись при волнении на море, увеличивая потенциальный частотный диапазон данных. В приведенных здесь примерах коса с датчиками двух типов обычно буксировалась на глубине 15 м.



Рисунки 4 Рисунки даны слева направо, суммарный разрез для гидрофона (давлений), полученный для глубины 8 м (синяя линия справа), эквивалентный суммарный общий разрез для давлений на той же глубине 8 м, полученный по данным для двух типов датчиков для глубины 15 м (красная кривая справа), и сравнительный амплитудный спектр.

На этой глубине кабель находится в спокойных и стабильных условиях.

Предварительная обработка данных для двух типов датчиков относительно проста и дает поля скоростей и давлений без волн-спутников. Первое, импульсная характеристика датчика скорости (который имеет неравномерный спектр) согласуется с равномерным нуль-фазовым спектром гидрофона. На этом этапе учитывается различие между чувствительностью двух датчиков.

Данные датчика скорости в диапазоне 0 - 20 Гц предсказываются на основе данных датчика давления, используя математическую формулу, приведенную выше. Это желательно, поскольку в записи датчика скоростей регистрируется сильный низкочастотный шум. Ограничения для низких значений частотного диапазона математически устойчивы для рассеянных волновых полей (подавляются прямые волны); и поскольку частоты менее 20 Гц имеют длины волн более 75 м, небольшие ошибки в глубинах косы или небольшие отклонения от плоской поверхности моря будут иметь незначительное влияние на процесс ввода ограничений.

Затем данные с двумя типами датчиков разделяются на поля восходящих и нисходящих волн давления и поле скоростей с помощью

методов разделения по углам, например как используются в обработке сейсмических данных донной океанической косы (Ikelle and Amundsen, 2005).

После разделения на восходящую и нисходящую компоненты, данные давления и скорости смещения можно экстраполировать на любую глубину. После чего данные проходят через поток традиционной обработки, модернизированный с целью сохранения и использования полученных частот и соотношения сигнал шум.

Рисунок 4 отображает обработку QC/проверка, в результате чего производится сравнение большого окна данных и накладывается амплитудный спектр для:

- Традиционная коса только с датчиком давления, буксируемая на глубине 8 м
- Коса с двумя типами датчиков, буксируемая непосредственно под ней на глубине 15 м
- Ограничения данных низких частот на 0 - 20 Гц
- Разделение поля волн на восходящее и нисходящее поле давлений
- Экстраполяция обоих (разделенных) полей волн на глубине 8 м
- Суммирование для получения совокупного поля давлений на глубине 8 м

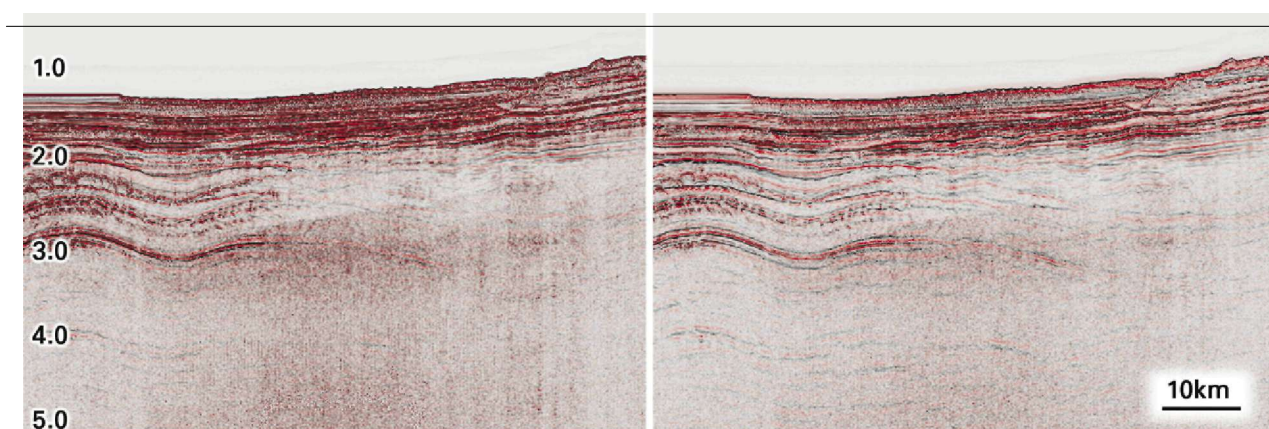


Рисунок 5 Сравнение немигрированного суммарного разреза для совокупных давлений (с волнами-спутниками) с традиционным SRME, примененным к данным слева и поле давлений восходящих волн (без волн-спутников) для данных с двумя типами датчиков с применением усовершенствованного решения SRME для системы с двумя типами датчиков, примененной справа. Отметим улучшение разрешения (отсутствие волн-спутников), увеличение соотношения сигнал-шум, и уменьшение шума и количества кратных в правой панели. Слабые однократные отражения слева теперь можно легко и надежно проинтерпретировать на результате обработки данных с двумя типами датчиков.

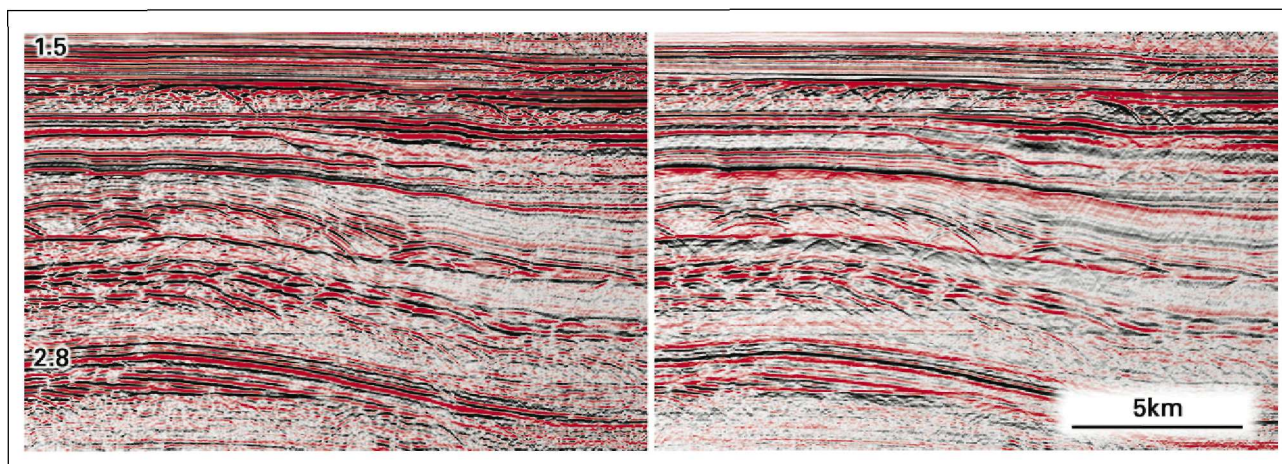


Рисунок 6 Немигрированный суммарный разрез общих давлений, полученный по данным с традиционной косой (включая волны-спутники со стороны приемника) в левой части и поле давлений восходящих волн без волн-спутников, полученное для косы с двумя типами датчиков справа. Обработка данных использовалась для получения эффективной глубины приемника 8 м для обеих панелей.

Результаты на рисунке 4 показывают, что поле общих давлений, восстановленное для данных с двумя типами датчиков и записанное общее поле давлений идентичны по своей природе (как и ожидалось), включая частотный спектр на очень низких частотах. Это (согласующееся) наблюдение говорит в пользу точности ввода ограничений на низкочастотные данные датчика скоростей, и надежность других этапов предварительной обработки.

Еще одно преимущество, которое рождается благодаря способности разделять поля волн - то, что возможно выполнять усовершенствованное подавление кратных, связанных с поверхностью (SRME) (Söllner et al., 2007 - Рис. 5). Предсказание кратных волн основано на поле давлений восходящих волн и нисходящем поле волн для датчика скоростей, экстраполированных до уровня источника таким образом, что кинематика кратных волн, связанных с поверхностью, точно воспроизводится. Ключевым преимуществом использования поля нисходящих волн, полученного с датчиком скоростей смещения, является то,

любые вариации уровня моря и коэффициентов отражения в неявном виде входят в предсказание. Кроме того, использование поля скоростей смещения автоматически включает необходимый масштаб, зависящий от угла, в процедуру предсказания.

Улучшение глубинности и отношения сигнал-шум

На рисунках с 6 по 9 представлены несколько примеров данных с двумя типами датчиков, полученных для двух различных областей съемки в Северном море. В обоих случаях традиционная коса, состоящая только из гидрофонов, буксировалась на глубине 8 м, а коса, которая несла датчики двух типов, буксировалась под традиционной косой на глубине 15 м. Это позволило провести пространственную корреляцию и контроль между двумя наборами данных. Рисунки 6 и 7 относятся к данным, записанным с помощью косы 6100 м, а Рисунки 8 и 9 - к данным, записанным косой 8100 м. Обработка данных выполнялась с использованием

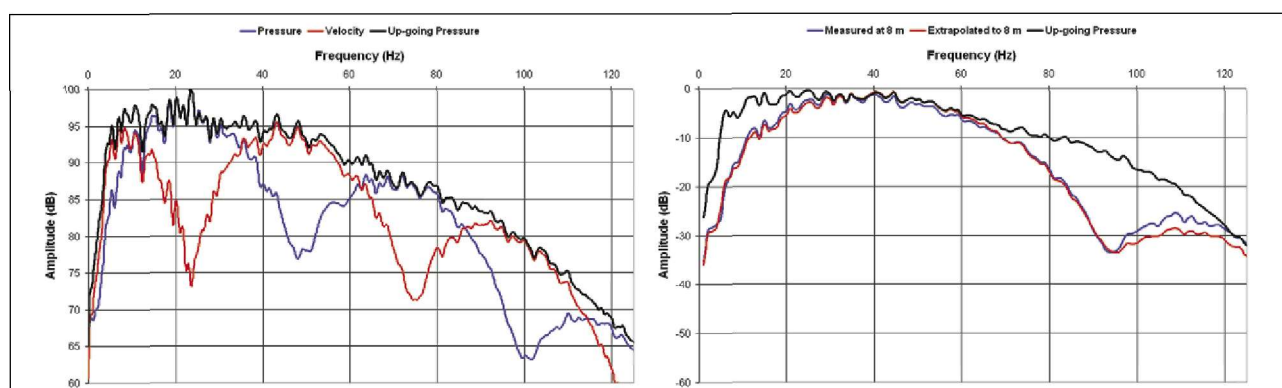


Рисунок 7 Рисунок слева является наложением амплитудного спектра для общего поля давлений (с волнами-спутниками) (синим), поля скоростей (красным), и поля давлений восходящей волны, с подавлением волн-спутников (черным). Данные, полученные с двумя типами датчиков, соответствуют глубине 15 м (обратите также к Рис. 3). Рисунок справа является наложением амплитудного спектра для общего поля давлений (с волнами-спутниками), записанного на глубине 8 м (синим), обработанного общего поля давлений (с волнами-спутниками), соответствующего глубине 8 м, но полученного по данным, записанным на глубине 15 м двумя типами датчиков (красным), и поле давлений восходящей волны, с подавлением спутников (черным). Отметим существенное возрастание амплитуд низких и высоких частот в результате подавления спутников (обратите также к Рис. 4).

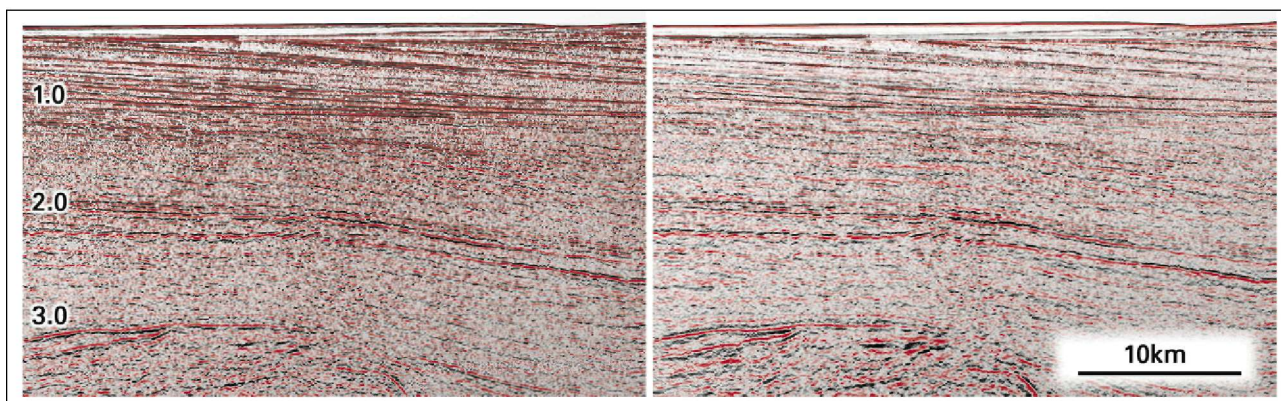


Рисунок 8 Мигрированный суммарный разрез общего поля давления, полученный с помощью традиционной косы (включая спутники со стороны приемника) в левой части и поле восходящих волн без спутников, полученное с помощью косы с датчиками двух типов справа. Обработка данных использовалась с целью получения эффективной глубины приемника 8 м для обоих случаев. Отметим, что разрешение данных было существенно повышено и разрез стал более понятным. Амплитуда и характер глубинных отражений также существенно лучше справа.

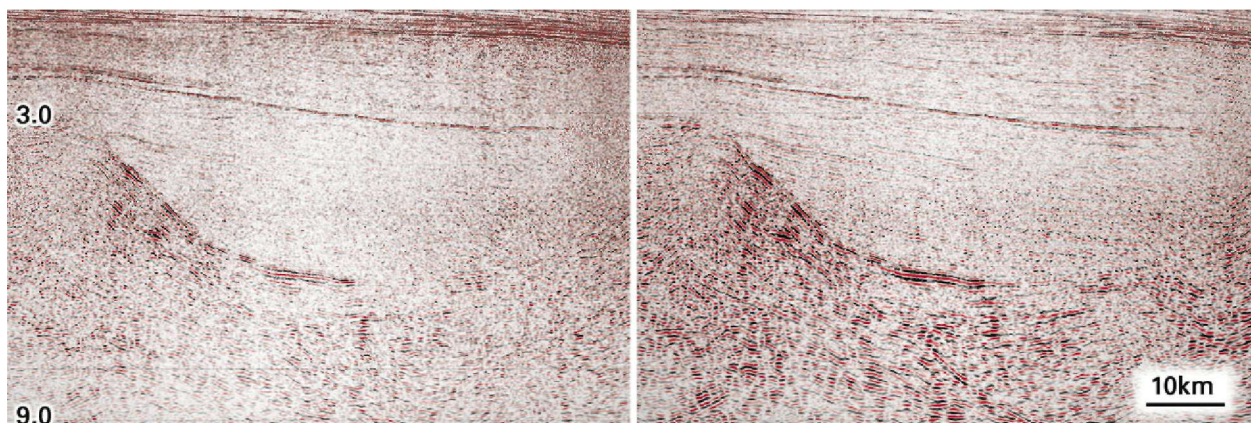


Рисунок 9 Более глубокий участок данных с рисунка 8. В правой части лучше видны особенности фундамента и межслойные отражения.

фундаментальных принципов, описанных выше, и демонстрирует существенные улучшения, которые обязаны использованию поля давлений восходящей волны, особенно что касается разрешения осей синфазности, частотного содержания и улучшения соотношения сигнал-шум для косы с двумя типами датчиков.

На рисунке 6 показано окно данных с 1 по 2 с двойного времени пробега под дном. Обработка данных умышленно упрощена с целью определения фундаментальных преимуществ геометрии сбора и обработки данных с двумя типами датчиков. Отметим, что на правой части рисунка 6 волны-спутники со стороны приемника полностью подавлены. Общий набор осей синфазности эффективно разделен пополам, что дало нам изображение, которое более интерпретируемо и менее неоднозначное. На рисунке 7 отражены преимущества подавления волн-спутников на примере амплитудного спектра, как в терминах увеличения амплитуд низких и высоких частот, которые обычно теряются из-за наличия спутников на приемнике, а также в терминах увеличения амплитуды низкочастотных компонентов из-за глубины буксирования 15 м. Для косы с двумя датчиками, глубина буксировки не вызывает никаких ухудшений для высоких частот. Более того, соотношение сигнал-шум для волновых полей давлений и скоростей смещений

превосходно, как и для случаев восходящего поля волн давления без волн-спутников, полученных во время обработки данных.

На рисунки 8 приведено окно данных на первых 3 с TWT под уровнем дна. Помимо улучшенного разрешения и частотного содержания на всех глубинах в данных, полученных с двумя типами датчиков, амплитуда глубинных отражений и их характер существенно улучшаются благодаря подавлению волн-спутников и глубине буксирования 15 м. На рисунке 9 представлено окно данных на первых 8 с TWT под уровнем дна (длина записи 10 с). Отметим существенное улучшение в амплитуде и характере глубинных данных, полученных с помощью датчиков двух типов.

Что касается высокой производственной эффективности, буксировка глубинных кос с двумя типами датчиков позволяет работать в более широком диапазоне погодных условий, иногда в таких сценариях, при которых традиционные работы были бы невозможны. Эффективная геометрия сбора данных заключается в буксировании всех кос с совместно расположенными датчиками давления и скорости смещения на одной глубине, с использованием всей ширины кос судна, и легкости управления поведением косы.

Выводы

Новые косы с двумя типами датчиков записывают как давление, так и вертикальную компоненту смещения частиц. Разделение на восходящую и нисходящую компоненты поля давлений и скоростей смещения просто в реализации. Таким образом, можно полностью устранить волны-спутники на приемнике из поля давлений, увеличивая разрешение. Получаемые сейсмические данные более надежны с точки зрения интерпретации, и характеризуются более широким частотным диапазоном и лучшим соотношением сигнал-шум, по сравнению с традиционными косами, которые регистрируют только поле давлений. Более того, оси синфазности для более глубоких отражений имеют большую величину и прослеживаемость. Буксирование кос на большей глубине увеличивает рабочий диапазон погодных условий, сокращает уровень шумов, и увеличивает глубинность сигнала. Давления и скорости измеряются в близкорасположенных точках, все косы, буксируются на одной и той же глубине. Буксировка всех кос на одной глубине оптимизирует производительность и улучшает надежность данных. Технология работ с косой, использующей два типа датчика, описанная в настоящей работе, открывает несколько новых возможностей для усовершенствованного подавления кратных волн, сейсмической инверсии и интерпретации данных.

Литература

Amundsen, L. [1993] Wave-number-based filtering of marine point source data. *Geophysics*, 58, 1335-1348.

Barr, F.J. and Sanders, J.I. [1989] Attenuation of water-column reverberations using pressure and velocity detectors in water-bottom cable. *Annual Meeting Expanded Abstracts*, SEG, 653-656.

Carlson, D., Söllner, W., Tabti, H., Brox, E., and Widmaier, M. [2007] Increased resolution of seismic data from a dual-sensor streamer cable. *Annual Meeting Expanded Abstracts*, SEG, 994-998.

Claerbout, J.F. [1976] *Fundamentals of geophysical data processing*. Blackwell Science, 274 pp.

Fokkema, J.T. and van den Berg, P.M. [1993] *Seismic applications of acoustic reciprocity*. Elsevier, Amsterdam, 350 pp. Ikelle, L.T. and Amundsen, L. [2005] Introduction to petroleum seismology. *SEG Investigations in Geophysics Series No. 12*, 679 pp.

Schneider, W.A. and Backus, M.M. [1964] Ocean-bottom seismic measurements off the California Coast. *J. Geophys. Res.*, 69, 1135-1143.

Söllner, W., Brox, E., Widmaier, M., and Vaage, S. [2007] Surface-related multiple suppression in dual-sensor towed-streamer data. *Meeting Expanded Abstracts*, SEG, 2540-2544.

Tenghamn, R., Vaage, S., and Borresen, C. [2007] A dual-sensor, towed marine streamer; its viable implementation and initial results. *Annual Meeting Expanded Abstracts*, SEG, 989-993.

