

Особенности обработки данных морской сейсморазведки, полученных с донными приемниками на основе системы датчиков гидрофон + геофон

Гуленко В.И. – кафедра геофизики КубГУ, г. Краснодар; Земцова Д.П., Долинин А.Н., Коновалова Ю.И. – отдел по разработке технологий ОАО Промгаз, г. Краснодар

Введение

В последние десятилетия мелководные акватории во всем мире привлекают к себе все больший интерес в качестве объектов геологического изучения с целью поисков углеводородного сырья. В этой связи технологии сейсморазведочных работ в мелком море, в том числе и на предельном мелководье и в транзитных зонах развиваются особенно быстро [1 и др.]. Появляются новые все более эффективные методики и более совершенные технические средства, предназначенные для работ именно в таких сложных условиях. К числу таких технических средств относятся, например, и цифровая телеметрическая донная коса системы XZone® Marsh Line, в которой в качестве приемников часто используются «PZ dual sensor» системы датчиков гидрофон + вертикальный геофон [3, 4].

Обработку сейсмических данных, полученных на мелководье, проводят, как правило, в рамках хорошо известных систем обработки с использованием стандартных и специализированных пакетов. Специфика обработки данных, полученных в переходных зонах, обусловлена необходимостью позиционирования приемных установок, определения ориентации содержащихся в установке геофонов, а также согласования сейсмических разрезов, полученных на стыках с транзитной зоной, с использованием различных источников и/или приемников колебаний. Кроме того, важное место в обработке данных занимает улучшение качества материалов путем подавления волн-помех, характерных для мелководья.

Некоторым вопросам обработки данных, полученных на мелком море с использованием PZ датчиков, и посвящена настоящая работа.

1. Интерференционные процессы в водном слое

При сейсморазведочных работах на мелководье приемное устройство системы XZone® Marsh Line с PZ датчиками обычно располагается на дне водного слоя глубиной H . Вследствие многократных отражений в водном слое от границы «вода-воздух» с коэффициентом отражения -1 и от границы дна с коэффициентом отражения равным k_{omp} волна, приходящая к приемнику снизу, так же, как и волна, излучаемая в нижнее полупространство, является интерференционной. При этом выражение, описывающее профиль интерференционной волны давления, приходящей из любого направления α_2 нижнего полупространства к гидрофону (угол α_2 отсчитывается от вертикальной оси):

$-\pi/2 \leq \alpha_2 \leq \pi/2$, полученное в приближении плоских волн, в дальней зоне (без учета расхождения) может быть записано в виде следующей суммы волн [1]:

$$F(t) = k_{np} \sum_{l=0}^{\infty} (-k_{omp})^l [f(t-l\tau) - f(t-\tau(l+1))], \quad (1)$$

где $\tau = 2H / (C \cdot \cos \alpha_1)$; $l = 0; 1; 2; \dots$; $C = 1500$ м/с – скорость звука в воде; $f(t)$ – профиль волны давления, соответствующей отраженной волне, пришедшей из нижнего полупространства; α_1 – угол входа луча в водный слой (отсчитывается от вертикали); k_{np} – коэффициент

преломления луча при переходе из нижнего полупространства в водный слой.

Комплексный спектр этой функции имеет следующий вид:

$$S_F(j\omega) = G_h(\omega) \cdot k_{np} S_f(j\omega) \cdot \sum_{l=0}^{\infty} (-k_{omp})^l e^{-j\omega l \tau} (1 - e^{-j\omega \tau}), \quad (2)$$

где $S_f(j\omega)$ – комплексный спектр функции

$f(t)$, $G_h(\omega)$ – собственная частотная характеристика гидрофона.

Отсюда обобщенная комплексная интерференционная характеристика гидрофона на дне водного слоя может быть получена в виде:

$$K_h(j\omega, \alpha_1, H) = S_F(j\omega) / S_f(j\omega) = G_h(\omega) \cdot k_{np} (1 - e^{-j\omega \tau}) \sum_{l=0}^{\infty} (-k_{omp})^l e^{-j\omega l \tau} \quad (3)$$

Модуль этого выражения после преобразования может быть представлен в виде произведения трех функций:

$$K_h(\omega, \alpha_1, H) = G_h(\omega) \cdot K_1(\omega, \alpha_1, H) \cdot K_2(\omega, \alpha_1, H), \quad (4)$$

одна из которых $G_h(\omega)$ – собственная частотная характеристика гидрофона;

другая $K_1(\omega, \alpha_1, H) = 2|\sin(\omega\tau/2)|$ модуль частотной характеристики, учитывающей влияние границы «вода-воздух», а третья функция –

$K_2(\omega, \alpha_1, H) = k_{np} [1 + 2k_{omp} \cos(\omega\tau) + k_{omp}^2]^{-1/2}$ – модуль частотной характеристики, учитывающей влияние границы дна. При фиксированных параметрах α_1 и H , т.е. в функции частоты, все выражение (4) представляет собой модуль интерференционной частотной характеристики гидрофона на дне водного слоя; в функции угла α_1 это выражение описывает диаграмму направленности гидрофона, расположенного на дне водного слоя глубиной H , на частоте ω (рис. 1).

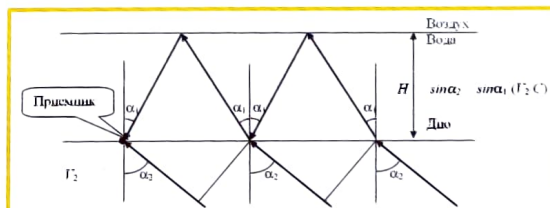


Рис. 1. К выводу интерференционной частотной характеристики приемника, расположенного на дне водного слоя

Иначе обстоит дело для вертикального геофона, установленного на дне водного слоя и имеющего упругий контакт с донным грунтом. В этом случае по сравнению с гидрофоном, регистрирующим волны давления, волны сжатия и разрежения, отраженные от поверхности «вода-воздух», геофоном регистрируются с обратными знаками. Поэтому выражение, описывающее профиль интерференционной волны смещения, регистрируемой геофоном, имеет следующий вид:

$$F(t) = f(t) + (1 - k_{omp}^2) \sum_{l=1}^{\infty} (-k_{omp})^{l-1} f(t-l\tau) \quad (1a)$$

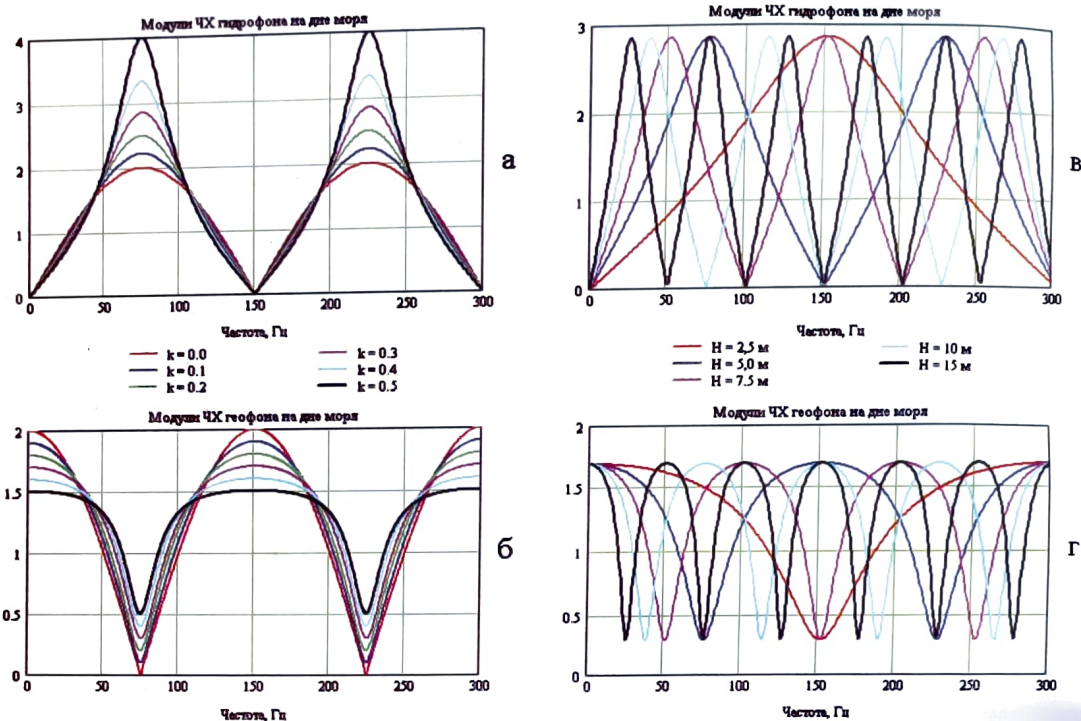


Рис. 2. Модули частотных характеристик гидрофона (а) и геофона (б) на дне водного слоя при его глубине $H = 5$ м и разных значениях коэффициента отражения $0 \leq k_{omp} \leq 0.5$; модули частотных характеристик гидрофона (в) и геофона (г) при фиксированном значении коэффициента отражения $k_{omp} = 0.3$ и разных глубинах моря $2.5 \text{ м} \leq H \leq 15 \text{ м}$

Соответствующая обобщенная комплексная интерференционная характеристика геофона, установленного на дне водного слоя, имеет вид:

$$K_g(j\omega, \alpha_1, \alpha_2, H) = S_F(j\omega) / S_f(j\omega) = G_g(\omega) \cdot Q_g(\alpha_2) \cdot \left[1 + (1 - k_{omp}^2) \sum_{l=1}^{\infty} (-k_{omp})^{l-1} e^{-j\omega l \tau} \right] \quad (3a)$$

где $G_g(\omega)$ собственная частотная характеристика геофона, $Q_g(\alpha_2) = \cos(\alpha_2)$ – характеристика направленности вертикального геофона 1-

го рода (угол α_2 отсчитывается от вертикали).

В качестве примера на рис.2 а–г приведены модули частотных характеристик, рассчитанные по формулам (3) и (3а) при $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$ (нормальное падение), постоянной глубине моря $H = 5$ м и разных значениях коэффициента отражения $k(0 \leq k_{omp} \leq 0.5)$ для гидрофона (а) и геофона (б). Влияние изменения глубины водного слоя H ($2.5 \text{ м} \leq H \leq 15 \text{ м}$) на частотные характеристики гидрофона и геофона при фиксированном значении коэффициента отражения $k_{omp} = 0.3$ показано,

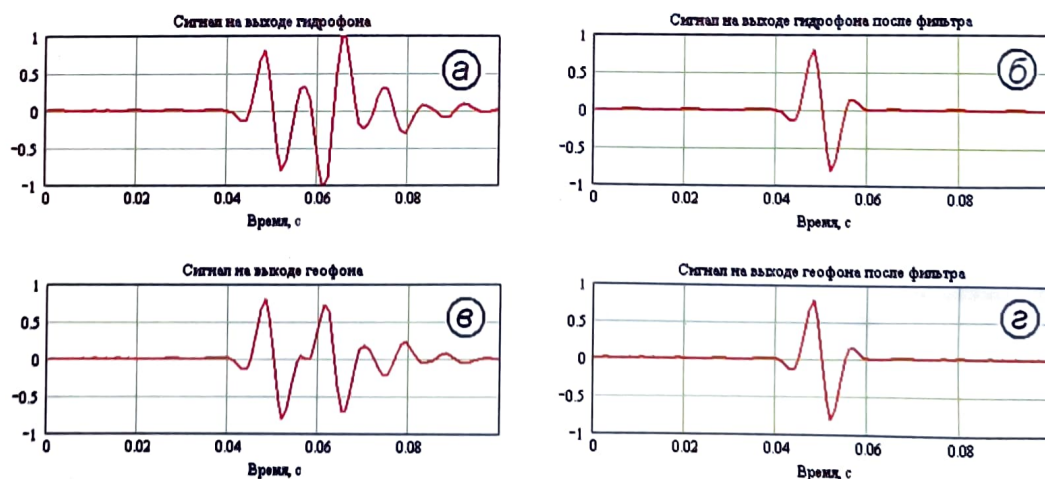


Рис. 3. Результат применения фильтров-деревербераторов на модельных материалах: исходные модельные трассы, рассчитанные для гидрофона (а) и геофона (в), трассы после фильтрации, соответственно, (б) и (г); $H = 10$ м, $k_{omp} = 0.3$

соответственно, на рис. 2 (в) и (г).

Различием этих характеристик в основном и обусловлено различие в частотном составе колебаний, регистрируемых на дне мелкого моря гидрофоном и геофоном. Как видно из рис. 2, при прочих равных параметрах максимумы и минимумы характеристик гидрофона и геофона, расположенных в одной и той же точке приема, находятся в противофазе, поэтому одновременное использование этих приемников позволяет рассчитывать на то, что на этапе обработки полученных данных можно будет компенсировать потерю информации, обусловленную интерференцией волн в водном слое.

2. Вариант обработки PZ данных

Идея совместного использования синхронно зарегистрированных PZ данных далеко не нова: за последние 20 лет к ней обращались многие авторы. Так, в работах [2, 8 и др.] рассмотрены разные подходы и способы синтеза волновых полей, синхронно полученных на мелководных акваториях с применением PZ датчиков.

В настоящей работе рассмотрена аналогичная задача построения фильтров-деревербераторов, позволяющих ослабить влияние интерференции волн в водном слое и устранить возможные фазовые различия колебаний, зарегистрированных на сейсмограммах, синхронно полученных с гидрофонами и геофонами на мелком море. В качестве основы для построения таких фильтров взяты выражения (3) и (3а), описывающие комплексные частотные характеристики

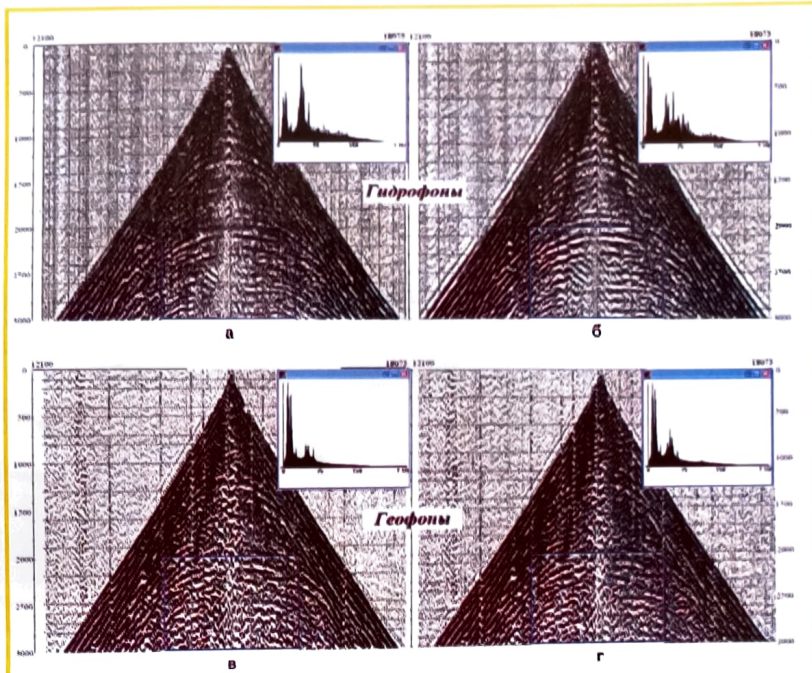


Рис. 4. Результаты применения фильтров-деревербераторов: исходные сейсмограммы, полученные с гидрофонами (а) и геофонами (в), отфильтрованные сейсмограммы, соответственно, (б) и (г). Донная коса XZone® Marsh Line с PZ датчиками, глубина акватории 10 м

гидрофона и геофона, расположенных на дне водного слоя. Комплексные частотные характеристики фильтров-деревербераторов в этом случае, очевидно, должны иметь следующий вид:

$$D_h(\omega, \alpha_1, H) = \frac{1}{K_h(\omega, \alpha_1, H) + \varepsilon_1};$$

$$D_g(\omega, \alpha_1, H) = \frac{1}{K_g(\omega, \alpha_1, \alpha_2, H) + \varepsilon_2}, \quad (5)$$

где ε_1 и ε_2 – величины порядка $10^{-2} - 10^{-3}$, подбираемые экспериментально. Импульсные характеристики $g_h(t)$ $g_g(t)$ этих фильтров-деревербераторов могут быть получены обратным преобразованием Фурье соответствующих комплексных частотных характеристик (5).

На рис. 3 (б) и (г) приведены результаты опробования фильтров (5) на модельных трас-

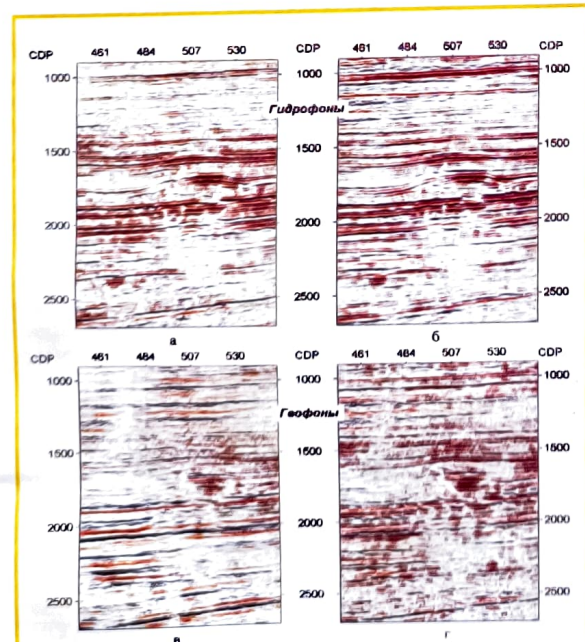


Рис. 5. Фрагменты временных разрезов, полученных в результате стандартной обработки PZ данных (а) и (в), а также с применением фильтров-деревербераторов к исходным сейсмограммам (б) и (г)

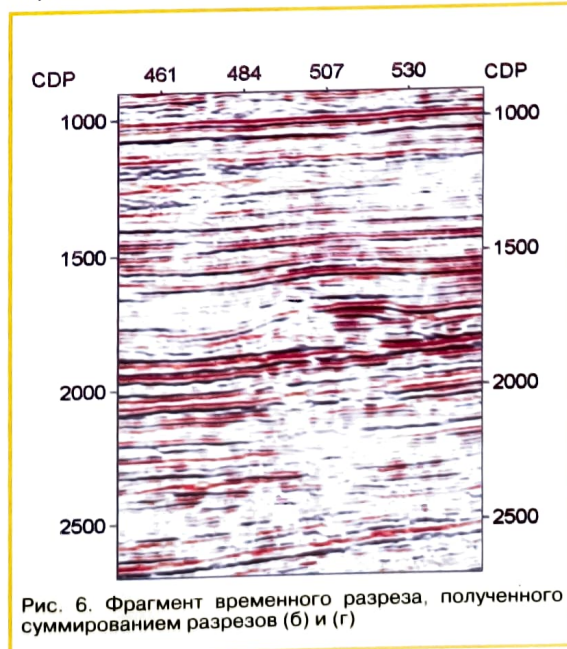


Рис. 6. Фрагмент временного разреза, полученного суммированием разрезов (б) и (г)

сах, рассчитанных, соответственно, для гидрофона (а) и геофона (в) при глубине водного слоя $H = 10$ м и коэффициенте отражения от дна $k_{отр} = 0.3$. Применение этих фильтров позволяет не только эффективно ослабить влияние интерференции волн в водном слое, но и устранить фазовые различия сигналов, синхронно регистрируемых гидрофоном и геофоном.

Практическое применение фильтров-деревербераторов на полевых сейсмограммах, полученных с донной косой XZone® Marsh Line с PZ датчиками при глубине акватории около 10 м, показано на рис. 4.

Как видно из этого рисунка, ожидаемый эффект от применения фильтра-деревербератора лучше всего прослеживается на сейсмограмме, полученной с гидрофоном: многофазное отображение осей синфазности на рис. 4(а), обусловленное, в основном, реверберацией волн в водном слое, практически полностью устранено на отфильтрованной сейсмограмме на рис. 4 (б). На сейсмограмме, полученной с геофоном, результаты фильтрации хотя и имеют место, однако не столь очевидны.

На рис. 5 приведены фрагменты временных разрезов, полученных в результате стандартной обработки данных (а) и (в), а также с применением к исходным сейсмограммам фильтра-деревербератора (б) и (г). Фрагмент объединенного P+Z временного разреза, полученного суммированием разрезов (б) и (г), представлен на рис. 6. Отдельно на рис. 7 в более крупном масштабе приведены фрагменты верхней части разрезов (а) и (б), полученных с гидрофонами.

Сопоставление всех представленных на рис. 5-7 фрагментов временных разрезов показывает, что применение предложенных фильтров-деревербераторов позволяет заметно улучшить качество материалов, полученных с гидрофонами и геофонами в условиях мелкого моря, а также повысить их информативность. Как следует из рис. 7, наибольший эффект от подавления реверберации волн в водном слое при этом наблюдается в верхней части разреза, где прослеживаемость отражений существенно улучшилась.

Заключение

Анализ исходных материалов, полученных в условиях мелководья Азовского моря с донной косой XZone® Marsh Line с PZ датчиками, показывает, что качество исходных сейсмограмм, особенно тех, что были получены с геофонами, существенно зависит от целого ряда факторов, и прежде всего таких, как характер донного грунта и качество упругого контакта геофона с грунтом. Изменение глубины моря, состава и свойств донного грунта вдоль линии профиля, наличия и характера донной растительности – все это приводит к заметным вариациям в характере интерференционных процессов, качества сейсмограмм и, как следствие, к вариациям эффектив-

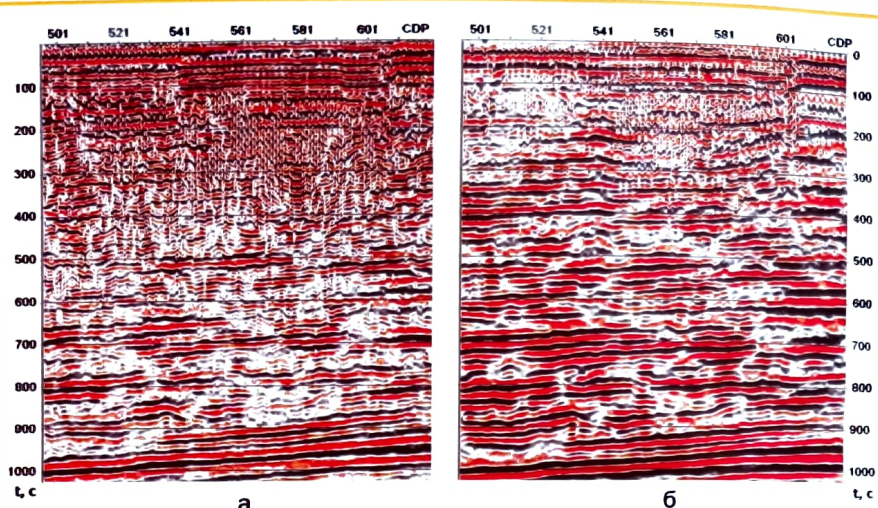


Рис. 7. Фрагменты временных разрезов, полученных с гидрофоном: (а) стандартная обработка данных, (б) с применением фильтра-деревербератора

ности работы любого алгоритма обработки PZ данных, в том числе и предложенного фильтра-деревербератора.

В этой связи перспективы дальнейшего развития способов обработки PZ данных, наряду с разработкой алгоритмов, аналогичных описанному выше, предполагают создание и совершенствование таких процедур, которые в каждом пункте приема позволят получать корректные оценки таких параметров, как глубина моря, коэффициент отражения от дна, а также учесть влияние внешних факторов на вариации передаточных функций сейсмоприемников.

Литература

- 1) Гуленко В.И., Шумский Б.В. Технологии морской сейсморазведки на предельном мелководье и в транзитной зоне. Монография. Краснодар: КубГУ, 2007. 111 с.
- 2) Mougenot D. Транзитная зона: последний рубеж сейсморазведки // Технологии сейсморазведки - Ежекварт. официальное издание ЕАГЕ, 01/2005. С. 10-13.
- 3) Жгенти С.А., Запорожец Б.В., Лещенко Д.П. Использование синхронного PZ приема колебаний при сейсморазведке в транзитных зонах для подавления интерференции волн в ближней зоне приемника // Технологии сейсморазведки - Ежекварт. официальное издание ЕАГЕ, 03/2008. С. 46-57.
- 4) Жгенти С.А., Запорожец Б.В. Опыт применения системы XZone® Marsh Line при 2D и 3D технологиях сейсмических исследований на предельном мелководье транзитных зон // Приборы и системы разведочной геофизики – Ежекварт. официальное издание Саратовского отделения ЕАГО, 03/2008. С. 32-37.
- 5) Barr, F. J., and Sanders, J. I., 1989, Attenuation of water-column reverberations using pressure and velocity detectors in a water-bottom cable: 59th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 653-656.
- 6) Dragoset, W. and Barr, F. J., 1994, Ocean-bottom cable dual-sensor scaling: 64th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 857-860.
- 7) Ikelle, L. T., 1999, Combining two seismic experiments to attenuate free-surface multiples in OBC data: Geophys. Prosp., 47, 179-193.
- 8) Hoffe, B. H., Lines, L. R., and Cary, P. W., 2000, Applications of OBC Recording. - The Leading Edge, April 2000, Vol. 19, No. 4.