

MicrOBS: новое поколение океанских донных сейсмометров

MicrOBS: A new generation of ocean bottom seismometer

И. Оффре, П. Пелло, Ф. Клингельхофер, Л. Жели, Ж. Крозон, Ж. И. Линь, Ж.-К. Сибу

(Y. Auffret*, P. Pelleau*, F. Klingelhoef*, L. Geli*, J. Crozon*, J.Y. Lin*, J.-C. Sibuet*)

Во Французском институте исследований по использованию моря (Ifremer) разработаны океанские донные сейсмометры (ОДС) нового поколения. Впервые удалось интегрировать электронные системы сбора и передачи данных, что позволило сократить размеры, вес и стоимость оборудования. Скачивание данных через порт USB и подзарядка батарей от внешнего источника позволяют обслуживать оборудование без вскрытия герметичной части. Оборудование было успешно испытано во время океанографического рейса Ifremer в районе Окинавского желоба у берегов Тайваня. Далее описаны результаты использования опытного образца.

Введение

ОДС обычно оснащаются трехкомпонентными сейсмоприемниками для записи изменений движений морского дна во всех направлениях и пьезоприемником для записи давления в окружающей воде. Их опускают на дно моря и отцепляют от троса. Запуск производится акустическим сигналом с борта судна. По сравнению с сейсмозазведкой на отраженных волнах ОДС дают

лучшее отношение сигнал-шум, поскольку на морском дне обстановки более спокойная, и возможность работы с большими расстояниями ПВ-ПП, что позволяет регистрировать отражения с больших глубин. С особым оснащением оборудование можно размещать на дне на срок до года для отслеживания естественной сейсмической активности (см. Laske *et al.*, 1999).

ОДС позволяют определять скорости Р- и S-волн в как осадочном чехле так и в остальной части коры. Последние дают возможность сузить область возможных значений геомеханических параметров осадочных слоев (Westbrook *et al.*, 2003a; Westbrook *et al.*, 2003b; Nouze, *et al.*, 2004), а также дают информацию о литологии более глубоких частей коры (Klingelhoef *et al.*, 2000). В 1970-80-х годах Ifremer разрабатывал и успешно применял ранние образцы океанских донных сейсмографов, в которых впервые использовался выносной сейсмоприемник и вертикальная 15-канальная сейсмодоска (Avedik, 1978; Avedik, 1986). С ростом качества данных сейсмозазведки на отраженных волнах разработка широкоугольной сейсмической аппаратуры приостановилось до 1999 г., когда Ifremer приобрел 15 океанских донных пьезоприемников (ОДП).

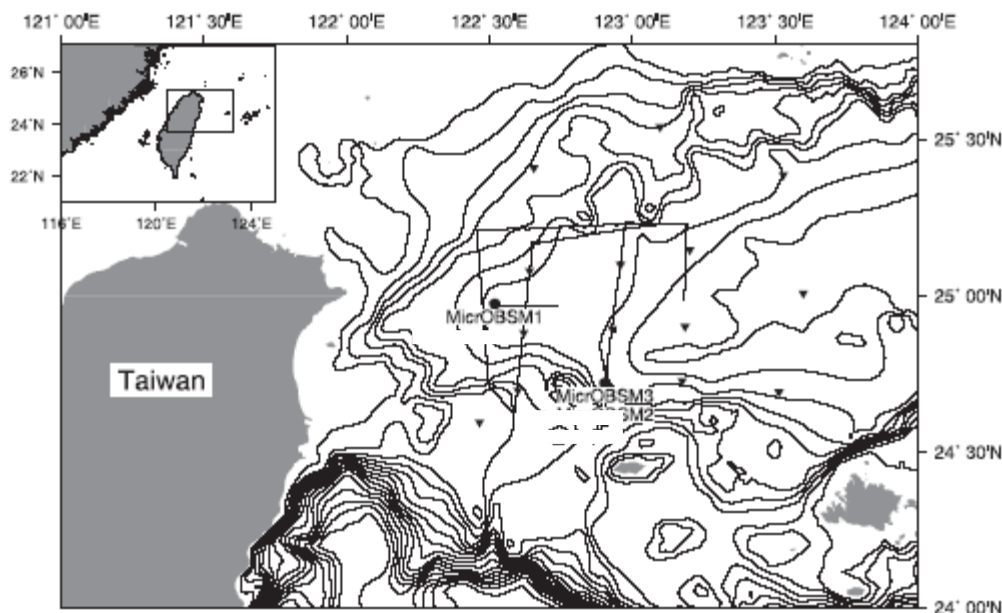


Рис. 1 Карта размещения ОДС в районе Окинавского желоба. Положения ОДС показаны треугольниками, места одновременного погружения MicrOBS и старых ОДС – кружками, сейсмические профили – черными прямыми. На врезке показано положение участка работ.

* IFREMER Centre de Brest, Department of Marine Geosciences, BP 70, F-29280 Plouzané.

Contact details: Yves.Auffret@ifremer.fr, Pascal.Pelleau@ifremer.fr, Klingelhoef@ifremer.fr, Louis.Geli@ifremer.fr, Jean.Claude.Sibuet@ifremer.fr, Tel : +33 2 98 22 40 40, Fax : +33 2 98 22 45 49

За четыре года Ifremer использовал ОДС в четырех глубинных исследованиях (Gutscher *et al.*, 2002; Contrucci *et al.*, 2004a; Contrucci *et al.*, 2004b; Bartolome *et al.*, subm.), а также в двух детальных исследованиях для описания отражающего горизонта, представляющего дно (Westbrook *et al.*, 2003a; Westbrook *et al.*, 2003b). В ходе рейса в западной части Окинавского желоба (ноябрь 2003 г.) на этом оборудовании впервые были получены данные по естественной сейсмичности. Это был совместный проект Ifremer и Национального Тайваньского университета океана (National Taiwan Ocean University), нацеленный на исследование естественной сейсмичности западной части Окинавского желоба. В ходе проекта по данным 15 ОДС и стационарных наземных станций определялись скорости распространения Р- и S-волн в земной коре этого региона, отличающегося очень интенсивным вулканизмом (Hsu *et al.*, 1996; Sibuet *et al.*, 2002).

Чтобы повысить разрешение сейсмического разреза, количество станций, используемых в одном рейсе, возросло до 100 (Kodaira *et al.*, 2000). Применение современных вычислительных средств позволяет интерпретировать такие большие объемы данных. Чтобы увеличить возможное количество ОДС, в 2002 г. Ifremer приступил к созданию ОДС нового поколения, малогабаритных, недорогих и простых в обслуживании (рис. 2). В ходе рейса к Окинавскому желобу северо-восточнее Тайваня проведены две серии испытаний с использованием как нового, так и более раннего (рис. 1) оборудования с целью сравнения их эксплуатационных характеристик и качества данных.

Техническое описание ОДС Ifremer

Современный ОДС Ifremer состоит из алюминиевой рамы, на которой установлены два цилиндра; в одном из них находятся электронные системы сбора и хранения данных, а также батареи ОДС; во втором находятся электронные компоненты и батареи системы всплытия.

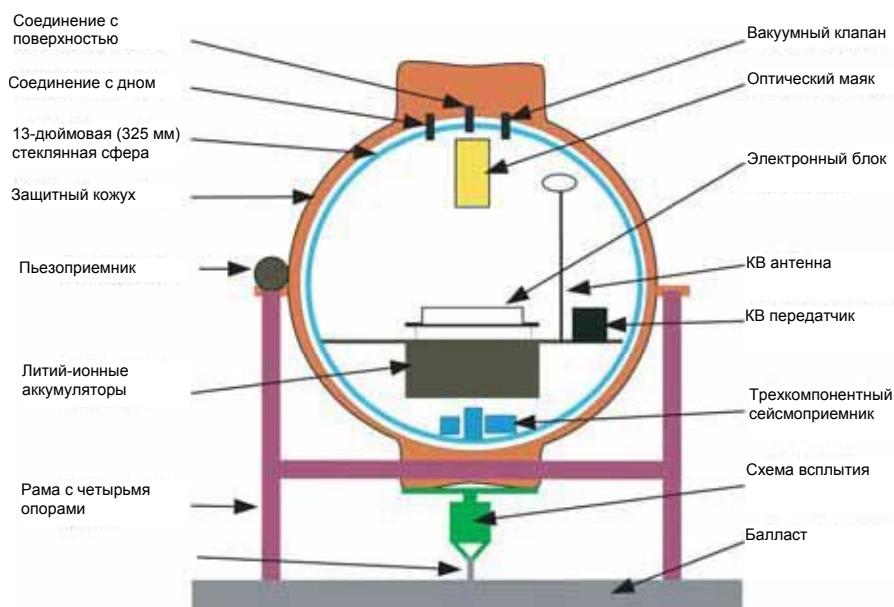


Рис. 2 Схема ОДС MicrOBS (габариты: 570 x 440 x 440)

Вес цилиндров в воздухе составляет 20 и 40 кг, к чему следует добавить вес элементов плавучести из синтетической пены. Полный вес ОДС составляет 250 кг, не считая 70 кг балласта, поэтому спуск и подъем оборудования в плохую погоду может быть трудным и даже опасным. После подъема цилиндр с электроникой снимается с рамы и вскрывается в лаборатории для перезаписи данных на компьютер и замены батарей перед следующим спуском. На эти операции и различные необходимые перед погружением проверки, включая проверку водонепроницаемых контактов, уходит 1-2 часа.

Электронные компоненты для ОДС поставляют компании Geomar (www.geomar.de; Bialas and Flueh, 1999; Flueh *et al.*, 2002) и Send (www.send.de); их монтируют на раме, разработанной в Ifremer. В настоящее время каждый ОДС комплектуется одним трехкомпонентным сейсмоприемником компании KUM (www.kum-kiel.de), обеспечивающим хороший контакт датчика с дном. Сейсмостанция автоматически опускается на дно через несколько часов после погружения при растворении электролитического датчика, разработанного в Ifremer. В комплект оборудования входят также пьезоприемники OAS E-2PD. Частота опроса каналов сейсмо- и пьезоприемников регулируется от 25 до 1000 раз в секунду, возможно увеличение до 10000 раз в секунду. Срок работы оборудования в режиме записи зависит от частоты опроса и типа питания и составляет обычно около 15 суток. Срок службы устройства всплытия Ixsea-Oceano AR-671CE (www.ixsea-oceano.com) - не менее 1 года, но при разрядке батареи системы записи нарушается синхронизация оборудования, и точная датировка данных становится невозможной.

Материнская плата	Persistor CFII Motorola CPU68332
Перенос данных	USB 1.1 - Persistor Add-on by OES
Хранение данных	Флэш-карта 1, 2, 4 и более ГБ, совместимая с FAT32
Пьезоприемник	Широкополосный HTI-90-U High Tech.
Сейсмоприемник	3 * (4.5Hz or 10Hz)
АЦП и обработка сигнала	Cirrus LogicCS5372 24 bits & DSP CS5376
Тактовый генератор	TCXO 1.10 ⁻⁷
Источник питания	Литий-ионный аккумулятор SAFT 14.4V 16.5 A/H
Элемент плавучести	325 мм стеклянная сфера (Vitrovex)
Световой маяк	Novatech OEM
Радиопередатчик	Novatech OEM (международный КВ диапазон)
Частота опроса	31.25, 62.5, 125, 250, 500 раз в секунду
Механизм всплытия	Крюк на тросе с разрывным элементом
Максимальная глубина погружения	До 5000 м

Табл. 1. Технические характеристики ОДС MicroOBS

Техническое описание ОДС MicroOBS

При разработке ОДС нового поколения MicroOBS возникли четыре основных новых идеи, не использовавшихся в более ранних моделях.

Совмещение блока сбора данных и системы всплытия

Это главное новшество (патент №0212159 от 10.02.2002 на имя Оффре и Пелло, 2002), впервые использовано в оборудовании, размещаемом на дне океана. Это позволяет значительно снизить вес прибора и тем самым упростить работу с ним. Совмещение стало возможным благодаря использованию широкополосного пьезоприемника, принимающего как низкочастотные (0.1-100 Гц) сигналы от пневмоисточника или землетрясения так и высокочастотный (около 10кГц) сигнал на всплытие. Программа сбора данных постоянно отслеживает регистрируемые данные и выделяет в них сигнал на всплытие.

Питание от аккумуляторов

Чтобы не открывать и затем вновь герметизировать оборудование (сделать это на борту судна по-прежнему сложно), в MicroOBS применено питание от блока аккумуляторов. Кроме того, снижено энергопотребление электронных компонентов.

Перенос данных через порт USB

Считывание данных производится через порт стандарта USB 1.1, что позволяет не вскрывать прибор после подъема на поверхность. На ныне используемой плате эффективная скорость переноса составляет 200 КБ/сек, что позволяет перенести 1ГБ данных за 1.5 часа.

Уменьшение габаритов

Три вышеназванных новшества позволили существенно сделать габариты MicroOBS существенно меньше, чем у более ранних моделей. Все оборудование удалось поместить в стеклянную сферу диаметром 325 мм, а раньше приходилось использовать сферу диаметром 427 мм (Charvis and Hello, 1988). Вес комплекта составляет всего 20 кг на борту и 17 кг на грунте. Также удалось

Установить световой и радиомаяки и радиоантенну внутри сферы и упростить ее обнаружение после всплытия, как днем, так и ночью.

Первые испытания опытных образцов MicroOBS показали, что уменьшение габаритов облегчает спуск и подъем оборудования. Прибор хорошо заметен даже в условиях волнения на море. При плохой видимости его можно обнаружить на расстоянии до 3 км по радиосигналу с помощью КВ пеленгатора. Световой маяк особенно полезен при ночных подъемах.

Программирование MicroOBS перед погружением и при считывании данных проводится с компьютера через порт RS232. Считывание данных производится через порт USB. Передача данных происходит легче, но если объемы велики, на считывание нужно некоторое время. ОДС MicroOBS определяет в данных

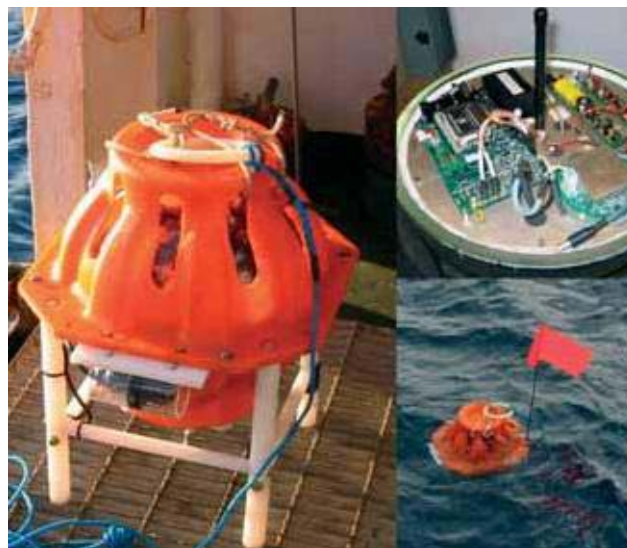


Рис. 3. ОДС MicroOBS. (a) на борту, (b) в стеклянной сфере, (c) в воде.

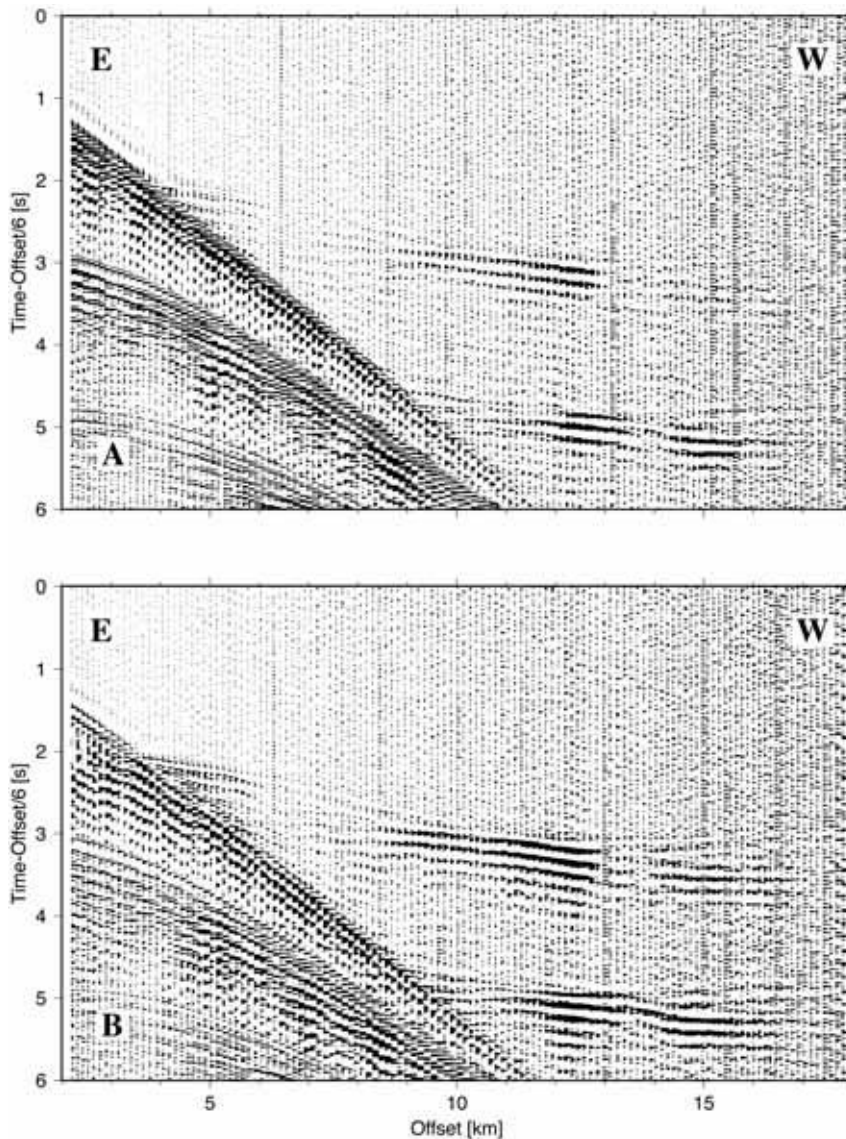


Рис. 4. Сравнение данных старой ОДС и ОДС MicrOBS на испытательном участке 1 (а) Данные канала пьезоприемника старой ОДС после полосовой фильтрации (граничные частоты 3,5,24,36), ввода поправки за расстояние ПВ-ПП и приведения к скорости 6 км/с. (б) Данные канала пьезоприемника ОДС MicrOBS после такой же обработки.

наличие акустического сигнала (12-битного кода) с поверхности. Кодирование производится с помощью линейной частотной модуляции. Это 12-битный код позволяет, например, передать 10 инструкций каждому из устройств из набора, размер которого может достигать 400 штук. В будущем такое количество кодов позволит менять настройки оборудования (например, время начала записи) даже без его подъема на борт. Для повышения гибкости код команды на всплытие может генерироваться компьютером. Данные с аудиовыхода стандартной звуковой карты (16-битный код, частота оцифровки 44100 Гц) подаются на усилитель мощности и далее на передатчик. Так разделяются этапы усиления и распознавания сигнала на всплытие.

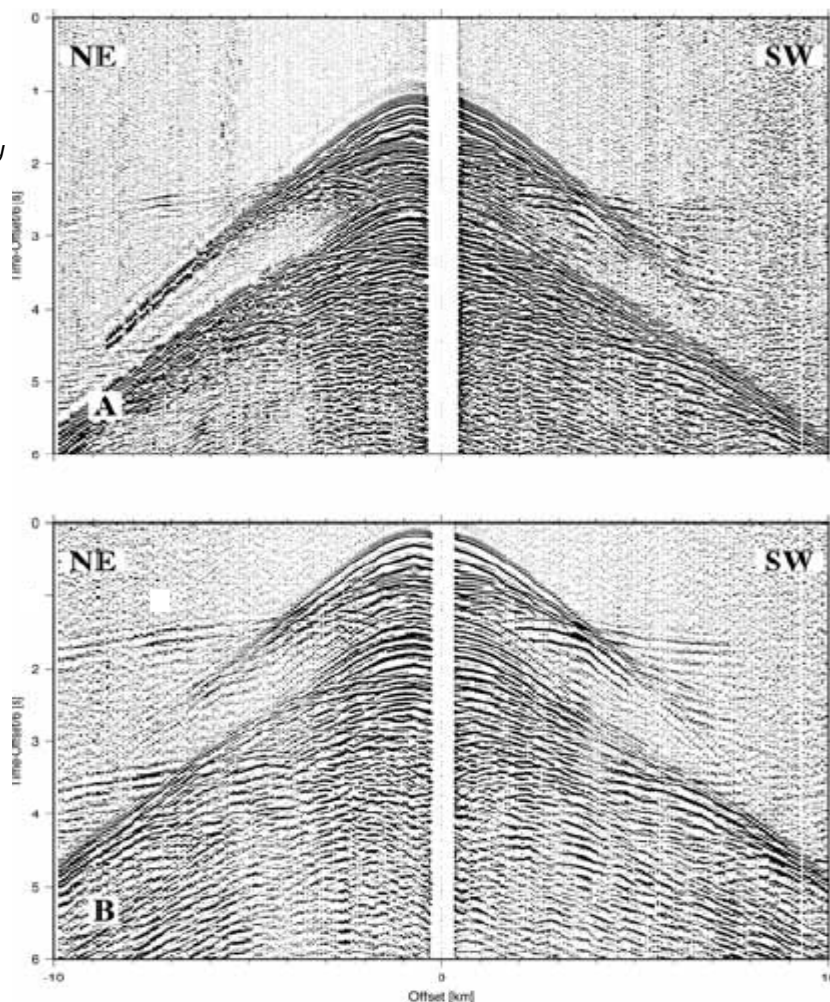
Два прибора MicrOBS, использованные в описанном далее эксперименте, являются первыми опытными образцами. Один из них для уменьшения веса в воде и увеличения скорости всплытия был смонтирован на пластиковой раме с четырьмя опорами (рис. 3).

Второй, более новый, образец был оснащен жесткой алюминиевой рамой для обеспечения хорошего контакта с грунтом. Сцепление с морским дном весьма важно, поскольку сейсмоприемник находится внутри сферы, а не устанавливается непосредственно на грунт. Кроме того, чтобы еще улучшить сцепление с грунтом, установлена стальная крестовина из U-образного профиля, которая обеспечивает более глубокое проникновение балласта в грунт. Скорость погружения MicrOBS составляет около 1 м/с, всплытия – 0,8 м/с.

Результаты испытаний и сопоставление с прежними моделями

Первое сравнение MicrOBS и более ранних моделей ОДС Ifremer проведено в ходе океанографического рейса на Окинавском желобе у берегов Тайваня (рис. 3). Эта впадина представляет собой задуговой бассейн на ранней стадии вулканизма. Это аномальный вулканизм может быть связан с разрывным нарушением

Рис. 5. Сравнение данных ОДС MicrOBS «Бэмби» и «Пучеглазый» на испытательном участке 2 (а) Данные канала вертикального сейсмоприемника станции «Бэмби» после обработки по графу рис. 4 (б) Данные канала вертикального сейсмоприемника станции «Пучеглазый» после такой же обработки.



в погружающейся плите на глубине около 100 км. Научная цель рейса состояла в регистрации естественной сейсмической активности с целью уточнения строения земной коры в регионе путем определения скоростного закона для P- и S-волн (Sibuet *et al.*, 2002).

В ходе рейса проведено два успешных совместных испытания. Первое испытание состояло в одновременной установке MicrOBS на пластиковой раме и ОДС старого образца (рис. 4). В течение 24 часов велась запись трасс от системы малых (1000 куб. дюймов = 16.4 дм³) пневмоисточника и от землетрясений. Линейная группа источник состояла из трех пневмопушек Bolt общим объемом 1275 куб. дюймов (21 дм³). Возбуждение происходило с интервалом 50 сек. Сравнение данных пьезоприемников MicrOBS и старых ОДС показало, что качество отраженных волн выше на MicrOBS. Например, отражение на времени 2.8 с на расстоянии ПВ-ПП около 15 км видно в данных MicrOBS, но едва различимо в данных старой ОДС. С другой стороны, прямая волна в данных MicrOBS осложнена звоном несколько сильнее, чем на старой ОДС, возможно – из-за пластиковой рамы. К сожалению, в ходе эксперимента не работал канал вертикального сейсмоприемника, поэтому не удалось

получить данные по S-волнам. Во время второго совместного испытания были установлены обе ОДС MicrOBS, одна на пластиковой раме («Бэмби»), другая – на алюминиевой («Пучеглазый»), и, как и ранее, был снят короткий профиль с той же группой источников (рис. 5). Сравнение данных вертикальных сейсмоприемников показало, данные MicrOBS с алюминиевой рамой оказались заметно более высокого качества. Все отраженные волны видно более отчетливо в данных прибора с алюминиевой рамой; кроме того, на приборе с пластиковой рамой часть отражений была пропущена из-за вибрации рамы. Поэтому было принято решение на всех последующих ОДС MicrOBS использовать алюминиевые рамы.

Поскольку изучение S-волн может дать ценную дополнительную информацию, интересно было сравнить данные вертикального и горизонтальных сейсмоприемников (рис. 6). На ОДС MicrOBS с алюминиевой рамой данные вновь оказались более высокого качества. Отражения S-волн, сами по себе более зашумленные, чем P-волны, успешно зарегистрированы обоими приборами.

К сожалению, в связи с тем, что один из каналов горизонтальных сейсмоприемников был закорочен для записи собственных шумов прибора, невозможно привести данные к реальному времени. Поэтому прямое сравнение горизонтальных каналов стало затруднительно, поскольку амплитуда регистрируемых S-волн зависит от взаимной ориентации осей X и Y прибора и линии возбуждения. Тем не менее, убывание амплитуды S-волн при прохождении судна над прибором и соответствующая инверсия полярности сигнала ясно видны в данных обоих приборов.

Хотя в настоящее время ОДС MicroOBS предназначены только для записи в течение короткого времени и не приспособлены для мониторинга землетрясений в течение длительного времени, удалось записать несколько местных землетрясений в те периоды рейса, когда не проводилось возбуждение (рис. 7).

На записях видны четкие отражения P- и S- волн, что говорит о нормальной работе каналов всех трех сейсмоприемников.

Обсуждение и выводы

В результате сотрудничества компании ORCA instrumentation/SERCEL Brest и института Ifremer созданы малогабаритные, недорогие, простые в обслуживании ОДС MicroOBS. В ходе рейса в Окинавский желоб у берегов Тайваня проведены первые испытания для сравнения приборов нового поколения с более ранними моделями ОДС Ifremer, в ходе которых установлено более высокое качество данных по каналу пьезоприемника MicroOBS. Испытания двух опытных образцов MicroOBS показали, что прибор с алюминиевой рамой дает более качественные данные по каналам сейсмоприемников, чем прибор с пластиковой рамой, которую сперва предполагалось использовать.

За полтора года работы над проектом проведено несколько испытаний в бассейне и в море на глубине до 2000 м. Хотя выполнение программы сертификации, включающей различные испытания (на давление, вибрацию, удары и перепады температур), завершится лишь к маю 2004 г., крупных поломок не случилось и значительных недостатков конструкции не выявлено.

Тем не менее, в ближайшее время в конструкции будут сделаны некоторые технические улучшения:

- Срок работы прибора в автономном режиме увеличится до 10 дней в режиме сбора данных, а срок пребывания на дне - до 20 дней.
- Собственные шумы прибора будут уменьшены, что улучшит работы 24-битного АЦП.
- Будет улучшена работа порта USB.

Первые испытания показали, что технология MicroOBS пригодна для регистрации землетрясений с высоким качеством. В 2005 г. на базе MicroOBS будет создана долговременная станция, в которой будут сочетаться возможность установки на длительное время (от полугода до года) и преимущества MicroOBS (низкая стоимость, простота установки, малые габариты).

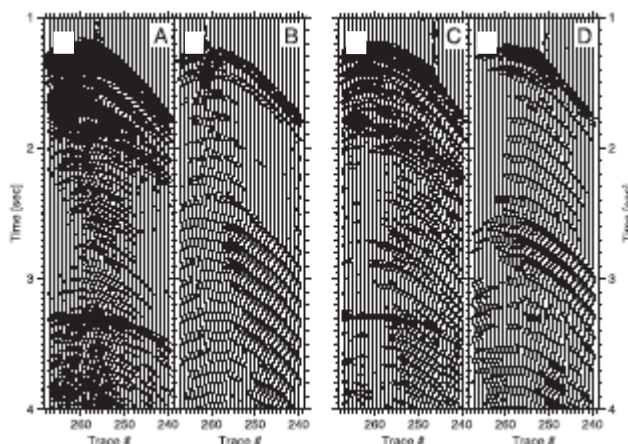


Рис. 6. Сравнение каналов станций «Бэмби» и «Пучеглазый» на испытательном участке 2. (а) Канал вертикального сейсмоприемника «Бэмби» (б) Канал вертикального сейсмоприемника «Пучеглазый» (с) Канал горизонтального сейсмоприемника «Бэмби» (д) Канал горизонтального сейсмоприемника «Пучеглазый».

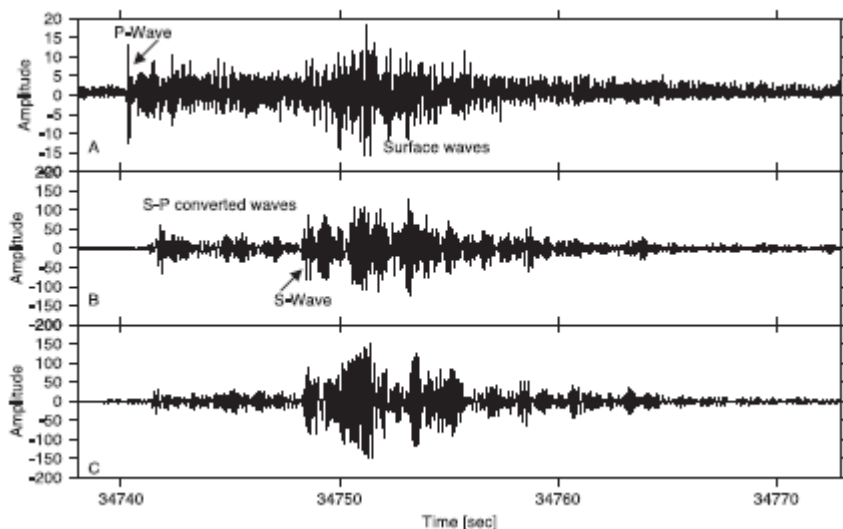


Рис 7 Запись местного землетрясения станцией «Пучеглазый» на испытательном участке 2 по завершении возбуждения. Расстояние до эпицентра – около 20 км, подписаны основные отражения. (а) Канал вертикального сейсмоприемника (б) Канал первого горизонтального сейсмоприемника (с) Канал второго горизонтального сейсмоприемника.



Эту разработку вновь проведут совместно компания ORCA instrumentation/SER- CEL Brest и институт Ifremer.

Благодарности

Большое спасибо Ц. С. Ли (C.S. Lee) и С. К. Чжу (S.K. Hsu) за предоставленную возможность испытать MicroBS в ходе рейса на Тайвань. Мы хотели бы также выразить благодарность капитану и экипажу НИС «Ocean Researcher I».

Наконец, мы хотели бы поблагодарить М. А. Гутчера (M.A. Gutscher) за помощь в переводе на английский язык.

Литература

- Avedik, F. [1978] Ocean bottom refraction Seismograph (OBRs). *Marine Geophysical Researches*, **3**, 4, 357-379. Avedik, F. [1986] Sea-floor seismology: mobile ocean bottom vertical array (OBVSA) for controlled source experiments. In: Ocean seismo acoustics, *NATO Conference Series IV*, 863- 870.
- Bartolome, R., Contrucci, I., Nouze, H., Thiebot, E., Klingelhoefer, F. [2004] Improving the 'single bubble' mult- channel vertical seismic image with pre-stack depth migration by using OBS wide-angle reflection/refraction velocities: exam- ple of the Moroccan margin. *Sub. to Tectonophysics*.
- Bialas, J. and Flueh, E. [1999] Ocean Bottom Seismometers. *Sea Technology* **40**, 4, 41-46.
- Charvis, P. and Hello, Y. [1988]. Les stations sismique sous-marines. *ORSTOM Actualites* 13-15.
- Contrucci, I., Matias, L., Moulin, M., Geli, L., Klingelhoefer, F., Nouze, H., Aslanian, D., Olivet, J.-L., Rehault, J.-P. and Sibuet, J.-C. [2004a] Deep structure of the West African continental margin (Congo, Zaire, Angola), between 5°S and 8°S, from reflection/refraction seismic and gravity data. *Geophys. J. Int.*, in press.
- Contrucci, I., Klingelhoefer, F., Perrot, J., Bartolome, R., Gutscher, M.-A., Sahabi, M., Malod, J., Rehault, J.-P. [2004b] The Crustal Structure of the NW-Moroccan Continental Margin From Wide-angle and Reflection Seismic Data. *Geophys. J. Int.*, in press.
- Flueh E., Klaeschen, D. and Bialas, J. (2002) Options for multi- component seismic data acquisition in deep water. *First Break* **20**, 12, 764-769.
- Gutscher, M.-A., Malod, J., Rehault, J.-P., Contrucci, I., Klingelhoefer, F., Mendez-Victor, L., Spakman, W. [2002] Evidence for active subduction beneath Gibraltar, *Geology* **30**, 12, 1071-1074.
- Hello Y. and Charvis Ph. [1998] Les stations sismiques sous-marines (OBS): Utilisation et perspectives. *Reunion des Sciences de la Terre*, Brest.
- Hsu, S. K., Sibuet, J.-C., Monti, S., Shyu, C. T., Liun C. S. [1996] Transition between the Okinawa Trough backarc extension and the Taiwan collision; new insights on the southernmost Ryukyu subduction zone. *Marine Geophysical Researches* **18**, 2-4, 163-187.
- Klingelhoefer, F., Geli, L. and White, R. S. [2000] Geophysical and geochemical constraints on crustal accretion at the very-slow spreading Mohns Ridge, *Geophys. Res. Let.* **27**, 10, 1547-1550.
- Kodaira, S., Takahashi, N., Park, J.-O., Mochizuki, K., Shinohara, M. and Kimura, S. [2000] Western Nankai Trough seismogenic zone: results from wide-angle ocean bottom seismometer survey, *J. Geophys. Res.* **105**, 5887-5905.
- Laske, G., J. Phipps Morgan and Orcutt, J. A. [1999] First results from the Hawaiian SWELL pilot experiment, *Geophys. Res. Let.*, **26**, 3397-3400.
- Nouze, H., Long, C., Westbrook, G.K., Roux, E., Foucher, J.-P., Klingelhoefer, F. [2004] Investigation of gas and gas hydrate related P-wave velocity variations with depth from OBS experiments on the northern flank of the Storegga slides. *Hydrate Symposium at IGC 32*, Florence.
- Sibuet, J.-C., Hsu, S. K., Le Pichon, X, Le Formal, J.-P., Reed, D. and Liu, C. S. (2002) East Asia plate tectonics since 15 Ma; constraints from the Taiwan region, *Tectonophysics* 344(1-2), 103-134.
- Westbrook, G.K., Long, C., Peacock, S., Foucher, J.P., Nouze, H., Reston, T., Zillmer, M., Mienert, J., Vanneste, M., and Buenz, S. [2003a] Seismic investigations of methane hydrate and gas offshore northwest Svalbard. *Geophysical Research Abstracts*, **5**, 08867.
- Westbrook G. K., Long C., Peacock S., Haacke R., Rossi G., Madrussani, G., Foucher J.P., Nouze H., Reston T., Zillmer M., Mienert J., Vanneste, M., Buenz, S. [2003a] Wave velocities and anisotropy in methane hydrate-and gas-Bearing sediments offshore Svalbard- the HYDRATECH project. *Abstract F839*, AGU 2003 Fall Meeting, 8-12 December 2003, San Francisco.