

## Seismic investigation of the Great Sumatra-Andaman earthquake

## Сейсмическое исследование причин землетрясения в Индийском Океане

Наконец получены первые результаты сейсмического исследования причин цунами 2004 года, повлекшего за собой огромные разрушения в Юго-Восточной Азии.

Цунами, вызванное Великим Суматранским Землетрясением, произошедшим 26 декабря 2004, повлекло за собой смерти около 300,000 человек в Юго-Восточной Азии и неисчислимые финансовые потери. Землетрясение (Магнитуда ~ 9.2-9.3, механизм надвига в эпицентре), сильнейшее за последние 40 лет, произошло вдоль Суматранской зоны движения по разломам. За ним последовали сотни повторных толчков и еще одно землетрясение магнитудой 8.7, 28 марта 2005.

Для изучения этого разрушительного землетрясения в январе 2005 был запущен проект SAGER (Sumatra-Andaman Great Earthquake Research, Исследование Землетрясения в Андаманском Море). Первый этап включал в себя запись повторных толчков на Суматре в июле-августе 2005 и изучение структуры дна. В июле-августе 2006 были проведены два глубоководных сейсмических исследования с использованием судна Schlumberger/WesternGeco, *Geco Searcher* и *Marion Dufresne*, судна IPEV. Сейсморазведка проводилась Schlumberger и Институтом Физики Земного Шара в Париже при поддержке индонезийского правительства (BPPT & LIPI), CNRS/INSU, Национального Исследовательского Бюро и министерства иностранных дел Франции, IPEV, и IFREMER (Французского Института Морских Исследований). В проекте также приняли участие UBO, Национальный Океанографический Центр в Саутгемптоне, Университет Durham, Кембриджский университет, NIO и NGRI (Индия), и ITB (Индонезия).

По предварительным данным, собранным *Geco Searcher*, разлом

может быть измерен до 30-50 км в глубину. Мы также определили литосферную границу плит, которая вызвала продвижение разлома на север к Андаманским островам.

### Землетрясение

Разрушительное землетрясение 26 декабря 2004 произошло на стыке Индийской и Бирмской плит. Оно было вызвано прорывом напряжения, развившегося при поддвижении Индийской плиты под Бирмскую со скоростью около 5.2 см/год. Схождение происходило под непрямым углом, с перпендикулярным сдвигом около 4 см/год и горизонтальным смещением вдоль Суматранского Разлома около 2 см/год (Рис.1). Из-за исключительных масштабов произошедшего, магнитуда землетрясения не могла быть определена с помощью стандартных способов и в конце концов была оценена в 9.2-9.3 балла. Таким образом, событие в Андаманском море стало вторым или третьим по силе среди всех землетрясений, зарегистрированных с начала использования сейсмологических методов больше века тому назад. Разрушительное цунами было вызвано значительным вертикальным компонентом тотального смещения (в среднем 12 м и местами достигающего 20 м) по всей длине 1300-километровой границы плиты от Суматры до северной границы Андаманских островов (Рис.1).

### Источник (сейсмогенные зоны) и разломы на поверхности

Считается, что механизм основного землетрясения 26 декабря 2004 — разлом, случившийся на наклонной

(8-12°) плите на глубине около 30 км. Предварительные измерения сейсмической активности в регионе и GPS-исследования поверхности свидетельствуют о том, что напряжение нарастало в течение значительного времени (100-300 лет). Моделирование цунами указывает на вертикальные смещения в эпицентре землетрясения, амплитуда которых превышала 10 м. Основная задача на данный момент — определить, как движение в эпицентре, на глубине в 30 км, было передано морскому дну, а затем столбу воды. Для такого значительного землетрясения, высока вероятность того, что разлом

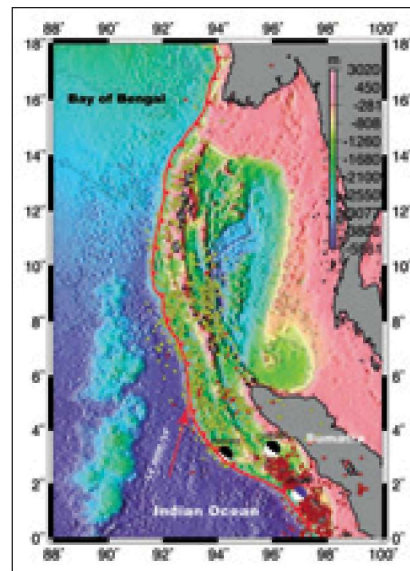


Рис. 1. Эпицентры и плоскости сбросов землетрясений 26 декабря 2004 (черные, тензоры центроидов согласно US Geological Survey (USGS)) и 28 марта 2005 г. (USGS). Желтые круги обозначают толчки, случившиеся в течение 10 дней после 26 декабря 2004. Красные круги обозначают толчки в течение 10 дней после землетрясения 28 марта 2005.

\* Для получения дополнительной информации обратитесь к: Satish Singh, главный научный координатор, Laboratoire de Géosciences Marines, CNRS-IPG Paris, 4 place Jussieu, 75005 Paris, France. E-mail: singh@ipgp.jussieu.fr.

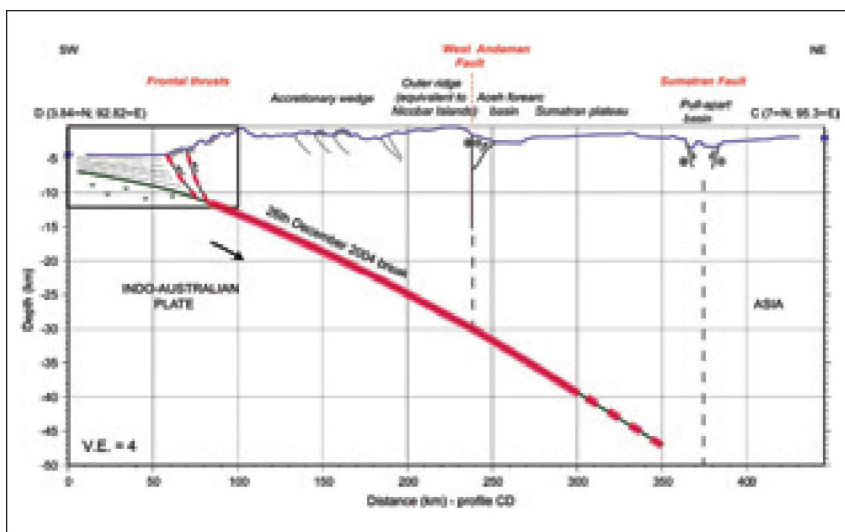


Рис. 2. Схематическое отображение поддвигания Индийской плиты под напользающую плиту и возможного появления разлома 26 декабря 2004 г.

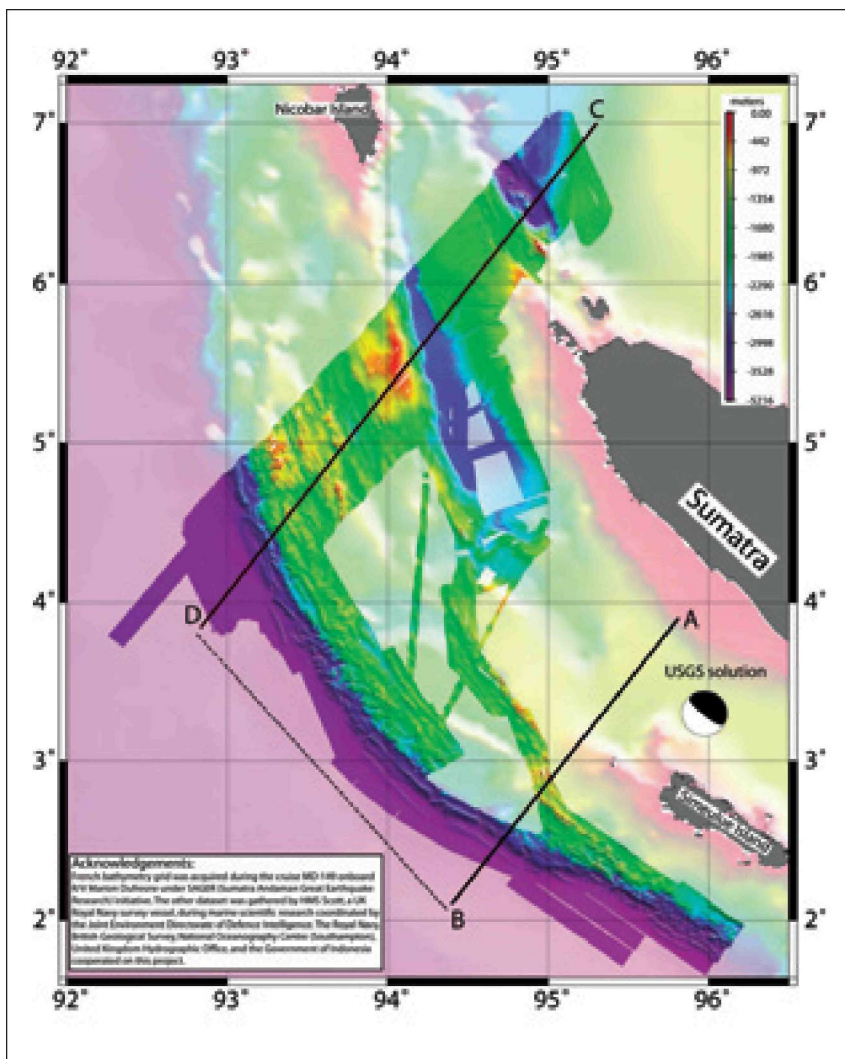


Рис. 3. Расположение глубоководных сейсмических линий съемки и недавно собранных батиметрических данных о морском дне. Линии были названы WG1 (AB), WG2 (CD), и WG3 (BD).

распространился по морскому дну вдоль одного или нескольких сдвигов в осадочной породе, скорее всего перед аккреционной призмой (Рис.2). Тем не менее, исследовательские суда позволяют изучение структур, находящихся на глубине не более 30 км под поверхностью. Распределение и геометрия этих разломов должны контролировать сдвиги морского дна и критические параметры для понимания механизма генерации цунами.

#### Научные цели:

Научные цели геофизических измерений заключаются в том, чтобы:

- Изучить разломы и поддвигающуюся плиту от поверхности до источника землетрясения (30 км) или глубже.
- Определить количество жидкости (воды), которое могло пройти через эти разломы.
- Изучить аномальные структуры, которые могли вызвать чрезвычайную силу землетрясения
- Соотнести эти данные с наблюдениями на малых глубинах, которые будут сняты в ближайшие несколько месяцев с академических судов (батиметрия и сейсморазведка с высоким разрешением, и наблюдения с подводных аппаратов).
- Предоставить анализ имеющихся данных проекту Бурения Океанского Дна

#### Сейсморазведка 2006

Для достижения научных целей, обозначенных выше, в июле-августе 2006 были проведены две глубоких сейсмических съемки – разведка методом отраженных волн с помощью судна Schlumberger/WesternGeco, *Geco Searcher*, и разведка методом преломленных волн с французского судна *Marion Dufresne*. Данные метода преломленных волн снимаются с приемников, расположенных на расстоянии 5-20 км. Сейсмографы (OBS) устанавливаются на дно океана вдоль длинных линий (100-400 км) и записывают сейсмическую энергию, проходящую через кору и верхнюю мантию. Так определяется скорость коры и верхней мантии.



С другой стороны, данные метода отраженных волн снимаются с буксируемой косы длиной 3-12 км, на которой на расстоянии 3-25 м расположены приемники, таким образом предоставляя сейсмическую картину коры, снятую с высоким разрешением как функцию времени прохождения вертикальных волн. Модель скоростей, полученная с помощью метода преломленных волн, может быть использована для построения изображения сейсмических отражений как функции глубины. Таким образом, методы преломленных и отраженных волн дополняют друг друга и являются ключевыми для разведки.

### Метод отраженных волн

*Geco Searcher* (Рис.4) покинуло Бали 13 июля для снятия данных методом отраженных волн вдоль линий WG1 и WG2 (Рис.3), а также по пути через Индийскую плиту – с линии WG3. Система сбора и обработки данных Q-Marine, принадлежащая Schlumberger/WesternGeco, позволяет снимать данные с широчайшей полосой пропускания в области сейсмических исследований. Тщательно настроенная воздушная пушка позволяла глубокое проникновение сейсмической энергии – до 50 км в глубину. Две косы, длиной 12 км и 5.5 км, буксировались на 15 м и 7.5 м, соответственно. Выстрелы производились через каждые 50 м, давая вертикальное разрешение в 6.25 м и вертикальное – от нескольких метров у дна до нескольких сотен метров на глубине 30 км. Съемка должна предоставить сейсмические изображения с непревзойденным качеством и разрешением. Линия WG1 (Рис.3) пересекает складку, на которой разрыв, образованный 26 декабря 2004, мог достигнуть поверхности, и Западно-Андаманский разлом, который мог вызвать распространение разрыва на север. Линия WG2 пересекает стык плит, бассейн Aceh, Западно-Андаманский разлом, Суматранский разлом, и вулканическую дугу, таким образом предоставляя разрез через Суматранскую субдукционную



**Рис. 4.** Судно Schlumberger/WesternGeco Geco Searcher проводит сейсмическую разведку методом отраженных волн, июль 2006.

**Рис. 5.** Исследовательское судно IPEV Marion Dufresne, использованное для



съемки методом преломленных волн.

систему (что невозможно дальше проводить в офисе WesternGeco в югу при использовании лишь Джакарте. Предварительные сейсмической съемки). Эта линия результаты содержат изображение также пересекает область, где 26 пододвигающейся плиты до 40-50 декабря 2004 г. произошел самый км в глубину, и указывают на то, что разрыв, случившийся 26

Предварительная обработка декабря 2004, мог достичь дна от данных была произведена на борту своего источника на глубине 30 *Geco Searcher*. Благодаря работе км. Разведка спонсируется исследователей еще до возвращения в Schlumberger/WesternGeco в порт были получены сотрудничестве с Агентством предварительные сейсмические Оценки и Приложения Технологии изображения подповерхностного (BPPT), министерством исследовании Индонезии, и IPG в Париже.

Эти результаты должны предоставить первое изображение зоны источника землетрясения (20-30 км) и указать на возможные пути передачи сдвига к дну. Затем эта информация может быть использована для аккуратного моделирования цунами. Эти результаты должны также помочь уменьшить ущерб от будущих землетрясений.

Метод преломленных волн *Marion Dufresne* (Рис.5) вышло из Джакарты в полночь 7 июля и прибыло на место исследования, к северо-западу от острова Симеулуе, утром 11 июля. На его борту находились 39 исследователей из Франции, Британии, Индии и Индонезии. Пятьдесят шесть донных сейсмографов (OBS) были установлены вдоль двух линий

(Рис.3). Из них 14 были предоставлены IFREMER, пять – Брестским Университетом (UBO), 20 – Парижским Институтом Физики Земного Шара (IPGP) и INSU, и 17 – британским университетом Durham (Рис.6). OBS, расположенные на морском дне с интервалом 4.5 км вдоль линии WG1 и 8.1 км – вдоль линии WG2, записывали сейсмические сигналы, созданные воздушной пушкой, буксируемой за судном в то время, пока оно двигалось вдоль линии со скоростью 5 узлов. Выстрелы производились с интервалом в 150 м. Длина линии WG1 – 255 км, а линии WG2 – 445 км.

По удачному совпадению OBS находились на дне, когда *Geco Searcher* собирал данные с линии WG2, так что приборы записали все выстрелы. Все OBS были удачно извлечены и качество полученных данных очень высоко. Вдоль большей части профилей легко увидеть прохождение сейсмических волн к поддвигающейся плите. Это должно позволить определить скоростное строение наподвигающей коры. Данные будут обработаны учеными из IPGP, IFREMER, UBO, и NOC. Изображения будут использованы для дальнейшей обработки данных (полученных во второй съемке) и изучения аномалий, повлиявших на масштабы землетрясения 26 декабря 2004. Проект, проведенный IPG Paris в сотрудничестве с IFREMER, Брестским Университетом и LIPI (Индонезийским Институтом Наук) был поддержан Французским Национальным Исследовательским Бюро (ANR). Французский Институт Polaire (IPEV) предоставил проекту судно *Marion Dufresne*, а также логистическую и техническую поддержку.

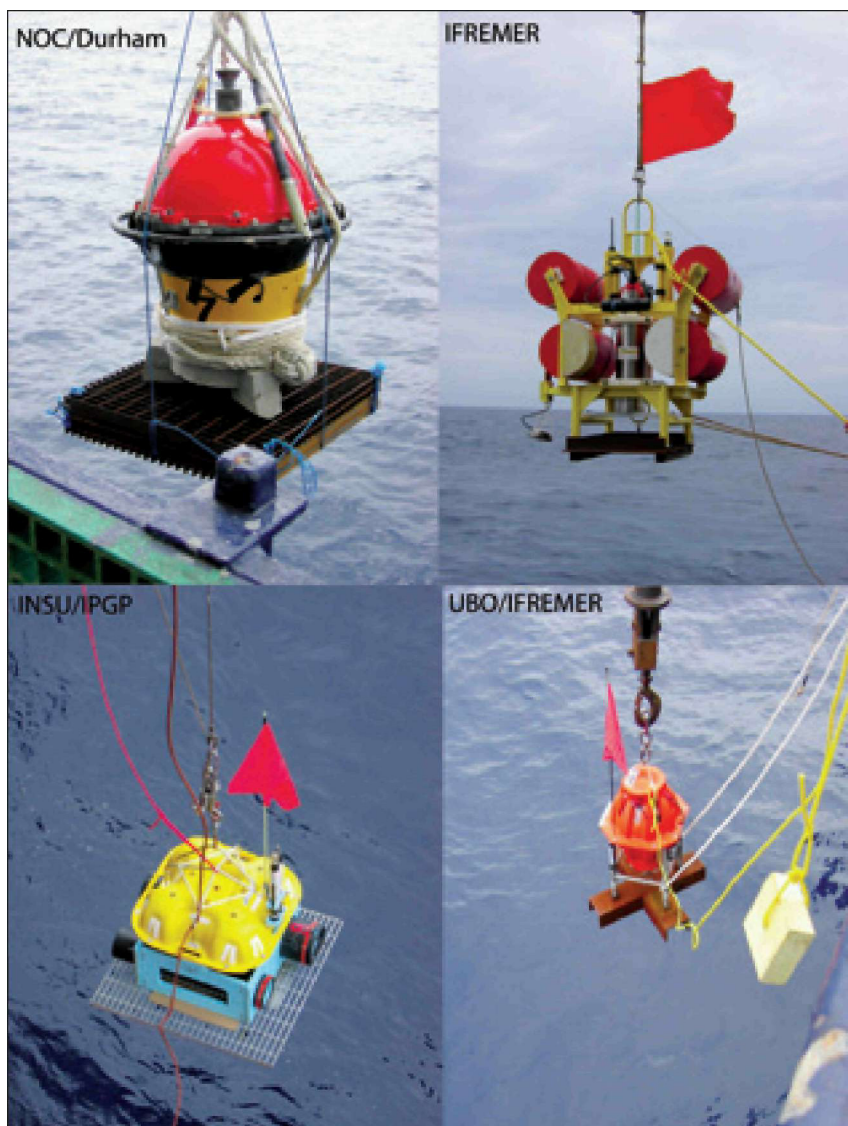


Рис. 6. Четыре разных типа OBS, использованных при сейсмической разведке у берегов Суматры