

## Землетрясение на Северной Суматре: 40 лет игнорирования теории глобальной тектоники плит

### Northern Sumatra earthquake: 40 years of ignoring plate tectonics

**Сразу после катастрофы 2004 г. в южной Азии, вызванной цунами, Артур Е. Берман (Arthur E. Berman), издатель периодического журнала Хьюстонского Геологического сообщества, директор PetroleumReports.com, написал свой отзыв на случившееся. Приводим сокращенную версию полного издания.**

Значение известково-щелочных толщ – таков был мой билет на промежуточном экзамене по петрологии в 1975 г. Наверное, это был самый каверзный вопрос, который мне когда-либо задавали как геологу. Это также единственный из всех экзаменационных вопросов, который я помню со студенческих лет.

После объявления результатов экзаменов я направился к профессору, доктору Руди Эпису (Rudy Epis), чтобы обсудить с ним мою низкую оценку. Я написал все, что знал о гранитных породах, слагающих известково-щелочные толщи, и все это было в точности верно. Единственное, что я не сделал – я не ответил на вопрос. Я ничего не написал об их значении. Я не обозначил проблему, связанную с гранитами.

Вообще, гранит – это светлая, относительно легкая порода, содержащая довольно много кварца. Геологическая среда (земная кора) в основном состоит из базальтов, противоположных по составу гранитам: темных, тяжелых пород, почти не содержащих кварца. Если же рассматривать всю Землю в целом, то гранит наоборот намного более распространен, особенно на континентах. Этот факт озадачивал ученых, начиная со времени зарождения геологии.

Эпис рассказал, что он пытался найти объяснение этой проблемы с точки зрения концепции тектоники литосферных плит. По существу, эта теория представляет Землю как огромный конвейер, на котором постоянно происходит циклическое поглощение океанической, базальтовой коры в зонах субдукции и генерирование гранитной коры, наподобие процесса перегонки.

Та дискуссия с доктором Эписом очень изменила мои взгляды. Я был ошеломлен его способностью мыслить и изумлен мощью научной концепции тектоники плит, когда такую сложную проблему он смог так просто объяснить. В отдельности я знал и про тектонику, и про гранитные породы. Но я просто не

додумался соединить их вместе так, как изящно это сделал он. Войдя в его кабинет, будучи студентом, беспокоящимся из-за оценки, я вышел от него уже, в определенной степени, геологом. Он заставил меня осознать, может быть, впервые, всю важность критического мышления. Я пообещал себе никогда больше не рассуждать о вопросе, не отвечая на него.

Я вспомнил о разговоре с Руди Эписом в начале декабря 2004 г., когда начал читать Симона Винчестера (Simon Winchester) "Кракатау - день, когда взорвался мир: 27 августа, 1883". Книга Симона Винчестера – популярное и занимательное объяснение теории тектоники плит в контексте с катастрофическим извержением вулкана, произошедшем в Индонезии 121 год назад. Извержение Кракатау сильнейшим образом повлияло на сознание людей викторианской эпохи, ведь благодаря изобретению телеграфа новость о взрыве мгновенно облетела весь мир.

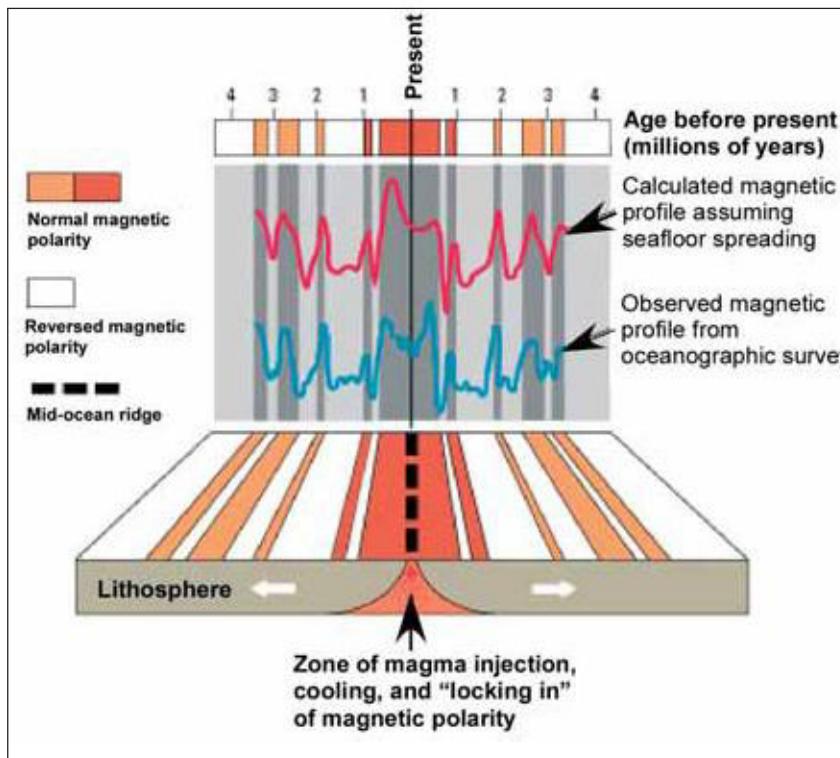
Очаг землетрясения, произошедшего на Северной Суматре 26 декабря 2004 г., находился в той же тектонической зоне, что и Кракатау. Мир был потрясен потерями людей и разрушениями, возникшими в результате землетрясения и последующего за ним цунами. Разница между событиями прошлого и настоящего в том, что сейчас, благодаря развитию модели тектоники плит, мы осознаем причины катастрофы; в 1883 г. геологи еще не были способны объяснить перепуганным людям взрыв Кракатау.

#### Тектоника плит и неспокойная Земля

Концепция тектоники плит не была нова в 1975 г., когда я изучал петрологию у Руди Эписа, но многими геологами она не воспринималась как нечто обязательное и доказанное: как и с большинством новых идей – для восприятия нового нужно время, пока ранние последователи смогут разобраться и принять нововведения (Берман (Berman), 2004).

Модель глобальной тектоники была впервые выдвинута в 1915 г. Альфредом Вегенером (Alfred Wegener), который опубликовал свои наблюдения о схожести очертаний континентов, разделенных современными океанами (по существу, этот факт был замечен еще в 1620 г. Фрэнсисом Бэконом (Francis Bacon)). Вегенер предложил свою теорию дрейфа континентов, согласно которой когда-то континенты были соединены между собой. Это было подтверждено многочисленными доказательствами из биологии. Гипотеза Вегенера была осмеяна научным сообществом, скорее всего, потому что тогда не было найдено механизма, по которому континенты могли двигаться вне зависимости от мантии и ядра Земли. Томас Чемберлен (Thomas Chamberlin), американский геолог, известный благодаря его методу множественных рабочих гипотез (*HGS Bulletin*, 47, №. 2), отказался от восприятия новой гипотезы, так прокомментировав в 1923 г. труды Вегенера: 'Если мы поверим в эту гипотезу, это означает, что мы должны забыть все, что мы узнали за последние 70 лет, и начать все сначала' (Winchester, 2003).

Гипотеза тектоники плит возродилась после Второй Мировой войны благодаря развитию измерительной техники и приборостроения в военное время. Новая модель Земли была развита и четко сформулирована в серии изданий Дица (Dietz) в 1961 г., Вильсона (Wilson) в 1965 и Кокса (Cox) и др. в 1967. Прорыв произошел в 1965 г., когда Брент Далримпл (Brent Dalrymple) представил результаты своих исследований на конференции Американского Геологического сообщества: он показал четкое соответствие между известными палеомагнитными измерениями на континентах и полосами перемагничивания на дне океанов, обнаруженными послевоенное время. Это доказало, что молодая океаническая кора непрерывно генерируется в срединно-оceanических хребтах. Как только магнитное поле Земли меняет полярность, что бывает раз в несколько миллионов лет, появляются магнитные минералы



**Рис. 1** Сравнение наблюденных и рассчитанных магнитных профилей океанического дна через восток Тихого океана (заимствовано у Каэса (Kious) и Тиллинга (Tilling), 1996).

с изменившейся намагниченностью. Это было настоящим открытием... и началом революции в науках о Земле! (Донненфилд (Donnenfield) и Хоуэл (Howell), 2004).

Концепция Вегенера была подтверждена: континенты действительно 'дрейфовали'. Оказалось, что земная кора делится на тектонические плиты, которые движутся вместе с континентами. Тектоника плит дала механизм, который объяснил то, что земная кора

может быть в постоянном движении, расходиться в одних местах и в то же время соединяться с мантей и ядром в других, что она непрерывно разрушается и генерируется.

С одного конца гигантского конвейера, в срединно-океанических хребтах, рождается новая океаническая кора, расширяя бассейны океанов. На другом конце этого конвейера, на краях тектонических плит, кора

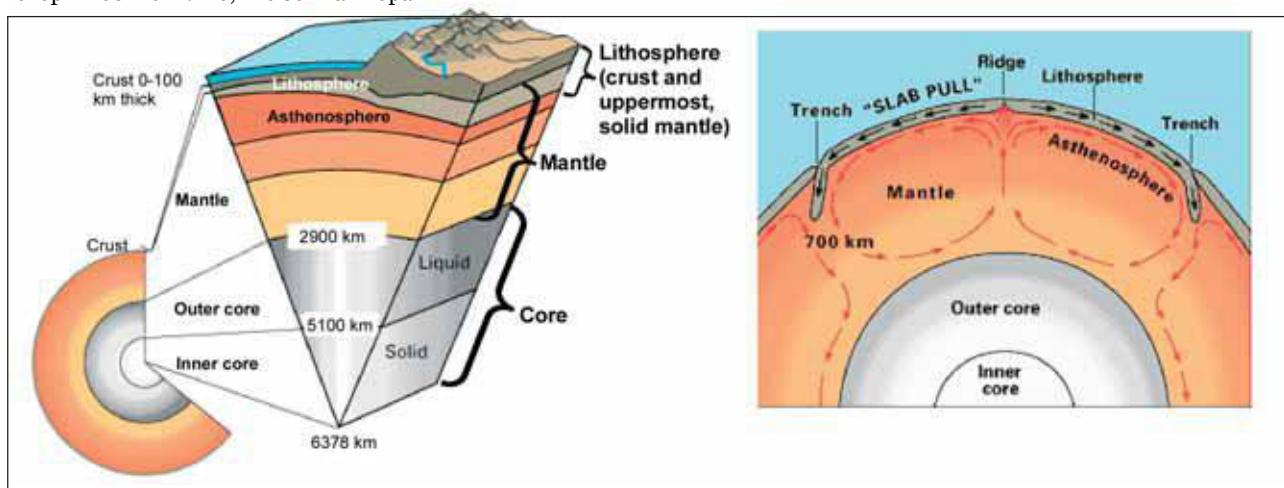
погружается в зоны субдукции. По мере погружения материал коры частично преобразуется в гранитный. С возрастанием глубины и давления кора нагревается, отчасти расплывается и, в сущности, перегоняется; наподобие очистки спирта от содержащегося в нем сусла, гранитный материал коры отделяется от базальтового. Когда расплавленные породы смешиваются с морской водой, вовлеченной в субдукцию, образуется насыщенный газом расплав, который может вызвать сильнейшие взрывы вулканов, таких как Кракатау или г. Св. Елены.

Это и было ответом на вопрос о значении известково-щелочных пород.

### Землетрясение на Северной Суматре в 2004 году

25 декабря в 18:58:53 по центральному стандартному времени (местное время в Индонезии 07:58:53, 26 декабря), произошло землетрясение, гипоцентр которого располагался на запад от Северной Суматры, Индонезия, ( $3.267^{\circ}$  с.ш./ $95.821^{\circ}$  в.д.), в 255 км на юго-запад от города Банда-Ачех. Землетрясение магнитудой 9.0 по шкале Рихтера, породило цунами со скоростью до 800 км/час (500 миль/час) по всей площади Индийского океана.

На побережьях Шри-Ланки, Индии, Бангладеша, Таиланда, Индонезии, Мальдивских островов и Малайзии высота волны набега (высота волны на сушу над уровнем моря) составила порядка 12.5 м и произвела гигантские разрушения. На момент написания статьи число погибших составило более 150000



**Рис. 2** Внутренняя структура Земли и модель конвективных ячеек мантии (заимствовано у Каэса (Kious) и Тиллинга (Tilling), 1996).

человек. Разрушительная сила цунами ощущалось даже на расстоянии 5000 км в Кении, на Кокосовых островах, Маврикии, Реюньоне, на Сейшельских островах и в Сомали - в этой стране погибло 120 человек. Цунами пересекло Тихий океан и было зарегистрировано в Новой Зеландии и вдоль западных побережий Северной и Южной Америки. По величине это четвертое в мире землетрясение, начиная с 1900 г. и самое сильное с 1964 г. после землетрясения в заливе Принс-Уильям-Саунд, Аляска.

По мере поступления новостей о землетрясении и цунами 26 декабря, было легко установить определенную категорию, в которую попадало землетрясение по модели тектоники плит. Я был поражен работой всемирной паутины: информация о случившемся поступала мгновенно, я мог тут же просматривать цифровое видео и фотографии разрушений на территории Индийского океана.

Эпицентр землетрясения, разломившего океанское дно неподалеку от Суматры на глубине порядка 1200 м, располагался на самом деле гораздо глубже – на глубине в 30 км. Он находился в прогибе океанского дна, в том месте, которое океанографы называют Зондским желобом. Здесь океаническая кора Австралийской и Индийской тектонических плит, располагающихся на юго-запад от желоба, сталкиваются с Индонезийской континентальной корой Евразийской плиты, лежащей северо-восточнее желоба. Непосредственно в пределах области землетрясения, плиты сходятся со скоростью примерно 6 см/год. Когда они сталкиваются, более тяжелая океаническая кора (базальтовая) "подныривает" под «легкую» континентальную (гранитную). Этот процесс в геологии называется субдукцией, что в переводе с латыни означает "увлекать под". Когда одна плита погружается под другую, накапливается напряжение, которое снимается при землетрясении. Зондский желоб является частью активной зоны землетрясений, окружающей Тихий океан, под названием "Огненное кольцо". Огненное кольцо включает такие сейсмические активные зоны, как Япония, Алеутские острова, западное побережье США вместе с территорией, окружающей г. Св. Елены на западе штата Вашингтон, разлом Сан-Андреас в Южной Калифорнии, а также Анды Южной Америки.

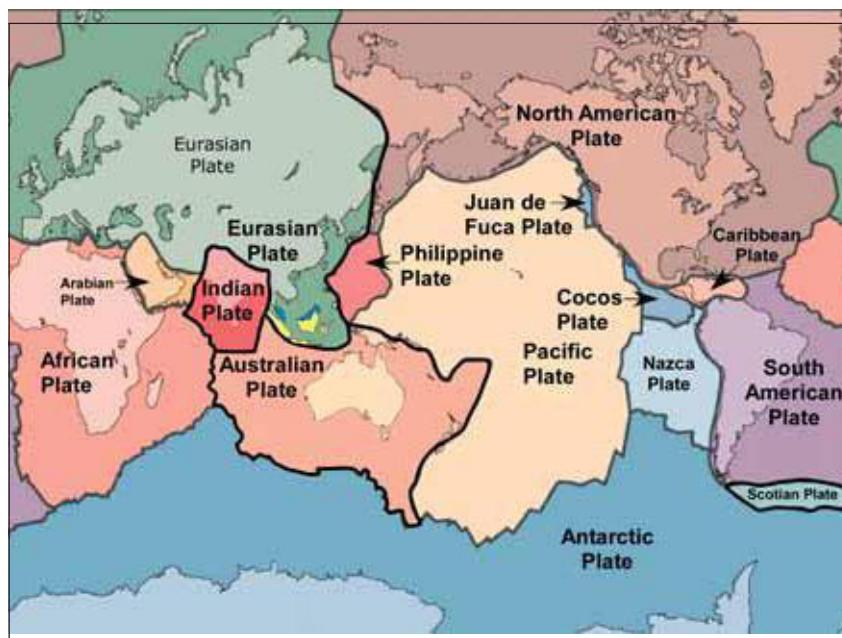


Рис. 3 Тектонические плиты Земли (заимствовано у Каэса (Kious) и Тиллинга (Tilling), 1996)

‘Примерное трассирование сильнейших автершоков, последовавших за землетрясением 2004г., показало, что в итоге произошло соскальзывание около 1200 км края плиты. По сравнению с сильнейшими толчками при других землетрясениях, ширина образовавшегося разлома оказалась равной примерно 100 км. Это все равно, что средний сдвиг плоскости разлома в 15 м. Поверхность морского дна, располагающаяся над разломом, в результате землетрясения должна подняться на несколько метров. Измерение смещения и размеров разлома завершился в ближайшем

будущем, как только будут обработаны волновые поля этого землетрясения.’ (Предварительный отчет по землетрясению, Геологическая служба США, 2004).

Само по себе землетрясение у Северной Суматры не имело прямых воздействий на людей, т.к. произошло в океане на довольно большом расстоянии от берегов. Именно последовавшее за ним цунами (япон. 'портовая волна') произвело беспрецедентные разрушения и вызвало гибель стольких людей по всему Индийскому

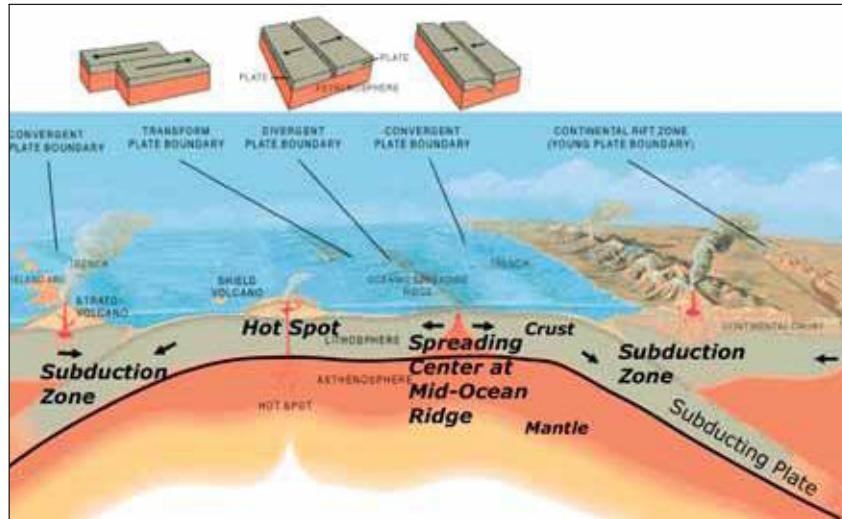


Рис. 4 Тектонические плиты и типы их границ (заимствовано у Каэса (Kious) и Тиллинга (Tilling), 1996).



Рис. 5 Эпицентр землетрясения 2004 г. у Северной Суматры и местоположение извержения Кракатау в 1883 г.

океану.

Цунами представляет собой пуг, или серию, огромных океанических волн, образовавшихся в океане из-за вертикального смещения толщи воды. В основном они порождаются в результате сильных подводных землетрясений или вулканических извержений. Иногда цунами ошибочно относят к приливной волне, но это не то же самое, т.к. не образуется за счет приливов.

При подводных землетрясениях над областью деформации происходит смещение толщи воды. Цунами

формируется, когда массы воды приходят в равновесие. Поднятие морского дна, в сущности, действует как гигантский генератор волн. Цунами имеют необычайно большие длины волн (расстояние между гребнями волн) в несколько сот метров и периоды (время, необходимое для пересечения следующей волной первоначальной позиции) порядка одного часа.

Цунами образуются в самом океане и преобразуются в путь катастрофических поверхностных морских волн, распространяющихся

вплоть до самого берега. Когда волновой фронт достигает берега мелководного континентального шельфа, трение о дно замедляет волну у ее основания. Таким образом, верхняя часть волны начинает двигаться быстрее, чем нижняя. Это происходит потому, что сопротивление трения о поднимающееся морское дно оказывает большее влияние на основание волны, чем на ее вершину. Более быстрый верхний гребень волны увеличивается и поднимается до тех пор, пока фронт волны остается более крутым по отношению к задней части, в результате волна как бы разбивается и обрушивается на берег. В случае цунами обрушающаяся волна может быть 15 м высотой и 20-30 м от фронта до заднего края. Сила этой гигантской волны сравнима больше с обвалом массивных камней, чем с падением воды.

Во время землетрясения у Северной Суматры в глубине океана образовались волны высотой от 30 до 60 см, которые двигались со скоростью порядка 600-800 км/ч, что равно скорости реактивного самолета (Национальный институт океанографии, Индия, 2004). Когда цунами достигло мелководного шельфа, его скорость упала до нескольких десятков км/ч. К тому времени, когда оно обрушилось на берег, его высота была уже от 4 до 12 м, хотя есть неподтвержденные данные о больших амплитудах волн.

Предварительные результаты, полученные в Национальном Центре по землетрясениям Геологической Службы США (USGS) говорят о величине сдвига порядка 15 м вдоль сегмента тектонической плиты в 1200 км по линии Зондского желоба (предварительный отчет USGS о землетрясении, 2004). Это означает мгновенное смещение 18 млн. м<sup>3</sup> морской воды (около 4 млрд. галлонов): это эквивалентно 5000 бассейнов олимпийского размера или 113217000 брл. нефти, что есть запасы гигантского месторождения, и все это в один момент обрушилось на берега южной Азии! Для сравнения, разлив нефти в г. Валдиз в 1989 г. составил порядка 1,25 млн. брл.

В сильнейшие землетрясения истории вошли также: 1) Чилийское, магнитудой 9,5 в 1960 г.; 2) Аляскинское 1964 г. в заливе Принс-Уильям-Саунд магнитудой 9,2; 3) Аляскинское землетрясение на Андреяновских островах в 1957 г. магнитудой 9,1; 4) Камчатское 1952 г. магнитудой 9,0 (USGS, 2004).

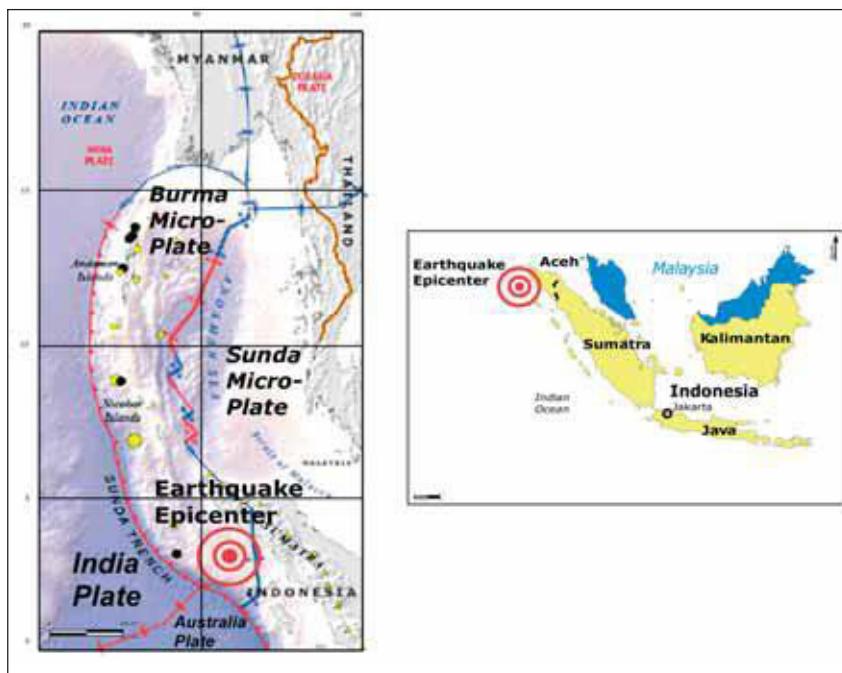


Рис. 6 Тектоническая обстановка при землетрясении у Северной Суматры (заимствовано у Каэса (Kious) и Тиллинга (Tilling), 1996).

## Всемирная паутина

Огромное количество людей по всему миру мгновенно узнало из Интернета о страшных разрушениях, последовавших за землетрясением у Северной Суматры в 2004 г. Новость об извержении Кракатау в 1883 г. тоже быстро облетела весь мир посредством телеграфа.

В 1825 г. британский изобретатель Уильям Стерджен (William Sturgeon) открыл электромагнит, а 5 лет спустя американец Джозеф Генри (Joseph Henry) смог пропустить по проводу длиной в 1 милю электрический ток, который привел в действие электромагнит и тем самым заставил работать электрический звонок. В 1835 г. Самюэл Морзе (Samuel Morse) использовал импульсы тока для отключения электромагнита, который сдвигал маркировочный инструмент и позволял записывать сигналы на бумаге – изобретение получило название азбуки Морзе (Bellis, 2004). В 1844 г. Морзе успешно посыпал электронное сообщение из Вашингтона, округ Коламбия, в Балтимор, Мэриленд – ‘Чудны дела твои, Господи! – которое стало первым двоичным кодом, обошедшими весь мир.

В том же 1844 году телеграфная связь соединила противоположные границы США – побережья Атлантического и Тихого океанов. Большинство американцев узнало об окончании Гражданской войны уже через два часа после капитуляции

Юга в Аппоматоксе. Для сравнения, Эндрю Джексон начал сражение за Новый Орлеан в 1812 г. через 20 дней после подписания мирного договора об окончании войны.

В первой половине 19 века приборы, использующие электричество, только начинали свое развитие. Надежных источников электричества еще не было создано. Гальванический элемент мог генерировать электричество только на короткое время, пока накопленный водород на его медном электроде не заблокировал бы электрический ток. Так было до изобретения гальванического элемента Даниеля в 1836 г. – той самой аккумуляторной батарейки, которая много лет спустя стала широкодоступным источником электричества (Кац (Katz), 2004).

Аккумуляторные батареи, отмечает Билл Бернс, эксперт по истории телеграфа, ‘использовались в ранних кабельных сетях за неимением иной альтернативы. Эффективные генераторы (динамомашины) были изобретены только в 1870-х гг., но даже после этого аккумуляторы использовались в сетях

благодаря своей безотказности’.

Телеграф стал первым изобретением, использующим электричество в коммерческих целях. До него не было случаев передачи электричества на большие расстояния, тем более под водой. Теории распространения электрического сигнала и электрических проводников в 1840-х гг., когда были проложены первые телеграфные линии, были еще на совсем примитивном уровне. Подводные кабели требовали соответствующих показателей электропроводности, совершенствований в медной металлургии, развития гуттаперчевой изоляции (интересно, что она была открыта на Малайском архипелаге) и новых технологий бронирования кабеля (Бернс (Burns), 2004).

Подводные телеграфные кабели положили начало глобальной сети связи радиоэлектронными средствами. В 1851 г. был успешно проложен первый телеграфный кабель из Дувра, Англия, в Кале, Франция. А 1866 год ознаменован первой трансатлантической телеграфной линией связи из

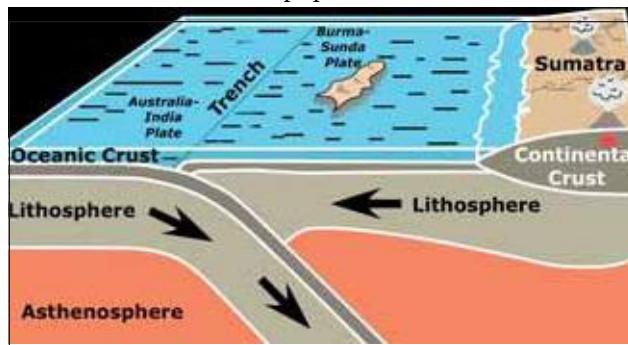


Рис. 8 Тектоническая модель землетрясения у Северной Суматры (заимствовано у Каэса (Kious) и Тиллинга (Tilling), 1996).



Рис. 7 Тектоническая обстановка северо-запада Индийского океана (заимствовано у Каэса (Kious) и Тиллинга (Tilling), 1996).

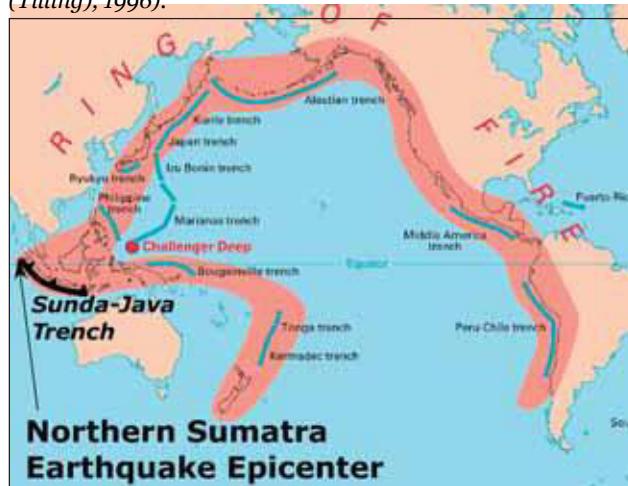


Рис. 9 Огненное кольцо, зона частых землетрясений и извержений, заимствовано у Каэса (Kious) и Тиллинга (Tilling), 1996.

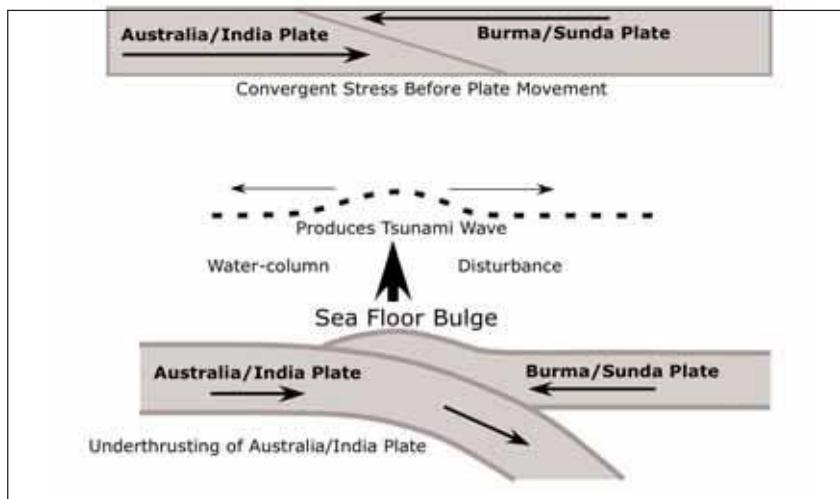


Рис. 10 Сейсмическая модель образования цунами.

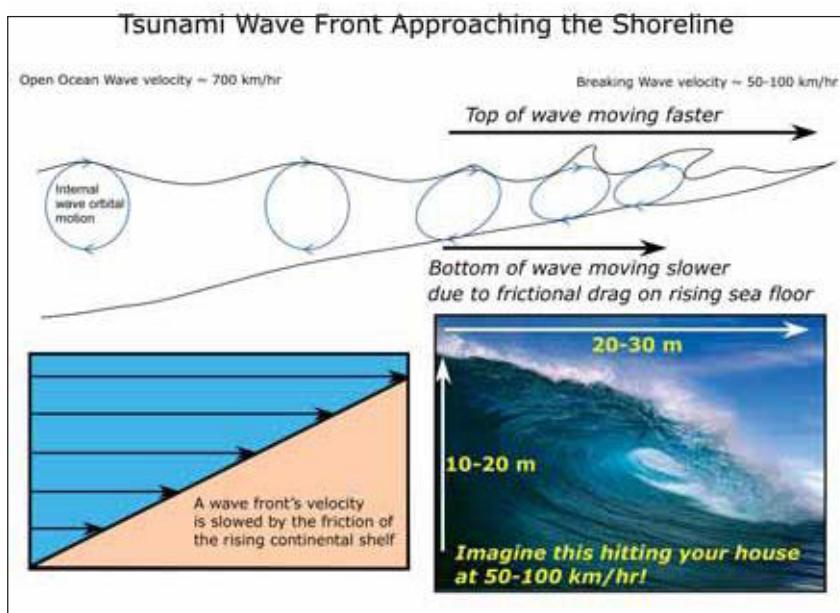


Рис. 11 Развитие цунами при приближении к берегу.

Ирландии в Ньюфаундленд (Бернс (Burns), 2004). За этот 15-летний период телеграфное сообщение эволюционировало от внутригосударственных наземных систем линий связи до подводных сетей, соединяющих большую часть Земного шара.

Дэвид Дадли Фильд (David Dudley Field) в 1879 г., во время 25-ой годовщины заключения его компанией договора о прокладывании трансатлантического кабеля, говорил:

‘Хотя впоследствии мы частично узнали, чем мы занимались, но нам было известно далеко не все. Действительность превзошла все ожидания. Я никак не мог

предположить, что всего через 20 лет, смотря на созвездие Южного Креста, я буду посыпать из Австралии сообщение к себе домой на север, которое, пока я стою, обогнет половину Земного шара, пролетев со скоростью мысли через 2000 миль австралийской пустыни и Арафурское море (между Австралией и Индонезией), минуя острова Тернате и Тидоре (Индонезия), через Бенгальский залив (Индия) и Аравийское море, вдоль побережья Красного, по дну Средиземного моря и неугомонного Бискайского залива, и, в конце концов, через весь наш Атлантический океан прямо к тому самому городу на островах (Нью-Йорк)’ (Спрайг (Sprague), 1884).

## Извержение Кракатау, август 1883

Те же телеграфные сети, которые упоминает Фильд в 1879 г.,

через 4 года почти мгновенно оповестили весь мир об извержении Кракатау. Бостонские газеты в течение всего 4 часов выпустили материал о случившемся (Brianstorms, 2004). Это был первый в истории случай, когда новость о катастрофе одновременно распространялась по всему миру и, в некоторой степени, стала всеобщим глобальным испытанием.

27 августа 1883 г. вулканическое извержение стерло с лица Земли остров Кракатау, находящийся в Зондском проливе между Явой и Суматрой, став самым сильным в современной истории взрывом, в 30 раз превосходящим по мощности термоядерные бомбы. Удар был слышен в Австралии и Мьянме, т.е. в тысячах км от самого Кракатау. Пепел и распыленные породы, выброшенные в воздух, еще целый год вращались в атмосфере Земли, на несколько лет нарушив погоду по всей планете. 40-метровые цунами затопили не менее 100 деревень по обоим берегам Зондского залива. Погибло порядка 37000 человек (предполагается, что смертельные потери могли быть занижены, т.к. основывались в основном на последствиях цунами и не учитывали данные по побережью всего Индийского океана). До недавнего времени на склоне горы острова Ява, в 4 км от берега, можно было увидеть заржавевший голландский военный корабль, который был отнесен туда цунами, образовавшимся после взрыва Кракатау (Лекис (Lekic), 2004).

В 1884 г. в Лондоне был основан Специальный комитет Королевского общества, целью которого было найти какие-либо объяснения извержения Кракатау и задокументировать его.

Заключительный отчет комитета был издан в 1888 г. и содержал около 500 страниц с расчетами давления и измерениями тока, позволявшими вычислить скорость цунами, последовавшего за извержением: около 1125 км/ч (700 миль/ч), что равно скорости звука. Остров Кракатау уменьшился примерно на 25 км<sup>3</sup>, которые либо были развеяны в воздухе, либо отнесены в океан (Винчестер (Winchester), 2003). Большая доля доклада была посвящена описанию необычных закатов и пемзовых вулканических выбросов, наблюдавшихся по всему Тихому и Индийскому океану. Но причины извержения так и не были выяснены Королевским обществом.

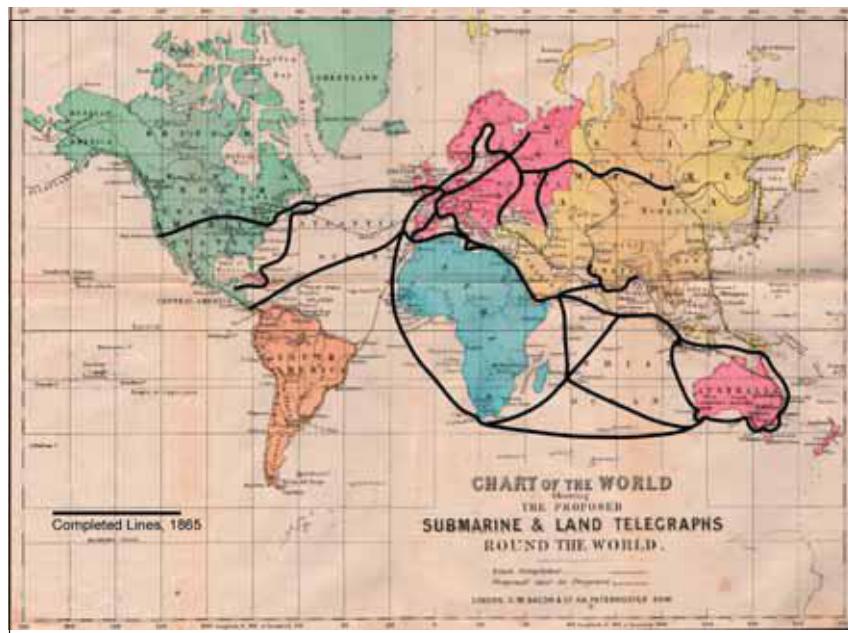
## 40 лет игнорирования теории глобальной тектоники

Теория тектоники плит позволяет нам сейчас понять то, о чем не догадалось Королевское общество. Кракатау находился в той области, где Австралийская и Индийская плиты погружаются под Евразийскую в ее Зондской и Бирманской частях. По сути, во всех отношениях, кроме магнитуды, извержение Кракатау было типичным для зоны субдукции: интенсивным, взрывным, гранитным по составу, склонным к выбросу пепла, пемзы и грязевого материала в большей степени, чем лавы. Кракатау входил в цепь вулканов, которая включает острова Суматру и Яву. 94% действующих на сегодняшний день вулканов сконцентрировано вдоль зон субдукции, а в Индонезии их больше, чем где-либо еще на Земле; на одной только Яве находится 21 активный вулкан (Winchester, 2003).

На протяжении десятилетий после извержения остров, первоначально имевший высоту 825 м, оставался маленьким островком, который был назван Раката. Однако в 1930 г. начал подниматься из океана новый вулканический конус – Анак Кракатау, или Дитя Кракатау. Сейчас он вырастает каждый год на 2 м и уже достиг высоты в 410 м (Лекис (Lekic), 2004). Активная работа субдукции мгновенно заливает последствия мощного взрыва.

Землетрясения 2004 г. на Северной Суматре и 1883 г. на острове Кракатау геологически взаимосвязаны, т.к. относятся к одной зоне субдукции. Они схожи и в том, что информация о них распространилась по миру практически мгновенно. Новость об извержении Кракатау обошла мир благодаря телеграфу. Известие о землетрясении и цунами на Суматре стоит в ряду многочисленных катастроф или кризисов, о которых человечество узнало посредством современных телекоммуникаций и Интернета: это, помимо природных бедствий, военные действия, этнические чистки, террористические атаки и эпидемии ВИЧ/СПИД.

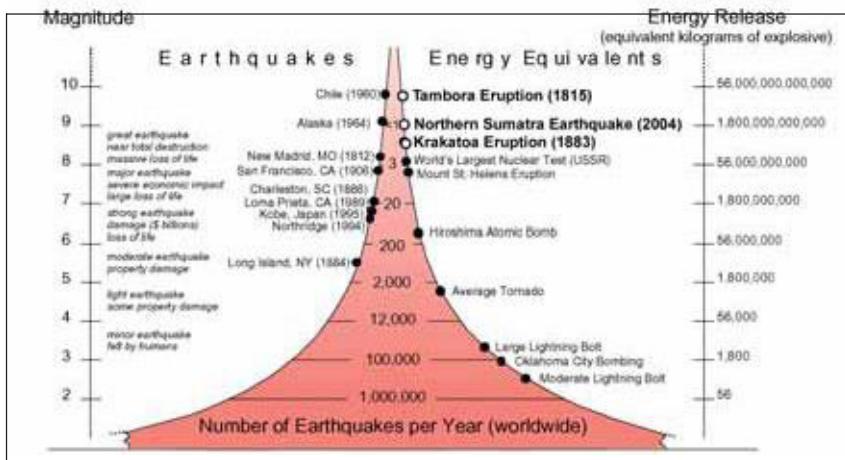
Успехи в понимании причин землетрясений и извержений и расширении коммуникации едва ли помогли сделать что-то для снижения трагических последствий



**Рис. 12** Карта мира 1865 г. с предполагаемыми наземными и подводными линиями телеграфа, подчеркивающая наличие связи между Дальним Востоком и Северной Америкой. С разрешения сайта [atlantic-cable.com](http://atlantic-cable.com).

VEI	Description	Plume Height	Volume	Classification	How often	Example
0 non-explosive		<100 m	1000s m <sup>3</sup>	Hawaiian	daily	Kilauea
1 gentle		100-1000 m	10,000s m <sup>3</sup>	Haw/Strombolian	daily	Stromboli
2 explosive		1-5 km	1,000,000s m <sup>3</sup>	Strom/Vulcanian	weekly	Galeras, 1992
3 severe		3-15 km	10,000,000s m <sup>3</sup>	Vulcanian	yearly	Ruiz, 1985
4 cataclysmic		10-25 km	100,000,000s m <sup>3</sup>	Vulc/Plinian	10's of years	Galunggung, 1982
5 paroxysmal		>25 km	1 km <sup>3</sup>	Plinian	100's of years	St. Helens, 1981
6 colossal		>25 km	10s km <sup>3</sup>	Plin/Ultra-Plinian	100's of years	Krakatau, 1883
7 super-colossal		>25 km	100s km <sup>3</sup>	Ultra-Plinian	1000's of years	Tambora, 1815
8 mega-colossal		>25 km	1,000s km <sup>3</sup>	Ultra-Plinian	10,000's of years	Yellowstone, 2 Ma

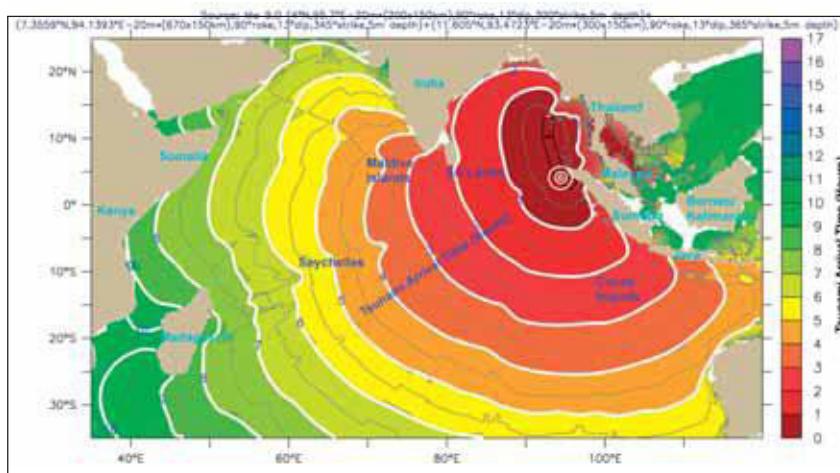
**Таблица 1** Шкала интенсивности землетрясений (VEI), Университет Северной Дакоты, [http://volcano.und.nodak.edu/vwdocs/eruption\\_scale.html](http://volcano.und.nodak.edu/vwdocs/eruption_scale.html)



**Рис. 13** Магнитуды землетрясений, Объединенный научно-исследовательский институт сейсмологии, Вашингтон, округ Коламбия, <http://www.iris.edu/edu/onpagers/p03.pdf>

таких катастроф. В декабре 2004 г. цунами достигло берегов Суматры примерно через полчаса после землетрясения, и известно, по меньшей мере, о 8000 погибших на

этом острове; до Шри-Ланки волна дошла в течение двух часов, там погибло 27000 человек; Таиланд она настигла через час и убила около 2400 человек; Индию - через 2 часа, там



**Рис. 14** Землетрясения 1975-2002 гг. в Индонезии магнитудой 7.0 и более, Эдинбургский университет предсказания землетрясений и аналитический сайт [http://tsunami.geo.ed.ac.uk/local-bin/quakes/mapscript/front\\_page.pl](http://tsunami.geo.ed.ac.uk/local-bin/quakes/mapscript/front_page.pl)

Date	Time	Latitude	Longitude	Magnitude	Location	Aftershocks
1st October 1975	3:29	4.88S	102.19E	7	Southern Sumatra, Indonesia	21
20th June 1976	20:53	3.39N	96.31E	7	Northern Sumatra, Indonesia	46
19th August 1977	6:08	11.08S	118.46E	7.9	South of Sumbawa, Indonesia	176
17th November 1984	6:49	0.19N	98.02E	7.2	Northern Sumatra, Indonesia	11
15th February 1994	17:07	4.96S	104.30E	7	Southern Sumatra, Indonesia	12
2nd June 1994	18:17	10.47S	112.83E	7.2	South of Java, Indonesia	167
1st January 1996	8:05	0.72N	119.93E	7.6	Minahassa Peninsula, Sulawesi	123
4th June 2000	16:28	4.72S	102.08E	8	Southern Sumatra, Indonesia	543
18th June 2000	14:44	13.80S	97.45E	7.8	South Indian Ocean	23
2nd November 2002	1:26	2.82N	96.08E	7.6	Northern Sumatra, Indonesia	63

**Таблица 2** Землетрясения 1975-2002 гг. в Индонезии магнитудой 7 и более, Эдинбургский университет предсказания землетрясений и аналитический сайт [http://tsunami.geo.ed.ac.uk/local-bin/quakes/mapscript/front\\_page.pl](http://tsunami.geo.ed.ac.uk/local-bin/quakes/mapscript/front_page.pl)

погибло 7400 жителей; на Сейшельы и Сомали она обрушилась через 7 часов, и там ее жертвами стали 117 человек.

Некоторые скажут, что достижения науки и техники в геологии не принесли никакой пользы, т.к. катастрофы вроде землетрясения на Суматре, до сих пор не могут быть предсказанны и предотвращены. Тот факт, что землетрясение может происходить только в определенной тектонической области, а фотографии и информация о нем могут мгновенно распространяться, никак не помогают человечеству.

Данные о магнитуде и эпицентре землетрясения на Северной Суматре в момент толчка были зарегистрированы, по крайней мере, на 128 сейсмостанциях по всему миру. Несколько из них располагаются на самой Суматре, часть в Таиланде, Шри-Ланке и Индии. Среди сейсмологов считается, что цунами всегда порождается при землетрясениях магнитудой свыше 8.0, а иногда они бывают и при 6.5.

Не требуется никакого сложного моделирования, чтобы быстро начертить карту распространения волн от эпицентра, зная скорости из многочисленных данных прошлых подземных толчков (включающих время вступления волн, зарегистрированных при взрыве Кракатау!).

Тектоника литосферных плит четко определяет зоны субдукции вроде Индонезийского Малайского архипелага как области частых землетрясений. В Индонезии происходит наибольшее число землетрясений и извержений, чем где-либо еще на планете. С 1975 по 2002 гг. там произошло 10 подземных толчков магнитудой более 7.0. Извержение еще более мощное, чем Кракатау, произошло в Индонезии в 1815 г. Вулкан под названием Тамбора выбросил в атмосферу столько пепла, что средняя температура на Земле понизилась на 1°C на целых 3 года (Winchester, 2003)!

В 2004 г. помимо упомянутого на Северной Суматре, в Зондской зоне субдукции произошло еще четыре землетрясения магнитудой от 7.0! Не основываясь ни на чем, кроме статистики, можно предположить, что особо масштабные землетрясения случаются в этом регионе раз в 75 лет. Т.к. после Кракатау не было таких глобальных землетрясений в течение 121 года, регион был перенапряжен. С привлечением данных 2004 г. цикл может измениться до 60 лет.

Планы предотвращения последствий цунами должны входить в обеспечение национальной безопасности каждой страны на побережье Индийского океана. История наук показывает, что изобретения и открытия сами по себе не могут быть предсказаны. Неизвестно, когда наука окажется способной точно прогнозировать землетрясения и цунами, связанные с ними. Тем не менее, мы достигли значительных успехов в истолковании происходящих процессов на Земле с точки зрения тектоники плит, и можем с определенной точностью утверждать, где могут быть землетрясения и какой силы.

*Подготовлено к печати в First Break с разрешения автора. EAGE не во всех случаях придерживается высказанный в статье точки зрения автора.*

## Благодарности

Благодарю Эндрю Палхема (Andrew Pulham), Тома Филдкампа (Tom Feldkamp), Джошуа Розенфельда (Joshua Rosenfeld) и Фрэнка Уолса (Frank Walles) за их содержательные комментарии и предложения по подготовке этой статьи. Спасибо также Эльзе Кэпитан-Вайт (Elsa Kapitan-White), Джеймсу Раксдэль (James Ragsdale) и Чарльзу Ревилля (Charles Revilla) за помощь в редакции.

## Литература

- Bellis, M. [2004] The history of the telegraph and telegraphy, About, Inc. <http://inventors.about.com/library/inventors/bltelegraph.htm>.
- Berman, A. E. [2004] New ideas and their diffusion: Houston Geological Society Bulletin, 47, 4, 9-17.

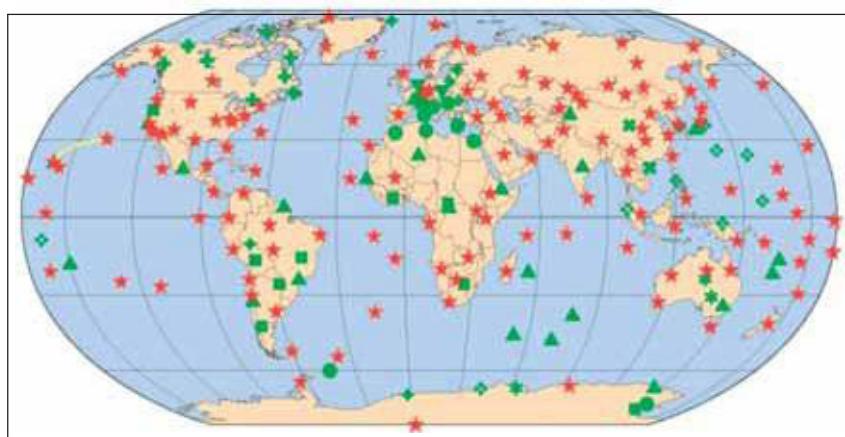


Рис. 15 Глобальная сеть сейсмостанций, согласно Объединенному научно-исследовательскому институту сейсмологии, <http://www.iris.edu/about/GSN/>

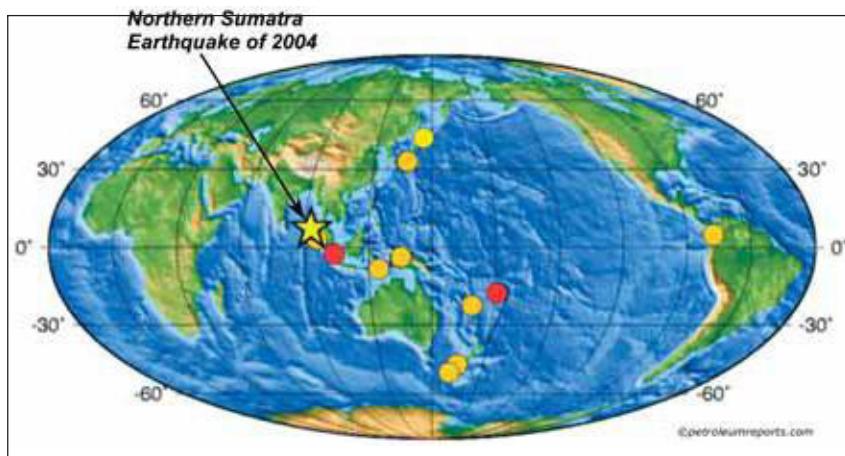


Рис. 16 Локализация землетрясений с магнитудой более 7.0 за 2001 год. Информационный Центр по землетрясениям, Геологическая служба США.

Boekelheide, Z. [2003] Modeling breaking waves: Scientific Computing, *Harvey Mudd College Math 164 Student Projects*, [http://www.math.hmc.edu/~depillis/MATH164/MATH164\\_Student\\_Projects\\_2003/ZOEB/ModelingBreaking-Waves.ppt](http://www.math.hmc.edu/~depillis/MATH164/MATH164_Student_Projects_2003/ZOEB/ModelingBreaking-Waves.ppt).

Brianstorms [2004] Birdrock Ventures. [www.brianstorms.com/archives/2004\\_04.html](http://www.brianstorms.com/archives/2004_04.html).

Burns, B. [2004] History of the Atlantic cable and submarine telegraphy: from the first submarine cable of 1850 to the worldwide fiber optic network. *Atlantic Cable Web*. <http://atlantic-cable.com/>.

Colp, R. [1998] To Be an Invalid, Redux. *Journal of the History of Biology*, **31**, 211-240.

Cox, A., Darymple, G.B., and R.R. Doell. [1967] Reversals of the Earth's Magnetic Field. *Scientific American*, **216**, 44-54.

Dietz, R.S. [1961] Continent and ocean basin evolution by spreading of the sea floor. *Nature*, **190**, 30-41.

Donnenfield, D. and Howell, D. [2004] The birth of plate tectonics theory. *USGS*. [www.usgs.gov/125/articles/plate\\_tectonics.html](http://www.usgs.gov/125/articles/plate_tectonics.html).

Global Seismographic Network (GSN) [2004] Incorporated Research Institutions for Seismology, Washington, DC. [www.iris.edu/about/GSN/](http://www.iris.edu/about/GSN/).

Incorporated Research Institutions for Seismology [2004] *How often do earthquakes occur?* [www.iris.edu/onepagers/no3.pdf](http://www.iris.edu/onepagers/no3.pdf).

Katz, E. and Daniell, J.F., [2004] *Biographies of Famous Electrochemists and Physicists Contributed to Understanding of Electricity*, [www.geocities.com/bioelectrochemistry/daniell.htm](http://www.geocities.com/bioelectrochemistry/daniell.htm).

Keillor, G. [2004] *The Writer's Almanac*. Monday, 27 December, *American Public Media*. <http://writersalmanac.publicradio.org/> Kent School District [2000] *The Physics Behind the Wave*. Kent, WA, USA.

<http://www.kent.k12.wa.us/staff/Tom-Robinson/physicspages/po2000/jenkcrash.htm>.

Kious, W. J. and Tilling, R.I. [1996] *This Dynamic Earth: the Story of Plate Tectonics*. *USGS*.

Lekic, S. Krakatoa Draws Tourists. *Associated Press*, Myrtle BeachOnline.com, [www.kansascity.com/mld/myrtlebeachonline/news/columnists/issac\\_baley/8677345.htm?1c](http://www.kansascity.com/mld/myrtlebeachonline/news/columnists/issac_baley/8677345.htm?1c).

Morus, I. R. [2004] Electricity on show, spectacular events in Victorian London. *Fathom Online Learning*, Columbia University.

<http://www.fathom.com/course/2170171/3/session3.html>.

Princeton University [1999] How a wave forms and moves. *Science Curriculum Support Project*. [www.princeton.edu/~pcpm/outreach/scsp/water\\_on\\_earth/waves/waves.htm](http://www.princeton.edu/~pcpm/outreach/scsp/water_on_earth/waves/waves.htm).

University of Edinburgh Earthquake Prediction & Analysis Site, [http://tsunami.geo.ed.ac.uk/local-bin/quakes/map-script/front\\_page.pl](http://tsunami.geo.ed.ac.uk/local-bin/quakes/map-script/front_page.pl).

Sprague, A. P. [1884] *Speeches, arguments, and miscellaneous papers of David Dudley Field*. D. Appleton and Company, New York.

USGS [2004] Preliminary Earthquake Report, Magnitude 9.0 off west coast of north- ern Sumatra, Sunday, December 26, 2004 at 00:58:49 UTC. *National Earthquake Information Center*, World Data Center for Seismology, Denver, <http://earthquake.usgs.gov/eqinthenews/2004/usslav/>.

USGS [1999] *Understanding plate motions*. <http://pubs.usgs.gov/publications/text/understanding.html>.

National Institute of Oceanography, India (Goa) [2004] *Understanding the seas*. [www.nio.org/jsp/tsunami.jsp](http://www.nio.org/jsp/tsunami.jsp).

Wilson, T. [1965] A new class of faults and their bearing on continental drift. *Nature*, **207**, 343-347.

Winchester, S. [2003] *Krakatoa*. HarperCollins Publishers, New York.