

**Российская академия наук
Сибирское отделение**

Регистрационный номер 01201260206

**Геодинамическое, гидродинамическое и
вычислительное моделирование в задачах
оценки цунами-риска для побережья России**

*Промежуточный информационный отчет
по Междисциплинарному интеграционному проекту №117
фундаментальных исследований на стыке наук*

Координатор проекта:

д.ф.-м.н. _____ В.К. Гусяков

Ученый секретарь проекта

к.ф.-м.н. _____ С.А. Бейзель

Институты – исполнители:

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН

Институт вычислительных технологий СО РАН

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН

Новосибирск – 2012

Заявленные на 2012 год цели проекта включали в себя:

Сбор сейсмологического материала, анализ каталогов землетрясений для определения уровня их представительности. Анализ развития глобальных активизаций сейсмического процесса. Сбор, обработка и анализ наблюдаемых данных о высотах трансокеанских цунами в ближней и дальней зонах. Интерпретация проведенных ранее результатов вычислительных экспериментов, формирование наборов входных данных и оптимальных наборов параметров вычислительных алгоритмов и программ. Построение гиперболических моделей второго приближения теории мелкой воды.

Основные результаты, полученные в 2012 году.

Блок геодинамического анализа и моделирования (ИВМиМГ СО РАН, ИНГГ СО РАН)

По направлению выделения и анализа глобальных активизаций основное внимание в отчетном году было уделено сопоставлению времени и места появления таких явлений со случаями возникновения мегаземлетрясений (с магнитудой $M_w = 9.0$ и выше). По результатам анализа сейсмологических каталогов за последние 100 с лишним лет выделяются: (1) – активизация конца XIX – начала XX веков, (2) – середины XX века и (3) – конца XX – начала XXI веков (Djadkov et al., 2005). Продолжительность одной активизации составляет приблизительно 20 – 30 лет. Начало активизаций пространственно связывается с западно-тихоокеанским поясом субдукции.

Выполненный на первом этапе анализ развития этих активизаций и сопоставление со случаями мегаземлетрясений (Рисунок 1, Рисунок 2) приводят к следующим выводам:

- Мега-землетрясения приурочены, в основном, к средней или завершающей стадиям глобальной активизации;
- Во время активизации конца XIX – начала XX веков произошло около десяти сильнейших землетрясений с $M \sim 8.6 - 8.7$, но события с $M = 9$ и большими магнитудами не регистрировались; во время активизации середины XX века произошли 3 мега-события с $M \sim 9 - 9.5$: (1) $M = 9$ (1952 г., Камчатка),

(2) $M = 9.5$ (1960 г., Чили) и (3) $M = 9.4$ (1964 г., Аляска), а также 3 землетрясения с $M \sim 8.5 - 8.7$.

Во время текущей активизации (конец XX – начало XXI веков) произошли 3 мега-землетрясения: (1) $M = 9.1$ (2004 г., Суматра), (2) $M = 8.8$ (2010 г., Чили) и (3) $M = 9.0$ (2011, Тохоку, Япония), а также еще 3 события с $M \sim 8.5 - 8.6$ (по данным Global Significant Catalog).

- Глобальные активизации ярко проявляются в основных сейсмоактивных зонах: в первую очередь в Тихоокеанских зонах субдукции, в районе Зондской дуги, в зоне Индо-Евразийской коллизии. Однако выполненный анализ отмечает отсутствие активизации сейсмического процесса в периоды глобальных активизаций в западной части Альпийско-Гималайского складчатого пояса.

- В районе Курильских островов и Камчатки известные сильнейшие события с $M \sim 7.8 - 9.0$ происходили именно во время глобальных сейсмических активизаций: 7 событий с $M \sim 7.8 - 8.5$ с 1899 по 1923 гг., 5 событий с $M \sim 7.8 - 9.0$ с 1952 по 1970 гг., 5 событий с $M \sim 7.8 - 8.3$ во время текущей глобальной активизации с 1994 по 2007 год.

В рамках этого направления дополнительно было разработано программное обеспечение для построения и визуализации механизмов очагов землетрясений не только в виде проекций главных напряжений или круговых стереодиаграмм на горизонтальную плоскость, но и виде проекций и круговых диаграмм на вертикальную плоскость, что особенно важно для анализа информации в районе зон субдукции, в том числе района Курил и Камчатки, где на следующем этапе выполнения проекта планируется выполнить детальный анализ механизмов очагов землетрясений, в первую очередь цунамигенных (Рисунок 3).

По второму направлению (*выделение класса событий, порождающих трансокеанские цунами, анализ данных об их высотах в ближней и дальней зонах*) был составлен список таких событий за все время исторических наблюдений цунами в Мировом океане (Таблица 1). Соответствующая таблица содержит 12 цунамигенных событий, 9 из которых были порождены мега-землетрясениями с магнитудой $M \sim 8.5 - 9.0$. Для трех событий (15.06.1896,

03.02.1923, 01.04.1946) магнитуда была меньшей, однако в очагах этих землетрясений, по-видимому, имело место образование подводных оползней и обвалов, существенно увеличивших энергию цунами.

Землетрясения предельно возможной магнитуды (9.0 и выше) являются редкими событиями, однако именно они вызывают наибольший ущерб и потери человеческих жизней. В ближней зоне такие землетрясения порождают разрушительные цунами с высотами от 20 до 40 – 50 метров, оказывающие воздействие на участки побережья протяженностью до 300 км (Рисунок 4).

До 2004 года считалось, что такие землетрясения могут происходить только в некоторых особых участках зон субдукции возрастом до 80 млн. лет и скоростью относительного движения плит более 5 см/год (Ruff, Kanamori, 1980). Предполагалось (Uyeda, Kanamori, 1979), что другие участки подобных зон не способны накапливать энергию, достаточную для возникновения мега-землетрясений, и освобождаются от накопленных напряжений путем серии землетрясений с меньшей магнитудой. Однако мега-землетрясения, происшедшие в 2004 году в Индонезии и, в особенности, в 2011 году в Японии, имеющей наиболее длинный ряд исторических наблюдений, показали, что наличие в сейсмической истории региона даже землетрясений с магнитудой 8.0 – 8.5 не является гарантией от появления мега-событий, просто их период повторяемости в таком районе много больше и может достигать тысячи и более лет. Подобные события вносят наиболее существенный вклад в общую цунамиопасность побережья, поэтому определение мест их возможного возникновения является приоритетной задачей исследования проблемы цунами в любом регионе.

Для оценки опасности цунами от таких землетрясений для Дальневосточного региона РФ была составлена общая сеймотектоническая схема возможных зон возникновения мега-землетрясений в Тихом океане (Рисунок 5).

Блок вычислительного эксперимента (ИВТ СО РАН, ИГиЛ СО РАН).

Разработка усовершенствованных численных алгоритмов динамики волн и проведение вычислительных экспериментов.

Исследования исполнителей этого блока в основном были направлены на совершенствование вычислительных методов и технологий, предназначенных для непосредственной оценки зон заплеска цунами на защищаемое побережье с последующим использованием полученных оценок при планировании и выполнении работ по снижению ущерба для населения и хозяйственных объектов. В ходе этих исследований разработан 2D вариант численного алгоритма расчета зон затопления в условиях реальной батиметрии прибрежной акватории, реального рельефа суши, прилегающей к линии уреза, и реальной формы набегающей волны. Этот алгоритм предполагает использование точных аналитических решений при постановке разностных краевых условий на подвижной линии уреза. Сравнение с результатами расчета высоты наката по известным приближенным аналитическим формулам, а также с результатами расчета в рамках плановой модели высоты заплеска на вертикальную стенку, установленную на некоторой глубине, подтвердило работоспособность разработанного алгоритма и правдоподобность результатов, полученных с его помощью. Следует отметить, что для сильно пологого рельефа в окрестности границы вода-суша при набегании волн большой высоты происходит их обрушение, вследствие чего аналитическими формулами в таких случаях пользоваться нельзя. При сравнении с величинами заплеска на вертикальную стенку обнаружено, что для относительно крутых откосов результаты сопоставимы, но для сильно пологих откосов вертикальный накат может получиться в 2 – 3 раза больше, чем заплеск на стенку. В настоящее время продолжается работа по моделированию зон затопления в рамках плановой модели мелкой воды для слабо искривленных участков побережья (Рисунок 6).

Для решения этого же класса задач создан оригинальный численный алгоритм сквозного счета, использующий методику фиктивных ячеек и позволяющий рассчитывать процесс распространения прерывных волн по сухому руслу на основе модифицированных уравнений первого приближения теории мелкой воды. Алгоритм был применен для численного моделирования

процесса формирования, распространения и выхода на наклонный берег крупной волны типа цунами, возникающей при разрушении гидротехнических сооружений и в результате резкого поднятия участка дна.

При выходе волны цунами на берег и распространении ее по руслам втекающих в море рек, большое значение имеет правильное моделирование процесса прохождения такой волны через различные сужения русла. В связи с этим в рамках первого приближения пространственно одномерной теории мелкой воды разработана методика, позволяющая моделировать волновые течения над скачками в сечении русла. Для ее обоснования решена задача о течениях, возникающих при разрушении плотины на скачке площади сечения прямоугольного канала, ширина которого в верхнем бьефе больше, чем в нижнем. Проведено сравнение построенных автомодельных решений с результатами численного моделирования этой задачи на основе пространственно двумерных (плановых) уравнений теории мелкой воды.

Исследована также возможность моделирования процесса распространения прерывных волн по сухому руслу на основе модифицированных уравнений первого приближения теории мелкой воды, допускающих распространение прерывных волн по сухому руслу. В качестве примера построено автомодельное решение задачи о трансформации прорывной волны цунами при ее распространении по сухому руслу.

Одновременная разработка в рамках интеграционного проекта альтернативных алгоритмов для решения одного класса задач с использованием различных подходов и идей чрезвычайно важна для успешного решения поставленной задачи, так как позволяет сопоставлять результаты, используя сравнительные оценки для совершенствования методик и выбора наиболее адекватных техник для каждого из рассматриваемых случаев.

Проведение вычислительных экспериментов по моделированию распространения цунами на трансокеанских расстояниях.

В этом направлении исполнителями подготовлен цифровой массив батиметрии, включающий всю акваторию Тихого океана, и проведены отдельные вычислительные эксперименты по воспроизведению процессов трансформации волн цунами на трансокеанских трассах их распространения от

очагов модельных цунамигенных землетрясений во всех сейсмогенных зонах Тихого океана (Рисунок 7).

Анализ полученных распределений высот цунами на побережье показал, что в случае трансокеанских цунами имеют место различные по своей физике процессы. Первый – это процесс динамического распространения начального энергетического пакета, излученного очагом. Второй – процесс раскачки всего Тихого океана как единого, но очень сложного по своей конфигурации бассейна, который при достаточном вбросе энергии в эту колебательную систему может продолжаться несколько суток. Третий процесс связан с возникновением краевых волн, возбуждаемых подходящими из открытого океана волнами цунами, и их распространением вдоль берега. Подробнее эти процессы будут изучаться в рамках второго года выполнения проекта.

Для эффективного использования вычислительных ресурсов при проведении численных экспериментов с необходимой точностью реализована технология расчетов на блочных (телескопически вложенных) сетках. Эта технология внедрена в разработанные ранее программные комплексы, реализующие уравнения мелкой воды в декартовой и сферической системах координат. Проведены тестовые расчеты в модельных и реальных акваториях, показавшие существенное сокращение времени счета при использовании разномасштабных сеток на участках акватории с различными глубинами при незначительной потере точности (Рисунок 8).

Блок гидродинамического моделирования (ИБТ СО РАН, ИГиЛ СО РАН).

Усовершенствование математических моделей волновой гидродинамики.

Усилия исполнителей работ по третьему блоку были сосредоточены на совершенствовании математических моделей волновой гидродинамики, необходимых для решения задач проблемы цунами, связанных с нетрадиционными механизмами генерации волн цунами, с адекватным учетом дисперсионных эффектов при распространении таких волн в реальных акваториях, с наиболее сложными заключительными фазами проявления цунами – их трансформацией при входе в русла рек, распространением по суше и т.п.

Чрезвычайно важным является вывод двух новых приближенных нелинейно-дисперсионных (НЛД)-моделей: слабо дисперсионной (для малых амплитуд) и слабо дисперсионной при дополнительном предположении о слабой деформации дна, обладающих законом изменения энергии. Для этих моделей разработаны численные алгоритмы с расщеплением на эллиптическую и гиперболическую части, и с их помощью выполнено исследование воздействия на берег поверхностных волн, вызванных сходом подводного оползня. Прделанная работа открывает путь к получению «правильных» НЛД-моделей на сфере, обладающих законом сохранения (изменения) энергии.

В ходе решения задачи о генерации поверхностных волн типа цунами при импульсивном движении погруженного тела (эллиптического цилиндра) вблизи свободной границы глубокой идеальной жидкости получено приближенное аналитическое решение. При этом использовался метод редукции исходной постановки к интегро-дифференциальной системе уравнений для функции, задающей возвышение свободной поверхности, а также нормальной и тангенциальной составляющей скорости на свободной поверхности. Эта задача возникает, например при конструировании и эксплуатации больших лабораторных испытательных бассейнов, оборудованных специальными волнопродукторами, которые генерируют модельные волны цунами, воздействующие на модели гидротехнических сооружений, корабли и т.п.

Для случая движения тела (цилиндра) с постоянным ускорением из состояния покоя построена начальная по времени асимптотика решения задачи. С помощью разложения по малому параметру заглубления для главных членов асимптотики получены явные формулы, описывающие различные режимы взаимодействия погруженного препятствия со свободной поверхностью.

В частности, полученные решения адекватно описывают процесс формирования инерционного слоя жидкости при достаточно быстром движении тела-волнопродуктора (Рисунок 9). Рисунок 10 иллюстрирует начальную стадию распада выталкиваемого инерционного слоя в результате генерации поверхностных волн, расходящихся влево и вправо при медленном подъеме волнопродуктора.

Построены новые асимптотические решения нелинейной задачи для уравнений Эйлера динамики неоднородной жидкости, описывающей стационарные докритические течения над локализованным препятствием. Существенным элементом новизны является получение аналитического описания ближнего и дальнего волнового поля для препятствий сложных геометрических форм.

Разработана математическая модель течения трехслойной мелкой воды с учетом негидростатичности распределения давления в однородных слоях. Проведено сравнение с экспериментом по генерации внутренних волн большой амплитуды в окрестности шельфовой зоны. В частности, построено решение нестационарной задачи о движении подводного оползня вдоль склона. На основе этой модели проведены численные расчеты эволюции волн большой амплитуды и дано их сравнение с экспериментальными данными. Показано, что рассматриваемая модель пригодна для описания эволюции внутренних волн первой моды как в задаче о набегании волн на откос, так и при моделировании плотностных течений (оползни, термики) вниз по склону. В частности, построенная модель может быть использована при моделировании генерации длинных поверхностных волн (цунами) при распространении подводных лавин.

Построена также математическая модель слоя смешения для течений сжимаемой и несжимаемой жидкости в длинных каналах. Исследовано влияние трения на скорость вовлечения жидкости в слой смешения. Показано, что для докритических течений уравнения движения жидкости со свободной границей и «под крышкой» дают близкие количественные результаты. Сформулированы критерии устойчивости сдвигового течения жидкости в терминах условий обобщенной гиперболичности нелинейных уравнений движения. Проведен анализ течений, возникающих при обтекании локального сужения или расширения канала. Построены непрерывные и разрывные точные решения, описывающие различные режимы течения и изучены их свойства. Рассмотрены стационарные сдвиговые течения, описывающие движение тонкого слоя жидкости с образованием рециркуляционных областей.

Уточненный план работы на этап 2013 года

- Анализ геодинамических условий возникновения очагов мега-землетрясений, в том числе особенностей строения литосферы и характера субдукционного процесса в этих зонах.
- Анализ аномалий параметров сейсмического режима в районах подготовки мега-землетрясений.
- Определение районов тихоокеанского сейсмического пояса, возникновение мега-землетрясений в которых наиболее опасно для Дальневосточного побережья РФ.
- Создание новых версий расчетных и вспомогательных программ, предназначенных как для последовательных, так и для параллельных вычислений и интерпретации результатов.
- Проведение тестовых расчетов в рамках новых гиперболических моделей динамики волн цунами, учитывающих эффекты турбулентности и дисперсии.
- Выполнение серии сценарных расчетов генерации и распространения цунами на конкретных участках акватории Дальневосточного региона РФ, по результатам которых будут получены оценки ожидаемых высот волн цунами вдоль побережья от землетрясений различной магнитуды. Сопоставление расчетных высот с данными наблюдений исторических цунами

Публикации

Опубликованные в 2012 г.

1. Викулин А.В., Мелекесцев И.В, Акманова Д.Р., Иванчин А.Г., Водинчар Г.М., Долгая А.А., Гусяков В.К. Информационно-вычислительная система моделирования сейсмического и вулканического процессов как основа изучения волновых геодинамических явлений // Вычислительные технологии. 2012. Т. 17, №3. С. 34-54.
2. Гусев О.И. Об алгоритме расчета поверхностных волн в рамках нелинейно-дисперсионной модели на подвижном дне // Вычислительные технологии. 2012. Т. 17, № 5. С. 46-64.
3. Остапенко В.В. О монотонности многомерных разностных схем // Доклады Академии наук. 2012. Т. 447, № 2. С. 146-149.
4. Остапенко В.В. О разрывных решениях уравнений теории мелкой воды в русле, имеющем скачок площади сечения // Прикладная математика и механика. 2012. Т. 76, вып. 6. С. 923-937.
5. Соммер А.Ф., Шокина Н.Ю. О некоторых проблемах конструирования разностных схем на двумерных подвижных сетках // Вычислительные технологии. 2012. Т. 17, № 4. С. 88-108.
6. Федотова З.И., Хакимзянов Г.С. Анализ условий вывода нелинейно-дисперсионных уравнений // Вычислительные технологии. 2012. Т. 17, № 5.
7. Beizel S.A., Chubarov L.B., Dutykh D., Khakimzyanov G.S., Shokina N.Yu. Simulation of surface waves generated by an underwater landslide in a bounded reservoir // Russ. J. Numer. Anal Math. Modelling, Vol. 2012. Vol. 27, N. 6. P. 539-558. DOI 10.1515/mam-2012-0031.
8. Dutykh D., Mitsotakis D., Chubarov L., Shokin Y. On the contribution of the horizontal sea-bed displacements into the tsunami generation process // Ocean Modeling. 2012. Vol. 56. P. 43-56 (doi.org/10.1016/j.ocemod.2012.07.002).
9. Бейзель С.А., Гусяков В.К., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И. Моделирование воздействия удаленных цунами на Дальневосточное побережье России // Труды

XI Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», 22-24 мая 2012 г., Санкт-Петербург, Россия. СПб.: Наука, 2012. 504 с., С. 226-229.

10. Бейзель С.А., Худякова В.К., Чубаров Л.Б. Две модели оползневого механизма генерации поверхностных волн в прибрежной зоне // Труды XI Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», 22-24 мая 2012 г., Санкт-Петербург, Россия. СПб.: Наука, 2012. 504 с., С. 229-232.

11. Михеева А.В. Подготовка, визуализация и анализ сейсмологических данных в программном комплексе <GIS-EEDB> // «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных». Материалы Седьмой Международной сейсмологической школы, пос. Нарочь, Республика Беларусь, 9-15 сентября 2012 г. Обнинск, 2012. С. 192-196.

12. Михеева А.В., Дядьков П.Г. Анализ параметров сейсмического режима с помощью геоинформационной системы EEDB // Материалы Всероссийского совещания с иностранным участием «Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе», г. Иркутск, 23-29 сентября 2012 г. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2012. Т. 2. С. 44-46.

13. Dutykh D., Mitsotakis D., Beisel S., Shokina N. Dispersive waves generated by an underwater landslide // Proceedings of International Conference to honour Professor E.F. Toro in the month of his 65th birthday «Numerical methods for hyperbolic equations: theory and applications», 4-8 July 2011, Santiago de Compostela, Spain. Vázquez-Cendón et al. (eds). Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-62150-2. P. 245-250.

14. Dutykh D., Mitsotakis D., Beisel S., Shokina N. On waves generated by an underwater landslide // In Proceedings of the IV Conference "Applied Problems of the fluid mechanics, heat and mass transfer", 1 - 3 November 2012, Dnepropetrovsk, Ukraine. P. 75-79

15. Gusiakov V.K. Inverse and direct problems in the study of tsunami behavior // 6th International Conference "Inverse Problems: Modeling and Simulation", May 21-26,

2012, Antalya, Turkey, symposium M3 “Numerical Methods of Solving Inverse Problems of Mathematical Physics”.

16. Liapidevskii V., Chesnokov A. Stability and horizontal mixing in shear shallow flows. Geophysical Research Abstracts Vol. 14, EGU2012-4149, 2012. EGU General Assembly 2012 (подготовлена статья в Nonlinear Processes in Geophysics, 2013).

17. Makarenko N.I., Kostikov V.K. Nonlinear water waves generated by impulsive motion of submerged obstacle // Geophysical Research Abstracts. 2012. Vol. 14. EGU2012-4772 (EGU General Assembly, 22-27 April, Vienna, Austria).

18. Makarenko N.I., Maltseva J.L. Interference patterns in non-homogeneous flow over the obstacles // Proc. 19th Int. Symposium on Nonlinear Acoustics, Tokyo, Japan, 21-24 May 2012. New York, Melville. P. 323-326.

Сданные в печать

1. Ковыркина О.А., Остапенко В.В. Сравнение теории и численного эксперимента в задаче о разрушении плотины на скачке площади сечения прямоугольного канала // Известия РАН. МЖГ.

2. Макаренко Н.И., Костиков В.К. Неустановившееся движение эллиптического цилиндра под свободной поверхностью // ПМТФ. 2013.

3. Хакимзянов Г.С., Шокина Н.Ю. Оценка высот волн, вызванных подводным оползнем в ограниченном водоеме // ПМТФ. 2012. Т. 53, № 5.

4. Гаврилов Н.В., Ляпидевский В.Ю., Ляпидевская З.А. Влияние дисперсии на распространение внутренних волн в шельфовой зоне. Специальный номер журнала «Фундаментальная и прикладная гидрофизика», Санкт-Петербург, 2013.

5. Бейзель С.А., Остапенко В.В., Хакимзянов Г.С., Чубаров Л.Б. Оценка максимальных заплесков на берег с помощью численно-аналитических методов // Вычислительные технологии. (готовится к печати).

Участие в конференциях

Двенадцатый всероссийский семинар «Геодинамика. Геомеханика и геофизика», Стационар «Денисова пещера», Алтайский край 23-28 июля 2012 г.

Седьмая Международная сейсмологическая школа «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных», поселок Нарочь, Республика Беларусь, 9-15 сентября 2012 г.

Всероссийское совещание с иностранным участием «Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе», Иркутск, ИЗК СО РАН, 23-29 сентября 2012 г.

34th International Geological Congress, Brisbane, Australia, August 4-12, 2012.

6th International Conference "Inverse Problems: Modeling and Simulation", Antalya, Turkey, May 21-26, 2012.

US - Russia Geohazards Symposium "Developing a road map to improved disaster risk reduction through collaborative actions", Moscow, July 17-19, 2012.

Расширенное заседание Совета РАН по координации деятельности региональных отделений и региональных научных центров РАН: Природные и техногенные катастрофы, Петропавловск-Камчатский, 11-15 сентября 2012 г.

Научно-техническое совещание по фундаментальным и прикладным проблемам развития Российской системы предупреждения о цунами, Новосибирск, 8-12 октября 2012 г. *В рамках этого совещания было проведено рабочее заседание исполнителей проекта, в котором приняли участие В.К.Гусяков, П.С.Зиновьев, Т.В.Калашикова (ИВМиМГ СО РАН), Л.Б.Чубаров, Г.С.Хакимзянов, С.А.Бейзель (ИБТ СО РАН), П.Г.Дядьков (ИНГГ СОРАН), В.Ю.Ляпидевский, Ж.Л.Мальцева, В.В.Остапенко, К.Н.Гаврилова (ИГиЛ СО РАН).*

Семинар-совещание исполнителей интеграционного проекта, Новосибирск, 4 мая 2012 г. *В совещании приняли участие В.К.Гусяков, П.С.Зиновьев, Т.В.Калашикова (ИВМиМГ СО РАН), Л.Б.Чубаров, Г.С.Хакимзянов, С.А.Бейзель (ИБТ СО РАН), П.Г.Дядьков (ИНГГ СОРАН), В.Ю.Ляпидевский, Н.И.Макаренко, Ж.Л.Мальцева, В.В.Остапенко, А.А.Чесноков, К.Н.Гаврилова (ИГиЛ СО РАН).*

Рисунки

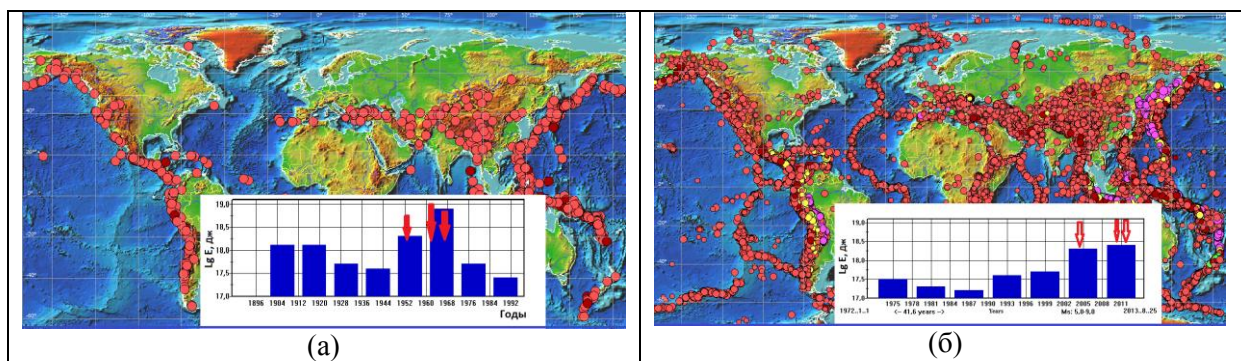


Рисунок 1. (а) Выявление глобальных активизаций по выделяемой сейсмической энергии ($\lg E$, Дж) с использованием каталога (Pacheco, J. and L.R. Sykes, 1992); (б) повышение выделяемой сейсмической энергии ($\lg E$, Дж) на Земле во время текущей сейсмической активизации: на карте изображены эпицентры землетрясений с $M=5.0 - 9.2$ (каталог USGS/NEIC, 1973-2012). Стрелками на графике изображены мегаземлетрясения: Суматра-Андаманское, 2004 г., $M=9.2$; Чилийское, 2010 г., $M=8.8$ и Японское, Тохоку, 2011, $M=9.0$.

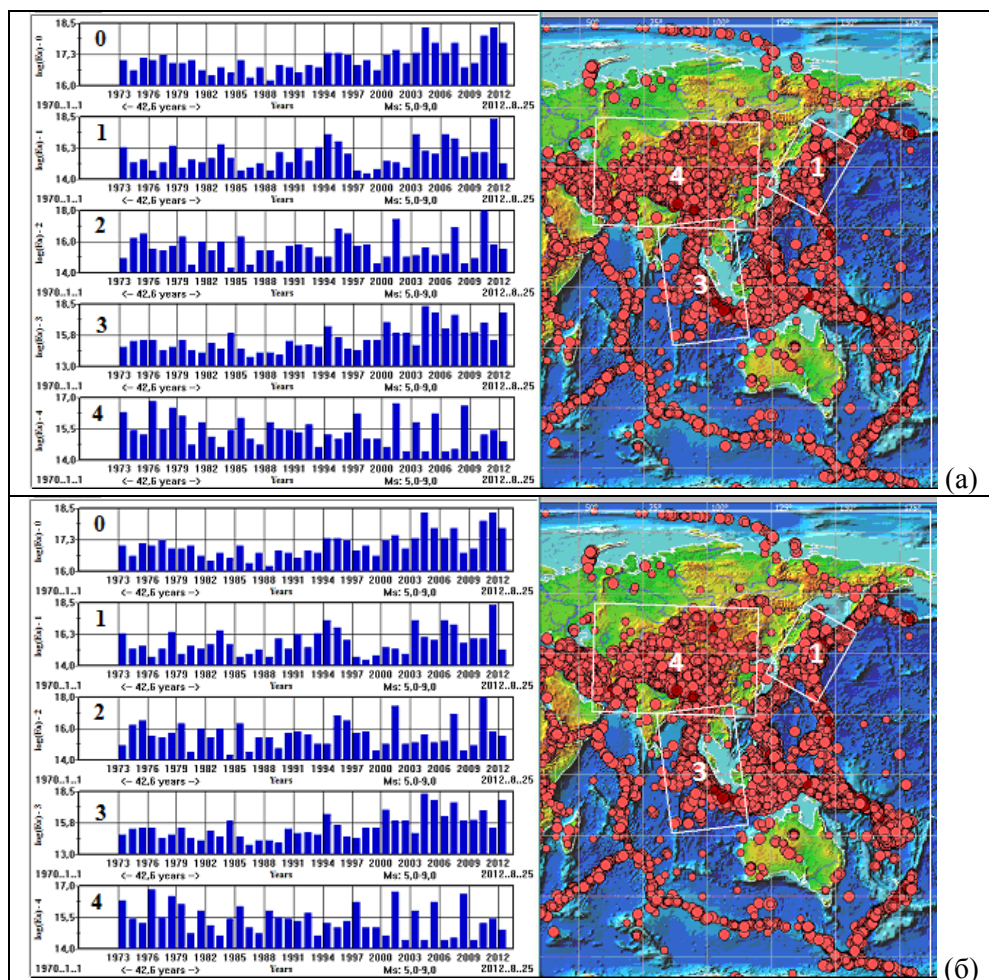
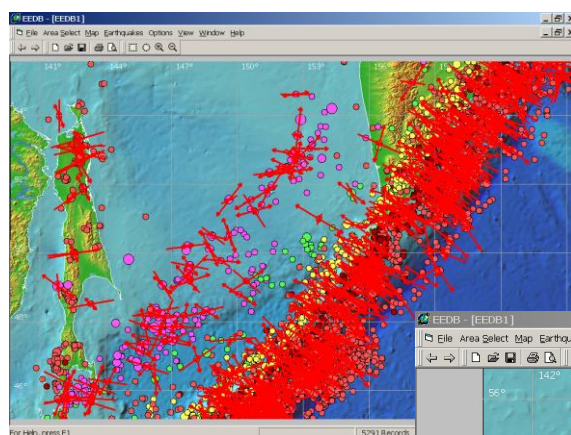


Рисунок 2. (а) Проявление текущей глобальной сейсмической активизации (сейсмическая энергия $\lg E$, Дж) за шестилетние интервалы для всей Земли (0) и отдельных регионов: района японских островов (1), Южной Америки (2), района Зондской дуги (3), зоны Индо-Евразийской коллизии и внутриконтинентальных районов ее влияния (4). Использован каталог USGS/NEIC; (б) аналогично (а), но для годовых интервалов.



$M \geq 4$

$M \geq 6.5$

Новые варианты визуализации очагов на географической карте и вертикальном разрезе; визуализация данных их механизмов.

Примеры построения механизмов очагов в виде проекций осей растяжения и сжатия (слева) и круговых стереограмм на площади (справа внизу) и по вертикальному разрезу (врезка) для района северных Курил и юга Камчатки.

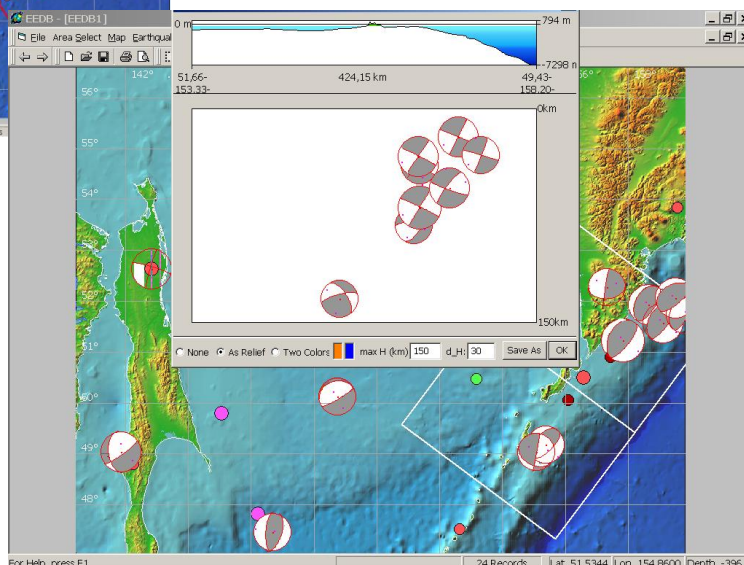


Рисунок 3. Примеры разработанных вариантов построения механизмов очагов землетрясений: в виде проекций осей растяжения и сжатия (слева), круговых стереограмм на площади (справа внизу) и по вертикальному разрезу (врезка) для района северных Курил и юга Камчатки.

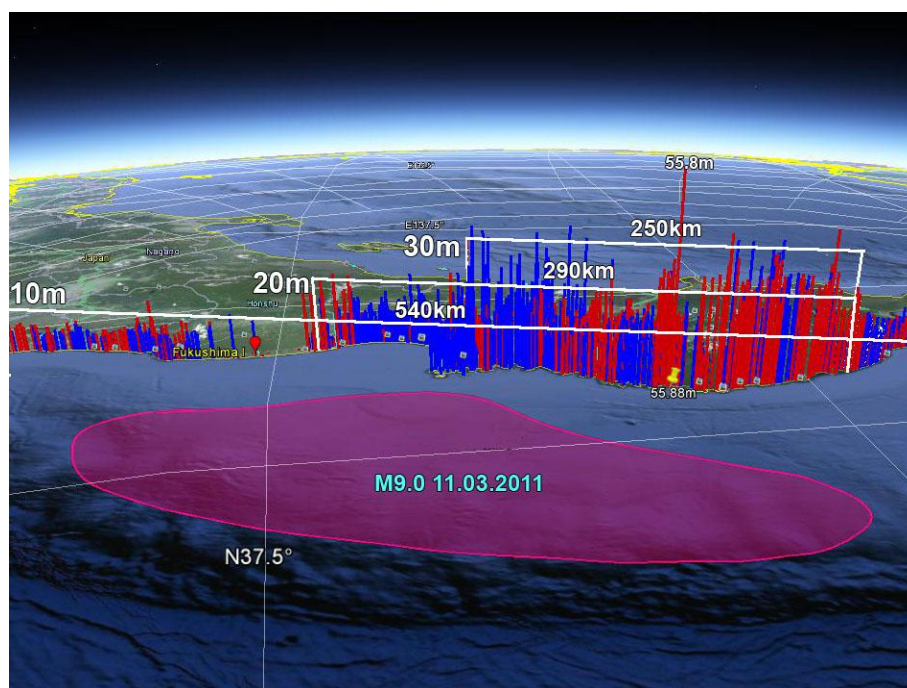


Рисунок 4. Измеренное распределение высот наката (красные линии) и глубин заливания (синие линии) при цунами Тохоку 11 марта 2011 года. Заливкой показано положение очага цунами. Белые сплошные линии показывают протяженность берега, на котором высоты цунами превышали указанные значения.

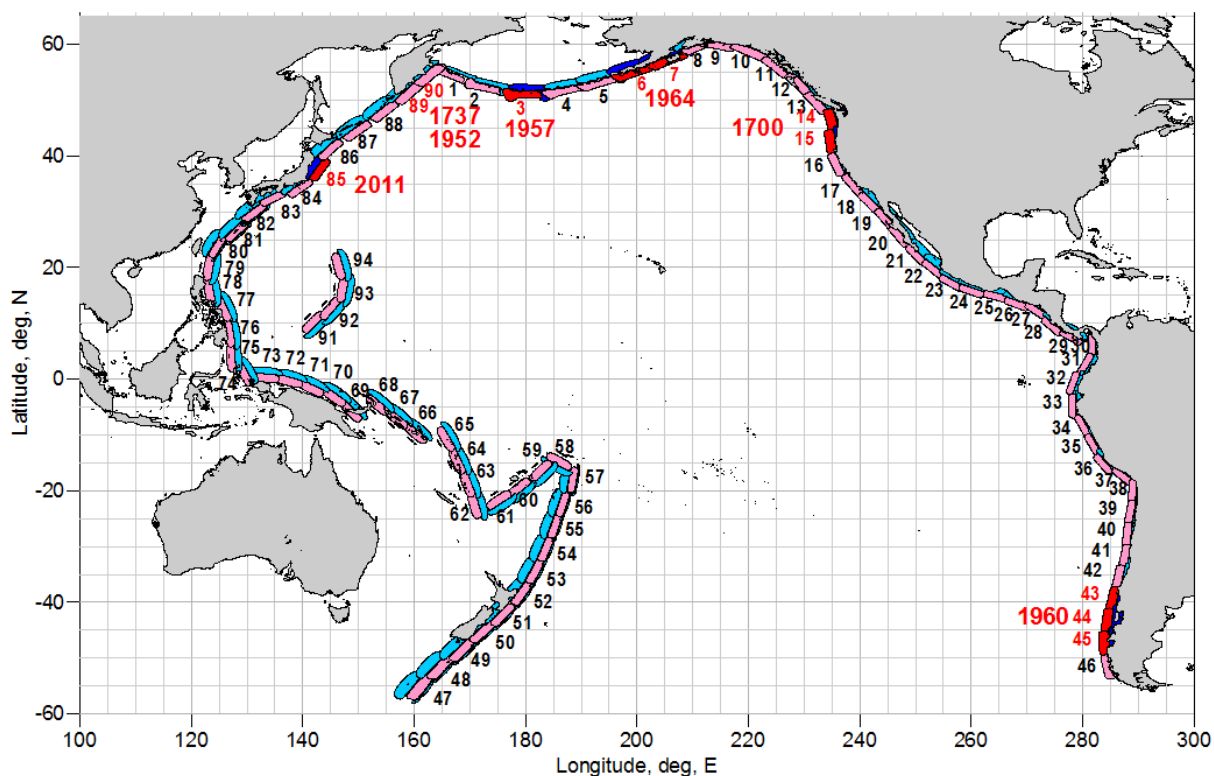


Рисунок 5. Схема размещения модельных очагов землетрясений с магнитудой $M_w = 9.0$ в основных цунамигенных зонах Тихого океана. Розовая заливка соответствует положительным значениям начального смещения дна в очаговой области, синяя – отрицательным. Красным цветом выделены зоны, в которых мега-землетрясения класса М9 происходили ранее.

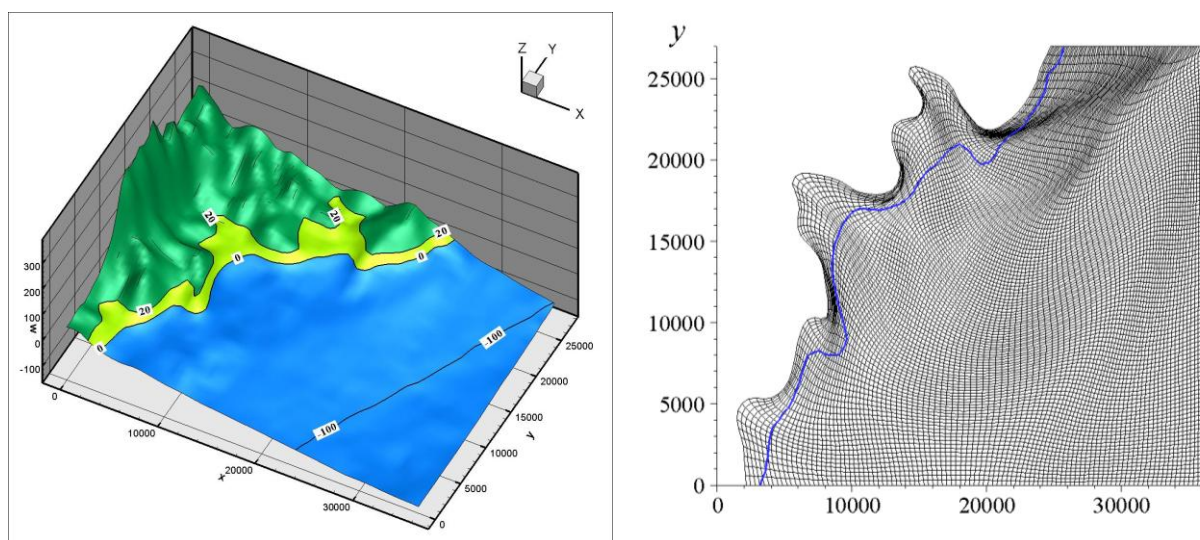


Рисунок 6. Рельеф прибрежной зоны (слева) и расчетная сетка, покрывающая часть суши и прибрежную акваторию (справа). Синим цветом выделена начальная линия уреза

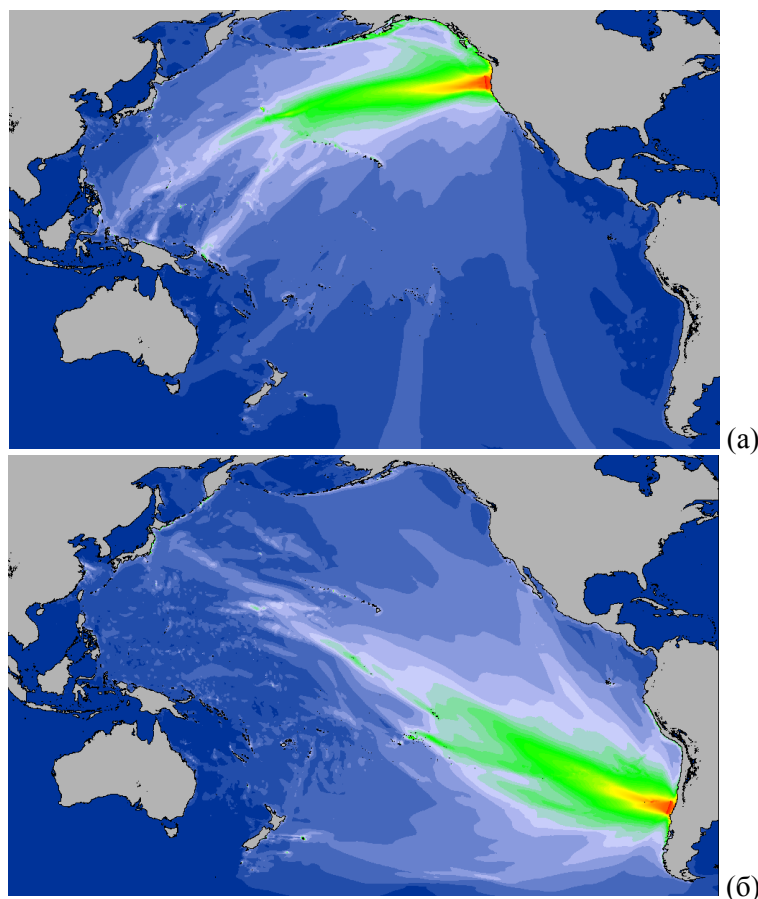


Рисунок 7. Примеры расчетных диаграмм свечения для модельных очагов с $M_w=9.0$, показанных на рис.4: (а) – №15 (Каскадия), (б) – №44 (Чили).

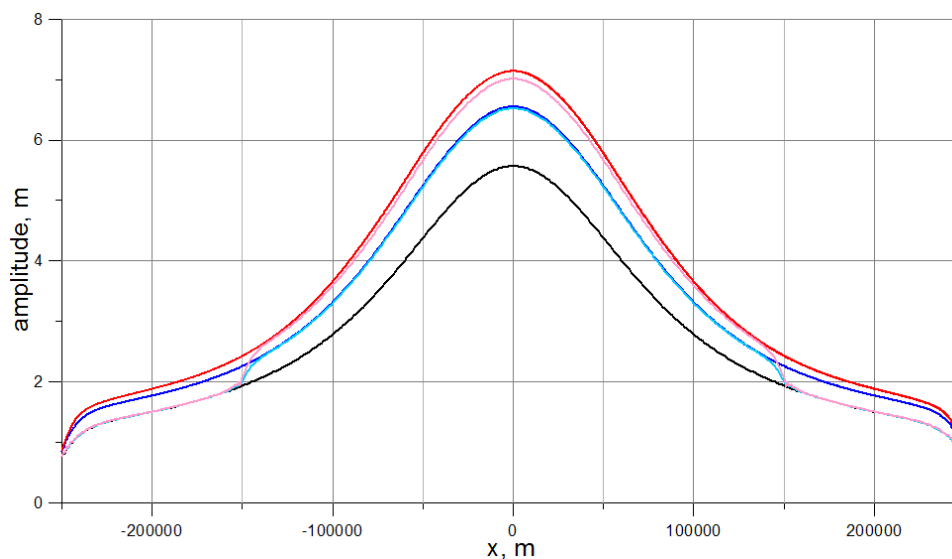


Рисунок 8. Сравнение максимальных положительных амплитуд волн вдоль побережья модельной акватории («корыто») от модельного сейсмического источника с магнитудой $M_w=9.0$. Черная линия – расчет во всей области с шагом 1000м (время счета около 50 секунд); синяя линия – расчет во всей области с шагом 500м (время счета около 5 минут); красная линия – расчет во всей области с шагом 250м (время счета около 40 минут); голубая линия – расчет во всей области с шагом 1000м, во вложенной (от -150000м до 150000м по ОХ) – с шагом 500м (время счета около 1 минуты); розовая линия – расчет во всей области с шагом 1000м, во вложенной – с шагом 250м (время счета около 3 минут).

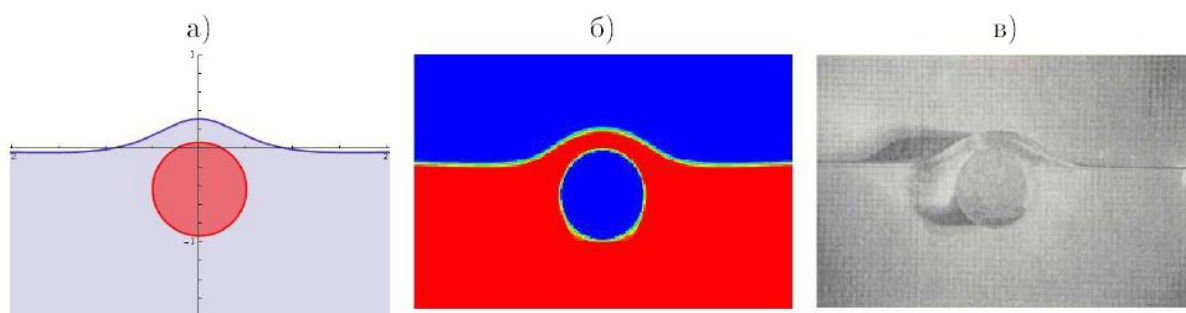


Рисунок 9. а) асимптотическое решение; б) численный расчет уравнений Эйлера (Zhu et al., 2007); в) эксперимент (Greenhow, Moyo, 1997).

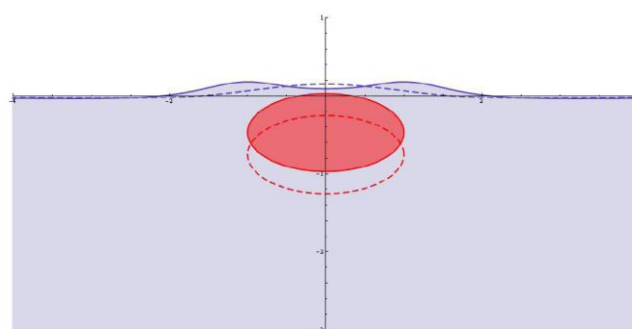


Рисунок 10. Вертикальный подъем эллиптического цилиндра с полуосями $a:b=2:1$.

Таблица 1. Список трансокеанских цунами и их основные параметры: M – магнитуда порождающего землетрясения (макросейсмическая, M_S или M_W), I – интенсивность цунами по шкале Соловьева-Имамуры, H_{maxNF} – максимальная высота цунами в ближней зоне, H_{maxFF} – максимальная высота цунами в дальней зоне (более 5000 км от очага), FAT – число жертв, вызванных волнам цунами.

Дата, место	M	I	H_{maxNF} , м	H_{maxFF} , м	FAT
1 ноября 1755, Лиссабон	8.5	4.0	30.0	7.0	~10000
7 ноября 1837, Чили	8.5	3.0	8.0	6.0	много
13 августа 1868, Чили	9.1	3.5	15.0	5.5	612
15 июня 1896, Санрику	7.4	3.8	38.2	5.5	27122
3 февраля 1923, Камчатка	8.3	3.5	8.0	6.1	3
1 апреля 1946, Алеуты	7.4	4.0	42.2	20.0	165
4 ноября 1952, Камчатка	9.0	4.0	18.0	9.1	>10000
9 марта 1957, Алеуты	9.1	3.5	22.8	16.1	0
22 мая 1960, Чили	9.5	4.0	15.2	10.7	1260
28 марта 1964, Аляска	9.2	4.5	68.0	4.9	221
26 декабря 2004, Суматра	9.3	4.5	50.9	9.6	229866
11 марта 2011, Тохоку	9.0	4.1	55.0	2.0	15870

Библиография

Djadkov P., Mikheeva A., Kuznetsova Y. (2005). Global high seismic activity periods on the Earth from the latest 19 to the earliest 21 century and the 2003, Ms7.5 Altay earthquake // Abstracts of International symposium “Active geophysical monitoring of the Earth lithosphere”, Novosibirsk, September 12-16, 2005, GS SB RAS, P. 103-104.

Greenhow M., Moyo S. (1997). Water entry and exit of horizontal circular cylinders // Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. 335(A). P. 551-563.

Pacheco J.F., Sykes L.R. (1992). Seismic moment catalog of large shallow earthquakes, 1900 to 1989 // Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 82. P. 1306-1349.

Ruff L., Kanamori H. (1980). Seismicity and the subduction process // Phys. Earth Planet. Inter. Vol. 23. P. 240-252.

USGS/NEIC, 1973-2012 (мировой каталог землетрясений).
http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/epic_global.php

Uyeda S., Kanamori H. (1979). Back-arc opening and the mode of subduction // J. Geophys. Res. Vol. 84. P. 1049-1061.

Zhu X., Faltinsen O.M., Hu C. Water entry and exit of a horizontal circular cylinder // JOMAE Transactions of the ASME. 2007. Vol. 129, N. 4. P. 253-264.