

## РАСШИРЕННАЯ АННОТАЦИЯ ОТЧЕТА

Исследования по проекту имели целью получение новых знаний о характеристиках проявления у Дальневосточного побережья РФ катастрофических волн цунами, вызванных удаленными от этого побережья цунамигенными землетрясениями. Оценка риска цунами от удаленных землетрясений для Дальневосточного побережья России требует особого рассмотрения, поскольку большая часть этого побережья открыта к воздействию волн практически от всех основных цунамигенных зон Тихого океана. Прежде всего потребовалось определить перечень потенциально опасных для Дальневосточного побережья России модельных удаленных очагов цунамигенных землетрясений. Наиболее опасные из них имели магнитуду  $M_w = 9.0$ . Такой перечень был составлен и включил 94 модельных очага, условно разбитых на группы, соответствующие географическим зонам их расположения.

Результаты вычислительного моделирования показали, что наиболее опасными для Дальневосточного побережья России являются волны, порожденные в районах Южной Америки (Чили), архипелага Тонга, Папуа – Новой Гвинеи, Соломоновых островов и способные проявляться у этого побережья высотами до 2-3 метров. Все другие цунамигенные зоны, в силу их географического расположения и отсутствия выраженных волноводов (подводных хребтов) вдоль трасс распространения цунами, не являются опасными даже при предельно возможной магнитуде подводных субдукционных землетрясений.

Было показано, что магнитуда 9.0 является своего рода пороговым значением для создания опасных волн цунами на всем протяжении Дальневосточного побережья РФ. Уже при снижении ее на 0.2 балла расчетные высоты волн становятся менее 1 метра, а при дальнейшем снижении магнитуды падают до нескольких десятков сантиметров. Анализ распределений экстремальных характеристик волн цунами, порожденных удаленными относительно побережья Охотского моря цунамигенными землетрясениями, выполнялся по результатам моделирования наиболее опасных источников с магнитудой  $M_w = 9.0$  – «чилийского» и «гвинейского» очагов и очага из группы Соломоновых островов и показал, что наибольшую опасность для охотоморского побережья представляют источники, расположенные у тихоокеанского побережья Чили вблизи очага исторического мега-цунами 1960 г.

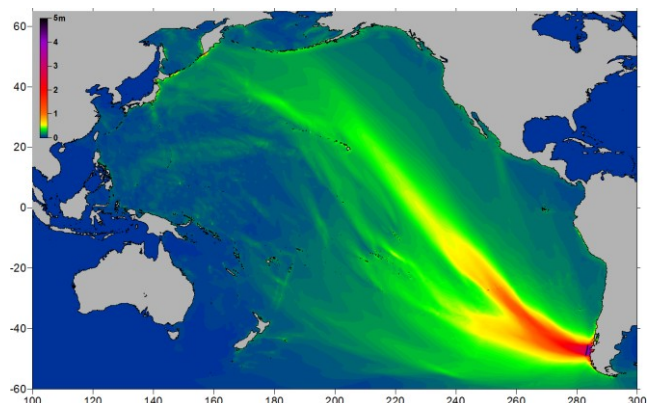
Наличие ледяного покрова может усиливать эффект воздействия цунами на берег (увеличение дальности заливания, вынос тяжелого льда на берег).

Переход от интегральных оценок проявления цунами у защищаемого побережья к детальным характеристикам наката волн цунами на конкретные участки побережья, прилегающие к населенным пунктам Дальневосточного побережья России позволил определить для таких важных населенных пунктов как п. Малокурильское, г. Северо-Курильск, г. Петропавловск-Камчатский границы зон затопления, максимальные глубины и длительности затопления, поля скоростей течений и их максимальных абсолютных значений на берегу. При этом в качестве источников цунами рассматривались наиболее опасные землетрясения класса  $M_9$ . Один из них был расположен вблизи побережья Чили (Рис. 1) и оказался близок к очагу чилийского цунами 1960 г., три других – в акваториях, прилегающих к архипелагу Тонга, Папуа-Новой Гвинее и Соломоновым островам.

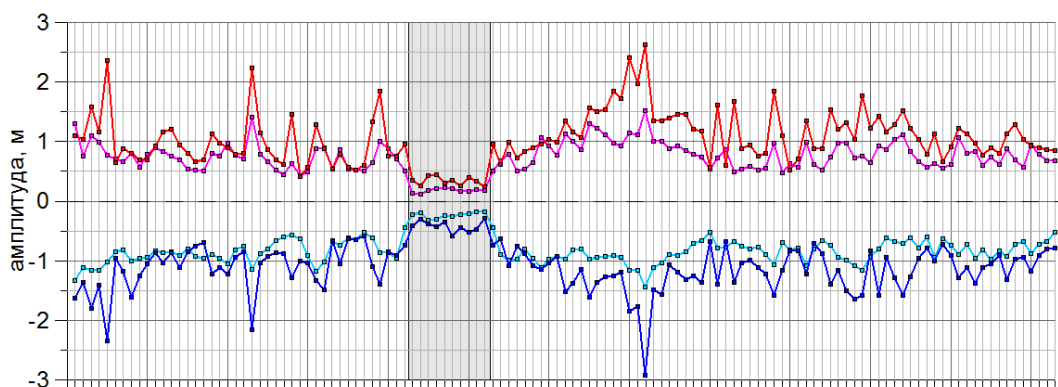
Рассматривая в качестве примера результаты численного моделирования наката «чилийского цунами» на берег вблизи г. Северо-Курильск, можно заметить, что максимальный рассчитанный заплеск здесь достигает 5 метровой изолинии рельефа и это хорошо согласуется с данными наблюдения, утверждающими что «На Курильских островах максимальная высота подъема воды составляла 4.7 м в районе г. Северо-Курильск. Были затоплены дома на побережье, склады и причал». Вместе с тем, наибольший заплеск на побережье, прилегающее к г. Северо-Курильску, оказывается связанным с волной цунами, порожденной источником, расположенным вблизи Соломоновых островов.

Не менее интересной и актуальной стала и задача об уточнении границ удаленной и ближней цунамигенных зон (относительно Дальневосточного побережья России), имеющая не только фундаментальное, но и серьезное практическое значение. Без ее

решения невозможно совершенствовать регламент действий национальной службы предупреждения о цунами, а значит и снижать ущерб, наносимый волнами цунами населению и хозяйственным объектам Дальневосточных прибрежных территорий России.



Характерные направления распространения волновой энергии, порожденной модельным цунамигенным «чилийским» землетрясением.



Распределение экстремальных положительных и отрицательных амплитуд волн, рассчитанных от чилийского модельного источника вдоль побережья в окрестности г. Петропавловска-Камчатского (от 157.5 до 161 градусов в.д.): лиловая и голубая линия соответствуют результатам, полученным на сетке с шагом 3 угловые минуты, красная и синяя – с использованием дополнительной вложенной сетки с шагом 30 угловых секунд.

Серым фоном выделены значения, рассчитанные внутри Авачинской губы.

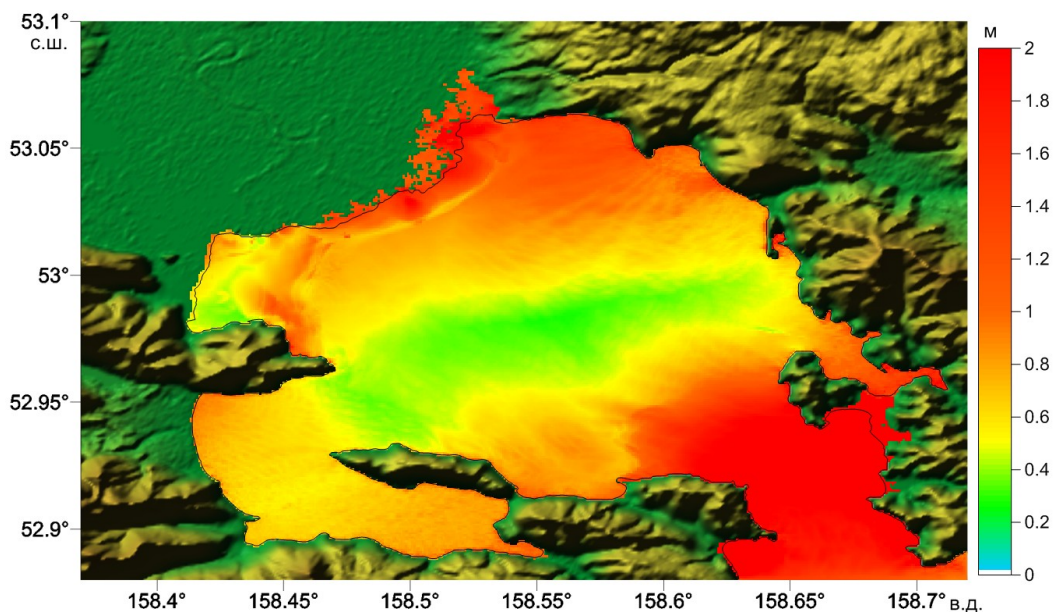


Диаграмма свечения – распределение максимальных положительных амплитуд волн цунами, от модельного источника, расположенного вблизи Папуа-Новой Гвинеи – Соломоновых островов, в Авачинской губе с учетом наката волн на побережье. Черная линия - начальная линия уреза.

**Номер проекта:**

12-05-00894

**Вид конкурса:**

а - Инициативные проекты

**Руководитель проекта:**

Чубаров Леонид Борисович

**Название проекта:**

Оценка воздействия удаленных цунами на Дальневосточное побережье России

**Организация финансирования проекта:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук

**Год представления отчета:**

2014

**Вид отчета:**

итоговый (2012-2014)

**Аннотация:**

В ходе выполнения проекта были получены следующие результаты об особенностях воздействия на Дальневосточное побережье России волн цунами, порожденных удаленными от этого побережья модельными цунамигенными землетрясениями.

\* Построен уточненный набор модельных удаленных очагов цунамигенных землетрясений магнитудой  $M_w = 9.0$ , потенциально опасных для Дальневосточного побережья России, в наиболее цунамиопасных для побережья России сейсмических зонах в этот набор включены очаги меньших магнитуд.

\* За счет детализации расчетных сеток уточнены расчетные характеристики проявления в акватории Тихого океана и у защищаемого побережья волн цунами, вызванных построенной системой модельных удаленных сейсмических источников. Получены оценки проявления удаленных и ближних цунами на охотоморском побережье. По результатам вычислительных экспериментов определены восточная и южная границы удаленных и ближней (для Дальневосточного побережья России) цунамигенных зон. Выполнено разномасштабное численное моделирование волны цунами, порожденной землетрясением, происшедшим 1 апреля 2014 г. Определены особенности характера распространения по акватории Тихого океана порожденной этим событием волновой энергии.

\* По материалам численного моделирования получены оценки характеристик наката волн цунами вблизи г. Северо-Курильска, хорошо согласующиеся с доступными историческими данными. Исследованы зависимости этих характеристик от магнитуды цунамигенного землетрясения, его положения и шероховатости поверхности суши. Рассчитаны также характеристики воздействия волн цунами от наиболее опасных для Дальневосточного побережья России модельных цунамигенных землетрясений, расположенных у берегов Чили, архипелага Тонга, Папуа-Новой Гвинеи – Соломоновых островов на защищаемые участки побережья вблизи г. Петропавловска-Камчатского и п. Малокурильское.

\* Для получения перечисленных выше результатов были созданы новые версии вычислительных и вспомогательных программных систем, включая средства поддержки проведения расчетов на последовательности вложенных сеток различной разрешающей способности, а также новые модули моделирования наката волн цунами. Созданы и адаптированы к особенностям вычислительных алгоритмов цифровые модели рельефов дна и суши высокого разрешения. С использованием известных аналитических решений, лабораторных и натурных данных выполнены валидация и верификация математических моделей и численных схем.

**Номер проекта:**

12-05-00894-а

**Название проекта:**

Оценка воздействия удаленных цунами на Дальневосточное побережье России

**Коды классификатора, соответствующие содержанию фактически проделанной работы (в порядке значимости):**

05-513 01-223

**Объявленные ранее цели Проекта:**

Основной объявленной при составлении заявки целью проекта являлось «получение расчетной основы для последующего решения фундаментальной задачи получения оценок риска опасного воздействия цунами из удаленных цунамигенных зон Тихого океана на Дальневосточное побережье РФ». В ходе работ по проекту на основе полученных знаний формулировки заданий на каждый следующий этап уточнялись.

Таким образом, путь к объявленной цели выглядел следующим образом.

На первом этапе (2012 г.) следовало сформировать необходимые наборы батиметрической информации, определить оптимальный набор вычислительных алгоритмов и программ; собрать и систематизировать исторические сведения о проявлениях удаленных цунами на Дальневосточном побережье РФ; определить основной набор магнитуд для описания удаленных цунамигенных землетрясений различной силы, выбрать адекватные механизмы модельных очагов для каждого магнитудного диапазона; предложить обоснованный вариант сеймотектонической схемы расположения очагов цунамигенных землетрясений в основных сейсмогенных зонах акватории Тихого океана, угрожающих защищаемому побережью России.

На второй этап (2013 г.) были запланированы уточнение восточной (вдоль Алеутской дуги, в акватории Берингова моря) и южной (вдоль побережья северной Японии) границ удаленных и ближней для Дальневосточного побережья России цунамигенных зон; детальное исследование воздействия удаленных цунами на представительный набор участков Дальневосточного побережья РФ, включая сбор исторических данных, натурной информации, определение экстремальных расчетных характеристик границ заплеска, высот наката с учетом детальной батиметрии и других факторов.

Наконец, основной целью заключительного (2014) этапа работ по проекту, непосредственно связанной с заявленной ранее основной задачей проекта, стали оценка характеристик проявления у важнейших пунктов защищаемого камчатского участка Дальневосточного побережья России волн цунами, порожденных удаленными относительно этого побережья очагами цунамигенных землетрясений; для этого предполагалось выполнить разномасштабное (от глобального до локального) численное моделирование исследуемых явлений, провести анализ полученных результатов и приступить к подготовке расчетной основы для составления обзорной карты цунамиопасности Дальневосточного побережья РФ, подверженного воздействию удаленных цунами.

**Степень достижения поставленных в проекте целей:**

Цели проекта в целом достигнуты, поставленные задачи решены.

**Полученные в ходе выполнения Проекта важнейшие результаты:**

Перечень важнейших результатов, полученных исполнителями настоящего проекта в 2012 – 2014 гг., можно представить следующим образом.

\* построен уточненный набор модельных удаленных очагов цунамигенных землетрясений магнитудой  $M_w = 9.0$ , потенциально опасных для Дальневосточного побережья России, на основании результатов моделирования волн цунами в наиболее цунамиопасных для побережья России сейсмических зонах этот набор пополнен очагами меньших магнитуд –  $M_w = 8.4$ ,  $M_w = 8.6$  и  $M_w = 8.8$ ;

\* за счет применения более детальной сетки с пространственным шагом 2 угловые минуты уточнены расчетные характеристики проявления в акватории Тихого океана и у защищаемого побережья волн цунами, вызванных построенной системой модельных

удаленных сейсмических источников и рассчитанных по результатам численного моделирования на период 48 часов физического времени распространения волны; с использованием уточненных характеристик обновлено содержание специализированной Базы данных;

\* выполнен анализ проявления удаленных и ближних цунами на охотоморском побережье, показавший, в частности, что опасными для этого побережья могут быть только очаги цунамигенных землетрясений класса М9, расположенные непосредственно у южного побережья Камчатки и в районе Курильской гряды; что касается удаленных очагов сильнейших землетрясений, то из всего тихоокеанского сейсмического пояса наиболее опасны южно-американские землетрясения, способные вызвать колебания уровня с размахом до 5 м по всему побережью Охотского моря; результаты численного моделирования удаленных цунами позволили обнаружить еще одну зону (Новая Гвинея, Соломоновы острова), очаги в которой могут быть опасны для охотоморского побережья, так как в силу особенностей распространения энергии цунами, один из боковых лепестков диаграммы направленности распространения волновой энергии при этом оказывается ориентирован в сторону Курильских проливов;

\* созданы новые версии вычислительных и вспомогательных программных систем, включая средства поддержки проведения расчетов на последовательно вложенных сетках различной разрешающей способности, а также новые модули моделирования затопления волнами цунами участков побережья; новые алгоритмы и программы обеспечивают возможность сквозного моделирования генерации, распространения и наката волн цунами с целью определения границ зон затопления, максимальных глубин и длительностей затопления, полей скорости течений и ее максимальных абсолютных значений на побережье;

\* созданы и адаптированы к особенностям вычислительных алгоритмов цифровые модели рельефов дна и суши высокого разрешения;

\* по результатам вычислительных экспериментов определены восточная и южная границы удаленных и ближней (для Дальневосточного побережья России) цунамигенных зон так, что южной границей при пороговой магнитуде 7.0 можно считать линию, перпендикулярную побережью Хоккайдо, пересекающую его примерно в точке 43.1°N, 145.2°E и проходящую через точку 41.4°N, 146.8°E, а восточную границу ближней цунамиопасной зоны при предельно сильных возможных землетрясениях (магнитуда 9.0 и выше) с очагами вдоль Алеутской дуги можно провести примерно в районе 175°E, при снижении магнитуды до 8, восточная граница ближней цунамиопасной зоны может быть смещена еще на 350 – 400 км к западу и проведена в районе 170°E, при дальнейшем снижении магнитуды (до 7.8) колебания уровня вблизи Камчатского побережья перестают быть опасными (размах ниже 0.5 м) за исключением механизмов с направлением подвижки в плоскости разрыва, равным 135 и 90 градусам;

\* с использованием известных аналитических решений, лабораторных и натуральных данных выполнены валидация и верификация математических моделей и численных схем, подтвердившие возможность их использования для решения фундаментальных и прикладных задач динамики волн цунами;

\* с использованием материалов численного моделирования генерации, распространения и наката на берег волн цунами, порожденных удаленными от Дальневосточного побережья России модельными цунамигенными землетрясениями, получены оценки характеристик заплеска таких волн вблизи г. Северо-Курильска, хорошо согласующиеся с доступными историческими данными. Исследованы зависимости этих характеристик от магнитуды цунамигенного землетрясения, его положения и шероховатости поверхности суши.

В рамках выполнения задания по оценке характеристик проявления у Дальневосточного побережья России волн цунами, порожденных удаленными относительно этого побережья очагами цунамигенных землетрясений в 2014 г. было выполнено разномасштабное численное моделирование волны цунами, порожденной происшедшим 1 апреля 2014 г. в 23:47 UTC у северного побережья Чили, в 95 км к северо-востоку от портового города Икике мощным землетрясением с магнитудой Mw=8.2. Эта

волна была зафиксирована глубоководными и прибрежными датчиками по всему Тихому океану.

У чилийского побережья, напротив эпицентра очага, наблюдались волны с амплитудами 4 – 5 метров, пришедшие через 45 минут после начала сейсмического события. Через 14 часов волна амплитудой около 10 см (в отдельных местах – до 60 см) подошла к Гавайским островам. У побережья Японии колебания уровня моря, вызванные цунами, были зафиксированы спустя 21-22 часа после землетрясения и имели амплитуду порядка 10-40 см. Вблизи дальневосточного побережья России волна цунами была зафиксирована мареографами примерно в это же время, и имела такие же амплитудные характеристики.

Экспресс-оценка по материалам выполненных ранее расчетов для близкого к реальному очага с магнитудой 9.0 была получена в оперативном режиме еще в ходе распространения волны по акватории Тихого океана, однако исполнителями проекта были предприняты уточняющие расчеты.

Процесс генерации волн цунами подводным землетрясением воспроизводился в расчетах в рамках «поршневой» модели дислокационного очага землетрясения, параметры которого выбирались с учетом известных природных данных и сеймотектонических особенностей региона. Центр верхнего края разлома был установлен в точке с координатами 70.3° з.д., 19.65° ю.ш. на глубине 10 км. Размеры площадки разрыва составляли 170 на 60 км; угол простирания (азимут) разрыва – 358 градусов, угол падения плоскости разрыва – 15 градусов, направление подвижки в плоскости разрыва – 109 градусов; величина подвижки – 4.35 м. Расчеты, как обычно, проводились с помощью комплекса программ MGC.

Оценка «регионального» воздействия волн цунами на побережье Чили и Перу была получена по результатам расчета распространения волн в области от 87° до 68° з.д. и от 38° до 15° ю.ш. на сетке с шагом 30 угловых секунд. Сопоставление рассчитанных и наблюдаемых амплитуд волн, зафиксированных чилийскими и перуанскими прибрежными станциями (Рис. 1) показало хорошее соответствие между этими значениями, демонстрируя при этом небольшое превышение численными результатами природных данных непосредственно напротив сейсмического источника и, наоборот, их занижение при смещении в сторону. Эти же выводы подтверждаются сравнением результатов численного моделирования с записями чилийских глубоководных станций системы DART (Рис. 2).

Моделирование распространения волны цунами в акватории Тихого океана производилось на 36 часов физического времени на сетке с шагом 2 угловые минуты в расчетной области, простирающейся от 127° в.д. до 68° з.д. и от 60° ю.ш. до 63° с.ш. В окрестности Курильских островов и южной части Камчатского полуострова использовалась вложенная сетка с шагом 1 угловая минута, покрывавшая область от 145° до 165° в.д. и от 42° до 56.5° с.ш.

Приведенное на рисунке 3 распределение максимальных высот волн за все время расчета (диаграмма свечения) показывает отсутствие преобладающего направления распространения волновой энергии от рассмотренного сейсмического источника, в результате чего эта энергия рассеивается почти равномерно по всей акватории Тихого океана, практически одинаково воздействуя на равноудаленные от сейсмического источника участки побережья, открытые прямому воздействию волн.

Рисунок 4 демонстрирует распределение рассчитанных максимальных положительных амплитуд волн вдоль восточного побережья Курильских островов и юга Камчатки. С учетом численных погрешностей при расчете распространения волны на столь большое расстояние и недостаточной точности батиметрии, эти результаты хорошо соответствуют наблюдавшимся в пределах 20-40 см амплитудам волн на Дальневосточном побережье.

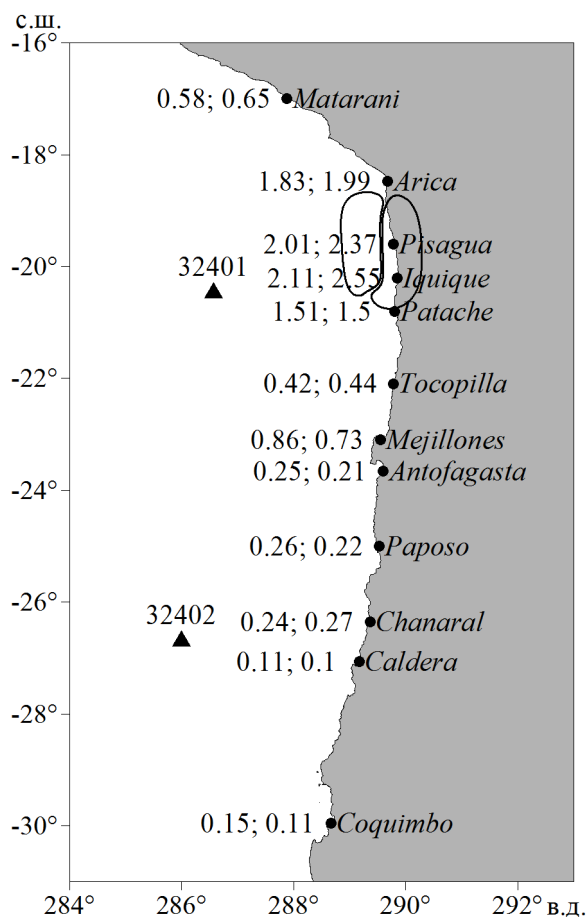


Рис. 1. Наблюдаемые (слева) и рассчитанные (справа) амплитуды волн на побережье Чили и Перу. Также показаны изолинии начального смещения и положение двух чилийских глубоководных датчиков системы DART.

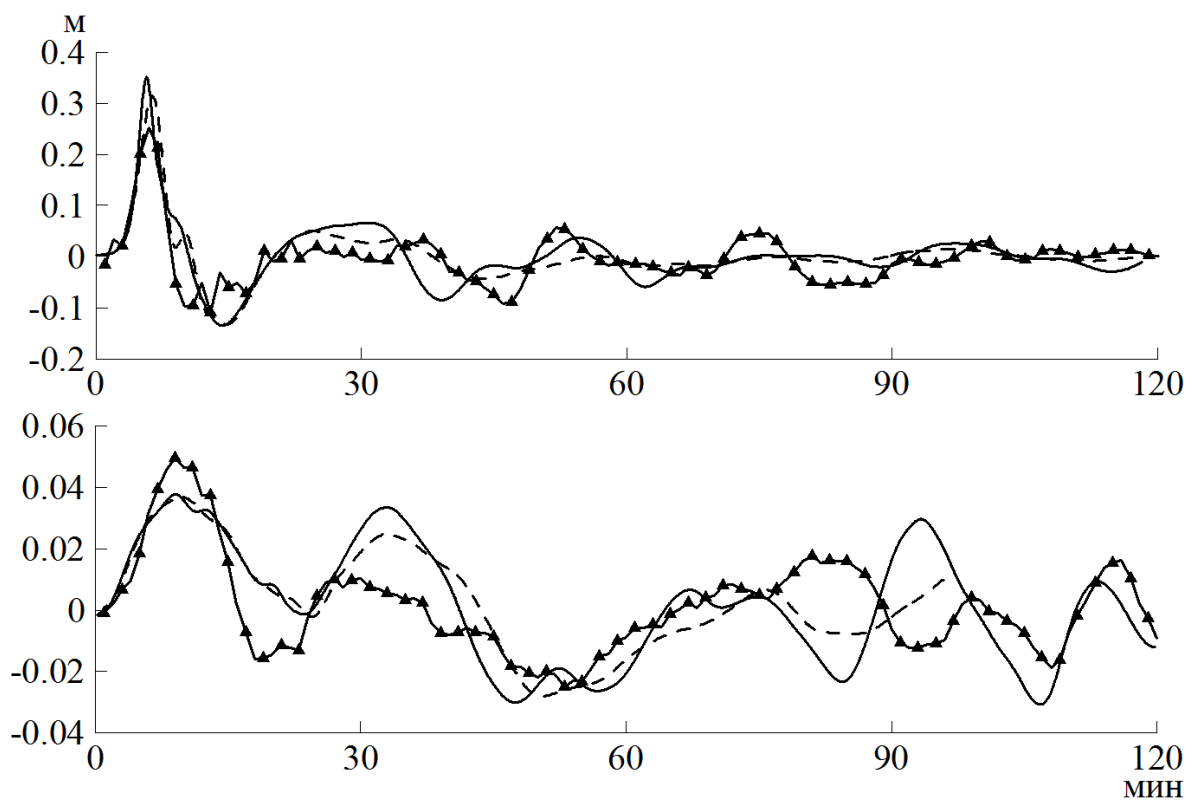


Рис. 2. Сравнение инструментальных записей (сплошные линии с маркерами) цунами в чилийских глубоководных станциях 32401 (сверху) и 32402 (снизу) с полученными при численном моделировании на сетке с шагом две угловые минуты (штриховые линии) и 30 угловых секунд (сплошные линии).

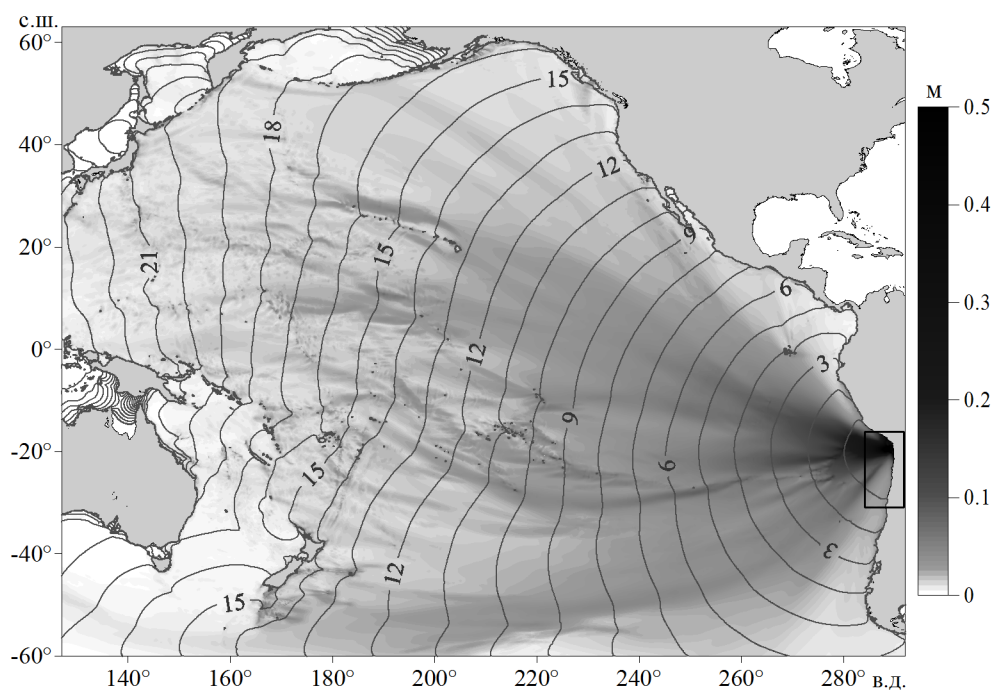


Рис. 3. Распределение рассчитанных максимальных амплитуд волн в акватории Тихого океана и изохроны движения волнового фронта. В области источника прямоугольником показана область, изображенная на рисунке 1.

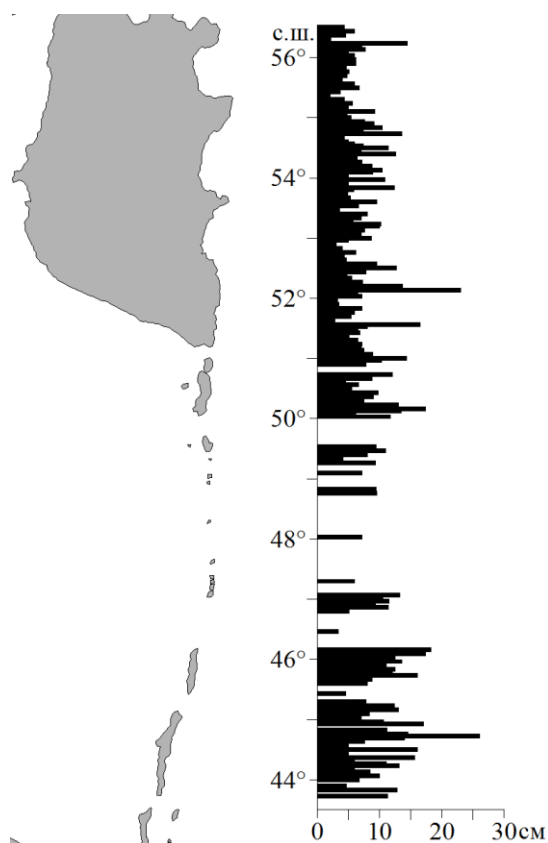


Рис. 4. Распределение рассчитанных максимальных амплитуд волн вдоль Курильских островов и юго-восточного побережья Камчатки.

Следуя плану заключительного 2014 года выполнения работ по проекту также были рассчитаны характеристики воздействия волн цунами от наиболее опасных для Дальневосточного побережья России модельных цунамигенных землетрясений, расположенных у берегов Чили (№ 45), архипелага Тонга (№ 64), Папуа-Новой Гвинеи – Соломоновых островов (№№ 67, 71) на защищаемые участки побережья вблизи г. Петропавловска-Камчатского и п. Малокурильское. Здесь были получены результаты двух типов. Первый из них непосредственно связан с созданием расчетной основы для решения задачи цунамирайонирования. В этом случае задачи решались на двухуровневых



последовательно вложенных сетках с постановкой граничных условий отражения («стенка») вдоль начального положения береговой линии. Полученные результаты были использованы для локального уточнения распределений экстремальных амплитуд волн вдоль побережья (Рис.5).

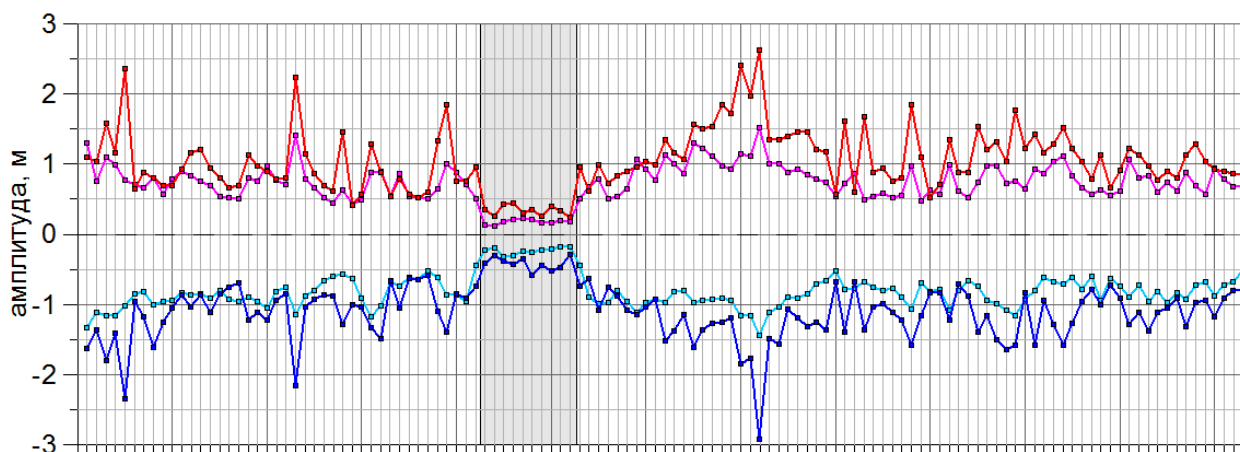


Рис. 5. Распределение экстремальных положительных и отрицательных амплитуд волн, рассчитанных от чилийского модельного источника вдоль побережья в окрестности г. Петропавловска-Камчатского (от 157.5 до 161 градусов в.д.): лиловая и голубая линия соответствуют результатам, полученным на сетке с шагом 3 угловые минуты. красная и синяя – с использованием дополнительной вложенной сетки с шагом 30 угловых секунд. Серым фоном выделены значения, рассчитанные внутри Авачинской губы.

Результаты второго типа (Рис. 6) были получены в ходе полного моделирования волн цунами (от генерации до наката) уже на трехуровневых последовательно вложенных сетках, так что на третьей, наиболее детальной сетке рассчитывался установленный ранее набор характеристик наката (границы зон затопления, максимальные глубины и длительности затопления, поля скоростей течений и их максимальных абсолютных значений на берегу).

#### **Методы и подходы, использованные в ходе выполнения проекта**

Все вычислительные эксперименты проводились с использованием созданного исполнителями программного инструментария, реализующего для расчета распространения волн цунами вычислительные схемы типа МакКормака, а для моделирования наката волн – адаптированный к этому классу задач метод крупных частиц, выбранный в качестве наиболее робастного по сравнению с другими опробованными методами (сквозной счет, 1.5D метод с использованием аналитических граничных условий на подвижном урезе воды). Все эти алгоритмы аппроксимировали классические уравнения теории мелкой воды в сферической системе координат.

Для расчета начального смещения свободной поверхности при моделировании трансформации волн цунами на трассах от зоны генерации к побережью использовалась модель Подъяпольского-Гусякова-Окады.

Численное моделирование осуществлялось с использованием оригинальных программных кодов TsuGen (№ 2011614599), MGC (Свидетельство о государственной регистрации № 2011614598), RunUp-LP (№ 2013617980), для интерпретации результатов, их хранения и визуализации были разработаны оригинальные информационные системы «Комплекс визуализации результатов моделирования волн цунами «Wave on Water» (Свидетельство о государственной регистрации № 2012617648) и База данных результатов моделирования волн цунами «Wave on Water» (№ 2012621201).

Существенным расширением функциональных возможностей используемого исполнителями оригинального программного обеспечения стала возможность одновременного комплексного моделирования процессов генерации, распространения и наката длинных поверхностных волн цунами на побережье, реализованная за счет использования в одном расчете последовательности вложенных (блочных) сеток. Для

этого применяется известная технология, когда возмущение в малую область передается из вмещающей ее глобальной области через начальные данные и граничные условия в узлах грубой сетки вдоль всех внешних морских границ малой области.

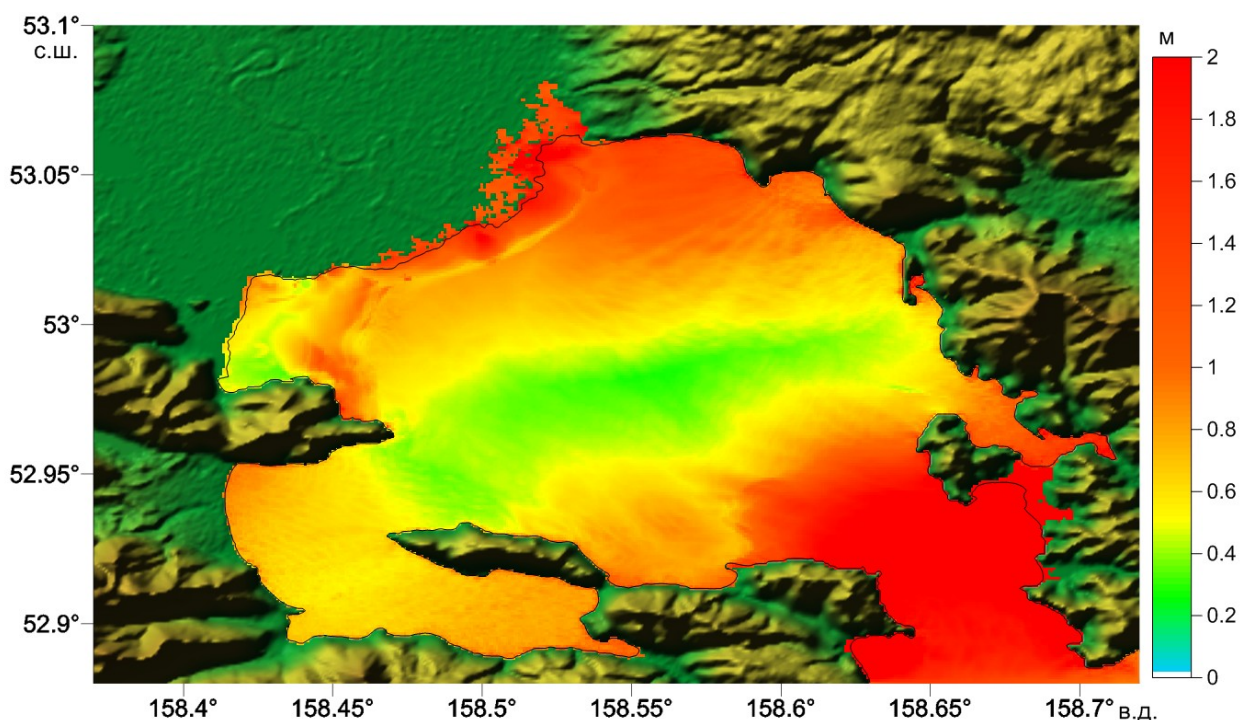


Рис. 6. Диаграмма свечения – распределение максимальных положительных амплитуд волн цунами, от модельного источника, расположенного вблизи Папуа-Новой Гвинеи – Соломоновых островов, в Авачинской губе с учетом наката волн на побережье. Черная линия - начальная линия уреза.

Созданный исполнителями вычислительный инструментарий для расчета наката реализован в виде отдельного модуля, встроенного в упомянутый выше программный комплекс МГС и позволяющего рассчитывать поля свободных поверхностей в заданные моменты времени; поля каждой из компонент скорости в те же моменты времени; картины «свечений» – массивы максимальных и минимальных значений свободной поверхности в каждом узле сетки за все время расчета наката; максимальные значения модуля скорости волн в каждом узле сетки за все время расчета; маски зоны затопления побережья; длительности затопления побережья, рассчитываемые как суммарное время, которое изначально «сухие» узлы сетки на побережье были затопленными в ходе наката волн.

Метод крупных частиц (МКЧ), использованный исполнителями проекта для решения задач наката цунами на берег, лишен недостатка, присущего «классическому» методу частиц в ячейках и состоящего в статистическом характере получаемого с его помощью решения, которое, в частности, не удовлетворяет условию гидростатического равновесия в покоящейся воде и значительно искажает процесс распространения волн. МКЧ позволяет получить сбалансированную разностную схему. При его реализации используется равномерная прямоугольная сетка, потому что, во-первых, побережье является достаточно сильно изрезанным и весьма проблематично построить криволинейную сетку, пригодную для решения уравнений математической модели и, во-вторых, в процессе наката волны происходит затекание воды во впадины, наличие которых обусловлено рельефом суши (устье рек, каньоны и т.п.), а также обтекание различного рода возвышенностей, поэтому использовать адаптивную сетку, «привязанную» к линии уреза, не представляется возможным.

Качество математических моделей и численных алгоритмов, применяемых исполнителями при решении задач оценки характеристик наката волн цунами, оценивалось на хорошо известных тестовых задачах в одномерной и двумерной постановках.

Сопоставление полученных численных результатов с натурными данными и с аналитически полученными результатами решения тестовых задач показали, что математическая модель и построенный на ее основе вычислительный алгоритм вполне адекватно воспроизводят процесс наката волн цунами на берег. Результаты также демонстрируют сходимость к экспериментальным данным при адекватном подборе свойств (шероховатость) заливаемой суши.

#### **Степень новизны полученных результатов:**

Все результаты на момент представления соответствующих отчетов являлись новыми и получены впервые.

Наиболее интересными и безусловно оригинальными являются:

- \* построение уточненного набора модельных удаленных очагов цунамигенных землетрясений магнитудой  $M_w = 9.0$ , потенциально опасных для Дальневосточного побережья России, дополненный на основании результатов моделирования в наиболее цунамиопасных для побережья России сейсмических зонах очагами меньших магнитуд –  $M_w = 8.4$ ,  $M_w = 8.6$  и  $M_w = 8.8$ ;

- \* уточнение за счет применения более детальной сетки с пространственным шагом 2 угловые минуты характеристик проявления в акватории Тихого океана и на защищаемом побережье волн цунами, вызванных построенной системой модельных удаленных сейсмических источников и рассчитанных по результатам численного моделирования за период 48 часов физического времени распространения волны;

- \* оценка проявления удаленных и ближних цунами на охотоморском побережье;

- \* создание новых версий алгоритмов и программ, обеспечивших возможность сквозного моделирования процессов генерации, распространения и наката волн цунами на побережье с использованием последовательности вложенных сеток с целью определения таких характеристик взаимодействия волн с побережьем, как границы зон затопления берега и осушения дна, максимальные глубины и длительности затопления, промежуточные поля скорости течений и ее максимальные абсолютные значения на побережье;

- \* уточнение южной и восточной границ удаленной и ближней (относительно Дальневосточного побережья России) цунамигенных зон;

- \* моделирование затопления побережья вблизи важных защищаемых населенных пунктов села Малокурильское, городов Северо-Курильска и Петропавловска-Камчатского волнами цунами, порожденными экстремальными гипотетическими цунамигенными удаленными землетрясениями.

#### **Сопоставление полученных результатов с мировым уровнем:**

Все результаты соответствуют мировому уровню исследований в данной области. Материалы исследований по проекту представлялись на авторитетных научных форумах:

- \* Теоретические семинары «Нелинейные волны», посвященный памяти чл.-к. РАН В.М. Тешукова. Март, 2012, 2013, 2014 гг., Новосибирск;

- \* XI и XII Всероссийские конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». Май, 2012, 2014 гг. Санкт-Петербург;

- \* Международная конференция «Современные информационные технологии для фундаментальных научных исследований в области наук о Земле», 8-13 сентября 2014 г., Петропавловск-Камчатский;

- \* V Всероссийская конференция с участием зарубежных ученых «Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения», 29 июня – 4 июля 2014 г., Бийск;

- \* XV Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям, 29 – 31 октября 2014 г., Тюмень;

- \* Четвертая научно-техническая конференция «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России», 29 сентября – 5 октября 2013 г., Петропавловск-Камчатский;

- \* III Международная конференция «Математические и информационные технологии», 5 – 9 сентября 2013 г., Врнячка Баня, Сербия, 10 сентября – 14 октября 2013 г., Будва, Черногория;

\* Научно-техническое совещание по фундаментальным и прикладным проблемам развития Российской системы предупреждения о цунами, 8 – 12 октября 2012 г., Новосибирск;

\* SP1 Symposium «Tsunamis, particularly due to submarine slides: cases, experiments, observations and warning» of the Joint Scientific Assembly of IAHS-IAPSO-IASPEI, July 22 – 26, 2013, Gothenburg, Sweden;

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

**Количество научных работ, опубликованных в ходе выполнения Проекта (за весь период выполнения Проекта, цифрами):**

29

**Из них в изданиях, включенных в перечень ВАК:**

7

**Из них в изданиях, включенных в системы цитирования(Web of Science, Scopus, Web of Knowledge, Astrophysics, PubMed, Mathematics, Chemical Abstracts, Springer, Agris, GeoRef):**

2

**Количество научных работ, подготовленных в ходе выполнения проекта и принятых к печати в 2014 году (цифрами):**

6

**Статьи**

1. Бейзель С.А., Гусяков В.К., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И. Численное моделирование воздействия удаленных цунами на Дальневосточное побережье России // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. **2014**. Т. 50, № 5. С. 578-590. S.A.Beisel, V.K.Gusiakov, L.V.Chubarov, and Yu.I.Shokin Numerical Simulation of the Action of Distant Tsunamis on the Russian Far East Coast // ISSN 0001-4338, Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2014, Vol. 50, No. 5, pp. 508-519. © Pleiades Publishing, Ltd., **2014**.
2. Бейзель С.А., Шокина Н.Ю., Хакимзянов Г.С., Чубаров Л.Б., Ковыркина О.А., Остапенко В.В. О некоторых численных алгоритмах расчета наката волн цунами в рамках модели мелкой воды. I. // ISSN 1560-7534, Вычислительные технологии. **2014**. Том 19, № 1. С. 40-63.
3. Шокин Ю.И., Бейзель С.А., Гусев О.И., Хакимзянов Г.С., Чубаров Л.Б., Шокина Н.Ю. Численное исследование дисперсионных волн, возникающих при движении подводного оползня // ISSN 2071-0216 (Print), ISSN 2308-0256 (Online), Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование». **2014**. Т. 7, № 1. С. 121-133, DOI: 10.14529/mmp140110.
4. Гусяков В.К. Сильнейшие цунами мирового океана и проблема цунами-районирования морских побережий // Проблемы информатики. **2013**. №4. С.36-46.
5. Dutykh D., Mitsotakis D., Chubarov L.B., Shokin Yu.I. 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).
6. 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.
7. 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.
8. Федотова З.И., Хакимзянов Г.С. Анализ условий вывода нелинейно-дисперсионных уравнений // Вычислительные технологии. **2012**. Т. 17, № 5. С. 94-108.

**Статьи в печати**

1. Шокин Ю.И., Бейзель С.А., Рычков А.Д., Чубаров Л.Б. Численное моделирование наката волн цунами на побережье с использованием метода крупных частиц // ISSN 0234-0879 (print), Математическое моделирование. **2015**. №1. (в печати)

2. Гусяков В.К., Чубаров Л.Б., Бейзель С.А. Оценка цунамиопасности побережья Охотского моря от региональных и удаленных источников // ISSN 0203-0306, Вулканология и сейсмология. **2015**. (в печати)

#### Статьи в сборниках

1. Gusiakov V.K. Tsunami impact on the African coast: historical cases and long-term hazard assessment // Extreme Natural Hazards, Disaster Risks and Societal Implications, A. Ismail-Zadeh, J. Fucugaugh, A. Kijko, K. Takeuchi, and I. Zaliapin, Editors, Cambridge University Press. May **2014**. pp. 225-233.
2. Косых В.С., Чубаров Л.Б., Гусяков В.К., Камаев Д.А., Григорьева В.М., Бейзель С.А. Методика расчета максимальных высот волн цунами в защищаемых пунктах побережья Дальнего Востока Российской Федерации // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. **2013**. № 40. С. 115-134.

#### Труды конференций

1. Shokin Yu.I., Beisel S.A., Rychkov A.D., Khakimzyanov G.S., Chubarov L.B. Исследование заплесков волн цунами на восточное побережье Японии методами численного моделирования The study of tsunami runup on the east coast of Japan by numerical simulation // Yu.Shokin et al. (Eds.): Zbornik radova Konferencije MIT [Matematicke i informacione tehnologije] 2013: u Vrnjackoj Banji (Republika Srbija) od 5 – 8 i u Budvi (Crna Gora) od 9 – 14 septembra 2013. – Beograd: Alfa univerzitet; Kosovska Mitrovica: Drustvo matematicara Kosova i Metolije; Novosibirsk: Institute of Computational Technologies Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. **2014** (Kraljevo: Grafkolor) – 404 str.: ilustr.; 24 cm. Radovi na engl. i rus. jeziku. – Tekst cir. i lat. ISBN 978-86-83237-90-6 (AU). COBISS.SR-ID 190685964. pp. 607-617.
2. Бейзель С.А., Гусяков В.К., Рычков А.Д., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И. Алгоритмы и методики численного моделирования наката волн цунами на берег в приложении к оценке характеристик заплеска волн на Дальневосточное побережье России // В кн.: ISBN 978-5-44-690306-1, Труды XII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». 27 по 29 мая 2014 г., Санкт-Петербург, Россия. - СПб.: Нестор-История. **2014**. - 626 с. стр. 228 – 230
3. Бейзель С.А., Гусяков В.К., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И. Некоторые оценки поведения волн цунами в акватории Охотского моря по материалам численного моделирования и анализа исторических сведений // В кн.: ISBN 978-5-44-690306-1, Труды XII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». 27 по 29 мая 2014 г., Санкт-Петербург, Россия. - СПб.: Нестор-История. **2014**. - 626 с. стр. 225 – 227
4. Бейзель С.А., Гусяков В.К., Рычков А.Д., Чубаров Л.Б. Вычислительные технологии определения заплесков волн цунами на отдельные участки дальневосточного побережья России // «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». Труды IV научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября – 5 октября 2013 г. Обнинск: ГС РАН, **2013**. С. 241-245.
5. Бейзель С.А., Гусяков В.К., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И. Анализ проявления удаленных и ближних цунами на охотоморском побережье России на основе результатов математического моделирования // «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». Труды IV научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября – 5 октября 2013 г. Обнинск: ГС РАН, **2013**. С. 236-240.
6. Гусяков В.К. Проблема мега-событий в оценке цунамиопасности побережья // Геология морей и океанов, Том V, Материалы XX Международной научной конференции (Школы) по морской геологии, Москва, ИО РАН, 18-22 ноября **2013** г. С.71-75.
7. Чебров В.Н., Гусев А.А., Гусяков В.К., Чебров Д.В., Абубакиров И.Р., Павлов В.М. Развитие научно-методического обеспечения сейсмической подсистемы Службы предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». Труды IV научно-

технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября – 5 октября 2013 г. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 221-225.

8. 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", СПб.: Наука, 2012. 504 с., С. 226-229.

#### **Зарегистрированные объекты интеллектуальной собственности**

1. Рычков А.Д., Бейзель С.А., Чубаров Л.Б., Программа для ЭВМ: Модуль расчета наката волн цунами на берег RunUp-LP // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ Федеральной службой по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам № 2013617980.

#### **Тезисы конференций**

1. Бейзель С.А., Рычков А.Д., Чубаров Л.Б. Сравнительный анализ некоторых алгоритмов моделирования наката волн цунами на берег // ISBN 978-5-9257-0276-5, Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения: тезисы V Всероссийской конференции с участием зарубежных ученых, 29 июня – 4 июля 2014 года, Бийск, Россия / Алт. Гос. Техн. Ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. Гос. Техн. Ун-та, 2014.– 139 с. С. 16.
2. Gusiakov V.K., Chubarov L.B., Beisel S.A. Mathematical Modeling in Tsunami Hazards Assessment: Problems and Perspectives // ISBN 978-5-8044-1470-3, Современные информационные технологии для фундаментальных научных исследований в области наук о Земле. Материалы Международной конференции. 8-13 сентября 2014 г., Петропавловск-Камчатский, Россия, pp. 102-103
3. Бейзель С.А., Гусяков В.К., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И. Уточнение северной и южной границ ближней цунамигенной зоны у Дальневосточного побережья России // Четвертая научно-техническая конференция «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России», 30 сентября – 4 октября 2013 г., г. Петропавловск-Камчатский. Программа. Тезисы докладов. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2013, 55 с. С. 39.
4. Beisel S., Gusiakov V.K., Chubarov L., Shokin Y. Tsunamis in the Okhotsk Sea: results of numerical simulation and analysis of historical data // Conference Information «Mathematical and informational technologies» MIT-2013, 05.09–09.09.2013, Vrnjacka Banja, Serbia, 10.09–14.09.2013, Budva, Montenegro. P. 68.
5. Beisel S., Gusiakov V.K., Rychkov A.D., Chubarov L. Numerical simulation of tsunami runup on the coast near the Severo-Kurilsk town and Malokurailskaya Bay // Conference Information «Mathematical and informational technologies» MIT-2013, 05.09–09.09.2013, Vrnjacka Banja, Serbia, 10.09–14.09.2013, Budva, Montenegro. P. 68-69.
6. Gusiakov V.K. Forgotten catastrophe – October 9, 1963 Vajont Dam overtopping wave // Oral presentation at SP1 Symposium "Tsunamis, particularly due to submarine slides: cases, experiments, observations and warning" of the Joint Scientific Assembly of IAHS-IAPSO-IASPEI, July 22 – 26, 2013. Gothenburg, Sweden.
7. Gusiakov V.K., Chubarov L.B., Beisel S.A. Assessment of tsunami hazard for the coast of the Okhotsk Sea // Poster presentation at SP1 Symposium "Tsunamis, particularly due to submarine slides: cases, experiments, observations and warning" of the Joint Scientific Assembly of IAHS-IAPSO-IASPEI, July 22 – 26, 2013. Gothenburg, Sweden.
8. Gusiakov V.K., Chubarov, L.B., Beisel, S.A. Input in tsunami hazard for Far-East coast of Russia from regional and far-field sources // Poster presentation at the Symposium "NH011. Innovations in Tsunami Hazard Analysis, Mitigation, and Preparedness", AGU 2013 Fall Meeting, 9-13 December 2013, San Francisco, USA. Paper Number: NH41B-1714.
9. 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, Abstracts, Izmir University. 2012. P. 60-61.
10. 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, Abstracts, Izmir University, 2012, 60-61.

Адреса (полностью) ресурсов в Интернете, подготовленных авторами по данному проекту:

[http://emsd.ru/conf2013lib/pdf/tsunami/Chebrov\\_etc\\_tsunami.pdf](http://emsd.ru/conf2013lib/pdf/tsunami/Chebrov_etc_tsunami.pdf)

[http://emsd.ru/conf2013lib/pdf/tsunami/Chubarov\\_etc.pdf?v2](http://emsd.ru/conf2013lib/pdf/tsunami/Chubarov_etc.pdf?v2)

[http://emsd.ru/conf2013lib/pdf/tsunami/Beyzel\\_etc.pdf?v2](http://emsd.ru/conf2013lib/pdf/tsunami/Beyzel_etc.pdf?v2)

[http://conf.nsc.ru/files/conferences/MIT-2013/abstracts/147217/165357/RunUp\\_FarEast-s.doc](http://conf.nsc.ru/files/conferences/MIT-2013/abstracts/147217/165357/RunUp_FarEast-s.doc)

[http://conf.nsc.ru/files/conferences/MIT-2013/abstracts/147218/166133/Okhotsk\\_Chubarov.doc](http://conf.nsc.ru/files/conferences/MIT-2013/abstracts/147218/166133/Okhotsk_Chubarov.doc)

[http://tsunami.esemc.nsc.ru/sites/tsunami.esemc.nsc.ru/files/12/public\\_pdf/JCT2014\\_v1n19\\_Bei sel.pdf](http://tsunami.esemc.nsc.ru/sites/tsunami.esemc.nsc.ru/files/12/public_pdf/JCT2014_v1n19_Bei sel.pdf)

[http://tsunami.esemc.nsc.ru/sites/tsunami.esemc.nsc.ru/files/12/public\\_pdf/v7n1st10.pdf](http://tsunami.esemc.nsc.ru/sites/tsunami.esemc.nsc.ru/files/12/public_pdf/v7n1st10.pdf)

**Участие в 2014 году в научных мероприятиях по тематике проекта (указать названия мероприятий):**

- Теоретический семинар «Нелинейные волны», посвященный памяти чл.-корр. РАН В.М. Тешукова, Новосибирск, 3 марта 2014 г.;
- XII Всероссийская конференция «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», Санкт-Петербург, 27 – 29 мая 2014 г.;
- V Всероссийская конференция с участием зарубежных ученых «Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения», Бийск, Россия, 29 июня – 4 июля 2014 г. (грант РФФИ № 14-01-06034);
- Международная конференция «Современные информационные технологии для фундаментальных научных исследований в области наук о Земле», Материалы Международной конференции. Петропавловск-Камчатский, Россия, 8-13 сентября 2014 г. (Грант № РФФИ №14-07-20017);
- XV Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям, Тюмень, 29 – 31 октября 2014 г. (грант РФФИ № 14-31-10274-мол\_г).

**Участие в 2014 году в экспедициях по тематике проекта, которые проводились при финансовой поддержке Фонда (указать номера Проектов):**

Нет

**Финансовые средства, полученные в 2014 году от РФФИ(указать общий объем, в руб.):**

360 000

**Финансовые средства, полученные в 2013 году от РФФИ(указать общий объем, в руб.):**

370000

**Финансовые средства, полученные в 2012 году от РФФИ(указать общий объем, в руб.):**

375000

**Приоритетное направление развития науки, технологий и техники РФ, которому, по мнению исполнителей, соответствуют результаты данного проекта**

6 – Рациональное природопользование

**Критическая технология РФ, в которой, по мнению исполнителей, соответствуют результаты данного проекта:**

21 – Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера

**Основное направление технологической модернизации экономики России, которому, по мнению исполнителей, соответствуют результаты данного проекта :**

Не очевидно

ФОРМА 501 ВОЗМОЖНОСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ  
ПРОЕКТА РФФИ

**Краткое назначение конечной продукции, технологии или услуг, которые будут производиться с применением полученных результатов:**

Минимизация ущерба, наносимого катастрофическими волнами цунами населению и хозяйственным структурам Дальневосточного побережья Российской Федерации

**В какой форме результаты проекта могут быть доведены до практического использования?**

Научно-техническая продукция

**Планируемый период проведения дополнительных НИОКР с целью разработки прототипов продукции (технологии) для демонстрации потенциальным инвесторам:**

До 3 лет

**Информация, связанная с интеллектуальной собственностью:**

Участие в программах федеральных органов исполнительной власти, государственный корпораций

**Предполагаемые авторами пути дальнейшего продвижения проекта:**

Патентование потребуется в ходе дальнейшей работы



## АННОТАЦИИ ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ЗА ВСЕ ГОДЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОЕКТА

**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». 2012. Стр. 226-229. Наука. Санкт-Петербург.

*Краткий реферат публикации*

Представлены результаты численного моделирования проявления вблизи Дальневосточного побережья России волн цунами, порожденных гипотетическими подводными землетрясениями, расположенными вдоль всего Тихоокеанского сейсмического пояса. По результатам расчетов определены общие закономерности распределения энергии волн цунами от очагов из различных сейсмических участков, выявлены наиболее опасные цунамигенные зоны.

**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. Стр. 34-54. Институт вычислительных технологий СО РАН. Новосибирск.

*Краткий реферат публикации*

Статья посвящена информационно-вычислительным аспектам системы аккумуляции и обработки сейсмических и вулканических данных. Описаны принципы моделирования геодинамических процессов (миграции активности) в блоковой геосреде, разработаны новые методические приемы, приведены первые результаты.

**Федотова З.И., Хакимзянов Г.С.**

Анализ условий вывода нелинейно-дисперсионных уравнений // Вычислительные технологии. 2012. Том 17. № 5. Стр. 94-108. Институт вычислительных технологий СО РАН. Новосибирск

*Краткий реферат публикации*

При более слабых, чем в работе Green A.E., Naghdi P.M. (J. Fluid Mech. 1976), ограничениях на скорость трёхмерного вихревого течения жидкости над подвижным дном выведена система нелинейно-дисперсионных уравнений мелкой воды для приближённого описания течений со свободной границей. Определены порядки аппроксимации основных гидродинамических величин и уравнений, реализованные при переходе от пространственной модели к приближённой. Для полученной нелинейно-дисперсионной модели найдены законы изменения полной энергии и потенциального вихря.

**Гусев О.И.**

Об алгоритме расчета поверхностных волн в рамках нелинейно-дисперсионной модели на подвижном дне // Вычислительные технологии. 2012. Том 17. № 5. Стр. 46-64. Институт вычислительных технологий СО РАН. Новосибирск.

*Краткий реферат публикации*

Проведено расщепление системы полных нелинейно-дисперсионных уравнений мелкой воды, учитывающих подвижность дна, на две части. Описан конечно-разностный алгоритм решения расщеплённой системы. На основе сравнений с классической моделью мелкой воды и моделью потенциальных течений обсуждается важность учёта дисперсионных свойств в рассматриваемых задачах.

**Dutykh D., Mitsotakis D., Chubarov L.B., Shokin Yu.I.**

On the contribution of the horizontal sea-bed displacements into the tsunami generation process // Ocean Modelling 2012. Vol. 56. Pp. 43-56. Elsevier. Амстердам

*Краткий реферат публикации*

Основной причиной генерации цунами являются деформации дна океана, вызванные подводными землетрясениями. Как правило, учитываются только вертикальные движения, а горизонтальные сейсмические смещения в отсутствие оползней – нет. В настоящем исследовании предлагается методология, основанная на известном решении Окада и более детально воспроизводящая все компоненты сейсмических смещений дна. Уравнения движения морского дна в сочетании с трехмерными слабо нелинейными уравнениями движения волн на воде позволяют моделировать генерацию волн цунами. Особое внимание уделяется изменению кинетической и потенциальной энергий возникающих волн, также количественно оценивается вклад горизонтальных смещений в энергетический баланс волн. Методы, предложенные в исследовании, иллюстрируются на примере цунами 17 июля 2006 у берегов Ява и некоторых более поздних событий.

#### **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, Abstracts. 2012. Pp. 60-61. Izmir University

##### *Краткий реферат публикации*

Рассмотрены подходы и методы решения прямых и обратных задач применительно к проблеме восстановления источника цунами в области генерации очагом подводного землетрясения

#### **Гусяков В.К.**

Проблема мега-событий в оценке цунамиопасности побережья // Геология морей и океанов. Материалы XX Международной научной конференции (Школы) по морской геологии, 18-22 ноября 2013 г. 2013. Том 5. Стр. 71-75. Институт океанологии РАН. Москва.

##### *Краткий реферат публикации*

Статья посвящена проблеме оценки опасности цунами для океанического побережья. Наиболее сильные возможные события (мега-цунами), характеризующиеся высотой заплеска до 40-50 м, измеренной вдоль значительной части береговой линии (до 1000 км) дают основной вклад в цунамиопасность побережья. Источником большинства мега-цунами являются подводные субдукционные землетрясения с магнитудой 9,0 и выше с периодом повторяемости от 200-300 до 1000-1200 лет. При получении любых оценок опасности цунами следует учитывать возможность возникновения таких мега-событий в ближайшем сегменте зоны субдукции.

#### **Гусяков В.К.**

Сильнейшие цунами мирового океана и проблема цунами-районирования морских побережий // Проблемы информатики. 2013. № 4. Стр. 36-46. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук. Новосибирск

##### *Краткий реферат публикации*

В работе рассматриваются проблемы оценки цунамиопасности морских побережий. Выделен класс особо опасных событий (мега-цунами), характеризующихся высокими заплесками (до 40-50 м) на протяженных участках побережья (до 1000 км). Источником таких мега-цунами в большинстве случаев являются подводные землетрясения с магнитудой 9.0 и выше, с повторяемостью от 200-300 до 1000-1200 лет, возникающие на некоторых участках зон субдукции. Учет возможности возникновения таких землетрясений на участках цунамигенных зон, угрожающих данному побережью, необходим при построении карт цунамирайонирования любого масштаба.

#### **Чебров В.Н., Гусев А.А., Гусяков В.К., Чебров Д.В., Абубакиров И.Р., Павлов В.М.**

Развитие научно-методического обеспечения сейсмической подсистемы Службы предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России // Проблемы комплексного

геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды IV научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 30 сентября – 6 октября 2013 г. 2013. Стр. 221-225. Геофизическая служба РАН. Обнинск

*Краткий реферат публикации*

Рассматриваются вопросы организационного обеспечения сейсмической составляющей функциональной подсистемы предупреждения о цунами, включая разработку, отладку и внедрение регламентов работы в службе предупреждения о цунами единой системы в Дальневосточном регионе. Приводятся основные результаты развития научно-методического обеспечения СП СПЦ.

**Gusiakov V.K.**

Forgotten catastrophe – October 9, 1963 Vajont Dam overtopping wave // «Tsunamis, particularly due to submarine slides: cases, experiments, observations and warning» of the Joint Scientific Assembly of IAHS-IAPSO-IASPEI, July 22 – 26, Gothenburg, Sweden. 2013. <http://iahs-iapso-iaspei2013.com/Abstracts.aspx?252606>. Gothenburg, Sweden.

*Краткий реферат публикации*

В докладе анализируются обстоятельства, приведшие к одной из самых драматических гидрологических катастроф - возникновению в октябре 1963 года оползня на склоне водохранилища Вайонт в северной Италии, в результате которого образовалась волна с высотой до 250 метров, перелившаяся через плотину и обрушившаяся на несколько расположенных ниже по течению деревень, в которых в течение нескольких минут погибло 1913 человек. В 2008 году ЮНЕСКО назвало трагедию на плотине Вайонт в числе пяти наиболее драматических инженерных катастроф XX века, вызванных неспособностью инженеров и проектировщиков правильно понимать природу.

**Бейзель С.А., Гусяков В.К., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И.**

Анализ проявления удаленных и ближних цунами на охотоморском побережье России на основе результатов математического моделирования // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды IV научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября – 5 октября 2013 г. 2013. Стр. 236-240. Геофизическая Служба РАН. Обнинск

*Краткий реферат публикации*

По результатам численного моделирования распространения в Охотском море волн цунами, возникающих при землетрясениях Курило-Камчатской зоны, получена оценка цунамиопасности Охотоморского побережья. Результаты вычислительных экспериментов указывают на то, что реальная опасность для Охотоморского побережья (высоты волн более 2 м) возникает при подводных землетрясениях на шельфе и материковом склоне Курильской островной дуги при магнитудах более 8.4, а при предельно сильных землетрясениях (магнитуда 9.0) происходит интенсивное проникновение цунами в акваторию Охотского моря с захватом волновой энергии шельфами Сахалина, северной части Охотоморского побережья и западного побережья Камчатки.

**Бейзель С.А., Гусяков В.К., Рычков А.Д., Чубаров Л.Б.**

Вычислительные технологии определения заплесков волн цунами на отдельные участки дальневосточного побережья России // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды IV научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября – 5 октября 2013 г. 2013. Стр. 241-245. Геофизическая Служба РАН. Обнинск.

*Краткий реферат публикации*

В работе представлены результаты применения известного численного метода крупных частиц для оценки заплеска волн цунами побережье. При этом генерация волн цунами воспроизводится с использованием дислокационной модели Подъяпольского-Гусякова-Окады, процессы распространения по океану и наката волн на берег моделируются в рамках уравнений мелкой воды. Особое внимание уделяется методике определения границ заплеска, которые рассчитываются с помощью комплексного подхода, в котором

результаты двумерного моделирования распространения волны до контрольных датчиков, расположенных на заданной глубине, используются в качестве краевых условий для последующего моделирования наката.

**Gusiakov V.K., Chubarov, L.B., Beisel, S.A.**

Assessment of tsunami hazard for the coast of the Okhotsk Sea // «Tsunamis, particularly due to submarine slides: cases, experiments, observations and warning» of the Joint Scientific Assembly of IAHS-IAPSO-IASPEI, July 22 – 26, Gothenburg, Sweden. 2013. <http://iahs-iapso-iaspei2013.com/Abstracts.aspx?253186>. Gothenburg, Sweden.

*Краткий реферат публикации*

Рассматриваются оценки долгосрочной опасности цунами для побережья Охотского моря, полученные на основе анализа реальных наблюдений исторических цунами и численного моделирования генерации и распространения волн от модельных сейсмических источников, представляющих типичные цунамигенные землетрясения в зонах субдукции. Рассмотрено несколько сценариев для модельных землетрясений с магнитудами от 7,8 до 9,0, помещенных в разных местах вдоль Курило-Камчатской сейсмической зоны, а также на шельфе Сахалина. Получены диаграммы направленности энергии цунами и распределения максимальных высот волн вдоль Охотоморского побережья

**Gusiakov V.K., Chubarov, L.B., Beisel, S.A.**

Input in tsunami hazard for Far-East coast of Russia from regional and far-field sources // Innovations in Tsunami Hazard Analysis, Mitigation, and Preparedness, AGU 2013 Fall Meeting, 9-13 December 2013, San Francisco, USA. 2013. <http://agu-fm13.abstractcentral.com/abstract>. San Francisco, USA

*Краткий реферат публикации.*

Применительно в дальневосточному побережью РФ рассматривается проблема соотношения опасностей цунами от региональных и удаленных источников. На основе результатов численного моделирования показывается, что реальная опасность от удаленных цунами может возникать только при мега-землетрясениях с магнитудой 9.0 и выше, происходящих в определенных цунамигенных зонах Тихого океана (Южная Америка, Новая Гвинея - Соломоновы острова). Ожидаемые амплитуды волн от таких землетрясений могут достигать 6-7 метров, при этом, в отличие от региональных цунами, затрагивается практически все побережье Дальнего Востока РФ.

**Косых В.С., Чубаров Л.Б., Гусяков В.К., Камаев Д.А., Григорьева В.М., Бейзель С.А.**

Методика расчета максимальных высот волн цунами в защищаемых пунктах побережья Дальнего Востока Российской Федерации // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2013. № 40. Стр. 115-134. Федеральное государственное бюджетное учреждение Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации. Москва

*Краткий реферат публикации*

В работе представлено подробное описание методики расчета максимальных высот волн цунами в прибрежных защищаемых пунктах Дальнего Востока России, результаты работы которой используются Федеральной службой России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидрометом) в работе Национальной службы предупреждения о цунами. Описаны математические модели генерации волн цунами очагами подземных землетрясений, распространения волн от источника к защищаемому побережью, а также вычислительные алгоритмы для моделирования распространения и трансформации волн цунами. Приведены основные технологические этапы выполнения работ по расчету максимальных высот волн цунами в защищаемых пунктах на побережье Дальнего Востока.

**Бейзель С.А., Шокина Н.Ю., Хакимзянов Г.С., Чубаров Л.Б., Ковыркина О.А., Остапенко В.В.**

О некоторых численных алгоритмах для расчета наката волн цунами в рамках модели мелкой воды. I. // Вычислительные технологии. 2014. Том 19. № 1. Стр. 40-63.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук

*Краткий реферат публикации*

Представлен метод численного моделирования наката волн цунами на побережье, основанный на использовании модели мелкой воды в двух приближениях: одномерном и двумерном. Вначале по двумерной модели с отражающим краевым условием на берегу рассчитывается распространение волны от источника к побережью. Параметры течения на некоторой изобате, полученные из этого расчета, используются затем в качестве краевых условий для одномерного моделирования наката вдоль различных сечений, проведенных от этой изобаты до выбранной изолинии на суше. Выполнено сравнение трех численных методов для расчета наката вдоль сечений: сквозного счета и с выделением линии разрыва на основе классической модели мелкой воды и конечно-разностного метода, основанного на модели мелкой воды с модифицированным уравнением импульса. Описана процедура восстановления границы затопления суши по результатам решения одномерных задач. Изложенная авторами методика применялась для расчета зон затопления многих участков побережья и показала удовлетворительное согласование численных результатов с данными натурных наблюдений Японского цунами 2011 года.

**Шокин Ю.И., Бейзель С.А., Гусев О.И., Хакимзянов Г.С., Чубаров Л.Б., Шокина Н.Ю.**

Численное исследование дисперсионных волн, возникающих при движении подводного оползня // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: математическое моделирование и программирование. 2014. Том 7. № 1. Стр. 121-133.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)

*Краткий реферат публикации*

Особенность моделирования поверхностных волн, порожденных движением подводного оползня, определяется тем, что эти волны зарождаются в прибрежной зоне с малой глубиной, меньшей, чем длины генерируемых волн, поэтому приемлемое описание исследуемых волновых режимов, особенно в начальной стадии процесса, может дать модель мелкой воды. Нелинейно-дисперсионные (НЛД-) модели лучше воспроизводят волновую картину, чем классические (бездисперсионные) уравнения мелкой воды, поскольку в НЛД-уравнениях гидродинамики учитывается дисперсия волн и в не-которой степени неоднородность процесса в вертикальном направлении. В настоящей работе используется полная НЛД-модель, выведенная в (Fedotova Z.I., Khakimzyanov G.S., Dutykh D. RJNAMM. 2014 (в печати)) из уравнений Эйлера с учетом подвижности дна и без предположений о малости амплитуды и о потенциальности исходного трех-мерного течения несжимаемой жидкости со свободной границей. Предлагается метод расщепления, сводящий сложную задачу для НЛД-уравнений к двум более простым: к системе уравнений гиперболического типа и к скалярному уравнению эллиптического типа для осредненной по глубине дисперсионной составляющей давления. Приведены некоторые результаты расчетов с использованием НЛД-модели, которые сравниваются с результатами, полученными по бездисперсионной модели мелкой воды, а также с известными лабораторными данными о волнах, возникающих при движении твердых тел по плоскому подводному откосу.

**Бейзель С.А., Гусяков В.К., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И.**

Численное моделирование воздействия удаленных цунами на Дальневосточное побережье России // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Том 50. № 5. Стр. 578-590. МАИК.

*Краткий реферат публикации*

Представлены результаты численного моделирования воздействия удаленных цунами на Дальневосточное побережье России. Показано, что наиболее опасными для этого побережья являются волны, порожденные очагами сильнейших землетрясений класса М9 в районе южно-чилийского побережья, а также в районе Папуа-Новой Гвинеи и Соломоновых островов. Другие цунамигенные зоны Тихого океана, в силу их географического расположения, ориентации очагов и отсутствия выраженных волноводов (подводных хребтов) вдоль трасс распространения цунами, не являются для него опасными даже при предельно возможной магнитуде подводных субдукционных землетрясений. Результаты моделирования сопоставлены с историческими данными о проявлениях удаленных цунами на Дальневосточном побережье РФ.