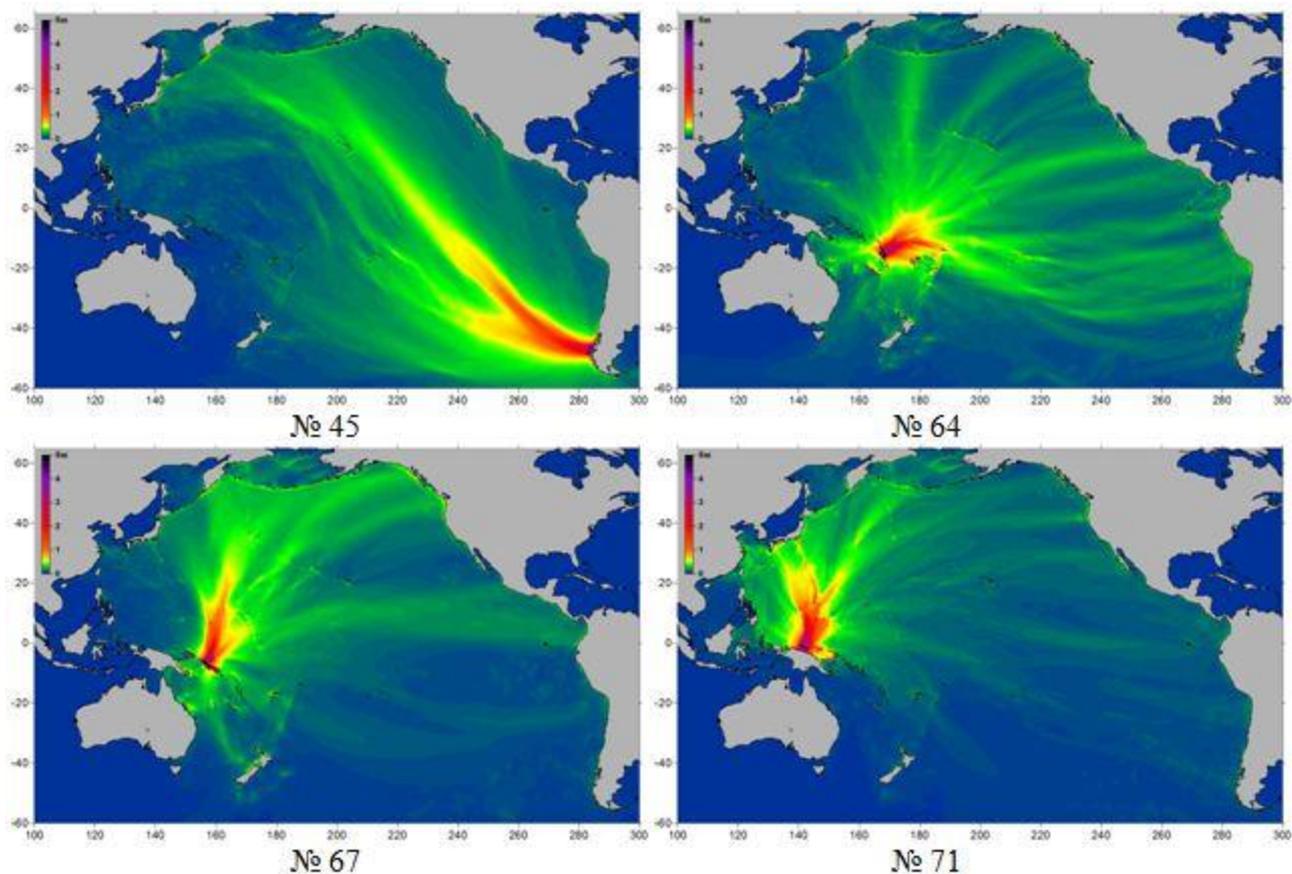


РАСШИРЕННАЯ АННОТАЦИЯ ОТЧЕТА

Исследования, выполненные в 2013 г. по проекту, были связаны с получением новых знаний о характеристиках проявления у Дальневосточного побережья РФ катастрофических волн цунами, вызванных удаленными от этого побережья цунамигенными землетрясениями. При этом исполнители проекта сумели перейти от глобальных оценок, представляющих картины свечений – направлений распространения волновой энергии на трассах от источника волны (цунамигенного землетрясения) до береговой линии, интегральных характеристик проявления волн, порожденных различными удаленными землетрясениями, вдоль протяженного участка защищаемого побережья, гистограмм, иллюстрирующих распределения максимальных амплитуд волн, рассчитанных вблизи конкретных защищаемых пунктов для различных очагов – к детальным характеристикам заплеска волн цунами на локальные участки побережья, прилегающие к населенным пунктам Дальневосточного побережья России: границ зон затопления, максимальных глубин и длительностей затопления, полей скорости течений и ее максимальных абсолютных значений на побережье.

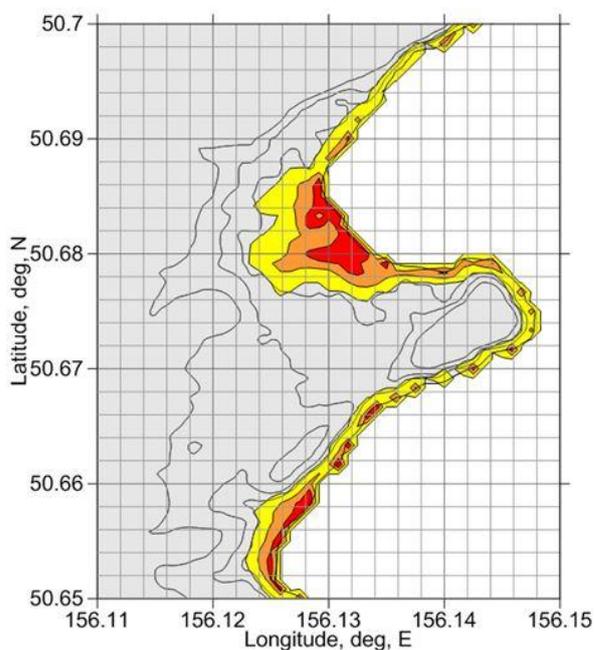
Примером такого рода результатов стало численное исследование характеристик заплеска на побережье вблизи г. Северо-Курильска. Выполненные на предыдущем этапе исследования позволили выделить в акватории Тихого океана четыре наиболее опасных для побережья России положения гипотетических очагов цунамигенных землетрясений. Один из них был расположен вблизи побережья Чили и оказался моделью очага «чилийского, 1960 г.» цунами (№ 45), три других оказались в акватории, прилегающей к Папуа-Новой Гвинее и Соломоновым островам (№№ 64, 67, 71). Следующие четыре рисунка демонстрируют характерные направления распространения волновой энергии, порожденной упомянутыми выше цунамигенными землетрясениями.



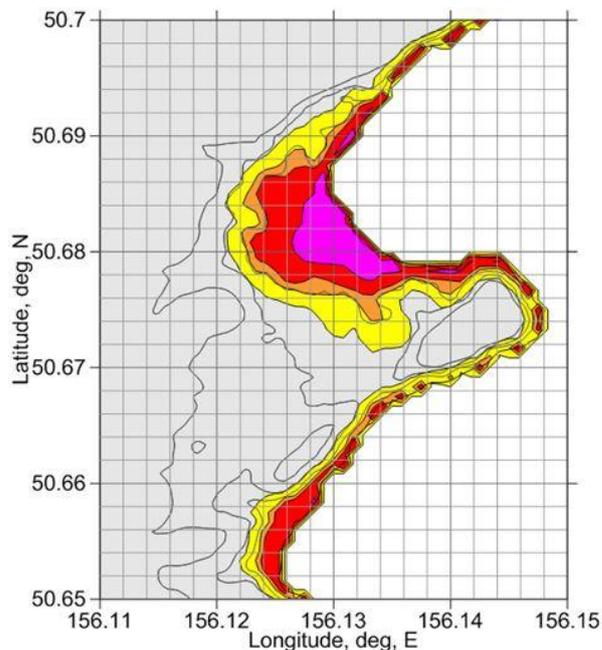
Результаты численного моделирования «Чилийского цунами» показали, что максимальный заплеск в окрестности г. Северо-Курильск достигает 5 метровой изолинии рельефа, что хорошо согласуется с известными данными наблюдения, утверждающими что «На Курильских островах максимальная высота подъема воды составляла 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 № 67, расположенным вблизи Соломоновых островов.



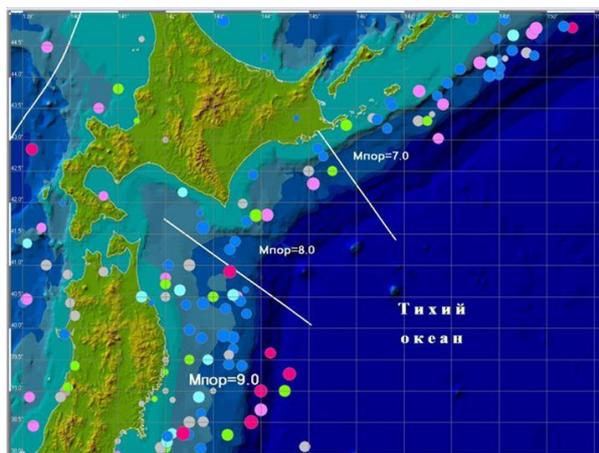
№ 45



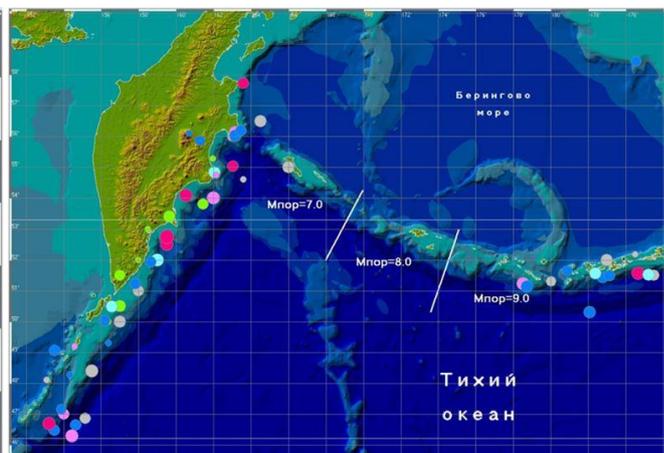
№ 67

Оценки воздействия волн цунами на побережье удалось получить благодаря новым вычислительным алгоритмам и программным системам, позволившим проводить расчеты на вложенных сетках различной разрешающей способности и моделировать затопление волнами цунами участков побережья с учетом реальных рельефов суши и дна.

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. Выполненные исследования показали, что южной границей ближней цунамигенной зоны при пороговой магнитуде 7.0 можно считать линию, перпендикулярную побережью Хоккайдо, пересекающую его примерно в точке 43.1°N , 145.2°E (в районе Хаманака) и проходящую через точку 41.4°N , 146.8°E . а восточную границу можно провести примерно в районе 170°E .



Южная граница



Восточная граница

Форма 501. КРАТКИЙ НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ

1.1. Номер проекта	12-05-00894
1.2. Руководитель проекта	Чубаров Леонид Борисович
1.3. Название проекта	Оценка воздействия удаленных цунами на Дальневосточное побережье России
1.4. Вид конкурса	а - Инициативные проекты
1.5. Год представления отчета	2013
1.6. Вид отчета	этап 2013 года
1.7. Аннотация	

Краткий перечень полученных за отчетный период важнейших результатов выглядит следующим образом:

- созданы новые версии вычислительных и вспомогательных программных систем, включая средства поддержки проведения расчетов на 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 можно провести примерно в районе 170°E;
- с использованием известных аналитических решений, лабораторных и натурных 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, демонстрируя достигающий 5 метровой изолинии рельефа заплеск волны от «чилийского» источника и наибольший заплеск от волны цунами, порожденной источником, расположенным вблизи Соломоновых островов.

1.8. Полное название организации, где выполняется проект

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

"Исполнители проекта согласны с опубликованием (в печатной и электронной формах) научных отчетов и перечня публикаций по проекту"

Подпись руководителя проекта

Форма 503. РАЗВЕРНУТЫЙ НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ

- 3.1. *Номер проекта* 12-05-00894
- 3.2. *Название проекта* Оценка воздействия удаленных цунами на Дальневосточное побережье России
- 3.3. *Коды классификатора, соответствующие содержанию фактически проделанной работы* 05-513 01-223 01-222
- 3.4. *Объявленные ранее (в исходной заявке) цели проекта на 2013 год*
- 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, проведение вычислительных экспериментов и определение экстремальных характеристик границ заплеска, высот наката с учетом детальной батиметрии и других факторов.

Исходя из этих целей был сформулирован план работ, согласно которому

- совершенствовалось **алгоритмическое и программное обеспечение**;
 - осуществлялись **постановки задач** для выполнения вычислительных экспериментов;
 - готовились необходимые для проведения расчетов **входные данные**, включая цифровые рельефы дна исследуемых акваторий и прилегающих к ним участков суши;
 - составлялись наборы **гипотетических цунамигенных землетрясений** и рассчитывались соответствующие массивы начальных возмущений свободной поверхности океана;
 - проводились **вычислительные эксперименты** в ходе которых решались задачи, соответствующие заявленным целям проекта:
 - уточнению **восточной и южной границ** удаленных и ближней для Дальневосточного побережья России цунамигенных зон,
 - определению **характеристик заплеска волн цунами** на побережье, прилегающее к некоторым населенным пунктам Дальневосточного побережья России.
- 3.5. *Степень выполнения поставленных в проекте задач*
Цели этапа 2013 г. в целом достигнуты, поставленные в плане задачи решены.
- 3.6. *Полученные за отчетный период важнейшие результаты*
Краткий перечень полученных за отчетный период важнейших результатов выглядит следующим образом:
- созданы новые версии вычислительных и вспомогательных программных систем, включая средства поддержки проведения расчетов на вложенных сетках различной разрешающей способности, а также новые модули моделирования затопления волнами цунами прилегающих к исследуемым акваториям участков побережья;
 - созданы и адаптированы к особенностям вычислительных алгоритмов цифровые модели рельефов дна и суши высокого разрешения;
 - по результатам вычислительных экспериментов определены восточная (вдоль Алеутской дуги, в акватории Берингова моря) и южная (вдоль побережья северной Японии) границы удаленных и ближней для Дальневосточного побережья России цунамигенных зон;
 - с использованием известных аналитических решений, данных лабораторных исследований и натурных наблюдений выполнены валидация и верификация используемых математических моделей и вычислительных алгоритмов,

подтвердившие возможность использования имеющегося инструментария в решении как фундаментальных, так и прикладных задач динамики волн цунами, в том числе и прогнозного характера;

- 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 некоторых населенных пунктов.

Далее следует более подробное изложение перечисленных выше результатов.

1. Новые версии вычислительных и вспомогательных программных систем

В отчетный период произведена модификация программного обеспечения, заключающаяся в частности в том, что программный комплекс, рассчитывающий процессы генерации волн подводными землетрясениями и их распространения в акваториях от зоны источника к побережью, дополнен модулем расчета наката волн цунами на побережье, реализующий алгоритм метода крупных частиц. Модуль позволяет рассчитывать такие характеристики 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. Выполнены необходимые шаги по государственной регистрации соответствующей программы для ЭВМ Федеральной службой по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам [5].

Еще одним результатом совершенствования и модификации программного обеспечения, выполненной в рамках проекта, стала возможность моделирования процессов генерации, распространения и наката длинных поверхностных волн цунами на побережье с использованием телескопически вложенных (блочных) сеток.

2. Цифровые модели рельефов дна и суши

Для трех населенных пунктов Дальнего Востока – пос. Малокурильское, г. Северо-Курильск, пос. Усть-Камчатск, расположенных в разных частях (южной, центральной и северной) Курило-Камчатской сейсмогенной зоны и обладающих различной ориентацией подводной акватории по отношению к направлению подхода волн цунами, построены детальные цифровые массивы топографии и батиметрии на сетке с шагом 1 угловая секунда (Рис. 1 – Рис. 3). Эти рельефы были построены на основе данных SRTM-3sec для суши [9] и оцифровки доступных изображений морских карт.

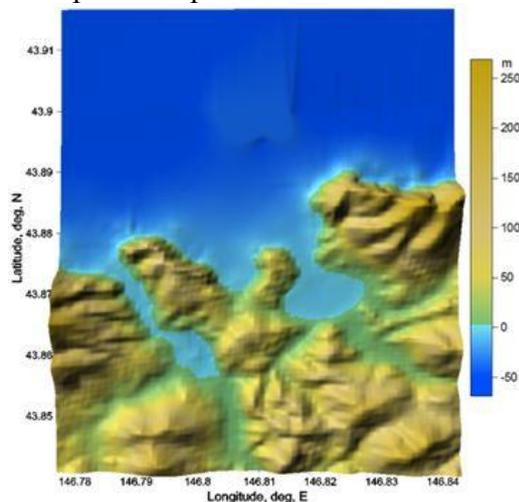


Рис. 1. 3D изображение рельефа расчетной области для моделирования наката волны цунами на побережье бухты Малокурильская.

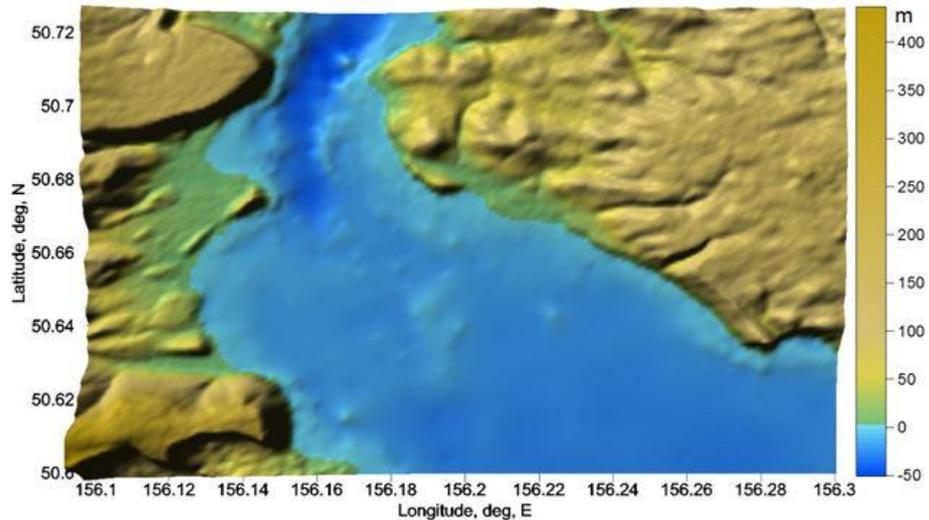


Рис. 2. 3D изображение рельефа расчетной области для моделирования наката на побережье вблизи г. Северо-Курильска

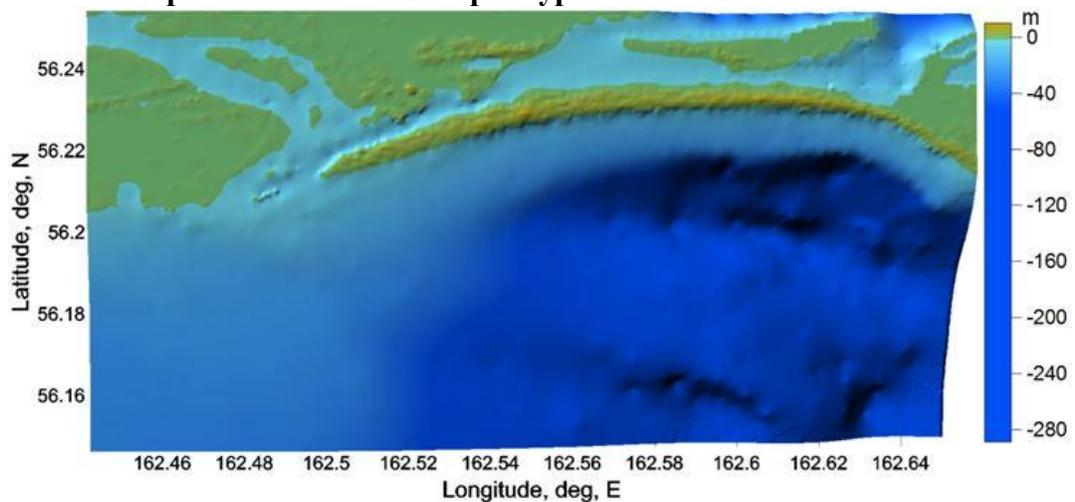


Рис. 3. 3D изображение рельефа расчетной области для моделирования наката на побережье вблизи пос. Усть-Камчатск

3. Восточная и южная границы удаленных и ближней цунамигенных зон

Задача об уточнении границ удаленной и ближней цунамигенных зон (относительно Дальневосточного побережья России) имеет не только фундаментальное, но и серьезное практическое значение. Без ее решения невозможно вести работу по совершенствованию регламента действий национальной службы предупреждения о цунами, а значит и по снижению, минимизации ущерба, наносимого волнами цунами населению и хозяйственным объектам Дальневосточных прибрежных территорий России.

Решение указанной задачи получено с использованием результатов анализа доступных исторических сведений и результатов специально организованных вычислительных экспериментов, выполнявшихся для группы «ближних» и группы «удаленных» модельных цунамигенных землетрясений.

Исторические данные (Рис. 4, Рис. 5) говорят о том, что цунамигенные землетрясения с очагами южнее 41°N , расположенными вдоль восточного побережья о-ва Хонсю, и давшие максимальные заплески на побережье Санрику 15 июня 1896 года ($M_s = 7.6$, $H_{\text{max}} = 38$ м) и 2 марта 1933 года ($M_s = 8.1$, $H_{\text{max}} = 29$ м), не вызвали каких-либо ощутимых колебаний уровня в районе Южных Курильских островов. Отсюда следует, что цунамигенные очаги с расположением южнее зоны сочленения Курило-Камчатской и Японской островных дуг не представляют реальной угрозы для российского побережья. Исключением здесь могут быть только предельно возможные по силе мега-землетрясения с магнитудой 9.0 и выше. Как известно [3], цунами Тохоку 11 марта 2011 года

вызвало колебания уровня с размахом до 2.2 м на всех Южных Курилах и наблюдалось на северных Курилах с высотами до 2 м.

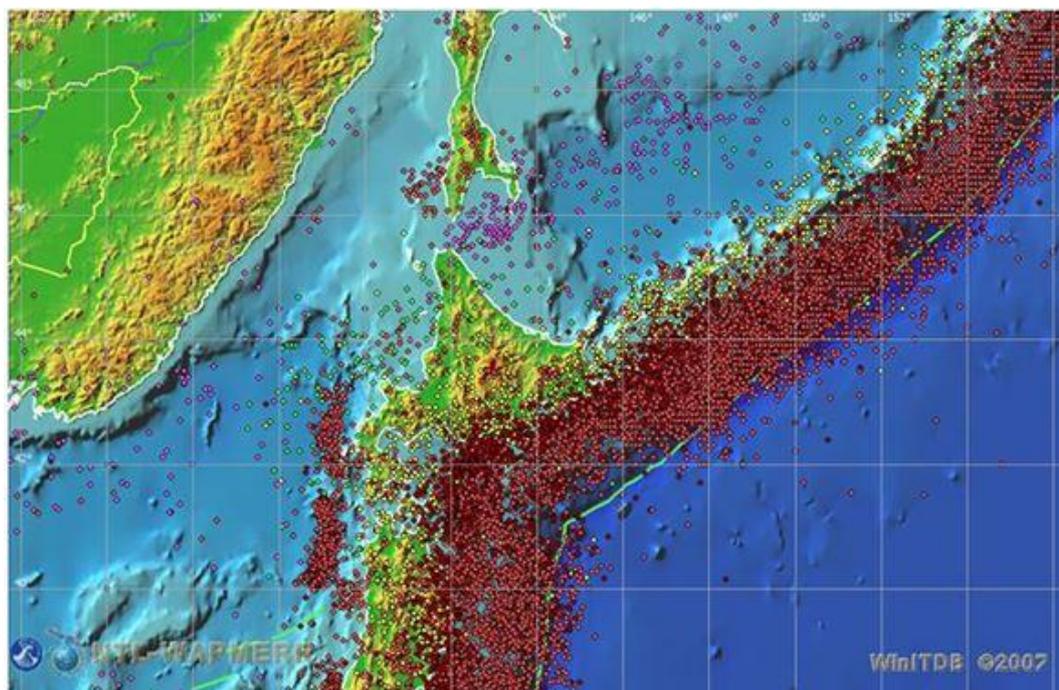


Рис. 4. Карта сейсмичности района сочленения Курило-Камчатской и Японской сейсмогенных зон. Показаны землетрясения с магнитудами $M > 5$ за период с 1900 по 2011 гг.

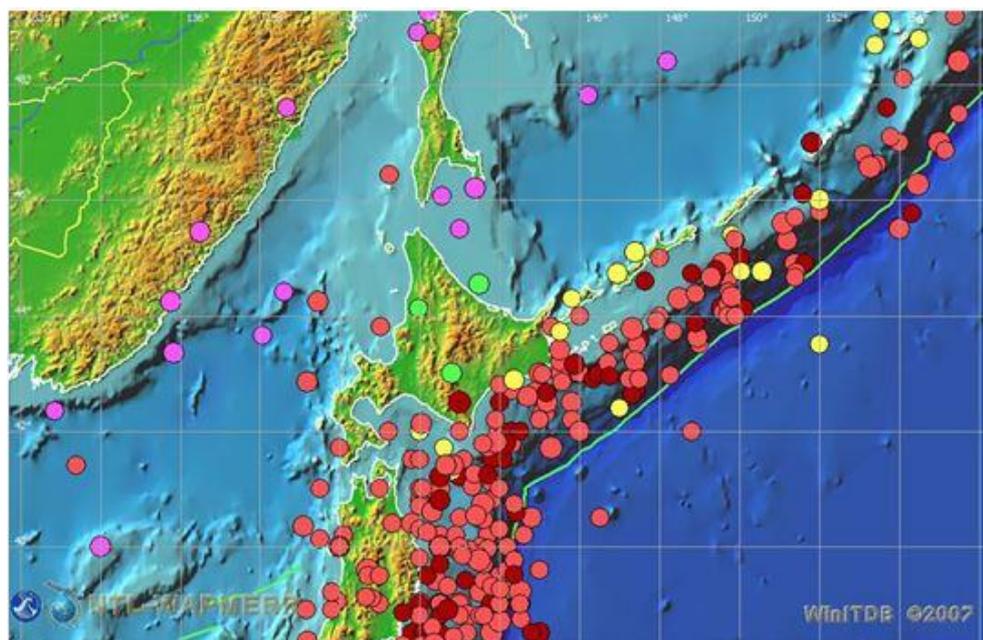


Рис. 5. Карта очагов сильных (с $M > 7$) очагов землетрясений для района сочленения Курило-Камчатской и Японской сейсмогенных зон за период с 1900 по 2011 гг.

Численное моделирование группы «ближних» цунами проводилось на сетке с шагом 1 угловая минута на 24 часа физического времени в расчетной области (Рис. 6), простиравшейся по долготе от 127°E до 180°E и по широте от 32°N до 63°N , а группы «удаленных» цунами – на двухминутной сетке, на 48 часов физического времени в расчетной области, простирающейся в долготном направлении от 100°E до 300°E и в широтном – от 60°S до 65°N .

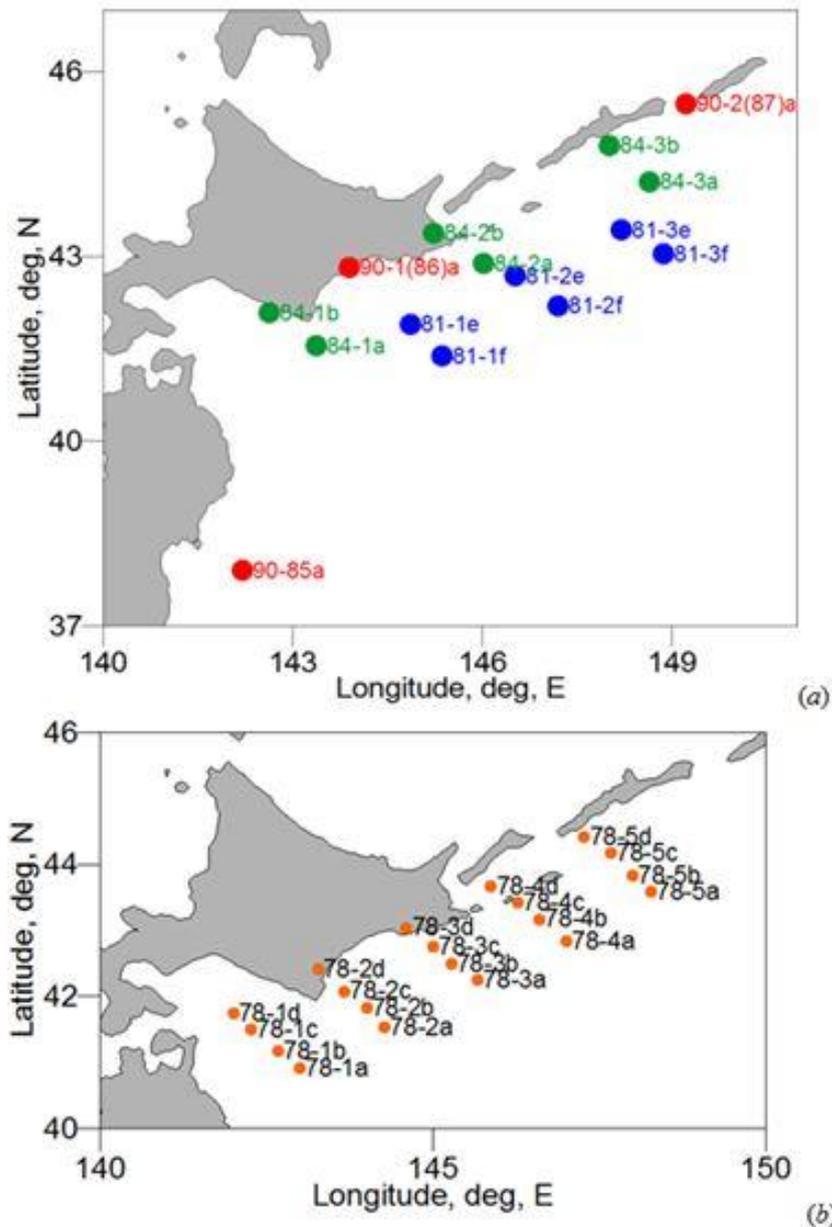


Рис. 6. Схемы расположения модельных очагов гипотетических цунамигенных землетрясений, рассмотренных при уточнении южной границы ближней цунамигенной зоны, представляющей опасность для Дальневосточного побережья России. Разноцветными кружочками указаны положения эпицентров землетрясений с различной магнитудой.

Выполненные исследования показали (Рис. 7), что южной границей ближней цунамигенной зоны при пороговой магнитуде 7.0 можно считать линию, перпендикулярную побережью Хоккайдо, пересекающую его примерно в точке 43.1°N, 145.2°E (в районе Хаманака) и проходящую через точку 41.4°N, 146.8°E. Выбор этого положения границы сделан главным образом на основании результатов моделирования, показывающих, что для очагов южнее этой границы диаграмма свечения типичного цунамигенного очага с магнитудой в диапазоне 7.0-7.9 уже полностью «уходит» с российского побережья. Этот вывод также подтверждается всеми доступными материалами о проявлениях исторических цунами из этого района.

Для очагов с магнитудами в диапазоне 8.0-8.9 положение южной границы сдвигается еще примерно на 200 км к юго-западу (вдоль побережья Хоккайдо) в район сочленения Курило-Камчатской и Японской цунамигенных зон (пролив Цугару) и соответствует линии, проходящей через точки 41.7°N, 142.0°E и 40.1°N,

145.0°E. Южнее этой границы опасными остаются мега-землетрясения с магнитудами 9.0 и выше, что наглядно подтвердилось в случае цунами Тохоку 11 марта 2011 года. Такие события, однако, должны обрабатываться по совершенно другой схеме, отличной от обработки «нормальных» цунамигенных землетрясений. Главной проблемой при этом становится различие сильнейших нормальных землетрясений (магнитуды 8.0-8.9) от мега-землетрясений класса M9 (с магнитудами 9.0 и выше), которое не может быть сделано в пределах первого часа после возникновения события только по сейсмическим данным. Здесь требуется применение всего комплекса измерений, включая GPS данные, записи приборов сильных движений, глубоководных регистраторов цунами и прибрежных кабельных либо буйковых датчиков, защищающих конкретные населенных пункты.



Рис. 7. Границы и магнитудные пороги для южной части границы ответственности дальневосточной СПЦ. Кружками показано положение исторических цунамигенных землетрясений этого района. Цвет кружков определяется интенсивностью цунами по шкале Соловьева-Имамуры.

Каждая из двух крупнейших сейсмогенных зон Тихого океана – Курило-Камчатской, являющейся восточной границей Тихоокеанской плиты, и Алеутской имеет в недавнем прошлом историю возникновения крупнейших (класса M9) землетрясений и высокий уровень современной сейсмичности (Рис. 8, Рис. 9).

Другой проблемой является почти полное отсутствие исторических данных о проявлениях цунами из этого района (западная часть Алеутской дуги) на Дальневосточном побережье РФ. Последнее по времени крупное землетрясение в районе западной части Алеутской дуги произошло 4 марта 1965 года. Магнитуда основного толчка M_w оценивается величиной 8.7. Максимальный заплеск (10.6 м) был измерен на о-ве Шемя. Наиболее раннее историческое событие из этого района относится к 1849 г. Далее, в одном из каталогов [4] имеются сведения о землетрясении, случившемся в этом районе 30 января 1917 года, которое, возможно, сопровождалось цунами. Других сильных землетрясений в этой части Алеутской дуги не зафиксировано. По мнению многих исследователей, ее западный участок, лежащий между западной границей очага землетрясения 1965 года (примерно в районе 170°E) и полуостровом Камчатский, представляет собой

крупную (длиной порядка 500 км) сейсмическую брешь, способную разрядиться землетрясением с магнитудой не менее 8.

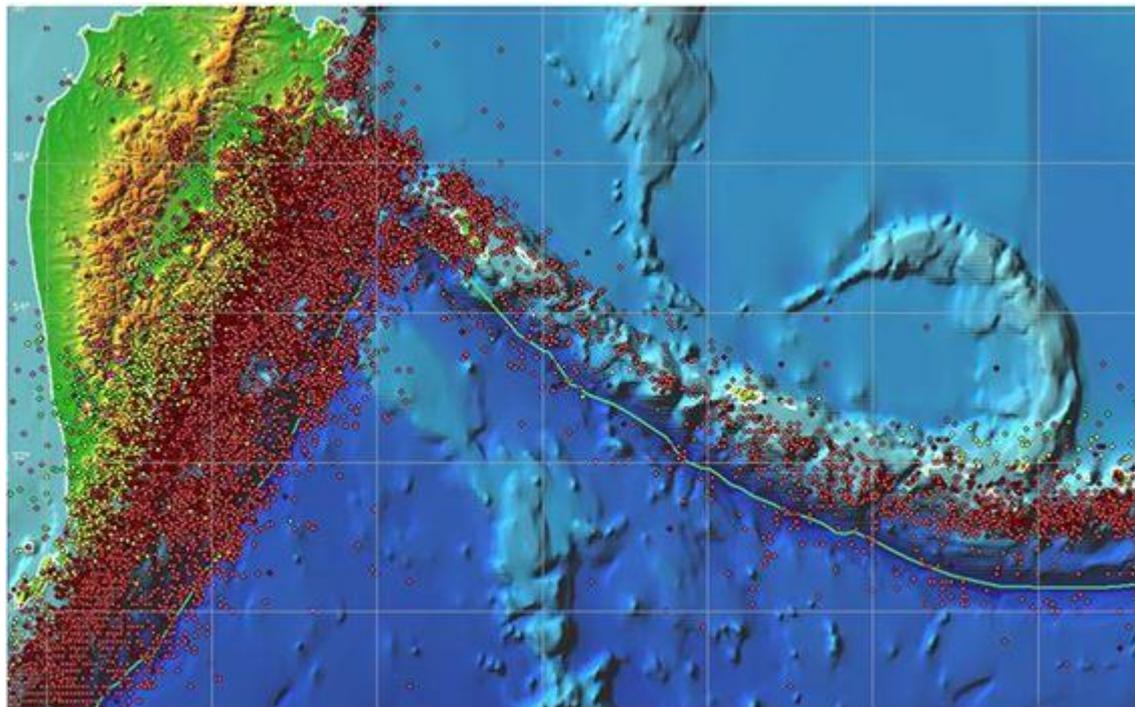


Рис. 8. Карта сейсмичности района сочленения Курило-Камчатской и Алеутской сейсмогенных зон. Показаны землетрясения с магнитудами $M > 5$ за период с 1900 по 2011 гг.

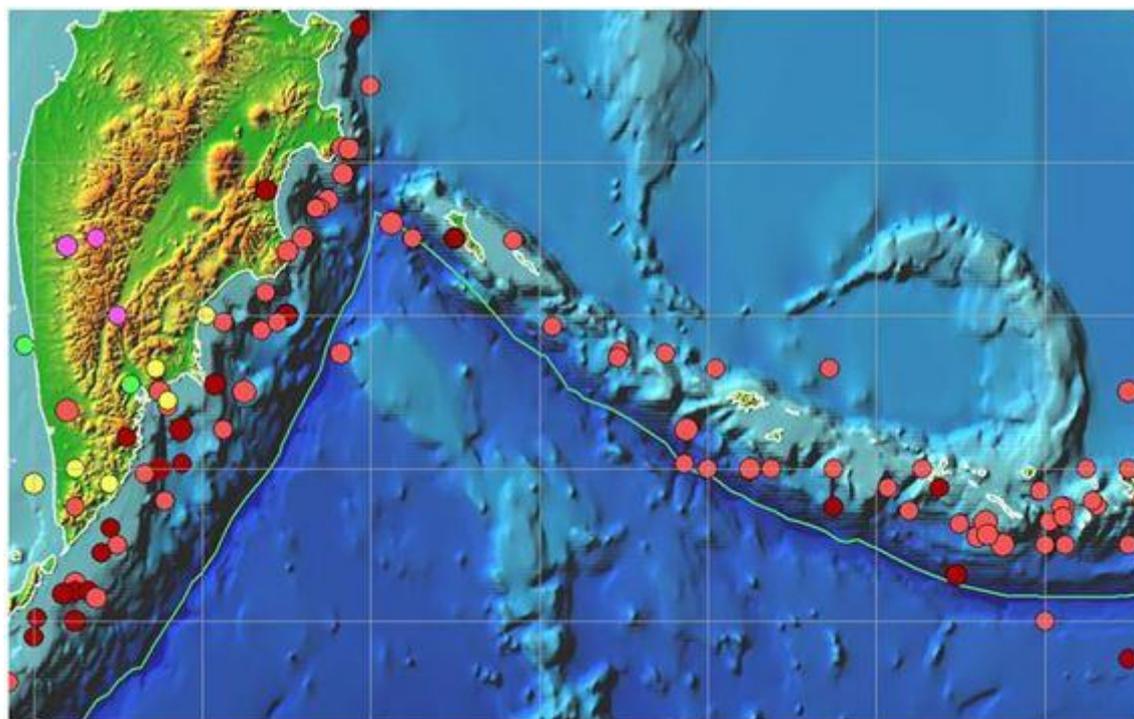


Рис. 9. Карта сейсмичности района сочленения Курило-Камчатской и Алеутской сейсмогенных зон. Показаны землетрясения с магнитудами $M > 7$ за период с 1900 по 2011 гг.

В серии выполненных авторами численных расчетов распространения цунами проверялись различные очаги модельных землетрясений с магнитудами от 7.8 до 9.0 и разрывами, ориентированными вдоль Алеутской дуги с пологим падением плоскости разрыва ($\delta = 10^\circ$) под Берингоморскую плиту. Для каждого

модельного очага проверялось также влияние изменения направления подвижки – от правостороннего сдвига ($\lambda = 170^\circ$), через взбросо-сдвиг ($\lambda = 135^\circ$) до пологого надвига ($\lambda = 90^\circ$).

Результаты расчетов показали, что цунамиопасность для Дальневосточного побережья России (в основном, конечно, Камчатки и, в меньшей степени, Курильских островов) представляют не только очаги, входящие в «ближнюю» систему, но также и более далекие алеутские источники. Для них размахи амплитуд волн составляют в отдельных мареографах до 5 и 3 м соответственно, наблюдаются также и размахи до 2 м на восточном побережье Сахалина (такого сильного воздействия на сахалинское побережье у более близких алеутских очагов не наблюдается). По мере удаления эпицентров землетрясений от побережья России цунамиопасность для побережья России генерируемых ими волн уменьшается, так что наблюдаются только амплитуды волн с размахами до 2 м с западной стороны м. Говена.

Таким образом, 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 (Рис. 10). При этом время распространения головной волны до о-ва Беринга будет порядка 40 мин, до побережья Камчатки – 60-70 мин. Землетрясение магнитуды 9.0 из этого района способно создать опасные колебания уровня на всем восточном побережье Камчатки с высотами свыше 3 м и размахом порядка 6 м. Причем максимальные колебания уровня на Камчатке слабо зависят от типа подвижки – чисто сдвиговый механизм может оказаться более опасным, чем поддвиговой. Максимальный размах колебаний может возрастать до 11 – 12 м при приближении очага землетрясения к Камчатке, опять же вне зависимости от типа механизма. Интересно отметить, что максимальные высоты и размах колебаний на о-ве Беринга оказываются при этом даже ниже, чем на камчатском побережье (3-4 м и 6-8 м, соответственно), что может быть следствием его нахождения в пределах очаговой области, где фактические колебания уровня примерно соответствуют начальным подвижкам в очаге землетрясения.

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 . Для очагов с $M_w = 8.4$ максимальные высоты на Камчатском побережье будут в пределах 1 м, размах – в пределах 2 м. При этом, согласно модельным расчетам, примерно такие же высоты (в пределах 1 м) будут наблюдаться и на о-ве Беринга. 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.

В отличие от стандартной ситуации расположения очага вдоль защищаемого побережья изменение направления подвижки (угол λ_0) для модельных алеутских очагов не оказывает существенного влияния на средние высоты волн на Камчатке. Причина этого заключается в изменении диаграммы направленности излучения энергии очагом при изменении направления подвижки. При сдвиговой подвижке диаграмма имеет четырехлепестковый вид, при этом один из лепестков всегда направлен в сторону Камчатки (под углом в 45° к простиранию разрыва). При взбросовой подвижке амплитуда начальных смещений увеличивается, но в диаграмме остаются два основных лепестка, направленных под прямым углом к плоскости разрыва, т.е. в этом случае основная энергия уходит в северо-западный сектор Тихого океана, минуя побережье Камчатки и северных Курил.



Рис. 10. Границы и магнитудные пороги для восточной части границы ответственности дальневосточной СПЦ. Кружками показано положение исторических цунамигенных землетрясений этого района. Цвет кружков определяется интенсивностью цунами по шкале Соловьева-Имамуры.

4. Валидация и верификация математических моделей и вычислительных алгоритмов

Выполнены верификация и валидация математических моделей, вычислительных алгоритмов и программного обеспечения на известных модельных задачах [13] для одномерного (Рис. 11, накат уединенной волны на пологий откос, соединяющийся с участком постоянной глубины) и двумерного (Рис. 12, обтекание уединенной волной конического острова) случаях.

Результаты проведенных вычислительных экспериментов хорошо согласуются с аналитическими решениями, экспериментальными данными, результатами расчетов другими численными алгоритмами, в том числе (в одномерном случае) имеющимися в арсенале исполнителей проекта (Рис. 19, Рис. 22).

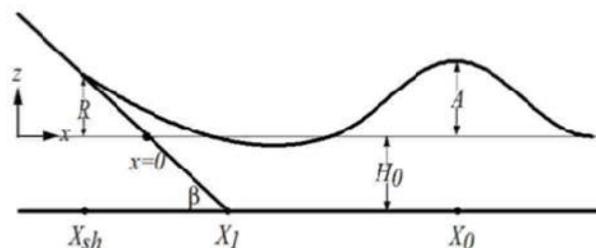


Рис. 11. Схема расчетной области для одномерных тестовых расчетов.

Анализ высот заплеска вдоль периметра конического острова (Рис. 22), рассчитанных в ходе тестовых испытаний для различных значений параметра шероховатости, подтвердил ранее обнаруженную тенденцию к образованию теневой («безопасной») зоны при *подходе* к тыльной стороне острова и значительный рост высоты заплеска в тыльной его части.

Приведенные на рисунке результаты явно демонстрируют нелинейность изучаемого процесса. Это проявляется в том, что если при малой амплитуде падающей волны (эксперимент А) удастся подобрать параметр шероховатости (коэффициент Шези), при котором результаты численного моделирования вплотную приближаются к экспериментальным данным вдоль всего периметра

конического острова, то при увеличении амплитуды (эксперимент В) падающей волны такого единого параметра подобрать не удастся. В этом случае экспериментальные данные о заплеске в тыльной (теневой) зоне острова хорошо воспроизводятся при нулевом значении коэффициента Шези, а в остальных частях – при его значении, равном 0.004. Следует отметить также, что с увеличением амплитуды падающей волны возрастает различие между результатами, полученными с различными коэффициентами трения.

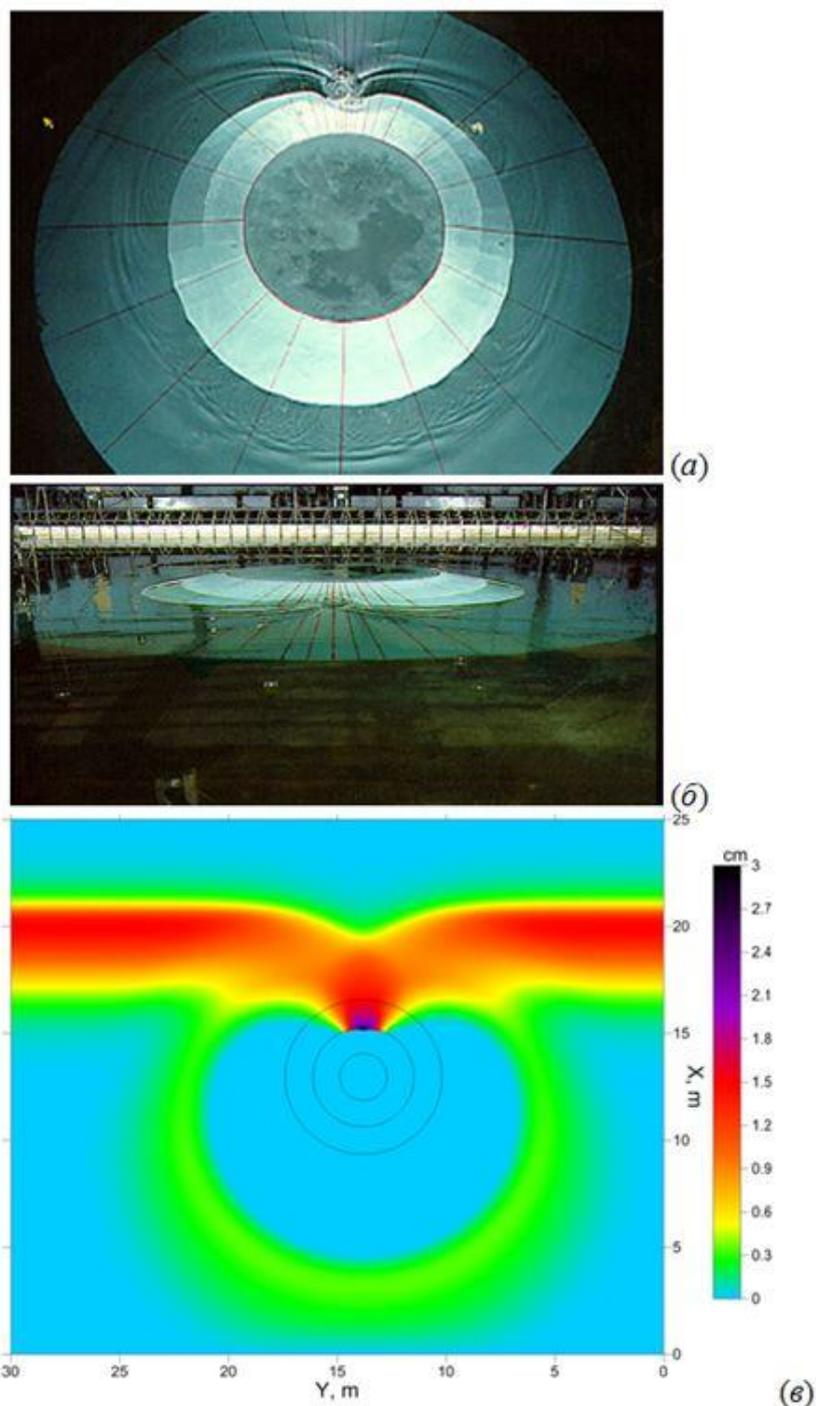


Рис. 12. Взаимодействие уединенной волны (солитона) с коническим островом в момент времени, совпадающий с моментом фиксации состояния свободной поверхности на Рис. 21, δ : (a) – лабораторный эксперимент (вид сверху) – <http://chl.ercdc.usace.army.mil/chl.aspx?p=s&a=Projects;35> – волна приближается к острову «снизу»; (б) – то же (вид с тыльной стороны); (в) – результат вычислительного эксперимента в близкий момент времени.

Сравнение полученных численных результатов показывает, что несмотря на

допущенное упрощение при задании исходного возмущения математическая модель и построенный на ее основе вычислительный алгоритм вполне адекватно воспроизводят процесс взаимодействия уединенной волны с препятствием в виде конического острова. Результаты также демонстрируют сходимость к экспериментальным данным при адекватном подборе свойств (шероховатость) заливаемой суши. Сопоставляя мареограммы, рассчитанные в точках установки «контрольных» датчиков для эксперимента А методом крупных частиц, с записанными в этих же точках экспериментальными данными, можно отметить хорошее совпадение в головной части записей и несколько упрощенное воспроизведение последующих осцилляций.

Представленные в настоящем разделе отчета материалы тестовых испытаний модели и алгоритма позволяют рассматривать созданный вычислительный инструмент как вполне пригодный для моделирования волн цунами в целом – от генерации вплоть до заплеска на берег. Эти же результаты, однако, указывают, что для получения результатов с точностью, обеспечивающей приемлемое качество прогнозной оценки характеристик взаимодействия волн цунами с побережьем, необходимо обладать детальной цифровой информацией (с шагом оцифровки порядка 15 м) о батиметрии акваторий, прилегающих к защищаемым участкам побережья и характеристикам рельефа суши (растительность, параметры земной поверхности, наличие строений и их характеристики и т.п.).

5. Оценки характеристик заплеска волн цунами

Положительные результаты тестовых испытаний математических моделей и алгоритмов позволили перейти к предварительным расчетам характеристик наката волн цунами, порожденных удаленными относительно побережья России землетрясениями.

Для таких предварительных расчетов в качестве источников были отобраны модельные очаги удаленных катастрофических землетрясений магнитуды $M_w = 9.0$, дававших наибольшие высоты волн в пос. Северо-Курильск, рассчитанные в ходе ранее выполненного исполнителями численного моделирования воздействия (без расчета наката) волн цунами с установкой вдоль линии побережья вертикальной «стенки» (условия отражения).

Гистограмма, представляющая распределение максимальных положительных и отрицательных высот волн (Рис. 13), позволяет сопоставить количественные характеристики проявления у побережья защищаемого пункта «Северо-Курильск» волн цунами, порожденных различными очагами, входящими в совокупность модельных удаленных цунамигенных землетрясений, и рассчитанных на сетке с шагом 2 угловые минуты на 48 часов физического времени. По результатам анализа таких гистограмм в качестве «пробных» источников были отобраны землетрясения № 45 (Чили), 64, 67 и 71 (Папуа – Новая Гвинея и Соломоновы острова). Отметим, что в ходе проведенного ранее анализа воздействия волн цунами на все Дальневосточное побережье России наиболее опасными оказались удаленные очаги №№ 45, 67 и 71. В отчетный период этот набор был дополнен очагом № 64 в связи с тем, что именно он порождал одни из наибольших высот волн непосредственно в рассматриваемом защищаемом пункте.

Численное моделирование процессов генерации, распространения и наката волн цунами на пос. Северо-Курильск проводилось на наборе из трех сеток: глобальной, охватывающей весь Тихий океан и имеющей шаг 3 угловые минуты; региональной, покрывающей окрестные для г. Северо-Курильск акватории с шагом 30 угловых секунд, и локальной, включающей непосредственно защищаемый пункт и ближайшие к нему акватории с шагом 3 угловые секунды (около 90 м). При этом моделирование наката проводилось только на самой

мелкой сетке, в локальной области. Ниже (Рис. 14, Рис. 15) приведена схема соответствующих расчетных областей и изолинии начальных смещений водной поверхности от рассмотренных модельных землетрясений.

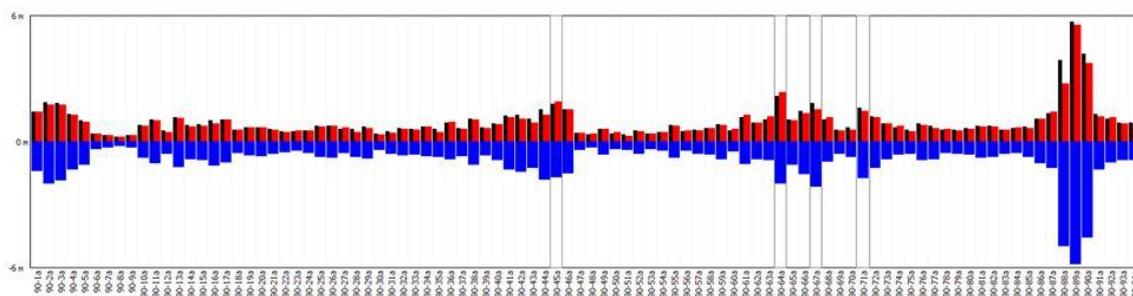


Рис. 13. Распределение максимальных (столбики красного цвета) и минимальных (столбики синего цвета) высот волн цунами для защищаемого пункта Северо-Курильск, рассчитанных на двухминутной сетке без учета наката для исходного набора гипотетических удаленных цунамигенных землетрясений. Серым выделены столбцы, соответствующие источникам 45, 64, 67 и 71 (слева направо.)

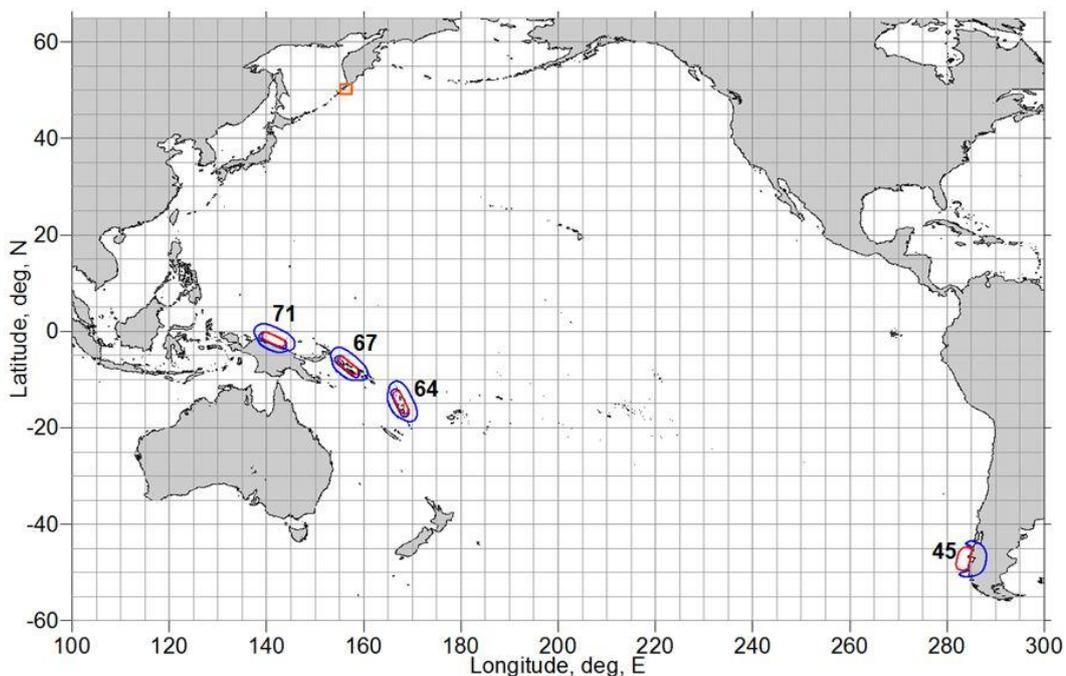


Рис. 14. Глобальная расчетная область. Оранжевым прямоугольником показано положение региональной области. Красными и синими линиями – изолинии соответственно положительных и отрицательных начальных смещений водной поверхности от модельных подводных очагов землетрясений.

В ходе проведенных численных экспериментов были определены: границы зон затопления, распределения промежуточных и максимальных скоростей течений, максимальных глубин и длительностей затопления.

Сопоставление с натурными данными оказалось возможным для чилийского (23 мая 1960 г.) события, аналогом которого стало гипотетическое цунами, порожденное источником № 45. Судя по историческим свидетельствам (http://www.sakhgu.ru/expert/Tsunami/TS_60r.html), «Через 21-22 часа, преодолев более 16 тысяч километров, утром 24 мая волна цунами подошла к тихоокеанским берегам Дальнего Востока России. Высота подъема воды, в

среднем, составила 3-4 м, максимальная достигала 6-7 м. На Курильских островах максимальная высота подъема воды составляла 4.7 м в районе г. Северо-Курильск. Были затоплены дома на побережье, склады и причал. Смыт мост и некоторые строения в Южно-Курильске.».

Результаты, полученные исполнителями проекта (Рис. 17), хорошо согласуются с этими данными, демонстрируя заплеск, достигающей 5 метровой изолинии рельефа вблизи г. Северо-Курильск. Вместе с тем, наибольший заплеск на побережье, прилегающее к г. Северо-Курильску, оказывается связанным с волной цунами, порожденной источником № 67, расположенным вблизи Соломоновых островов.

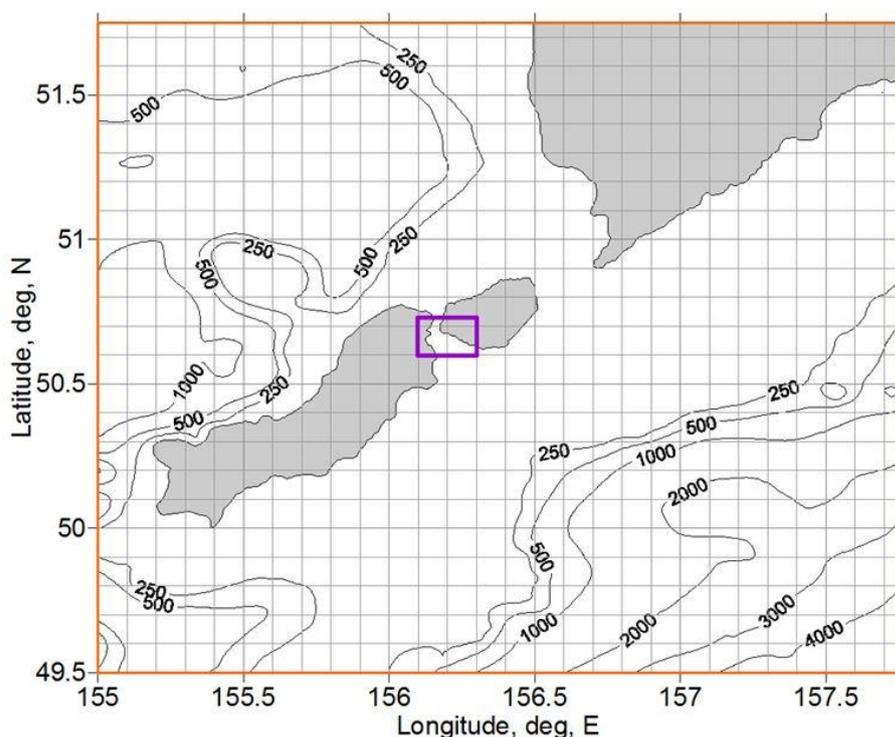


Рис. 15. Региональная расчетная область (оранжевый прямоугольник). Фиолетовым прямоугольником показано положение локальной области. Значения на изолиниях батиметрии – положительные.

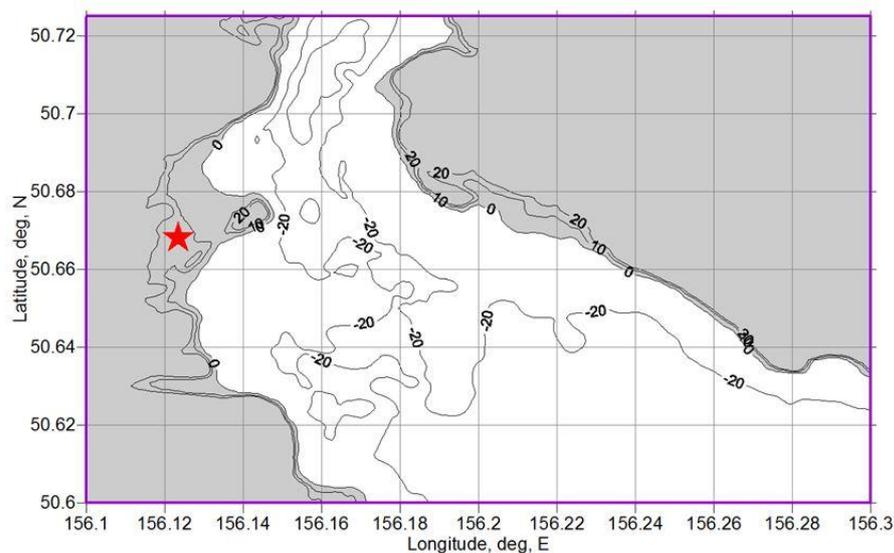


Рис. 16. Локальная расчетная область (фиолетовый прямоугольник). Звездочкой отмечено примерное местоположение населенного пункта (пос. Северо-Курильск).

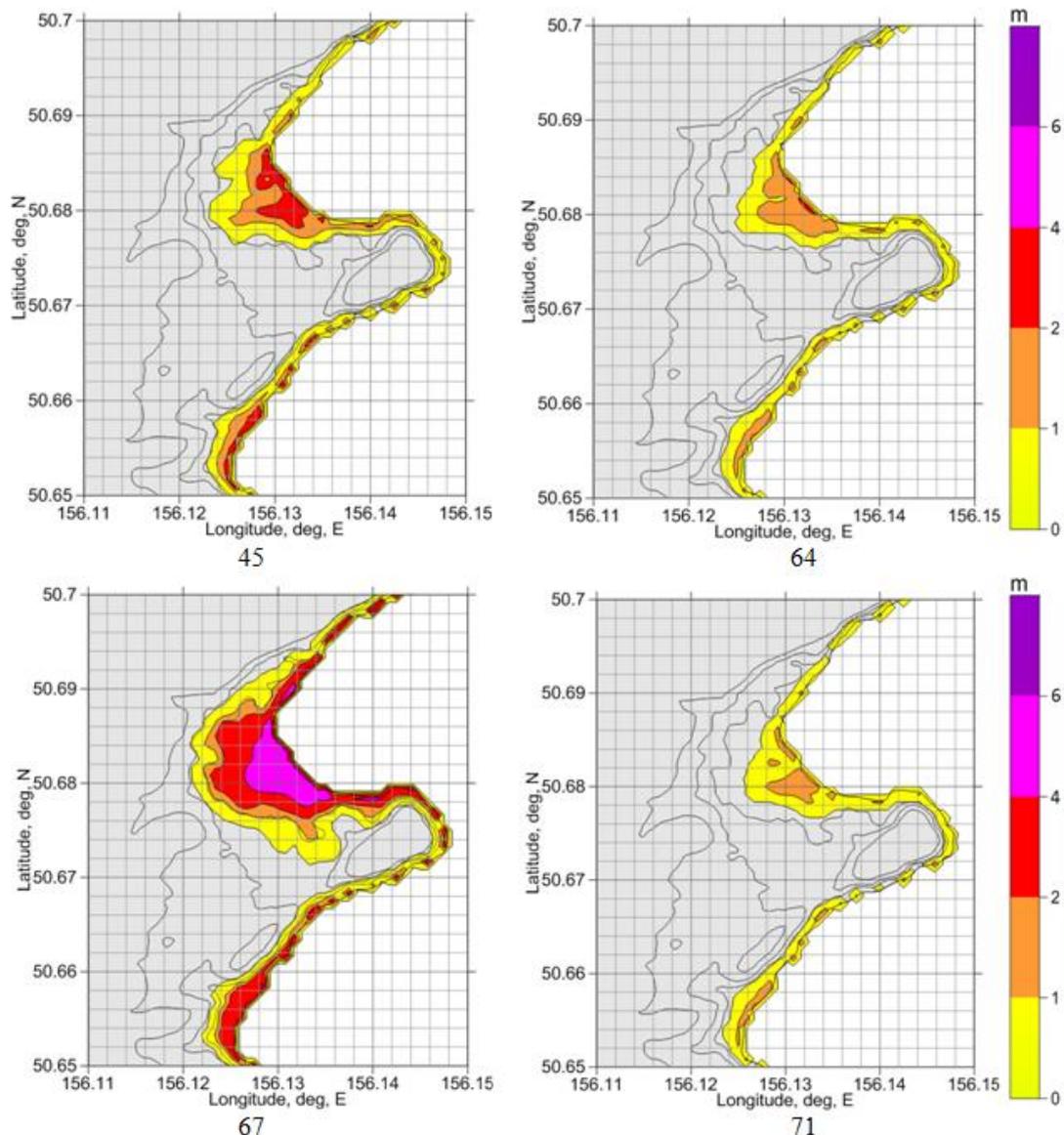


Рис. 17. Распределение максимальной глубины затопления (толщины водного слоя) при заплеске волн цунами от четырех модельных удаленных очагов для участков побережья, прилегающих к защищаемому пункту «Северо-Курильск» (фрагмент локальной области). Индекс соответствующего очага указан в подписи к рисунку. Максимальные глубины затопления (толщина водного слоя) показаны на цветовой шкале. Серыми линиями отрисованы изолинии рельефа суши по сечениям 5 м, 10 м, 20 м.

Библиография:

1. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. М.; Наука. 1982. 392 с.
2. Борисова Н.М., Гусев А.В., Остапенко В.В. О распространении прерывных волн по сухому руслу // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2006, № 4. С. 135-148.
3. Кайстренко В.М., Шевченко Г.В., Ивельская Т.Н. Проявления цунами Тохoku 11 марта 2011 года на тихоокеанском побережье России // Сейсмические приборы, 2011. Т. 38, № 1. С. 41-64.
4. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. Отв. ред. Н.В.Кондорская, Н.В.Шебалин. М., Наука, 1977. 535 с.
5. 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.
6. Чубаров Л.Б., Бабайлов В.В., Бейзель С.А. Программа расчета характеристик воды цунами сейсмического происхождения MGC // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ Федеральной службой по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам № 2011614598.
 7. Bautin S.P., Deryabin S.L., Sommer A.F., Khakimzyanov G.S., Shokina N.Yu. Use of analytic solutions in the statement of difference boundary conditions on a movable shore line // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2011. Vol. 26, No. 4. P. 353-377.
 8. MacCormack R.W. The Effect of Viscosity in Hypervelocity Impact Cratering // J. Spacecraft and Rockets. 2003. Vol. 40, No. 5. P. 757-763.
 9. SRTM version 2.1, http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM3/Eurasia/
 10. Synolakis C.E. The runup of solitary waves // J. Fluid Mech. 1987. Vol. 185. P. 523-545.
 11. Synolakis C.E. Tsunami Runup on Steep Slopes: How Good Linear Theory Really Is // Natural Hazards. 1991. Vol. 4. P. 221-234.
 12. Takagi T. Finite element analysis in bench mark problems 2 and 3 // In: Long Wave Runup Models, Yeh H. et al (ed), World Scientific, Singapore. 1996. P. 258-264.
 13. Yeh H., Liu P., Synolakis C.E. Long-wave runup models. Singapore: World Sci. Publ., 1996.

3.7. *Степень новизны полученных результатов*

Все результаты являются новыми и получены впервые. Наиболее интересными и безусловно оригинальными являются:

Совершенствование и модификация алгоритмов и программ, обеспечившие возможность сквозного моделирования процессов генерации, распространения и наката волн цунами на побережье с использованием телескопически 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, показавшее, что южной границей ближней цунамигенной зоны при пороговой магнитуде 7.0 можно считать линию, перпендикулярную побережью Хоккайдо, пересекающую его примерно в точке 43.1°N, 145.2°E (в районе Хаманака) 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.

Моделирование затопления побережья в районе г. Северо-Курильска волнами цунами, порожденными экстремальными гипотетическими цунамигенными удаленными землетрясениями, результаты которого хорошо согласуются с доступными историческими данными, демонстрируя достигающей 5 метровой изолинии рельефа заплеск волны от «чилийского» источника и наибольший заплеск от волны цунами, порожденной источником, расположенным вблизи Соломоновых островов.

3.8. *Сопоставление полученных результатов с мировым уровнем*

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

* Теоретический семинар «Нелинейные волны», посвященный памяти чл.-к. РАН В.М. Тешукова, 1 марта 2013, Новосибирск;

* 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», Врнячка Баня, Сербия, 05.09–09.09.2013, Будва, Черногория, 10.09 – 14.09.2013;

* 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, Gothenburg, Sweden.

3.9. *Методы и подходы, использованные в ходе выполнения проекта*

1. 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 телескопически вложенных (блочных) сеток (Рис. 18). При этом используется 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.

Созданный исполнителями вычислительный инструментарий для расчета наката реализован в виде отдельного модуля, встроенного в зарегистрированный ранее исполнителями программный комплекс MGC [6] и позволяющего рассчитывать поля свободных поверхностей в заданные моменты времени; поля каждой из компонент скорости в те же моменты времени; картины «свечений» – массивы максимальных значений свободной поверхности в каждом узле мелкой сетки за все время расчета наката; максимальные значения модуля скорости волн в каждом узле мелкой 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.

2. Математические модели, алгоритмы и методики моделирования генерации и распространения волны цунами вплоть до начального положения линии уреза, на которой ставилось условие «непротекания» (вертикальная стенка), применялись в глобальной и региональной областях всюду за исключением локальных областей, в которых осуществлялось моделирование наката волны цунами. Здесь под глобальной областью понимается прямоугольная область, охватывающая часть побережья и океанической акватории, в которой зарождается и распространяется к берегу волна цунами, а под региональной – вложенная в глобальную подобласть, покрывающая некоторую окрестность защищаемого участка побережья. Локальной областью является подобласть региональной, включающая в себя часть суши и часть океана, через границы которой проходит волна цунами при ее движении к побережью.

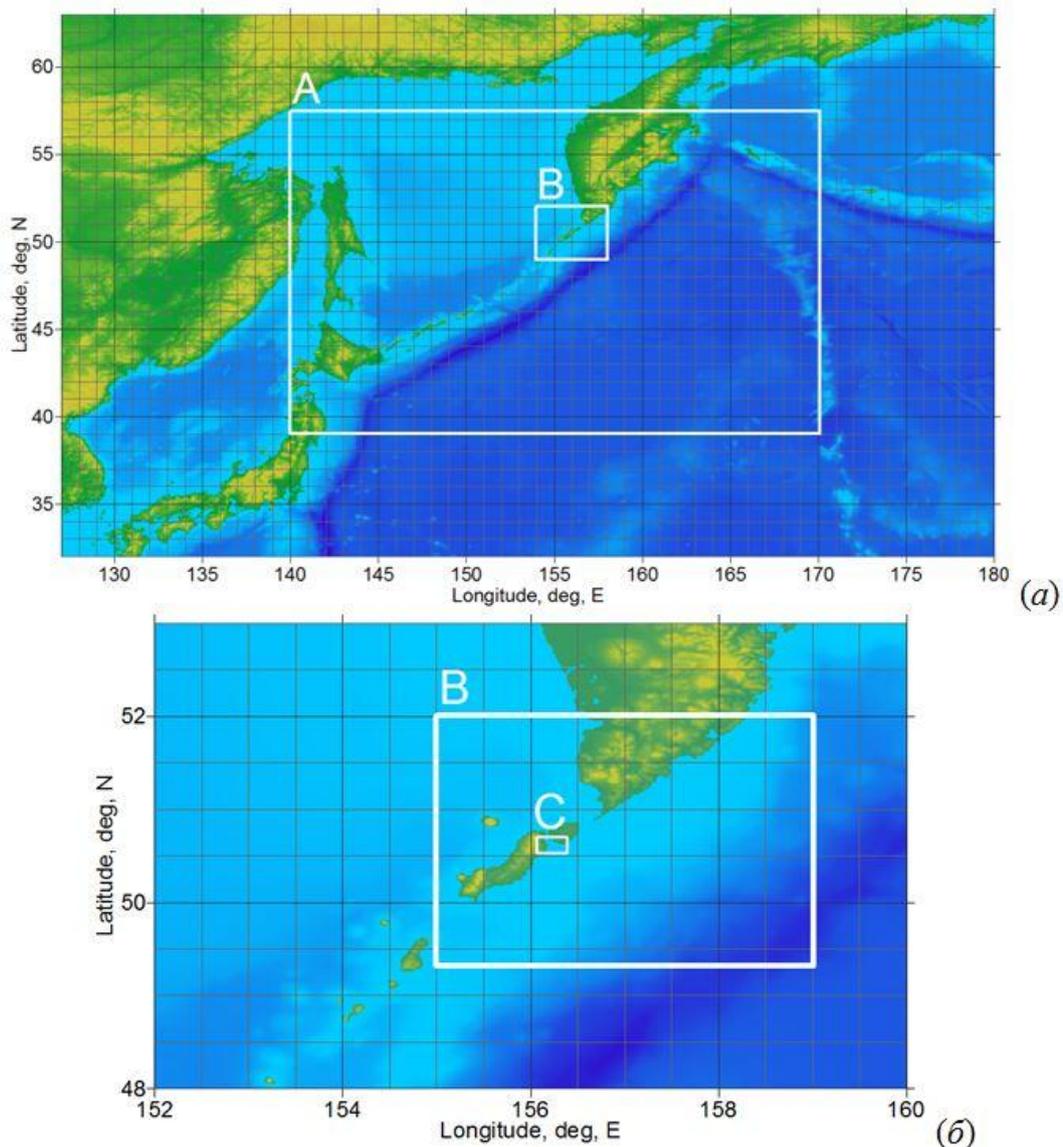


Рис. 18. Границы глобальной (прямоугольник А) и региональной (прямоугольник В) расчетных областей для моделирования воздействия на пос. Северо-Курильск волн, порожденных очагами землетрясений, расположенных вдоль Курило-Камчатского глубоководного желоба (а); региональная (прямоугольник В) и локальная (прямоугольник С) области (б).

Генерация волн цунами рассчитывается в рамках сейсотектонической модели, основанной на уравнениях динамической теории упругости, описывающих колебания слоя сжимаемой жидкости (модель океана), залегающего на поверхности упругого полупространства (модель земной коры и верхней мантии).

Для расчета характеристик распространения волн цунами, как и ранее, использовалась двухшаговая схема Мак-Кормака [8], а для моделирования наката волн на побережье – метод крупных частиц [1]. Алгоритм расчета состоит из двух этапов, на первом из которых на основной (грубой) сетке на каждом новом шаге по времени в глобальной и региональной областях рассчитывается численное решение, которое на границах локальной области принимается в качестве граничных условий. Для пересчета значений с грубой сетки на мелкую используется линейная интерполяция, как по пространству, так и по времени (в случаях, когда текущий временной шаг мелкой сетки оказывается меньше соответствующего шага сетки грубой). В этой области методом крупных частиц рассчитываются все параметры движения волны, которые затем используются для корректировки значений на грубой сетке.

Использование «классического» метода частиц в ячейках для решения задач наката цунами на берег оказывается невозможным в силу статистического характера получаемого с его помощью решения, которое, в частности, не удовлетворяет условию гидростатического равновесия в покоящейся воде и значительно искажает процесс распространения волн. Метод крупных частиц лишен этого недостатка и 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.

Реализация метода крупных частиц проводилась также в два этапа. На первом (эйлеровом) этапе в исходных уравнениях математической модели теории мелкой воды отбрасывались все конвективные члены, и решаемая система записывалась в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial t} &= 0, \\ \frac{\partial u_\lambda}{\partial t} + \frac{g}{R_E \cos(\phi)} \frac{\partial(H-h)}{\partial \lambda} &= -u_\lambda C_R + \alpha u_\phi, \quad C_R = g k_f^2 \frac{\sqrt{u_\lambda^2 + u_\phi^2}}{H^{4/3}}, \\ \frac{\partial u_\phi}{\partial t} + \frac{g}{R_E} \frac{\partial(H-h)}{\partial \phi} &= -u_\phi C_R - \alpha u_\lambda. \end{aligned} \quad (1)$$

На втором (лагранжевом) этапе решались уравнения переноса

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{R_E \cos(\phi)} \left[\frac{\partial(H u_\lambda)}{\partial \lambda} + \frac{\partial(H \cos(\phi) u_\phi)}{\partial \phi} \right] &= 0, \\ \frac{\partial u_\lambda}{\partial t} + \frac{1}{R_E} \left[\frac{1}{2 \cos(\phi)} \frac{\partial(u_\lambda^2)}{\partial \lambda} + u_\phi \frac{\partial u_\lambda}{\partial \phi} \right] &= 0, \\ \frac{\partial u_\phi}{\partial t} + \frac{1}{R_E} \left[\frac{u_\lambda}{\cos(\phi)} \frac{\partial u_\phi}{\partial \lambda} + \frac{1}{2} \frac{\partial(u_\phi^2)}{\partial \phi} \right] &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $H(\lambda, \phi, t)$, $h(\lambda, \phi)$ – полная глубина воды и отсчитываемый от поверхности «спокойной» воды профиль дна соответственно, $u_\lambda(\lambda, \phi, t)$, $u_\phi(\lambda, \phi, t)$ – компоненты вектора скорости по направлениям λ и ϕ соответственно, R_E – средний радиус Земли, $\alpha = 2\omega_E \sin(\phi)$, ω_E – угловая скорость вращения Земли, k_f – коэффициент шероховатости (коэффициент Шези). Средний радиус Земли $R_E = 6371$ км, $\omega_E = 7.292115 \cdot 10^{-5}$ 1/с.

Для решения уравнений (1) – (2) строилась явная разностная схема первого порядка точности. Применение схемы первого порядка точности, обладающей к тому же монотонными свойствами, для получения численного решения с достаточным разрешением картины заплеска волны цунами на побережье вполне оправдано в силу необходимости смягчения нежелательных численных эффектов, обусловленных изрезанностью берегового рельефа суши. При построении разностной схемы использовалась сетка с разнесенными узлами, в которых определялись сеточные функции $H_{i,j}$ и $h_{i,j}$. Компоненты скорости u_λ , u_ϕ определялись на серединах соответствующих граней ячеек.

Разностная схема первого этапа записывалась следующим образом:

$$\begin{aligned}
\tilde{H}_{i,j} &= H_{i,j}^n, \\
\tilde{u}_{\lambda,i+1/2,j} &= \\
&= (u_{\lambda,i+1/2,j}^n - g \Delta t ((H-h)_{i+1,j}^n - (H-h)_{i,j}^n) / (R_E \cos(\phi_j) \Delta \lambda) + \Delta t \alpha u_\phi) / (1 + \Delta t C_R), \\
\tilde{u}_{\phi,i,j+1/2} &= \\
&= (u_{\phi,i,j+1/2}^n - g \Delta t ((H-h)_{i,j+1}^n - (H-h)_{i,j}^n) / (R_E \Delta \phi) - \Delta t \alpha u_\lambda) / (1 + \Delta t C_R).
\end{aligned}$$

На втором этапе для уравнений переноса (2) использовалась противопотоковая разностная схема:

$$\begin{aligned}
H_{i,j}^{n+1} &= \tilde{H}_{i,j} - \Delta t ((\tilde{q}_{i+1/2,j} - \tilde{q}_{i-1/2,j}) / \Delta x + (\tilde{q}_{i,j+1/2} - \tilde{q}_{i,j-1/2}) / \Delta y), \\
\tilde{q}_{i+1/2,j} &= \begin{cases} \tilde{H}_{i,j} \tilde{u}_{\lambda,i+1/2,j} & \text{if } \tilde{u}_{\lambda,i+1/2,j} > 0, \\ \tilde{H}_{i+1,j} \tilde{u}_{\lambda,i+1/2,j} & \text{if } \tilde{u}_{\lambda,i+1/2,j} < 0, \end{cases} \quad \tilde{q}_{i,j+1/2} = \begin{cases} \tilde{H}_{i,j} \tilde{u}_{\phi,i,j+1/2} & \text{if } \tilde{u}_{\phi,i,j+1/2} > 0, \\ \tilde{H}_{i,j+1} u_{\phi,i,j+1/2} & \text{if } \tilde{u}_{\phi,i,j+1/2} < 0. \end{cases}
\end{aligned}$$

Аналогичным образом записывались выражения для вычисления значений $(u_\lambda)_{i+1/2,j}^{n+1}$ и $(u_\phi)_{i,j+1/2}^{n+1}$. Условием устойчивости разностной схемы является

$$\text{выполнение неравенства } \Delta t \leq \alpha \cdot \min \left\{ \frac{\Delta x}{|u_\lambda| + \sqrt{gH}}, \frac{\Delta y}{|u_\phi| + \sqrt{gH}} \right\} \text{ во всех узлах}$$

разностной сетки, где $0 < \alpha < 1$ – эмпирический коэффициент запаса устойчивости. Для расчета параметров течения в узлах сетки, попадающих в область суши, все параметры течения, в том числе и величина отклонения свободной поверхности от невозмущенного уровня $\eta = H - h$ полагались равными нулю. В узлах сетки на границе воды и суши система уравнений мелкой воды записывалась в недивергентном виде, и на лагранжевом этапе для решения уравнений переноса использовались односторонние противопотоковые разности. Положение линии уреза определялось путем ее «улавливания» в узел разностной сетки.

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

В одномерном случае решалась задача о накате уединенной волны на плоский откос (Рис. 11) с углом наклона β , сопрягающийся с участком дна постоянной глубины H_0 .

Для рассматриваемой задачи К.Синолакисом в работе [10] получено аналитическое решение для определения величины вертикального заплеска:

$$\frac{R}{H_0} = 2.831 \sqrt{\text{ctg} \beta} \left(\frac{A}{H_0} \right)^{5/4}. \quad (3)$$

Сравнение возможностей различных численных моделей наката для решения одномерной тестовой задачи проведено сопоставлением (Рис. 19) величин вертикального заплеска, рассчитанных с помощью метода крупных частиц с аналогичными величинами, определенными по аналитической формуле (3), с лабораторными данными [10, 11], со значениями, рассчитанными по другим методикам, в том числе, реализованными исполнителями проекта с использованием на подвижной линии уреза аналитических граничных условий [7]. На этом же рисунке приведены результаты, полученные с использованием модифицированной модели мелкой воды [2]. В основе этой модели лежит модифицированный закон сохранения полного импульса, в котором учитываются сосредоточенные потери импульса, связанные с образованием локальных турбулентно-вихревых структур на фронтах прерывных волн.

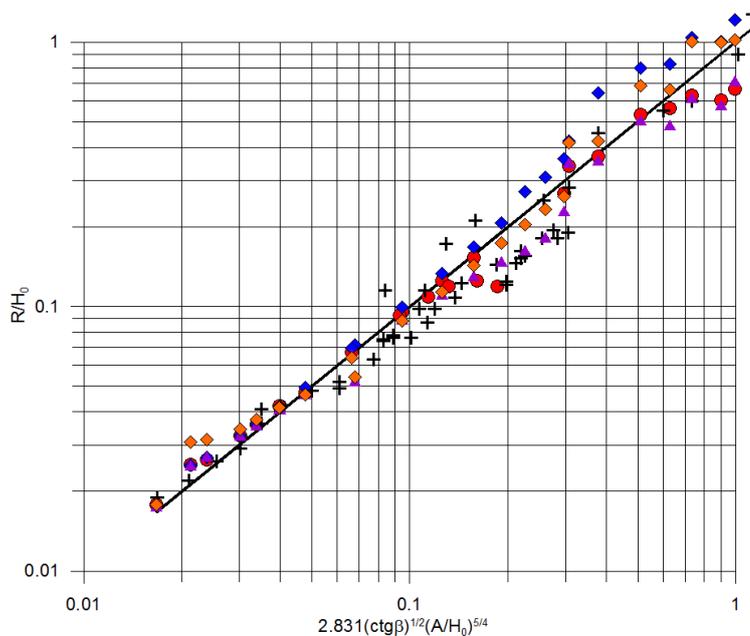


Рис. 19. Задача наката уединенной волны на плоский откос. Значения максимальных заплесков, полученные по аналитической формуле (сплошная линия), в лабораторных экспериментах (+) и с помощью численных методов сквозного счета (◆), адаптивных сеток (♦), крупных частиц (●) на основе классической модели мелкой воды и конечно-разностного метода, основанного на модифицированной модели мелкой воды (▲).

Для оценки качества результатов расчетов в двумерных случаях использовались материалы также хорошо известного натурального эксперимента, выполненного в исследовательской лаборатории ВМС США, воспроизводящего взаимодействие уединенной волны, распространяющейся в бассейне постоянной глубины с расположенным в центральной части такого бассейна коническим островом (Рис. 20).

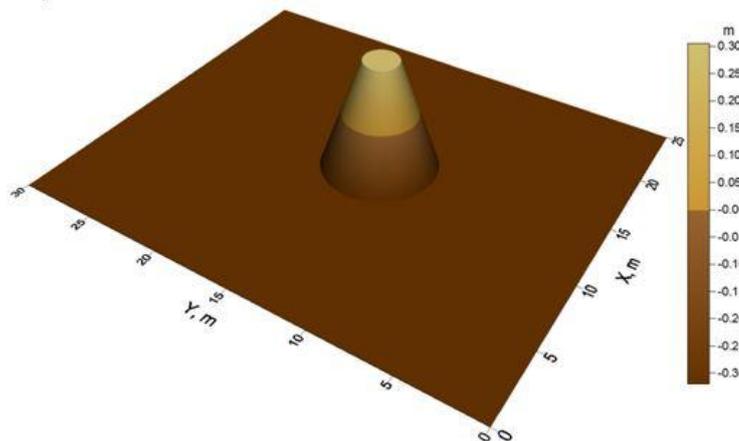


Рис. 20. Задача обтекания уединенной волной конического острова: рельеф дна модельного бассейна.

При постановке вычислительного эксперимента через границу впускалась уединенная волна (солитон) с амплитудой A_0 :

$$\eta(0, y, t) = A_0 \operatorname{sech}^2 \left\{ \left(\frac{3A_0}{4H_0^2(H_0 + A_0)} \right)^{1/2} (x_0 - ct) \right\}, \quad c = \sqrt{g(H_0 + A_0)}.$$

В ближайших к входной границе внутренних точках задавалась нормальная компонента скорости, а касательная ее компонента во внутренних узлах сетки,

прилегающих к входной границе, вычислялась из соотношения, которое является следствием предположения о квази-потенциальности вектора скорости. Это соотношение выполняется точно на участках бассейна с постоянной глубиной. На других границах ставились хорошо известные «поглощающие» условия, задаваемые уравнением Зоммерфельда.

В таблице (Таблица 1) приведены рассчитанные без учета трения значения максимального вертикального наката на фронтальной и задней сторонах острова в сравнении с экспериментом и с результатами, определенными с помощью метода конечных элементов (также без учета трения) из работы [12].

Таблица 1. Сравнение рассчитанных авторами настоящего отчета значений максимального вертикального заплеска на передней и задней по отношению к падающей волне сторонах конического острова с данными лабораторного эксперимента и вычислений, приведенных в статье (Takagi, 1996).

Коэффициент Шези (шероховатость)	Эксперимент А						Эксперимент В				
	Расчет методом крупных частиц				Расчет (Takagi, 1996)	Эксперимент.	Расчет методом крупных частиц			Расчет (Takagi, 1996)	Эксперимент.
	0	0.002	0.004	0.005			0	0.002	0.004		
R (см) спереди	4.5	4.1	3.6	3.6	4.9	3.2	11.5	9.1	7.1	8.7	7.4
R (см) сзади	3.5	3.1	2.5	2.1	4.1	2.2	9.1	6.1	4.1	7.2	8.6

Общий характер развития волнового процесса (Рис. 21) слабо зависит от амплитуды падающей волны (эксперименты А, В): уединенная волна с возрастающей по мере взаимодействия с модельным островом амплитудой огибает его и образует в тыльной части острова зону концентрации энергии, которая движется по направлению к выходной границе. За этим волновым образованием следует череда концентрических волн, покидающих бассейн через боковые выпускающие границы. Показанные на рисунке последовательные во времени состояния свободной поверхности были рассчитаны для эксперимента без учета донного трения.

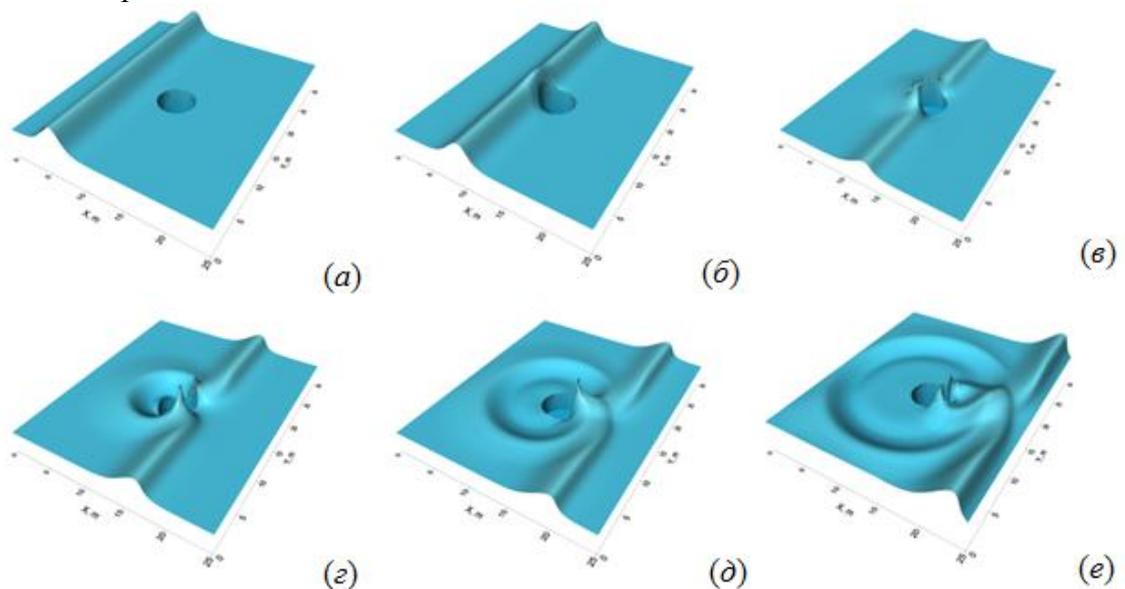


Рис. 21. Последовательные во времени состояния свободной поверхности при взаимодействии уединенной волны с коническим островом.

Как показали результаты решения тестовых задач, рассчитанные значения находятся в хорошем соответствии с натурными данными и, в частности, хорошо воспроизводят изменение величины вертикального наката при обтекании волной острова: максимальный накат наблюдается на передней стороне, затем, при обходе вдоль острова, он постепенно снижается, а на задней стороне наблюдается еще один экстремум величины заплеска (Рис. 21 (д), Рис. 22).

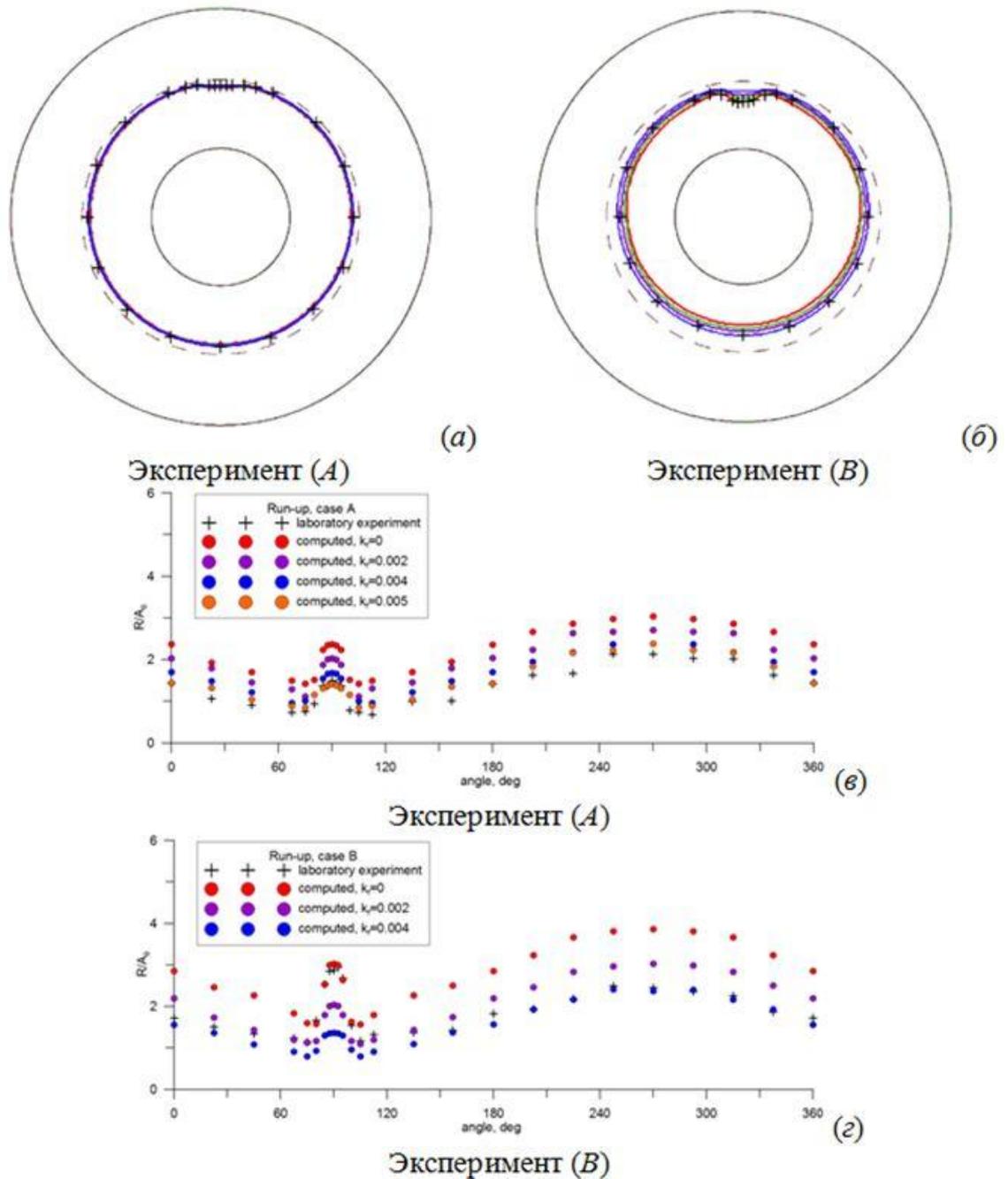


Рис. 22. Задача обтекания уединенной волно конического острова.
 Верхняя часть рисунка представляет сопоставление рассчитанных для различных значений коэффициента шероховатости границ заплеска уединенной волны на конический остров (цветные линии) с экспериментальными данными (крестики) – эксперименты (А) и (В). Нижняя часть рисунка представляет распределение высот заплеска по периметру острова для экспериментов А и В. Цвета линий и маркеров одинаковым образом соответствуют различным значениям коэффициента шероховатости.

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.

- 3.10.1.1. *Количество научных работ, опубликованных в ходе выполнения проекта* 12
- 3.10.1.2. *Из них включенных в перечень ВАК* 0
- 3.10.1.3. *Из них включенных в системы цитирования (Web of science, Scopus, Web of Knowledge, Astrophysics, PubMed, Mathematics, Chemical Abstracts, Springer, Agris, GeoRef)* 1
- 3.10.2. *Количество научных работ, подготовленных в ходе выполнения проекта и принятых к печати в 2013 г.* 1
- 3.11. *Участие в научных мероприятиях по тематике проекта, которые проводились при финансовой поддержке Фонда* 1
- 3.12. *Участие в экспедициях по тематике проекта, проводимых при финансовой поддержке Фонда* 0
- 3.13. *Финансовые средства, полученные от РФФИ* 370 000 руб.
- 3.14. *Адреса (полностью) ресурсов в Internet, подготовленных авторами по данному проекту*
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/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/147218/166133/Okhotsk_Chubarov.doc
- 3.15. *Библиографический список всех публикаций по проекту*
 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.
 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.
 Гусяков В.К. Сильнейшие цунами мирового океана и проблема цунами-районирования морских побережий // Проблемы информатики. 2013, №4. С.36-46.
 Федотова З.И., Хакимзянов Г.С. Анализ условий вывода нелинейно-дисперсионных уравнений // Вычислительные технологии. 2012. Т. 17, № 5. С. 94-108.
 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).
 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. Т. 19, № 1. (в печати).
 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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

Beisel S., Gusyakov 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.

Beisel S., Gusyakov 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.

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, Gothenburg, Sweden.

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.

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, Gothenburg, Sweden.

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.

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, ISBN: 9781107033863 (в печати).

- 3.16. *Приоритетное направление развития науки, технологий и техники РФ, в котором, по мнению исполнителей, могут быть использованы результаты данного проекта*
Рациональное природопользование
- 3.17. *Критическая технология РФ, в которой, по мнению исполнителей, могут быть использованы результаты данного проекта*
Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера
- 3.18. *Основное направление технологической модернизации экономики России, которому, по мнению исполнителей, соответствуют результаты данного проекта*
Не очевидно

Подпись руководителя проекта

Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА

- 9.1. *Номер проекта* 12-05-00894
- 9.2. *Первый автор* Гусяков В.К.
- 9.3. *Другие авторы*
- 9.4. *Название публикации* Проблема мега-событий в оценке
цунамиопасности побережья
- 9.5. *Язык публикации* русский
- 9.6.1. *Полное название издания* Геология морей и океанов. Материалы XX
Международной научной конференции (Школы) по морской геологии, 18-22 ноября
2013 г.
- 9.7. *Вид публикации* статья в сборнике
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2013
- 9.10.1 *Том издания* 5
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы* 71-75
- 9.12.1. *Полное название издательства* Институт океанологии РАН
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство* Москва
- 9.13. *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.
- 9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы* 11

Подпись руководителя проекта

Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА

- 9.1. *Номер проекта* 12-05-00894
- 9.2. *Первый автор* Гусяков В.К.
- 9.3. *Другие авторы*
- 9.4. *Название публикации* Сильнейшие цунами мирового океана и проблема цунами-районирования морских побережий
- 9.5. *Язык публикации* русский
- 9.6.1. *Полное название издания* Проблемы информатики
- 9.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2013
- 9.10.1 *Том издания*
- 9.10.2 *Номер издания* 4
- 9.11. *Страницы* 36-46
- 9.12.1. *Полное название издательства* Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство* Новосибирск
- 9.13. *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.
- 9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы* 32
- Подпись руководителя проекта*

Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА

- 9.1. *Номер проекта* 12-05-00894
- 9.2. *Первый автор* Чебров В.Н.
- 9.3. *Другие авторы* Гусев А.А., Гусяков В.К.,
Чебров Д.В., Абубакиров И.Р., Павлов В.М.
- 9.4. *Название публикации* Развитие научно-методического
обеспечения сейсмической подсистемы Службы предупреждения о цунами на
Дальнем Востоке России
- 9.5. *Язык публикации* русский
- 9.6.1. *Полное название издания* Проблемы комплексного геофизического
мониторинга Дальнего Востока России. Труды IV научно-технической конференции.
Петропавловск-Камчатский. 30 сентября – 6 октября 2013 г.
- 9.7. *Вид публикации* статья в сборнике
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2013
- 9.10.1 *Том издания*
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы* 221-225
- 9.12.1. *Полное название издательства* Геофизическая служба РАН
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство* Обнинск
- 9.13. *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.
- 9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы* 8
- Подпись руководителя проекта*

Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА

- 9.1. *Номер проекта* 12-05-00894
- 9.2. *Первый автор* Gusiakov V.K.
- 9.3. *Другие авторы*
- 9.4. *Название публикации* Forgotten catastrophe – October 9, 1963 Vajont Dam overtopping wave
- 9.5. *Язык публикации* английский
- 9.6.1. *Полное название издания* «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.
- 9.7. *Вид публикации* тезисы доклада
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2013
- 9.10.1 *Том издания*
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы*
- 9.12.1. *Полное название издательства*
<http://iahs-iapso-iaspei2013.com/Abstracts.aspx?252606>
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство* Gothenburg, Sweden
- 9.13. *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.
- 9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы* 0

Подпись руководителя проекта

Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА

- 9.1. *Номер проекта* 12-05-00894
- 9.2. *Первый автор* Бейзель С.А.
- 9.3. *Другие авторы* Гусяков В.К., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И.
- 9.4. *Название публикации* Анализ проявления удаленных и ближних цунами на охотоморском побережье России на основе результатов математического моделирования
- 9.5. *Язык публикации* русский
- 9.6.1. *Полное название издания* Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды IV научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября – 5 октября 2013 г.
- 9.7. *Вид публикации* статья в сборнике
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2013
- 9.10.1 *Том издания*
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы* 236-240
- 9.12.1. *Полное название издательства* Геофизическая Служба РАН
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство* Обнинск
- 9.13. *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.
- 9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы* 3
- Подпись руководителя проекта*

Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА

- 9.1. *Номер проекта* 12-05-00894
- 9.2. *Первый автор* Бейзель С.А.
- 9.3. *Другие авторы* Гусяков В.К., Рычков А.Д., Чубаров Л.Б.
- 9.4. *Название публикации* Вычислительные технологии определения заплесков волн цунами на отдельные участки дальневосточного побережья России
- 9.5. *Язык публикации* русский
- 9.6.1. *Полное название издания* Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды IV научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября – 5 октября 2013 г
- 9.7. *Вид публикации* статья в сборнике
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2013
- 9.10.1 *Том издания*
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы* 241-245
- 9.12.1. *Полное название издательства* Геофизическая Служба РАН
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство* Обнинск
- 9.13. *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 Подьяпольского-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.
- 9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы* 8

Подпись руководителя проекта

Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА

- 9.1. *Номер проекта* 12-05-00894
- 9.2. *Первый автор* Gusiakov V.K.
- 9.3. *Другие авторы* Chubarov, L.B., Beisel, S.A.
- 9.4. *Название публикации* Assessment of tsunami hazard for the coast of the Okhotsk Sea
- 9.5. *Язык публикации* английский
- 9.6.1. *Полное название издания* «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
- 9.7. *Вид публикации* тезисы доклада
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2013
- 9.10.1 *Том издания*
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы*
- 9.12.1. *Полное название издательства* <http://iahs-iapso-iaspei2013.com/Abstracts.aspx?253186>
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство* Gothenburg, Sweden
- 9.13. *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
- 9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы* 0

Подпись руководителя проекта

Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА

- 9.1. *Номер проекта* 12-05-00894
- 9.2. *Первый автор* Gusiakov V.K.
- 9.3. *Другие авторы* Chubarov, L.B., Beisel, S.A.
- 9.4. *Название публикации* Input in tsunami hazard for Far-East coast of Russia from regional and far-field sources
- 9.5. *Язык публикации* английский
- 9.6.1. *Полное название издания* Innovations in Tsunami Hazard Analysis, Mitigation, and Preparedness, AGU 2013 Fall Meeting, 9-13 December 2013, San Francisco, USA.
- 9.7. *Вид публикации* тезисы доклада
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2013
- 9.10.1 *Том издания*
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы*
- 9.12.1. *Полное название издательства* <http://agu-fm13.abstractcentral.com/abstract>
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство* San Francisco, USA
- 9.13. *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.
- 9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы* 0
- Подпись руководителя проекта*

Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА

- 9.1. *Номер проекта* 12-05-00894
- 9.2. *Первый автор* Бейзель С.А.
- 9.3. *Другие авторы* Шокина Н.Ю., Хакимзянов Г.С.,
Чубаров Л.Б., Ковыркина О.А., Остапенко В.В.
- 9.4. *Название публикации* О некоторых численных алгоритмах для
расчета наката волн цунами в рамках модели мелкой воды. I.
- 9.5. *Язык публикации* русский
- 9.6.1. *Полное название издания* Вычислительные технологии
- 9.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации* принято в печать
- 9.9. *Год публикации* 2014
- 9.10.1 *Том издания* 19
- 9.10.2 *Номер издания* 1
- 9.11. *Страницы*
- 9.12.1. *Полное название издательства* Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт вычислительных технологий Сибирского отделения
Российской академии наук
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство* Новосибирск
- 9.13. *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.
- 9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы* 57
- Подпись руководителя проекта*

Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА

- 9.1. *Номер проекта* 12-05-00894
- 9.2. *Первый автор* Beisel S.
- 9.3. *Другие авторы* Gussyakov V.K., Chubarov L., Shokin Y.
- 9.4. *Название публикации* Tsunamis in the Okhotsk Sea: results of numerical simulation and analysis of historical data
- 9.5. *Язык публикации* английский
- 9.6.1. *Полное название издания* Conference Information «Mathematical and informational technologies» MIT-2013, 05.09–09.09.2013, Vrnjacka Banja, Serbia, 10.09–14.09.2013, Budva, Montenegro
- 9.7. *Вид публикации* тезисы доклада
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2013
- 9.10.1 *Том издания*
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы* 68
- 9.12.1. *Полное название издательства* Природно-математический факультет Косовской Митровицы
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство* Белград
- 9.13. *Краткий реферат публикации* Содержание доклада основано на материалах, полученных авторами в результате вычислительных экспериментов и анализа исторических сведений о цунами в Охотском море. Основное внимание было сосредоточено на сейсмогенных цунами, связанных с землетрясениями, происходящими в Курило-Камчатской зоне. Оценка характеристик проявления волн у Охотоморского побережья продемонстрировала реальную опасность (высоты волн более 2 м) возникающую при подводных землетрясениях на шельфе и материковом склоне Курильской островной дуги при магнитудах более 8.4. Мега землетрясения (с магнитудой 9.0 и более) приводят к интенсивному проникновению энергии цунами в акваторию Охотского моря с захватом этой энергии шельфами Сахалина, северной части Охотоморского побережья и западного побережья Камчатки. Высоты волн в районе Охотска и Магадана при этом могут достигать 10 м. Помимо чисто исследовательского интереса, полученные результаты самым непосредственным образом направлены на использование в рамках модернизации национальной Службы предупреждения о цунами.
- 9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*

Подпись руководителя проекта

Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА

- 9.1. *Номер проекта* 12-05-00894
- 9.2. *Первый автор* Beisel S.
- 9.3. *Другие авторы* Gusyakov V.K., Rychkov A.D., Chubarov L.
- 9.4. *Название публикации* Numerical simulation of tsunami runup on the coast near the Severo-Kurilsk town and Malokurailskaya Bay
- 9.5. *Язык публикации* английский
- 9.6.1. *Полное название издания* Conference Information «Mathematical and informational technologies» MIT-2013, 05.09–09.09.2013, Vrnjacka Banja, Serbia, 10.09–14.09.2013, Budva, Montenegro
- 9.7. *Вид публикации* тезисы доклада
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2013
- 9.10.1 *Том издания*
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы* 68-69
- 9.12.1. *Полное название издательства* Природно-математический факультет Косовской Митровицы
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство* Белград
- 9.13. *Краткий реферат публикации* Представленные в докладе результаты связаны с исследованием поведения волн цунами вблизи двух участков побережья Дальнего востока России – в окрестностях г. Северо-Курильска и бухты Малокурильская. Авторами рассматриваются модельные цунами, порожденные гипотетическими цунамигенными землетрясениями, источники которых рассчитывались с использованием дислокационной модели Подъяпольского-Гусякова-Окады. Процессы распространения по океану и наката волн на берег моделируются в рамках уравнений мелкой воды. Границы заплеска рассчитываются с помощью специализированного расчетного модуля, выполняющего моделирование наката цунами на детальных расчетных сетках, покрывающих заранее выбранные фрагменты области моделирования, связанные с «защищаемыми» участками побережья. При этом через границы осуществляется обмен информации с областью моделирования распространения волны от источника до прибрежной зоны. Полученные результаты сопоставляются с известными данными натурных наблюдений, определяются их зависимости от точности использованных батиметрии и топографии, величины трения на поверхности суши, а также от способов задания краевых условий.
- 9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы* 1
- Подпись руководителя проекта*

Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА

- 9.1. *Номер проекта* 12-05-00894
- 9.2. *Первый автор* Бейзель С.А.
- 9.3. *Другие авторы* Гусяков В.К., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И.
- 9.4. *Название публикации* Уточнение северной и южной границ ближней цунамигенной зоны у Дальневосточного побережья России
- 9.5. *Язык публикации* русский
- 9.6.1. *Полное название издания* Четвертая научно-техническая конференция «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России», 30 сентября – 4 октября 2013 г.
- 9.7. *Вид публикации* тезисы доклада
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2013
- 9.10.1 *Том издания*
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы* 39
- 9.12.1. *Полное название издательства* Камчатский филиал Геофизической службы Российской Академии наук
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство* Петропавловск-Камчатский
- 9.13. *Краткий реферат публикации* Проведен анализ сейсмичности дальневосточного региона, выделены основные зоны возникновения цунамигенных землетрясений, угрожающих дальневосточному побережью РФ. На основе комплексного анализа механизмов очагов подводных землетрясений, данных о разломной тектонике построена предварительная сеймотектоническая схема региона и выбраны параметры очагов модельных землетрясений в диапазоне магнитуд 7.8 – 9.0. Эти модельные очаги позволяют рассчитать смещения дна в очаговой области цунами, которые, в свою очередь, используются в качестве начальных данных для программы расчета распространения цунами на конкретных участках акватории Дальневосточного региона. По результатам анализа фактических высот цунами при реальных цунамигенных землетрясениях и результатов численного моделирования уточнено положение южной (в районе Хоккайдо) и восточной (в районе Командорских островов) границ зоны ответственности дальневосточной СПЦ. Предложены магнитудные пороги подводных землетрясений, превышение которых создает непосредственную угрозу цунами для дальневосточного побережья РФ.
- 9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*

Подпись руководителя проекта

Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА

- 9.1. *Номер проекта* 12-05-00894
- 9.2. *Первый автор* Косых В.С.
- 9.3. *Другие авторы* Чубаров Л.Б., Гусяков В.К., Камаев Д.А., Григорьева В.М., Бейзель С.А.
- 9.4. *Название публикации* Методика расчета максимальных высот волн цунами в защищаемых пунктах побережья Дальнего Востока Российской Федерации
- 9.5. *Язык публикации* русский
- 9.6.1. *Полное название издания* Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов
- 9.7. *Вид публикации* статья в сборнике
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2013
- 9.10.1 *Том издания*
- 9.10.2 *Номер издания* 40
- 9.11. *Страницы* 115-134
- 9.12.1. *Полное название издательства* Федеральное государственное бюджетное учреждение Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство* Москва
- 9.13. *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.
- 9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы* 8

Подпись руководителя проекта

Форма 510. ЗАЯВКА НА 2014 г.

- 10.1. *Номер проекта* 12-05-00894
- 10.2. *Коды классификатора* 05-513 01-223 01-222
- 10.3. *Ключевые слова*
волны цунами, удаленные очаги, математическое моделирование, оценка воздействия волн на побережье
- 10.4. *Цели очередного годовичного этапа, связь с основной задачей проекта*
- Основной целью заключительного этапа работ по проекту, непосредственно связанной с заявленной ранее основной задачей проекта, станет оценка детальных характеристик проявления у важнейших пунктов защищаемого камчатского участка Дальневосточного побережья России волн цунами, порожденных удаленными относительно этого побережья очагами цунамигенных землетрясений.
 - Для достижения этой цели будут проведены
 - разномасштабное (от глобального до локального) численное моделирование исследуемых явлений;
 - содержательная интерпретация и анализ результатов такого моделирования;
 - подготовка с использованием материалов анализа расчетной основы для составления обзорной карты цунамиопасности Дальневосточного побережья РФ, подверженного воздействию удаленных цунами.
- 10.5. *Ожидаемые в конце 2014 г. научные результаты*
На завершающем этапе работ по проекту предполагается получить следующие результаты:
- уточненные обоснованные наборы модельных очагов цунамигенных землетрясений, порождающих наиболее опасные для защищаемого побережья волны цунами;
 - адаптированные к особенностям вычислительных алгоритмов цифровые модели высокого разрешения для рельефов суши и акваторий, прилегающих к исследуемым участкам побережья;
 - уточненные итоговые распределения высот волн на линии уреза вдоль Дальневосточного побережья от модельных очагов в наиболее опасных для него удаленных цунамигенных зонах Тихого океана;
 - оценки параметров наката волн цунами от удаленных очагов на выбранных участках Дальневосточного побережья РФ, включая границы зон затопления, максимальные глубины и длительности затопления, поля скорости течений и их максимальные абсолютные значения.
- 10.6. *Общий объем финансирования на 2014 год* 750 000 руб.
- 10.7.1. *Сроки проведения в 2014 г. экспедиции по тематике проекта* 0
- 10.7.2. *Ориентировочная стоимость экспедиции (в руб.)* 0
- 10.7.3. *Регион проведения экспедиции* нет
- 10.7.4. *Название района проведения экспедиции* нет
- 10.8.1. *Перечень оборудования и материалов, которые необходимо дополнительно приобрести, изготовить или отремонтировать для успешного выполнения Проекта.*
Выделенные Фондом средства предполагается затратить на приобретение (замену) носителей информации (жесткие диски, диски «Blue Ray», DVD-dl), расходных материалов (картриджи, бумага, канцелярский). Эти затраты обусловлены необходимостью обеспечить сохранность больших массивов данных, порождаемых запланированными вычислительными экспериментами, а также подготовкой значительного объема отчетных материалов и публикаций.
- 10.8.2. *Перечень командировок (в том числе зарубежных), необходимых для выполнения Проекта.*
В 2014 г. исполнители проекта предполагают представить результаты выполненных работ на двух конференциях:

1. XII Всероссийская конференция «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» 27 – 29 мая 2014 г. Санкт-Петербург, Россия
2. Международная конференция «Современные информационные технологии для фундаментальных научных исследований в области наук о Земле», 8-13 сентября 2014 г., Петропавловск- Камчатский, Россия

Общая стоимость участия в первой из них оценивается примерно в 25000 руб. на одного представителя коллектива, во второй – 35000 руб.

В первой конференции предполагается участие трех исполнителей, во второй – двух. Таким образом, общий расход на участие в научных конференциях в 2014 г. оценивается в 145 000 руб.

10.9.1. Планируемая численность участников Проекта в 2014 году 8

10.9.2. Полный список членов коллектива в 2014 год

Бейзель Софья Александровна

Гусев Олег Игоревич

Гусяков Вячеслав Константинович

Калашикова Тамара Владимировна

Камаев Дмитрий Альфредович

Рычков Александр Дмитриевич

Хакимзянов Гаяз Салимович

Чубаров Леонид Борисович

Подпись руководителя проекта

Форма 511. ВОЗМОЖНОСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОЕКТА РФФИ

11.1.1. 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

11.1.2. В какой форме результаты проекта могут быть доведены до практического использования

Научно-техническая продукция

11.2.3. Планируемый период проведения дополнительных НИОКР с целью разработки прототипов продукции (технологии) для демонстрации потенциальным инвесторам
До 3 лет

11.3.4. Предполагаемые авторами пути дальнейшего продвижения проекта

Участие в программах федеральных органов исполнительной власти, государственных корпораций

11.7. Информация, связанная с интеллектуальной собственностью

Патентование потребуется в ходе дальнейшей работы

Подпись руководителя проекта