

НОМЕР ПРОЕКТА <b>09-05-00294</b>		УЧЕТНАЯ КАРТОЧКА
НАЗВАНИЕ ПРОЕКТА <b>Детальное исследование волн цунами у Дальневосточного побережья России с использованием компьютерных моделей нового поколения</b>		
ОБЛАСТЬ ЗНАНИЯ <b>05 - науки о земле</b>	КОД(Ы) КЛАССИФИКАТОРА <b>01-201 01-207 01-421 05-513</b>	
ВИД КОНКУРСА <b>а - Инициативные проекты</b>		
ФАМИЛИЯ, ИМЯ, ОТЧЕСТВО РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА <b>Чубаров Леонид Борисович</b>		ТЕЛЕФОН РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА <b>(383)3331882</b>
ПОЛНОЕ НАЗВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ, ГДЕ ВЫПОЛНЯЕТСЯ ПРОЕКТ <b>Учреждение Российской академии наук Институт вычислительных технологий Сибирского отделения РАН</b>		
ПОЛНОЕ НАЗВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ, ЧЕРЕЗ КОТОРУЮ ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ ФИНАНСИРОВАНИЕ <b>Учреждение Российской академии наук Институт вычислительных технологий Сибирского отделения РАН</b>		
ОБЪЕМ СРЕДСТВ, ФАКТИЧЕСКИ ПОЛУЧЕННЫХ ЗА 2011 г. <b>320000 руб.</b>		
ЧИСЛО УЧАСТНИКОВ ПРОЕКТА (включая руководителя) <b>7</b>	ЧИСЛО УЧАСТНИКОВ, ИМЕЮЩИХ УЧЕНУЮ СТЕПЕНЬ <b>4</b>	ЧИСЛО МОЛОДЫХ (до 35 лет включительно) УЧАСТНИКОВ <b>4</b>
<b>Хакимзянов Гаяз Салимович</b>		
<b>Бейзель Софья Александровна</b>		
<b>Чубаров Дмитрий Леонидович</b>		
<b>Гусяков Вячеслав Константинович</b>		
<b>Худякова Виктория Константиновна</b>		
<b>Гусев Олег Игоревич</b>		
ПОДПИСЬ РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА		ДАТА ПОДАЧИ ОТЧЕТА <b>09.12.2011</b>

## **Форма 501. КРАТКИЙ НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ**

### *1.1. Номер проекта*

09-05-00294

### *1.2. Руководитель проекта*

Чубаров Леонид Борисович

### *1.3. Название проекта*

Детальное исследование волн цунами у Дальневосточного побережья России с использованием компьютерных моделей нового поколения

### *1.4. Вид конкурса*

а - Инициативные проекты

### *1.5. Год представления отчета*

2012

### *1.6. Вид отчета*

итоговый (2009-2011)

### *1.7. Аннотация*

1. С целью определения общих характеристик проявления волн цунами у Дальневосточного побережья России от волн цунами, порожденных «ближними» и «удаленными» очагами цунамигенных землетрясений, на основе сеймотектонического анализа, а также систематизации и интерпретации накопленного расчетного материала выбраны расчетные области, минимизирующие требования к вычислительным ресурсам и одновременно обеспечивающие необходимую достоверность результатов, сформирован представительный набор модельных цунамигенных землетрясений, определены содержательные постановки задач в части конструирования и адаптации необходимых батиметрических данных, расстановки виртуальных мареографов, набор которых содержит «датчики», размещенные вблизи защищаемых пунктов, «датчики», размещенные вдоль защищаемого побережья, а также в местах расположения гидрофизических измерителей Тихоокеанской системы предупреждения о цунами (PTWS) и глубоководных регистраторов системы DART.

Разработана и обоснована методика расчетов, созданы алгоритмы и программное обеспечение пересчета батиметрической информации с нерегулярных сеток на регулярные с заданным разрешением. С целью повышения быстродействия и эффективности вычислительных алгоритмов разработаны их параллельные версии, учитывающие особенности доступных высокопроизводительных вычислительных комплексов. Созданные комплексы программ зарегистрированы в Реестре программ для ЭВМ Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам (№№ 2011614598, 2011614599).

По результатам интерпретации материалов моделирования определены наиболее опасные цунамигенные зоны Тихого океана и общие характеристики проявления цунами у Дальневосточного побережья России; определены также направления дальнейших исследований и постановки задач, решение которых необходимо для усовершенствования национальной системы предупреждения о цунами и регламента ее работы. На основе численного моделирования катастрофического цунами 11 марта 2011 года в Тохоку (Япония) выполнен сравнительный анализ различных модельных очагов землетрясения, вызвавшего волну цунами, рассмотрены действия японской, российской и международной служб предупреждения о цунами, а также возможное влияние этого события на дальнейшее развитие служб предупреждения о цунами и методы создания карт сейсмо- и цунамиопасности.

2. Выполнены работы по уточнению используемых математических моделей и

проверке их работоспособности. Разработан простой, основанный на интегральных законах сохранения способ получения нелинейно-дисперсионных (НЛД-) моделей волновой гидродинамики для поверхностных волн конечной амплитуды, распространяющихся над неровным подвижным дном. Выведена полностью нелинейная модель поверхностных волн, учитывающая эффекты дисперсии, нестационарности дна и сферичности Земли. Предложен конечно-разностный алгоритм, основанный на идеях схем типа «предиктор-корректор» для полных НЛД-уравнений Железняк-Пелиновского. При этом эффективно использовалось расщепление исходной системы на эллиптическую и гиперболическую части. Разработана разностная схема первого порядка аппроксимации для расчета распространения волн на сфере в рамках приближенной НЛД-модели Буссинеска.

3. В рамках работ по исследованию оползневой механизма генерации поверхностных волн предложен закон движения квазинедеформируемого оползня, учитывающий пространственную неоднородность склона, по которому движется оползень, конечность его пространственных размеров, эффекты сил тяжести, трения, сопротивления воды, архимедовой силы и присоединенной массы. В рамках классических нелинейных уравнений мелкой воды с использованием предложенного нового закона движения оползня проведена серия расчетов на последовательности усложняющихся рельефов дна, включающей кусочно-линейные, а также модельные и реальные криволинейные склоны. Результаты расчетов позволили определить особенности процессов волнообразования на различных типах рельефов в зависимости от размеров оползней, их начальных заглублений, плотностных соотношений и характеристик поверхности склона, определяющих эффекты трения.

*1.8. Полное название организации, где выполняется проект*

Учреждение Российской академии наук Институт вычислительных технологий  
Сибирского отделения РАН

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

*Подпись руководителя проекта*

## **Форма 502. КРАТКИЙ НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ**

### *2.1. Номер проекта*

09-05-00294

### *2.2. Руководитель проекта*

Chubarov Leonid Borisovich

### *2.3. Название проекта*

Detailed study of tsunami waves near the Far East coast of Russia using computer models of new generation

### *2.4. Год представления отчета*

2012

### *2.5. Вид отчета*

ИТОГОВЫЙ (2009-2011)

### *2.6. Аннотация*

1. In order to determine the general characteristics of tsunami manifestation in the Far Eastern coast of Russia from tsunami waves generated by the "neighboring" and "remote" foci of tsunamigenic earthquakes, based on the seismotectonic analysis, and also ordering and interpretation of accumulated current estimates of calculation material, computational domains are chosen, representative set of model of tsunamigenic earthquakes is established, thoughtful formulations of the problem are set in designing and adapting the necessary bathymetric data, placement of virtual gauges near the protected coast and in the locations of hydro-meter Pacific Tsunami Warning System (PTWS) and deep-sea gauges DART.

The calculation technique is developed and justified, algorithms and software to converse bathymetric data from irregular to regular grids with a specified resolution are developed. In order to improve performance and efficiency of computational algorithms their parallel versions are developed, taking into account the characteristics of available high-performance computing systems. A set of programs are registered with the Registry of the computer programs (NN 2011614598, 2011614599).

The most dangerous tsunamigenic zones of the Pacific and the general characteristics of the manifestation of a tsunami in the Far Eastern coast of Russia are defined. On the basis of numerical simulation of the catastrophic tsunami March 11, 2011 in the Tohoku (Japan) a comparative analysis of various models of earthquake that caused the tsunami wave is made, the action of Japanese, Russian and international tsunami warning services is considered, as well as the possible impact of this event for the further development of tsunami warning services and methods for mapping seismic- and tsunami-risk.

2. The works to refine the mathematical models and test their functionality are performed. A simple method, based on the integral conservation laws, is developed to derive nonlinear dispersive (NLD-) wave hydrodynamics models for surface waves of finite amplitude, propagating over an uneven bottom movable. The fully nonlinear model of the surface waves, taking into account the effects of dispersion, non-stationary bottom and sphericity of the earth, is derived. A finite-difference algorithm based on the ideas of schemes such as the "predictor-corrector" for full-NLD equations Zheleznyaka-Pelinovsky, is suggested. The finite-difference scheme of the first order of approximation for the calculation of wave propagation on a sphere within the framework of an approximate model of Boussinesq NLD is developed.

3. As part of studies on landslide mechanism of surface wave motion the law of quasi-nondeformable landslide is proposed, taking into account the spatial inhomogeneity of the slope, the finiteness of landslide's spatial dimensions, the effects of gravity, friction, water resistance, forces of buoyancy and added mass. In the framework of classical nonlinear

shallow water equations using the proposed new law of motion of the landslide, a series of calculations on a sequence of increasingly complex bottom topography, including piecewise-linear, as well as model and real curved slopes, is performed. The results of calculations allowed to determine the characteristics of wave processes in various types of relief depending on the size of landslides, their initial penetration, density ratio, surface characteristics of the slope, and effects of friction.

2.7. *Полное название организации, где выполняется проект*  
Institute of Computational Technologies SB RAS

*Подпись руководителя проекта*

## Форма 503. РАЗВЕРНУТЫЙ НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ

- 3.1. *Номер проекта*  
09-05-00294
- 3.2. *Название проекта*  
Детальное исследование волн цунами у Дальневосточного побережья России с использованием компьютерных моделей нового поколения
- 3.3. *Коды классификатора, соответствующие содержанию фактически проделанной работы*  
05-513 01-201 01-207 01-421
- 3.4. *Объявленные ранее цели проекта на 2011 год*
1. Детальное исследование характеристик цунами от удаленных очагов у Дальневосточного побережья РФ с использованием построенной в 2010 г. системы модельных цунамигенных землетрясений.
  2. Расширение возможностей вычислительного инструментария путем разработки и программной реализации численного алгоритма на основе созданной в 2010 г. полной нелинейно-дисперсионной модели для исследования длинных поверхностных волн на вращающейся притягивающей сфере с учетом нестационарности дна.
  3. Оценка влияния дисперсионных эффектов на процесс трансформации сейсмогенных волн цунами при их распространении на трансокеанические расстояния и на характеристики волновых режимов, порождаемых оползневый механизм.
  4. Завершение работ по проекту, включающее содержательную интерпретацию результатов, всесторонний анализ совокупности результатов моделирования, сопоставление с историческими и натурными данными, формирование практических рекомендаций.
- В конце 2011 г. планировалось получить следующие научные результаты:
1. Будут определены уточненные характеристики проявления у Дальневосточного побережья РФ волн цунами, порожденных **удаленными** цунамигенными землетрясениями – значения высот волн у побережья и зоны влияния каждого из 90 рассмотренных очагов цунамигенных землетрясений с магнитудами  $MW = 9.0$ .
  2. Будет разработан, программно реализован и обоснован численный алгоритм на основе созданной в 2010 г. полной нелинейно-дисперсионной модели для исследования длинных поверхностных волн на вращающейся притягивающей сфере с учетом нестационарности дна.
  3. Будут проведены вычислительные эксперименты, в ходе которых будет получена оценка вклада дисперсионных эффектов в процесс трансформации сейсмогенных волн цунами при их распространении на трансокеанические расстояния и в процесс формирования волновых режимов оползневый механизм.
  4. Будут выполнены содержательная интерпретация результатов моделирования, и их сопоставление с историческими и натурными данными, будут сформулированы практические рекомендации.
- 3.5. *Степень выполнения поставленных в проекте задач*  
Цели этапа 2011 г. в целом достигнуты, сформулированные планом задачи решены
- 3.6. *Полученные за отчетный период важнейшие результаты*  
На заключительном этапе работ основное внимание исполнителей было сосредоточено на исследовании характеристик цунами от удаленных очагов у Дальневосточного побережья РФ. Такое решение обусловлено наибольшим

заделом, сформировавшимся у коллектива в этом направлении за предыдущие годы, а также тем, что без выполнения этих работ невозможным представляется запланированное на ближайшие 3 – 5 лет решение ряда задач по совершенствованию структуры и регламента работы национальной системы предупреждения о цунами. Определенное влияние на выделение наиболее важного направления работ оказало также и серьезное уменьшение финансирования исследований со стороны РФФИ. Тем не менее, исполнителям удалось получить важные результаты также в части конструирования вычислительных алгоритмов для проведения расчетов по созданной оригинальной нелинейно-дисперсионной модели, учитывающей сферичность Земли и нестационарность донной поверхности, которая обеспечивает возможность воспроизведения оползневого механизма генерации волн цунами. Произошедшее в марте 2011 г. сильнейшее цунами у берегов Японии также заставило несколько скорректировать план работ и значительную часть усилий уделить срочному исследованию этого интереснейшего и важнейшего явления.

Краткие формулировки полученных за отчетный период важнейших результатов выглядят следующим образом.

**Первое направление:**

1. создан уточненный представительный набор модельных очагов с магнитудой 9.0 в удаленных цунамигенных зонах Тихого океана, потенциально опасных для Дальневосточного побережья России; на основе предварительного анализа исторических данных в ходе постановки задач для вычислительного эксперимента предложен расширенный набор виртуальных мареографов, в который включены «датчики», размещенные вблизи защищаемых пунктов Дальневосточного побережья России, «датчики», размещенные вдоль защищаемого побережья, а также в местах расположения гидрофизических измерителей Тихоокеанской системы предупреждения о цунами (PTWS) и глубоководных регистраторов системы DART;
2. модифицирован программный инструментарий, в том числе для расширения списка рассчитываемых с его помощью волновых характеристик; комплексы программ, использованные для проведения вычислительных экспериментов, зарегистрированы в Реестре программ для ЭВМ Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам (№№ 2011614598, 2011614599);
3. проведены предварительные тестовые расчеты, по результатам которых подготовлены уточненные цифровые карты акваторий и определены значения вспомогательных вычислительных параметров; проведены серийные расчеты по определению характеристик проявления в Тихом океане и вдоль защищаемого побережья волн цунами от всего набора модельных очагов цунамигенных землетрясений за 48 часов физического времени распространения волны с использованием 5-минутной расчетной сетки;

**Второе направление**

4. Выведены новые приближенные НЛД-модели на вращающейся притягивающей сфере. Разработана разностная схема первого порядка аппроксимации для расчета распространения волн на сфере в рамках приближенной НЛД-модели Буссинеска. Для расчета трансформации поверхностных волн при их распространении над неровным подвижным дном разработана, программно реализована и протестирована на модельных задачах конечно-разностная схема на прямоугольных равномерных сетках,

аппроксимирующая плановые нелинейно-дисперсионные уравнения мелкой воды.

### **Третье направление**

5. Выполнен сравнительный анализ результатов численного моделирования процесса генерации поверхностных волн подводным оползнем в рамках традиционной модели мелкой воды первого приближения, разработанной исполнителями проекта оригинальной полной нелинейно-дисперсионной модели и модели потенциальных течений жидкости со свободной границей.

### **Четвертое направление**

6. По результатам интерпретации материалов моделирования определены наиболее опасные цунамигенные зоны Тихого океана и общие характеристики проявления удаленных цунами у Дальневосточного побережья России; определены также направления дальнейших исследований и постановки задач, решение которых необходимо для усовершенствования национальной системы предупреждения о цунами и регламента ее работы;
7. С использованием результатов рассмотрения сейсмотектонических особенностей региона катастрофического землетрясения и численного моделирования вызванного им цунами 11 марта 2011 года в Тохоку (Японии) выполнен сравнительный анализ различных модельных очагов землетрясения, вызвавшего волну цунами, рассмотрены действия японской, российской и международной служб предупреждения о цунами, а также возможное влияние этого события на дальнейшее развитие служб предупреждения о цунами и методы создания карт сейсмо- и цунамиопасности.

Подробное изложение перечисленных выше результатов излагается далее в соответствии с направлениями исследований.

### **Результаты, связанные с детальным определением и исследованием характеристик цунами у Дальневосточного побережья РФ от удаленных очагов, с содержательной интерпретацией материалов, полученных в ходе вычислительных экспериментов (направления 1 и 4).**

Для Дальневосточного побережья России проблема оценки риска цунами от удаленных землетрясений требует особого рассмотрения, и в этом состоит ее существенное отличие от аналогичной проблемы оценки сейсмического риска, где сейсмические очаги, удаленные более чем на 2-3 тысячи километров, попросту не рассматриваются. Волны же цунами в некоторых случаях способны распространяться на расстояния до 12 – 15 тысяч километров, сохраняя при этом свой разрушительный потенциал. Значительная часть Дальневосточного побережья России открыта к воздействию волн практически от всех основных цунамигенных зон Тихого океана. Однако за все XX столетие реально опасными для него были только два случая удаленных цунами – Чилийское 1960 года (высоты до 3 – 4 метров по всему Охотскому побережью, 5 – 6 метров на Курилах и восточном побережье Камчатки, включая Корякию) и Аляскинское 1964 года (высота до 1 метра на о-ве Парамушир). Два других сильнейших тихоокеанских цунами XX столетия (Аляскинское 1946 года и Алеутское 1957 года) никак не проявились на Дальневосточном побережье РФ. Между тем, тревоги цунами от удаленных землетрясений за период с 1958 года по 2010 год объявлялись 19 раз, в 17 из которых они оказались ложными. Эта статистика показывает, что проблема удаленных цунами требует специального

рассмотрения с привлечением всех доступных материалов исторических наблюдений и численного моделирования.

Формальный анализ содержания глобальной базы данных по наблюдениям цунами по типу источника цунами показывает, что в Тихом океане подводные землетрясения ответственны за 82% всех цунамигенных событий. Оставшаяся часть делится между обвальными (10%), вулканогенными (5%) и метеорологическими (3%) цунами (Gusiakov, 2009). Причем подавляющее большинство обвальных и вулканогенных цунами являются локальными, т.е. их ущерб ограничивается расстояниями в несколько сот километров от очага. Даже при крупнейшем вулканогенном цунами в Индонезии, вызванном взрывом вулкана Кракатау в 1883 году, все 36 тыс. погибших оказались на ближайших участках побережья Явы и Суматры, на расстоянии не более 150 – 200 км от очага. При наибольшей измеренной в ближней зоне высоте заплеска в 35 метров, максимальная высота волн в дальней зоне оказалась равной только 1.2 метра (в порту Галле, на Цейлоне). Это показывает, что при рассмотрении угрозы удаленных цунами для Дальневосточного побережья РФ можно ограничить рассмотрение только случаями сейсмогенных цунами.

Имеющиеся исторические каталоги наблюдений цунами на Дальневосточном побережье России (Заякин, 1996; Новый каталог..., 1977; Соловьев, 1978; Соловьев, Ферчев, 1961) и построенная на их основе сводная база данных WinITDB (2010) дают весьма ограниченный набор сведений о проявлениях цунами на Дальневосточном побережье России от удаленных очагов. Приводимые в них сведения касаются, в основном, Чилийского цунами 1960 года, причем данные о его проявлении на побережье внутренних морей (Японского, Охотского, Берингова) отрывочные и далеко не полные. Еще менее информативными в этом отношении являются зарубежные базы данных, в том числе основная из них, поддерживаемая Национальным центром данных по геофизике НОАА в Боулдере, США (NGDC, 2010).

Наиболее сильное в прошлом столетии Чилийское землетрясение 22 мая 1960 года ( $M = 8.5$ ) вызвало на большом протяжении восточного побережья Японии волны высотой до 7 – 8 метров, которые нанесли материальный ущерб в десятки миллионов долларов и унесли жизни 200 человек (The Chilean Tsunami..., 1961). На Курило-Камчатском побережье это цунами также наблюдалось повсеместно с высотами 2 – 4 метра. Время распространения цунами от берегов Чили до побережья Камчатки составило 21 час. Волны наибольшей высоты (до 7 метров) наблюдались на Камчатке в бухтах Моржовая и Русская (Соловьев, 1978). Данные о размерах материального ущерба и жертвах в российских каталогах отсутствуют. В каталоге (Заякин, 1996) приводятся краткие сведения о проявлении этого цунами на Беринговоморском побережье Камчатки, описывающие сильные течения и подтопление разгрузочных территорий ряда рыбокомбинатов, выбросы на берег глыб льда, повреждение причалов и мостов на речках.

Исторические каталоги и базы данных содержат сведения о 16 разрушительных цунами, происшедших вблизи побережья Южной Америки за 500 лет исторических наблюдений (1500 – 2010 г.). Из них по крайней мере 7 событий отмечены в каталоге Iida (1984) как вызвавшие опасные (высотой более 1 метра) волны цунами на побережье Японских островов. К сожалению, мы не имеем аналогичных исторических данных по Курило-Камчатскому побережью. Однако, основываясь на модельных представлениях о распространении трансокеанских цунами и на результатах наблюдения цунами 1960 года, можно предполагать, что средние высоты волн южно-американских

цунами на Японском и Курило-Камчатском побережьях примерно одинаковы.

По приведенным данным можно оценить средний период повторяемости наблюдения южно-американских цунами с высотами 2 и более метров у берегов Японии. За последние 400 лет (с 1586 по 1995 год) он оказывается равным 58 годам, что меньше ожидаемого периода повторяемости сильных (с магнитудой 7.5 и выше) подводных землетрясений в отдельном сейсмотектоническом блоке Курило-Камчатской сейсмогенной зоны, равном  $140 \pm 50$  лет (Федотов, 1968). Отсюда следует, что риск удаленных цунами для Дальневосточного побережья РФ является по крайней мере сопоставимым с риском цунами от близких региональных землетрясений. Максимально возможные высоты волн от таких удаленных землетрясений, по-видимому, не могут превышать 4 – 5 метров, однако, в отличие от региональных цунами, оказывающих разрушительное воздействие на ограниченном по протяженности участке берега, удаленные цунами могут проявляться практически на всем Дальневосточном побережье России, включая побережья Охотского и Берингова морей. Для таких участков побережья, не имеющих вблизи себя активных сейсмогенных зон, риск от удаленных цунами может быть даже выше риска местного и регионального цунами.

Сказанное выше показывает, что проблемы удаленных цунами заслуживает самого тщательного рассмотрения, которое было начато согласно плану работ по настоящему проекту и самым тесным образом связано с планами работ коллектива исполнителей на последующие 3 – 5 лет.

В силу отмеченного выше преобладания сейсмогенных цунами в общем числе цунамигенных событий Тихого океана, основные цунамигенные зоны здесь практически совпадают с положением его сейсмогенных зон, образующих так называемый тихоокеанский сейсмический пояс, в пределах которого происходит 99% землетрясений Тихого океана (Рис.1). Из анализа исторических сведений о проявлениях удаленных цунами на Дальневосточном побережье РФ следует, что опасными являются только землетрясения с магнитудой 9.0 или выше. Однако даже при такой предельно возможной магнитуде реальную опасность представляют очаги, определенным образом расположенные по отношению к защищаемому побережью, например, такие, которые обеспечивают ориентацию максимума диаграммы свечения источника в направлении нашего побережья.

Построенный набор из 94 удаленных (по отношению к Дальневосточному региону РФ) источников цунами можно условно разбить на группы, соответствующие географическим зонам их расположения. Таких групп можно выделить 9:

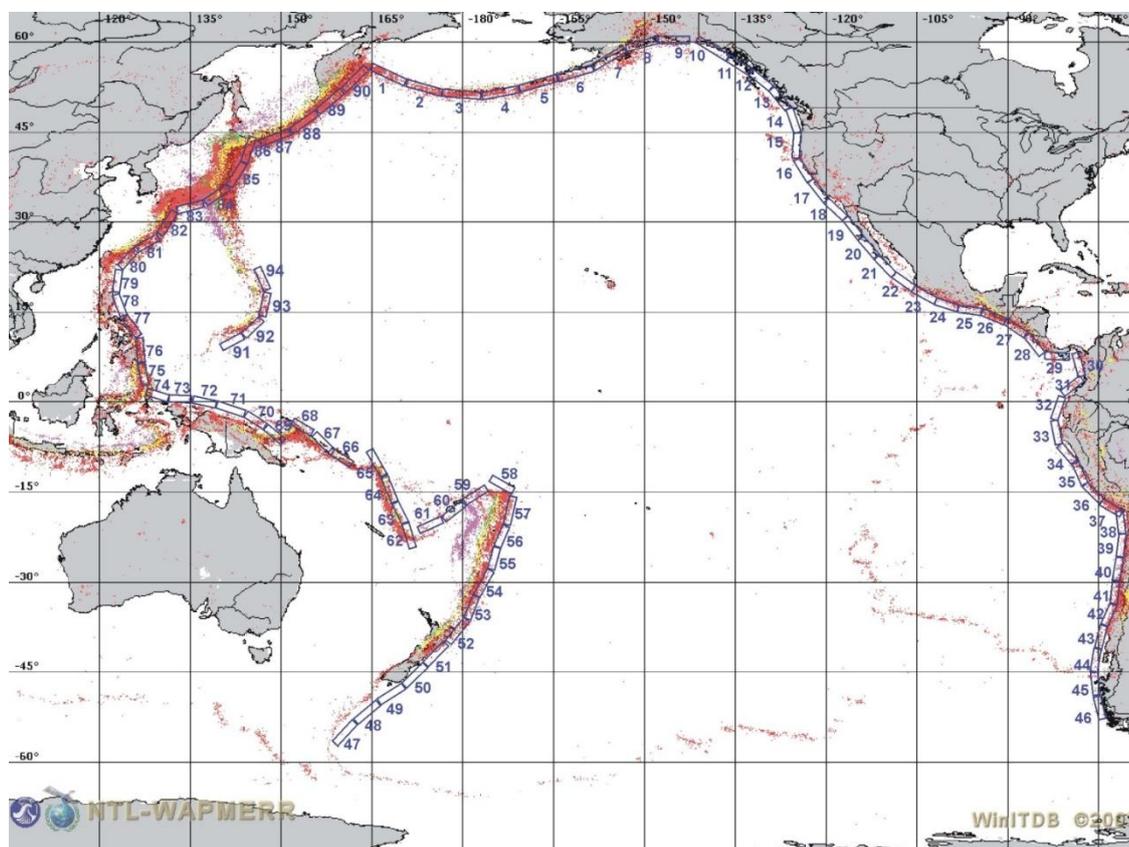
1. Алеуто-Аляскинская группа (1а – 8а),
2. Североамериканская группа (9а – 22а),
3. Центральноамериканская группа (23а – 29а),
4. Южноамериканская группа (30а – 46а),
5. группа Новой Зеландии – Тонга (47а – 57а),
6. группа Папуа-Новой Гвинеи – Соломоновых островов (58а – 74а),
7. Филиппинская группа (75а – 86а),
8. Курило-Камчатская группа (87а – 90а),
9. группа Гуама (91а – 94а).

Землетрясения 1а, 2а, 86а – 90а фактически являются для Дальневосточного побережья России «пограничными» и «близкими». Они включены в построенную систему очагов для полного покрытия всех возможных сейсмически активных зон Тихого океана, возникновение цунами в которых может угрожать Дальневосточному побережью РФ. Такое решение

обеспечивает возможность сравнительной оценки возможных амплитуд волн от удаленных и близких очагов в любой точке защищаемого побережья.

В ходе постановки задач на вычислительные эксперименты в расчетной области были расставлены 823 виртуальных мареографа (Рис. 2, Рис. 3) – точек записи уровня свободной поверхности. В 2011 г. этот набор включал:

- 82 защищаемых пункта (в числе которых пункты Приморья, западного и восточного побережья Сахалина, Курильских островов, восточного побережья Камчатки, Охотск и Магадан),
- 611 дополнительных виртуальных пунктов, размещенных вдоль всего защищаемого побережья с шагом 20 – 30 км; вместе с защищаемыми пунктами виртуальных мареографов на защищаемом побережье оказалось 693;
- 75 виртуальных прибрежных датчиков Тихоокеанской системы предупреждения о цунами (PTWS);
- 35 виртуальных глубоководных датчиков DART;
- 20 дополнительных виртуальных глубоководных датчиков DART, расположенных вблизи защищаемого побережья.

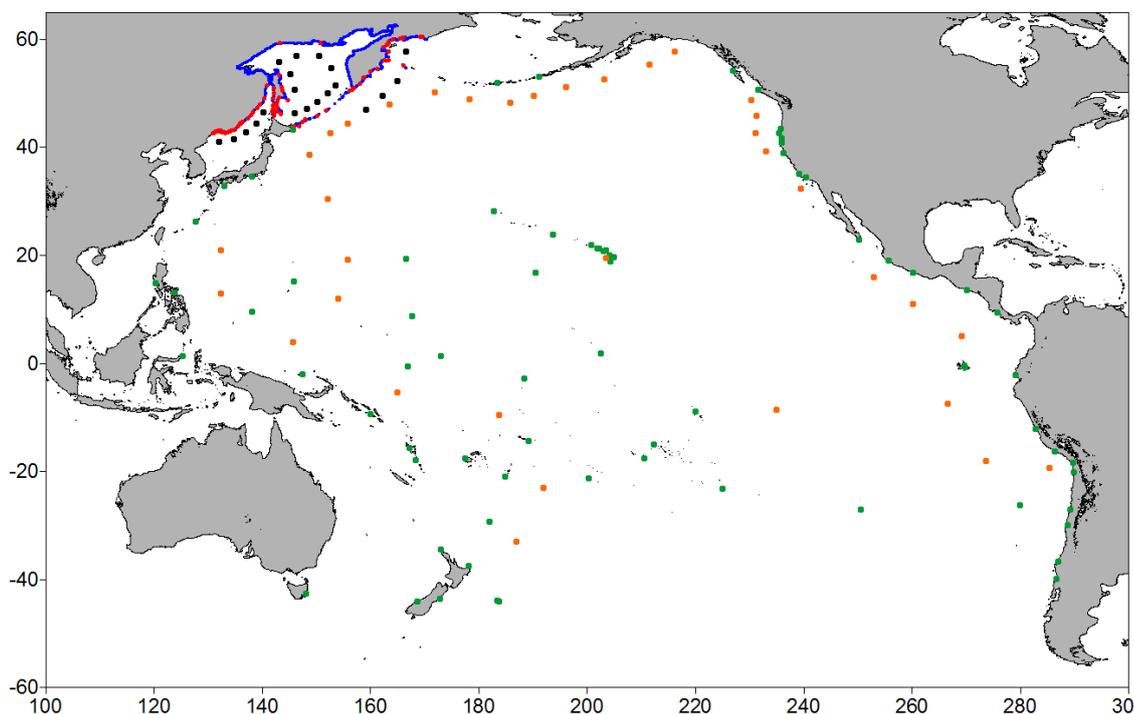


**Рис. 1. Карта сейсмичности Тихого океана (за инструментальный период) с нанесенными на нее проекциями площадок разрыва модельных очагов подводных землетрясений с магнитудами  $M_w=9.0$ .**

Моделирование трансформации удаленных относительно Дальневосточного побережья РФ цунами проводилось в расчетной «тихоокеанской» акватории, ограниченной с запада  $100^\circ$  В.Д., с востока  $60^\circ$  З.Д., с юга  $60^\circ$  Ю.Ш. и с севера  $65^\circ$  С.Ш. (см. Рис. 4). Соответствующий массив цифровой батиметрической информации был получен прореживанием одноминутной батиметрии «GEBCO-2009» на регулярную сетку с шагом 5 угловых минут. Физическое время распространения волны составляло 48 часов.

В результате серийных вычислительных экспериментов были рассчитаны:

- a. мареограммы в точках размещения виртуальных мареографов;
- b. распределения экстремальных (максимальных положительных и отрицательных) значений высот волн цунами в точках размещения виртуальных мареографов;
- c. распределения максимальных положительных и отрицательных высот волн цунами в расчетной акватории (картины свечения).
- d. распределения времен регистрации экстремальных значений высот волн цунами в точках размещения виртуальных мареографов;
- e. распределения времен регистрации первых возмущений в точках размещения виртуальных мареографов и во всех узлах расчетной акватории (ETA (Expected Tsunami Arrival));



**Рис. 2. Схема расположения виртуальных мареографов в расчетной области. Красные точки – «защищаемые» пункты, синие – дополнительные виртуальные мареографы на защищаемом побережье, зеленые – «прибрежные» датчики, оранжевые – виртуальные датчики DART, черные – дополнительные виртуальные датчики DART.**

В совокупность результатов моделирования в 2011 г. впервые включена характеристика, позволяющая наглядно сравнивать различные цунамигенные зоны по степени их опасности для защищаемого побережья в целом. Такой характеристикой стала интегральная энергетическая характеристика воздействия волн цунами на выбранные точки побережья. Она определялась по формуле

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^N A_i^2},$$

где  $N$  – число «контрольных» расчетных точек,  $A_i$  – размах максимальных колебаний (сумма абсолютных величин максимальных и минимальных значений уровня за все время колебаний, порожденных модельным очагом в  $i$ -

ой «контрольной» точке). Ниже на рисунке (Рис. 5) показано распределение этой характеристики по всем 693 виртуальным мареографам ( $N = 693$ ), распределенным вдоль защищаемого побережья, рассчитанное от всех модельных источников.

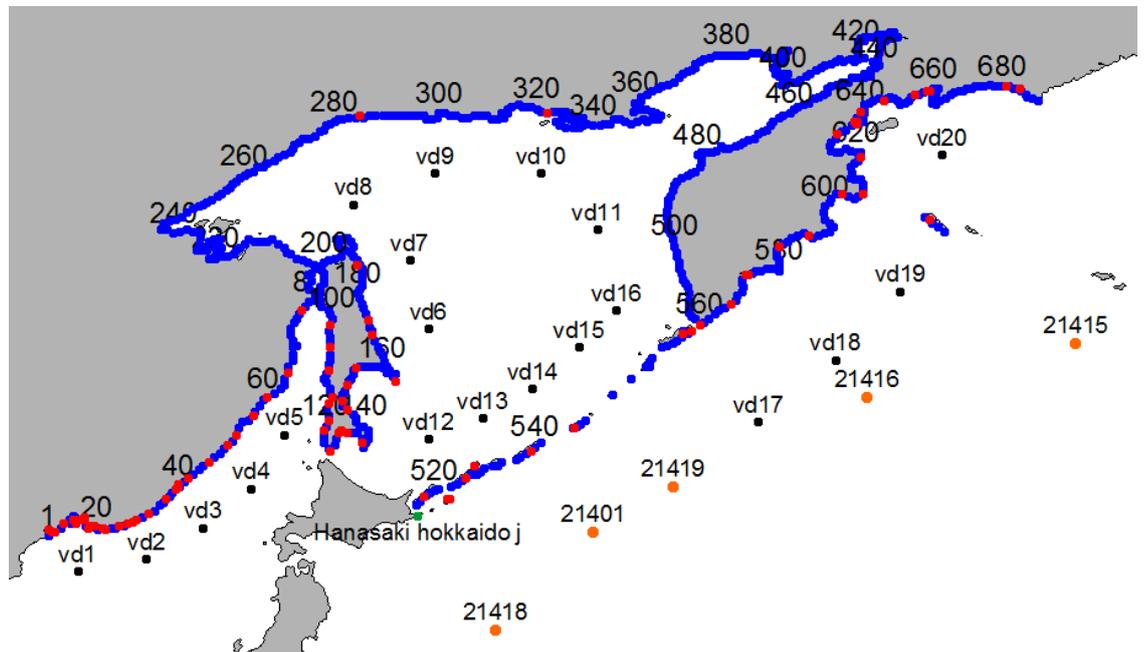


Рис. 3. Схема расположения мареографов вблизи защищаемого побережья. Красные точки – «защищаемые» пункты, синие – дополнительные виртуальные мареографы на защищаемом побережье, зеленые – прибрежные датчики PTWS, оранжевые – виртуальные датчики DART, черные – дополнительные виртуальные датчики DART.

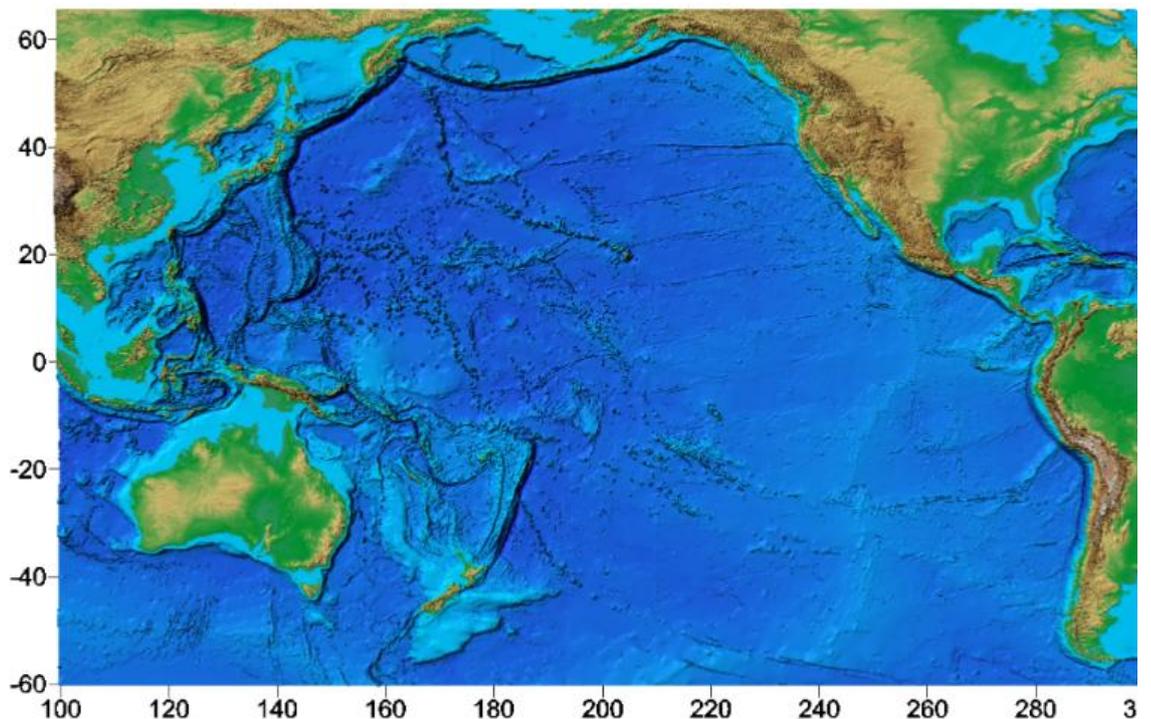
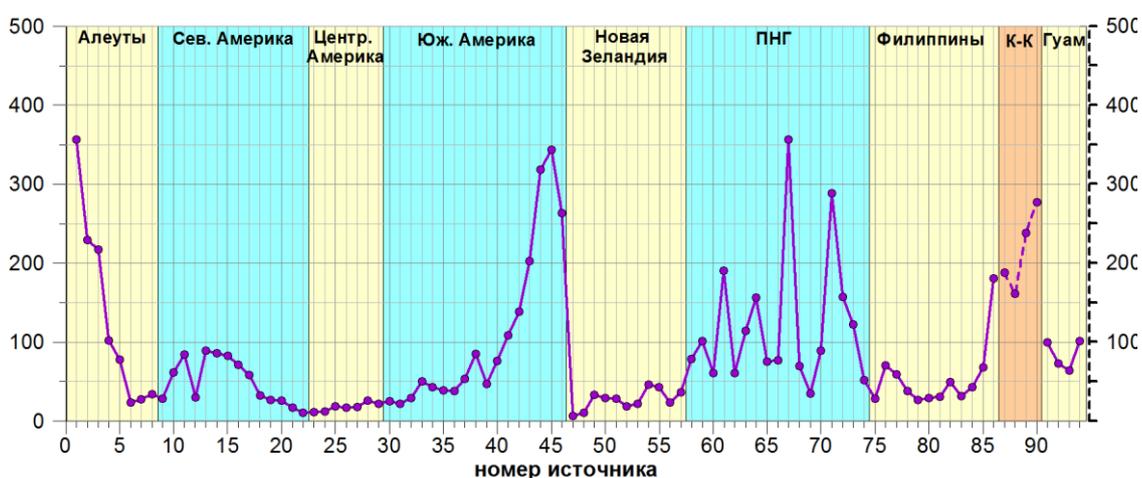


Рис. 4. Рельеф дна расчетной области, использованной для расчетов трансформации волн цунами, порожденных удаленными относительно Дальневосточного побережья РФ потенциально опасными очагами цунамигенных землетрясений.

Как показывает приведенная гистограмма, наибольшую опасность для Российского побережья несут, что естественно, землетрясения, располагающиеся в **ближней** зоне, – алеутские источники 1а – 3а (последний, впрочем, по принятой терминологии близким не считается), а также Курило-Камчатские 87а – 90а (значения характеристики для них следует определять по вертикальной оси, находящейся справа, и масштаб у нее в 10 раз больше, чем у левой оси, по которой определяются значения энергетической характеристики для остальных очагов).

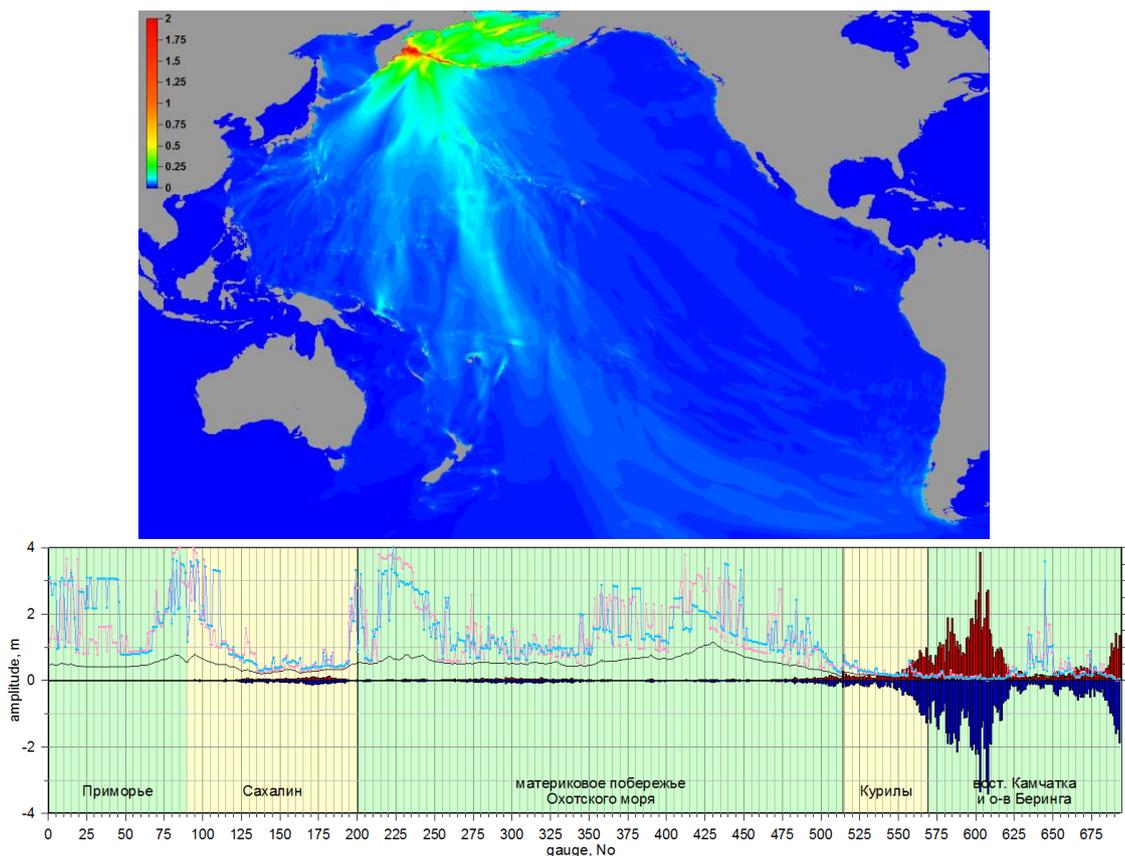
Самыми *безопасными удаленными* цунамигенными зонами для Дальневосточного побережья России являются зоны Северной и Центральной Америки, а также северной части Южной Америки, Новой Зеландии, Филиппин и Гуама. Как правило, во всех этих зонах интегральная характеристика ведет себя практически монотонно при переходе от одного очага к другому. Такая устойчивость результатов позволяет с достаточно большой уверенностью интерполировать данные от соседних очагов в случае, когда реальное землетрясение произойдет где-то между ними.



**Рис. 5. Интегральная характеристика воздействия различных групп очагов цунамигенных землетрясений на защищаемый участок Дальневосточного побережья РФ. На горизонтальной оси отложен номер очага, на левой вертикальной – интегральная характеристика, на правой – эта же характеристика в другом масштабе для очагов Курило-Камчатской группы (зона со штриховкой).**

Основное исключение здесь составляет североамериканский очаг № 12, самую малую по сравнению с соседями цунамиопасность которого можно объяснить тем, что большая часть его волновой энергии блокируется в проливе Хекате между материком и архипелагом Хайда-Гуаи (до 2010 г. – острова Королевы Шарлотты).

При смещении гипоцентра очага от Центральной Америки к югу материка цунамиопасность многократно возрастает, так что наибольшие высоты волн на российском побережье можно ожидать от почти самого южного очага № 45 и немного уступающего ему более северного очага № 44. Напомним, что в 1960 году катастрофическое землетрясение с магнитудой  $M_w=9.5$ , приведшее к ощутимым волнам на побережье Дальнего Востока, произошло около Чили вблизи очага № 42 из нашей системы, а он втрое «проигрывает» по своей цунамиопасности своим южным соседям №№ 44 и 45.

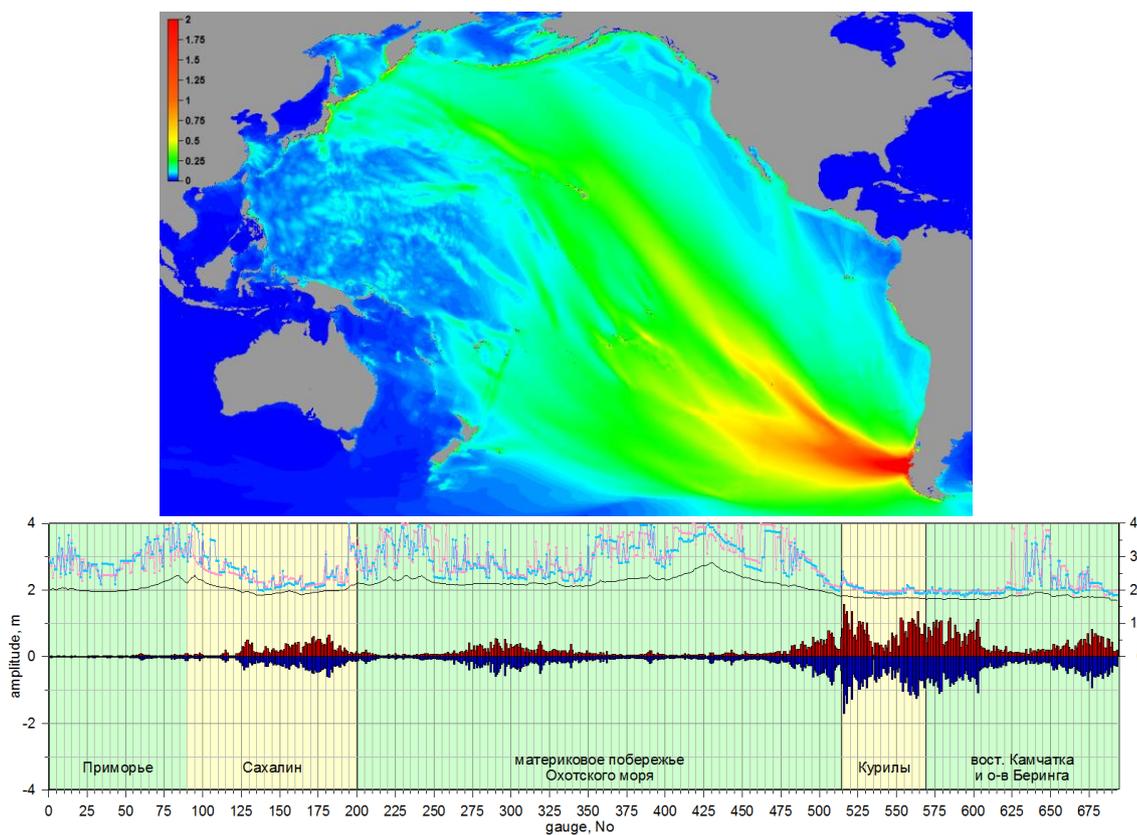


**Рис. 6.** Свечение и гистограмма для Алеутского источника 90-1а.

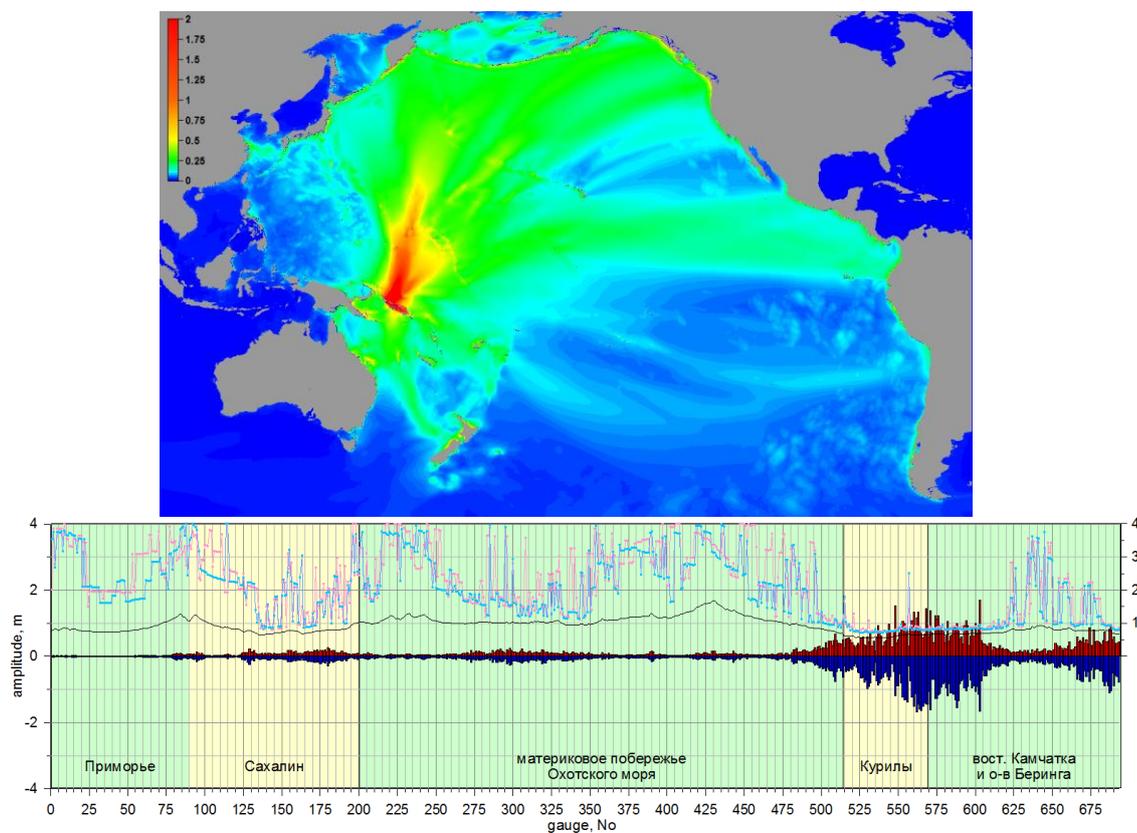
Таким образом, по введенной интегральной характеристике можно утверждать, что южноамериканские очаги представляют для Дальневосточного побережья угрозу, вполне сопоставимую с той, что несут в себе гораздо более близкие к этому побережью очаги, расположенные вдоль Алеутских островов. Здесь, однако, стоит напомнить, что обсуждаемая характеристика представляет собой осредненную высоту волны по мареографам вдоль всего защищаемого побережья, и малая ее величина не исключает возможности того, что существует достаточно короткий участок побережья, где высоты волн будут весьма существенными. Так, Алеутские очаги представляют опасность только для восточного побережья Камчатки и северной части Курильских островов, отгораживаясь ими от остального Дальневосточного побережья (**Рис. 6**).

В то же время волны от южноамериканских очагов воздействуют на восточную часть Камчатки слабее, но зато, ударяя по Курильской гряде, хорошо проникают сквозь проливы в Охотское море и достаточно ощутимо проявляют себя на восточном побережье Сахалина, в районе Охотска, Магадана и на западе Камчатки, приводя там к появлению волн с размахом более одного метра (на пятиминутной сетке). При этом опасности для запада Сахалина и Приморского края такие очаги также не представляют (**Рис. 7**).

**Повышенную** цунамиопасность для Дальнего Востока России несут и землетрясения в районе Папуа-Новой Гвинеи и Соломоновых островов. При этом, как показывает рисунок (**Рис. 5**), в этой зоне рассматриваемая нами интегральная характеристика ведет себя очень неустойчиво, в разы изменяясь при переходе от одного очага землетрясения к другому. Это можно объяснить большим количеством островов в этой части акватории Тихого Океана, аккумулирующих волновую энергию. Особенно выделяются в этой сейсмогенной зоне очаги №№ 67 и 71.



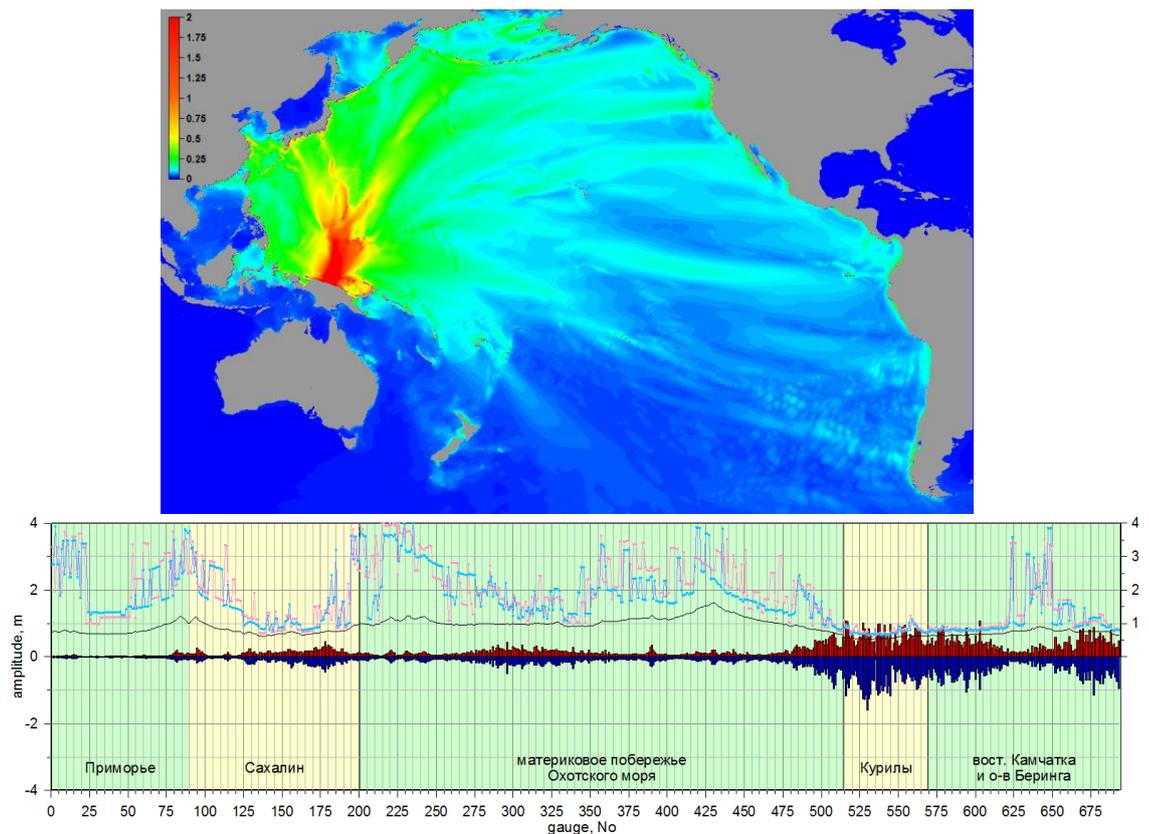
**Рис. 7. Свечение и гистограмма для южноамериканского источника 90-45а.**



**Рис. 8. Свечение и гистограмма для источника 90-67а около Соломоновых островов**

Как было отмечено ранее (см. отчет по проекту за 2010 г., а также статью Бейзель С.А., Гусяков В.К., Чубаров Л.Б., 2011), для получения более содержательных выводов о степени опасности для защищаемого побережья

удаленных цунами, порождаемых в различных сейсмических зонах Тихого океана, наряду с амплитудными характеристиками необходимо рассматривать и временные, позволяющие выяснить времена прихода экстремальных значений, близость по времени прихода относительных максимумов и минимумов смещений уровня океана. Именно поэтому в настоящий отчет впервые оказались включены расчетные времена прихода первого возмущения в каждый узел расчетной сетки, соответствующей «тихоокеанской» акватории, в том числе, в каждую точку размещения виртуальных мареографов. Эти данные позволяют строить карты изохрон, демонстрирующие времена добегания первых волн от очага землетрясения до защищаемого побережья, а также строить гистограммы, показывающие разницу во времени между приходом первой и максимальной волнами и т.п.



**Рис. 9. Свечение и гистограмма для Новогвинейского источника 90-71а.**

Результаты 2011 г. подтвердили обнаруженный ранее эффект, заключающийся в том, что в некоторых случаях при трансокеанском распространении максимальные колебания уровня моря наступают много позже (на десятки часов!) прихода не только головной волны, но и энергетического максимума, ожидаемого с учетом дисперсии внутри волнового пакета. Обнаруженные на участках защищаемого побережья особенности проявления цунами совпадают с известными представлениями о том, что в случае трансокеанских цунами имеют место несколько достаточно различных по своей физике процессов. *Первый* – это процесс динамического распространения начального энергетического пакета, излученного очагом. *Второй* – процесс раскочки всего Тихого океана, как единого, но очень сложного по своей конфигурации бассейна, который при достаточно сильном вбросе энергии в эту колебательную систему может продолжаться несколько суток. *Третий* процесс связан с возникновением краевых волн, возбуждаемых подходящими из открытого океана волнами цунами, и их распространением вдоль берега.

В случае «Центральноамериканских» очагов, которые в основном «светят» только на юго-восточную часть Тихого океана, максимальные колебания практически во всех пунктах Дальневосточного региона РФ обеспечиваются только такой раскачкой и наступают много позже ЕТА (на 24 – 48 часов). При этом моменты наступления максимальных приливных и отливных колебаний не совпадают по времени и могут отстоять друг от друга на десятки часов. Очаги в районе Алеут и Новой Гвинеи (**Рис. 6, Рис. 9**) представляют некоторую промежуточную ситуацию. При таком положении и ориентации очагов часть защищаемого побережья оказывается в зоне влияния боковых лепестков диаграммы свечения источников, соответственно, в таких пунктах максимальный размах колебаний наступает вскоре после ЕТА, в остальных же обеспечивается последующей раскачкой бассейнов окраинных морей.

В случае южноамериканского очага 90-45a (**Рис. 7**), расположенного вблизи южного побережья Чили, который «светит» на Японию, Курильские острова и Камчатку, максимальные волны приходят именно туда, и момент их наступления примерно соответствует расчетным временам ЕТА плюс 2 – 3 часа. При этом максимальные колебания на побережье Сахалина и Корякии наступают почти на сутки позже прибытия туда головной волны, что говорит о том, что в дело вовлекаются резонансные процессы окраинных морей (Охотского и Берингова).

Указанные обстоятельства сильно осложняют регламентацию рационального выбора времен объявления и, в особенности, отмены тревоги цунами по удаленным событиям, а также влияют на выбор пороговых магнитуд. Здесь можно надеяться на то, что дальнейший анализ результатов (по завершению всей планируемой на ближайшие 3 – 5 лет серии расчетов) покажет, что максимально возможные в Дальневосточном регионе РФ высоты волн от большинства удаленных очагов наступают все же в районе ожидаемого прихода энергетического максимума. Если это окажется не так, то для удаленных очагов реальный прогноз следует строить не на пороговых магнитудах, а на предвычислениях ожидаемых высот цунами на основе поступающих данных от тихоокеанской мареографной сети (в первую очередь, от островных станций типа Wake, Midway, Johnston и др), а также глубоководных регистраторов системы DART.

При землетрясении в ближней (по отношению к защищаемому побережью России) зоне принципиальная схема протекающих в океане процессов остается той же, но диапазон возможных времен наступления максимальных колебаний существенно сокращается (до 1 – 10 часов). Хотя в случаях землетрясения внутри окраинного моря (например, Японского) его раскачка может продолжаться сутки и более. Такие случаи имели место в прошлом – например, при землетрясении 21.06.1983 с  $M_w = 7.1$  вблизи западного берега о.Хоккайдо, когда максимальные колебания уровня в районе г.Владивостока наблюдались спустя сутки после главного толчка.

Интерпретация и содержательный анализ полученных результатов показали таким образом, что наиболее характерной особенностью трансокеанского распространения цунами от очагов удаленных землетрясений является существование четко выраженной диаграммы излучения энергии с четко выраженным максимумом, направленным, как правило, перпендикулярно плоскости разрыва в очагах. Этот максимум формируется непосредственно в очаговой зоне и является результатом совокупного действия двух основных факторов:

1. начальной асимметрии излучения энергии очагом землетрясения, имеющего

двухлепестковую диаграмму направленности с максимумами в направлениях, перпендикулярных плоскости разрыва;

2. вытянутостью очага цунами (соотношение длинной и короткой осей для очагов с магнитудой 9.0 составляет примерно 5:1).

Как видно из представленных диаграмм направленности (**Рис. 6 – Рис. 9**), действие этих очаговых механизмов сохраняется на расстояние 4-5 тысяч километров. На больших расстояниях основным фактором становится рефракция на неоднородностях подводного рельефа, которая в некоторых случаях (наличие протяженных волноводов над подводными хребтами) может преодолеть эффект цилиндрического расхождения и обеспечить увеличение амплитуд волн на отдельных участках побережья. На сверх протяженных трассах (например, от Южной Америки до Японии) имеет место также эффект фокусировки волновой энергии вблизи антиподальной точки при распространении на сфере.

Рассчитанные диаграммы направленности, в общем, подтверждают хорошо известный факт, что наиболее опасными для нашего побережья являются южноамериканские очаги, расположенные южнее 30-й параллели, поскольку для них диаграмма излучения направлена непосредственно на Курило-Камчатский регион плюс к этому, по-видимому, для этих очагов работает и эффект фокусировки на сфере. Дополнительным фактором усиления является также наличие обрывистого побережья и крутого континентального склона у берегов Южной Америки, который служит весьма эффективным отражателем энергии цунами, сравнительно со всеми другими цунамигенными зонами Тихого океана. Несколько неожиданным было обнаружение значительно эффекта влияния очагов в районе Новой Гвинеи, некоторые из которых также «светят» на Курило-Камчатскую зону.

За исключением этих двух отмеченных зон (южно-чилийской и новогвинейской) все остальные районы Тихоокеанского сейсмического пояса не представляют значительной угрозы для Дальневосточного побережья России, поскольку основная энергия цунами рассеивается на акватории Тихого океана. Исключение составляют, только очаги в западной части Алеутской гряды и северной Японии, однако, они являются по сути «пограничными» по отношению к близким региональным очагам, расположенных непосредственно в Курило-Камчатской зоне.

Среди рассмотренных в расчетах модельных очагов наименьшей степенью опасности характеризуется центрально-американские, направляющие свой основной энергетический поток к юго-западу в направлении Антарктиды. Относительно слабо у берегов России проявляются волны цунами, вызванные очагами северо-американской, новозеландской, филиппинской групп и группы вблизи о-ва Гуам.

По результатам выполненных исследований можно сформулировать следующие выводы.

1. Анализ условий возбуждения и распространения цунами от удаленных цунамигенных зон Тихого океана показывает, что их влияние на Дальневосточное побережье РФ крайне неравномерно и определяется как взаимным расположением и ориентацией зоны, так и элементами подводного рельефа дна на трассе распространения. Помимо этого, высоты волн сильно зависят от типа защищаемого побережья (открытое океаническое побережье, западное побережье островной дуги, побережье внутренних морей).

2. Совместный анализ исторических данных и результатов моделирования показывает, что наиболее опасной из удаленных зон является южноамериканская зона. Благодаря специфике взаимного расположения

области источника и области воздействия (удаленность почти точно на  $180^\circ$ , в силу чего происходит заметная конвергенция фронта цунами при распространении на сфере), и малому затуханию с расстоянием (в пределе по закону  $1/\sqrt{r}$ , минимально возможному с точки зрения закона сохранения энергии), сильнейшие южноамериканские цунами оказывают разрушительное воздействие на побережье Японии, Курильских остров и Камчатки. Дополнительным фактором усиления является также наличие обрывистого побережья и крутого континентального склона у берегов Южной Америки, который служит весьма эффективным отражателем энергии цунами, сравнительно со всеми другими цунамигенными зонами Тихого океана.

3. Вторым опасным цунамигенным регионом является район Тонга – Новой Гвинеи. Ориентация некоторых подводных землетрясений в этом районе такова, что Курило-Камчатское побережье оказывается в створе максимума излучения энергии очагом, которое затем может усиливаться фокусирующим действием элементов подводного рельефа. Отсутствие исторических данных по сильнейшим (класса M9) землетрясениям в этой зоне не означает невозможность их возникновения. С особой очевидностью этот факт проявился во время землетрясения и цунами 11 марта 2011 года вблизи побережья Тохоку (Япония), имевшего наиболее длинный по времени (более 1100 лет) каталог исторических наблюдений, в котором не было событий подобного класса.

4. На участках Дальневосточного побережья России, обращенных в сторону открытого океана, приход максимальных амплитуд цунами, как правило, совпадает с расчетными временами ETA, т.е. с временем прибытия основного волнового пакета непосредственно из очаговой области. Однако для гораздо более протяженного побережья окраинных и внутренних морей (Японского, Охотского, Берингова) максимальные колебания уровня могут начинаться спустя десятки часов после ожидаемого времени прибытия головной волны. Это обстоятельство осложняет регламентацию процедуры объявления и отмены тревог цунами при удаленных событиях.

5. Анализ результатов численного моделирования распространения цунами от очагов в удаленных цунамигенных зонах Тихого океана показывает, что принятое сейчас пороговое значение магнитуды ( $M = 8.0$ ) для объявления тревоги цунами является заниженным. Реально опасными, требующими заблаговременного приведения в готовность всех береговых служб, являются только землетрясения, начиная с магнитуды  $M = 9.0$ , происходящими в определенных цунамигенных зонах. При этом особого внимания требуют очаги в «пограничных» районах (западная часть Алеутской дуги, северная часть Японии).

6. Риск пропуска сильного цунами от удаленного источника в настоящее время сведен к минимуму благодаря развитым средствам коммуникации и международного обмена данными, осуществляемого в рамках Международной координационной группы МОК/ЮНЕСКО по системе предупреждения о цунами на Тихом океане. Однако это не устраняет проблему ложных тревог при удаленных событиях, а также проблему своевременной отмены статуса тревоги для населения прибрежных территории. Наличие и быстрая доступность данных глубоководных регистраторов цунами системы DART также не снимает этой проблемы, т.к. не существует прямой зависимости между амплитудами цунами на глубокой воде и максимальными заплесками в конкретных точках побережья. Здесь необходимо проведение специальной серии расчетов по определению наиболее информативных датчиков и установлению такой зависимости на конкретных трассах источник – защищаемое побережье.

## **Направление, связанное с анализом сеймотектонических особенностей и численным моделированием катастрофического землетрясения и вызванного им цунами 11 марта 2011 года в Тохоку (Японии).**

11 марта 2011 года вблизи восточного побережья о-ва Хонсю произошло одно из сильнейших землетрясений за всю историю инструментальных наблюдений в сейсмологии. Хотя оно случилось в одном из наиболее сейсмоактивных районов Японии, его очаг оказался далеко за пределами наиболее опасных зон ожидаемых землетрясений, обозначенных на официальной карте сейсмической опасности Японии. Несмотря на своевременно выпущенное предупреждение, жертвами разрушительного цунами с высотами до 40 метров стали около 24,000 человек. За 22 часа цунами пересекло Тихий океан и достигло Южной Америки с высотой до 4.5 м. На ближайшем к очагу побережье Санрику более 125 тысяч зданий было полностью разрушено или серьезно повреждено. Четыре с половиной миллиона жилищ остались без электричества и свыше полутора миллионов без водоснабжения. Материальный ущерб от землетрясения и цунами оценивается величиной порядка 300 млрд. долларов, что намного превышает прежний рекорд в 105 млрд. долларов от урагана Катрина. Землетрясение вызвало аварийное отключение 11 из 55 существующих в стране ядерных реакторов и привело к тяжелой аварии на трех реакторах атомной станции Фукусима 1, последствия которой не вполне ясны до сих пор. В ходе выполненных исследований исполнителями проекта проведен анализ основных сеймотектонических особенностей региона, механизма очага землетрясения и возникновения цунами, рассмотрены действия японской, российской и международной служб предупреждения о цунами, а также возможное влияние этого события на дальнейшее развитие служб предупреждения о цунами и методы создания карт сейсмо- и цунамиопасности.

Для проведения вычислительных экспериментов по моделированию трансформации волн цунами была выбрана акватория, прилегающая к о-ву Хонсю и ограниченная с запада  $139^{\circ}$  В.Д., с востока  $158^{\circ}$  В.Д., с юга  $29^{\circ}$  С.Ш. и с севера  $46^{\circ}$  С.Ш. (Рис. 10,а). Соответствующий массив цифровой батиметрической информации был получен с применением процедуры интерполяции одномоментной батиметрии «GEBCO-2009» на регулярную сетку с шагом 30 географических секунд.

Основной задачей, решавшейся с помощью вычислительных экспериментов, стал сравнительный анализ различных модельных очагов землетрясения, вызвавшего волну. При этом качество модели оценивалось путем сопоставления с распределением реальных измеренных высот волн цунами вдоль побережья (Рис. 10,с). Здесь на колоколообразном распределении отчетливо выделяется зона максимальных высот на широте около  $39.5^{\circ}$  С.Ш. Эта зона соответствует относительно гладкому, без существенных особенностей участку побережья, выгибающемуся в сторону океана. Ее протяженность составляет около двух градусов в широтном направлении, а высоты волн в ней изменяются от 40 до 20 метров. К югу происходит резкое падение высот волн почти до нуля, связанное, по-видимому, с защитным эффектом мыса, прикрывающего находящийся за ним залив. Далее высоты волн опять резко возрастают до 20 метров, после чего распределения плавно спадает к югу, причем на фоне этого плавного тренда отмечаются локальные экстремумы (15 и 10 метров), связь которых с какими-либо особенностями береговой линии практически не прослеживается.

Наилучшее соответствие реальному распределению было достигнуто с использованием модельного очага землетрясения, представляющего собой

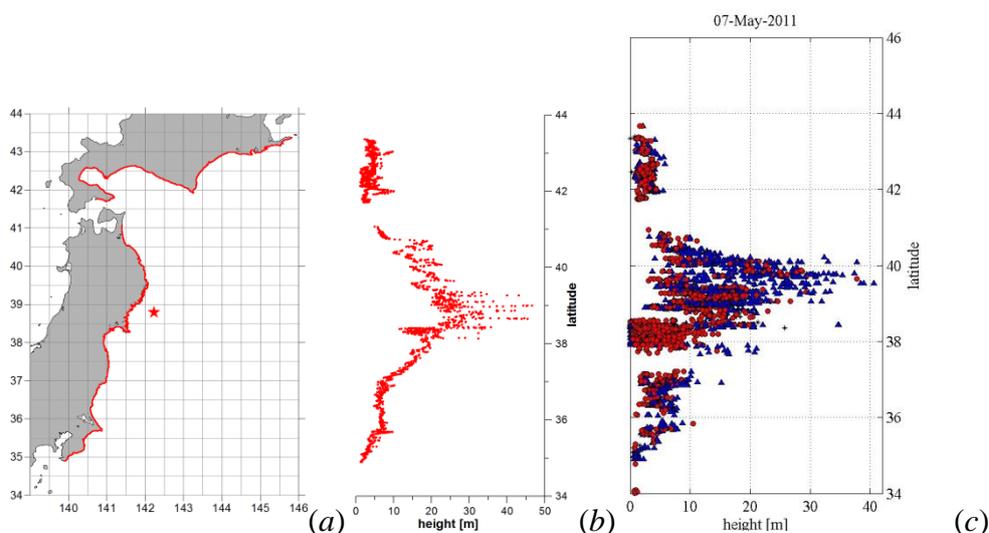
площадку разрыва длиной  $L=300$  км и шириной  $W=150$  км с величиной подвижки по ней  $D_0=30.0$  м, эпицентром, размещенным в точке с координатами  $38.8^\circ$  С.Ш.,  $142.2^\circ$  В.Д. (Рис. 10 **Ошибка! Источник ссылки не найден.,a**), углом падения плоскости разрыва (отсчитывается от горизонтальной плоскости)  $\delta=10^\circ$ , упругим параметром Ляме  $\lambda=88$  н/м<sup>2</sup>, углом простираия (азимут) плоскости разрыва (отсчитывается по часовой стрелке от направления на север)  $\theta=20^\circ$ , глубиной верхнего края разрыва  $H_{top}=25$  км.

Рассчитанное в ходе соответствующего вычислительного эксперимента распределение максимальных высот волн (Рис. 10,*b*) в целом удовлетворительно воспроизводит качественные характеристики проявления цунами вдоль побережья, однако зона экстремальных высот оказывается смещенной к югу. Такое смещение оказывается устойчивым относительно возможного (в пределах зоны афтершоков) перемещения эпицентра землетрясения. К настоящему времени модели очага подводного цунамигенного землетрясения, устраняющей указанное несоответствие, не предложено.

Результаты расчетов сравнивались также с данными регистрации уровня, полученными на двух гидрофизических прибрежных датчиках PTWS и на четырех, ближайших к о-ву Хонсю донных регистраторах уровня системы DART (

Таблица 1), положение которых указано на рисунке (Рис. 12). Анализ этих результатов (Рис. 11) указывает на способность созданных математических моделей хорошо воспроизводить качественные и количественные характеристики проявления волн цунами не только в прибрежных точках, но и (несколько хуже) на глубокой воде.

Как показывает гистограмма максимальных и минимальных высот волн в мареографах, установленных у побережья Японии и России (Рис. 13), наиболее опасным японское цунами 11.03.2011 г. оказалось в северной части восточного побережья о-ва Хонсю. Проявление этих волн вдоль восточного побережья Курильских островов не столь опасно. В целом, характер динамики рассчитанных экстремальных значений высот волн вдоль побережья соответствует результатам, полученным с помощью инструментальных измерений.

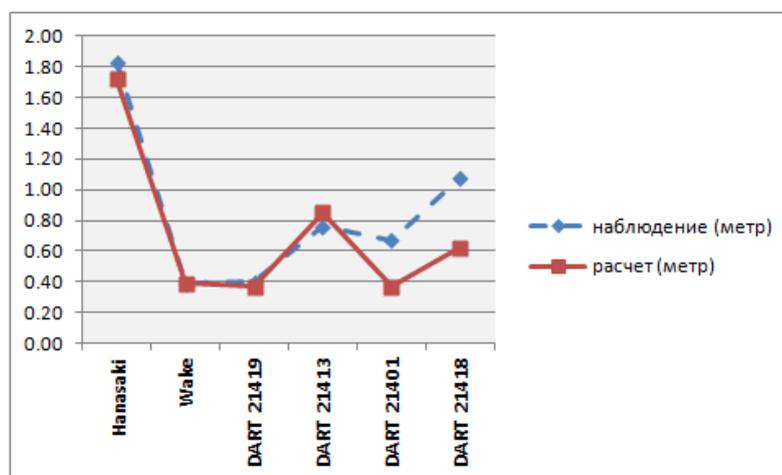


**Рис. 10.** Схема расчетной области с указанием (звездочка) эпицентра модельного землетрясения (*a*), распределение расчетных (*b*) и наблюдаемых (*c*) высот цунами вдоль побережья Хонсю (справа) для модельного очага с магнитудой  $M_w=9.0$  ( $L=300$  км,  $W=150$  км,  $D_0=30.0$

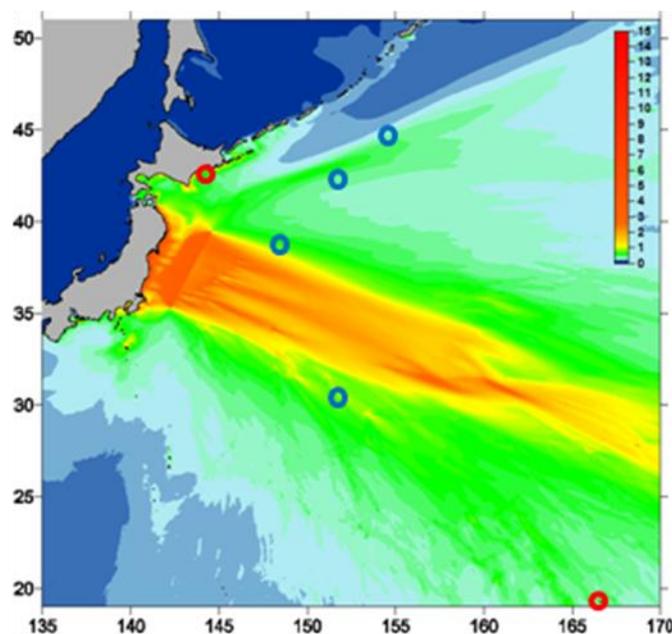
м)

**Таблица 1. Сопоставление расчетных и наблюдаемых высот волн цунами по материалам двух гидрофизических прибрежных датчиков PTWS и четырех регистраторов системы DART**

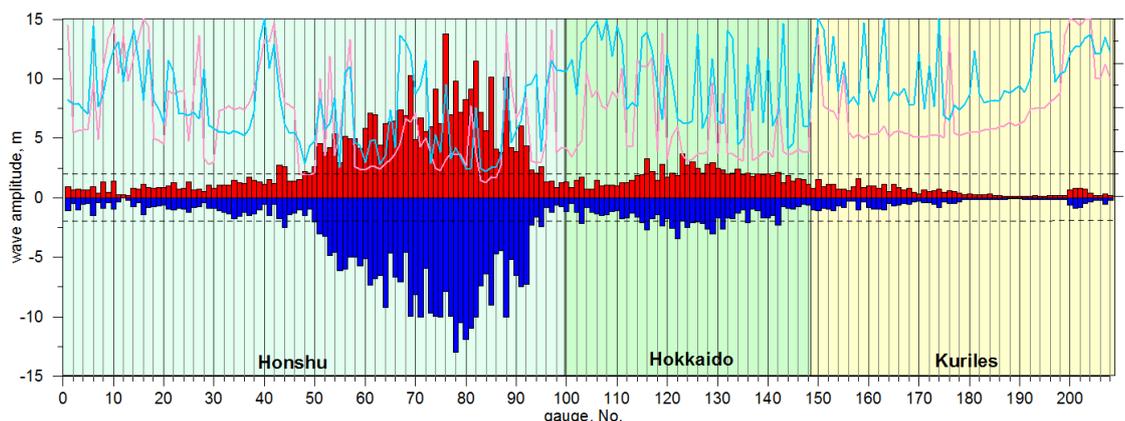
	Широта	Долгота	Наблюдение (м)	Расчет (м)
Hanasaki	43.3N	145.6E	1.83	1.72
Wake	19.3N	166.6E	0.39	0.39
DART 21419	44.5N	155.7E	0.40	0.37
DART 21413	30.5N	152.1E	0.76	0.85
DART 21401	42.6N	152.6E	0.67	0.37
DART 21418	38.7N	148.7E	1.08	0.62



**Рис. 11. Сравнение рассчитанных и наблюдаемых высот волн цунами в точках размещения прибрежных гидрофизических датчиков и регистраторов уровня системы DART**



**Рис. 12. Распределение энергии цунами по результатам моделирования, отмечены точки установки ближайших к о-ву Хонсю донных регистраторов уровня системы DART**



**Рис. 13. Гистограмма рассчитанных максимальных и минимальных высот волн в мареографах, установленных у побережья Японии и России**

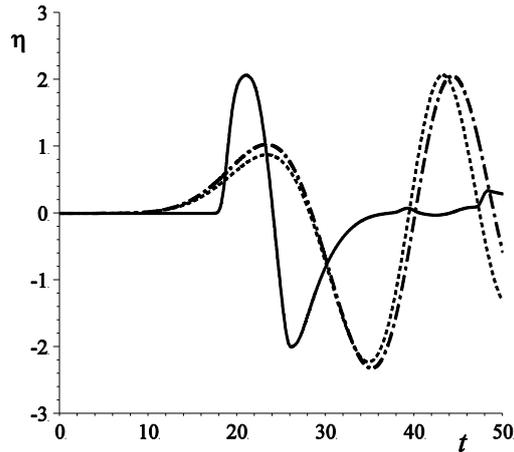
**Результаты, связанные с разработкой и программной реализацией численного алгоритма на основе созданной в 2010 г. полной нелинейно-дисперсионной модели (направление 2).**

Полные НЛД-уравнения на вращающейся притягивающей сфере были получены в 2010 г. с использованием подхода, основанного на предварительном масштабировании полных уравнений Эйлера на сфере и введении малых параметров, позволяющих оценить вклад нелинейности, дисперсии, подвижности дна и эффектов, связанных со сферичностью Земли и ее вращением. В 2011 г. из этих полных НЛД-уравнений получен класс новых приближенных НЛД-моделей на сфере, полезных с практической точки зрения: сферические аналоги плановых моделей Буссинеска, Перегринна, Дорфмана-Яговдика.

Для моделирования распространения длинных волн на сфере с учетом эффектов частотной дисперсии в рамках приближенной НЛД-модели Буссинеска создана разностная схема первого порядка аппроксимации на равномерных сетках. Выполнены первые расчеты распространения поверхностных волн в экваториальной области, ограниченной с севера и юга непроницаемыми границами, проходящими по заданным широтам.

**Результаты, связанные с оценкой вклада дисперсионных эффектов в процесс формирования волновых режимов оползневым механизмом (направление 3).**

Созданные исполнителями проекта оригинальная полная нелинейно-дисперсионная модель волновой гидродинамики и аппроксимирующий ее конечно-разностный алгоритм были успешно применены для сравнительного исследования высот волн, генерируемых оползнем в большом замкнутом водоеме. Мареограммы, рассчитанные на берегу акватории, демонстрируют результаты расчетов как на основе модели потенциальных течений жидкости, в которой учитываются вертикальные перемещения воды, так и на основе полной НЛД-модели, учитывающей дисперсионные эффекты и бездисперсионной модели мелкой воды. Видно, что первые две модели дают не только качественно близкие результаты, но и близкие количественно. Таким образом, расчет на основе НЛД-модели, существенно более экономичной, чем модель потенциальных течений, из-за уменьшения размерности задачи, может давать вполне адекватные результаты. Отметим попутно, что хотя бездисперсионная модель мелкой воды не может хорошо передавать детали течения, тем не менее, величины максимальных заплесков на берега водоема описываются ею вполне удовлетворительно.



**Рис. 14. Мареограммы на берегу водоема при использовании модели мелкой воды (сплошная линия), модели потенциальных течений (штриховая линия) и НЛД-модели (штрих-пунктирная линия)**

3.7.

*Степень новизны полученных результатов*

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

\* Исследование процессов, связанных с катастрофическим японским цунами 11.03.2011 г.: выполнено численное моделирование явления, проведен анализ основных сеймотектонических особенностей региона, механизма очага землетрясения и возникновения цунами, рассмотрены действия японской, российской и международной служб предупреждения о цунами, а также возможное влияние этого события на дальнейшее развитие служб предупреждения о цунами и методы создания карт сейсмо- и цунамиопасности, выполнен сравнительный анализ различных модельных очагов землетрясения, вызвавшего волну. Первые результаты, полученные спустя несколько часов после генерации волны цунами, были незамедлительно представлены научному сообществу посредством их публикации в ИТЭС Tsunami Bulletin Board.

\* Создание системы модельных очагов удаленных относительно Дальневосточного побережья России цунамигенных землетрясений, постановка задач для серийных вычислительных экспериментов, проведение расчетов и интерпретация полученных результатов.

\* Определение наиболее опасных цунамигенных зон Тихого океана и общих характеристик проявления удаленных цунами у Дальневосточного побережья России.

\* Определение направления дальнейших исследований и постановок задач, решение которых необходимо для усовершенствования национальной системы предупреждения о цунами и регламента ее работы.

\* Вывод класса новых приближенных нелинейно-дисперсионных (НЛД) моделей на сфере, являющихся аналогами плановых моделей Буссинеска, Перегринна, Дорфмана-Яговдика и др.; построение соответствующих конечно-разностных алгоритмов первого порядка аппроксимации на равномерных сетках.

\* Численное моделирование волновых режимов, возникающих в больших замкнутых акваториях при сходе оползня с крутого берегового склона,

выполненное в рамках новой полной НЛД модели с помощью оригинальных вычислительных конечно-разностных алгоритмов.

### 3.8. *Сопоставление полученных результатов с мировым уровнем*

Все результаты соответствуют мировому уровню исследований в данной области. Основные результаты работ по проекту представлялись на крупных международных и национальных научных форумах:

\* Всероссийская конференция «Нелинейные волны: теория и новые приложения», посвященная памяти чл.-корр. РАН В.М.Тешукова и приуроченная к 65-летию со дня его рождения, 2–4 марта 2011 г., Новосибирск: ИГиЛ СО РАН,

\* Международная конференция «Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика», посвященная 90-летию со дня рождения академика Н.Н. Яненко., Новосибирск, Россия, 30 мая – 4 июня 2011 г.,

\* IUGG Earth on the Edge: science for a sustainable planet, 28 June – 7 July 2011, Melbourne Convention and Exhibition Centre, XXV IUGG General Assembly, Melbourne, Australia

\* Международная конференция «Математические и информационные технологии, MIT-2011» (IX конференция «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании»), Врнячка Баня, Сербия, 27–31 августа 2011 г., Будва, Черногория, 31 августа – 5 сентября 2011 г.,

\* Международная конференция «Информационные технологии и математическое моделирование в науке, технике и образовании», г. Бишкек, Кыргызстан, 5 – 9 октября 2011 г.,

\* III научно-техническая конференция «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России», г. Петропавловск-Камчатский, 9-15 октября 2011 г.

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

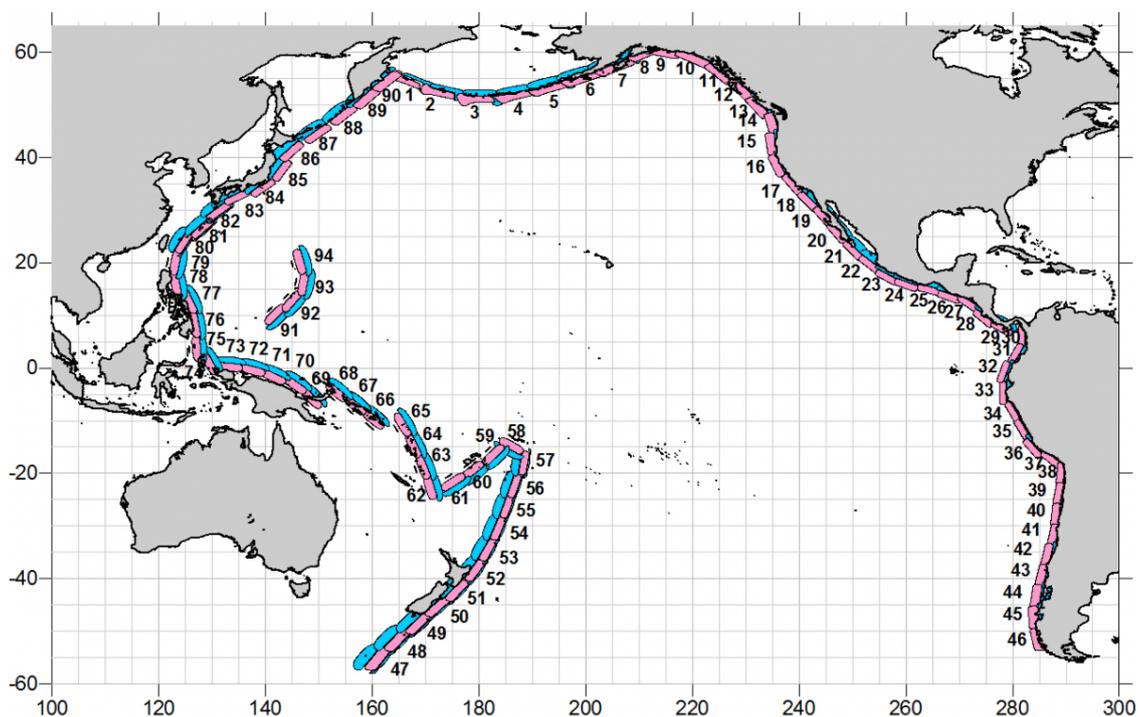
Одной из целей работы по проекту была оценка опасности Дальневосточного побережья РФ от удаленных цунами. Исходным материалом для такой оценки стали рассчитанные в ходе вычислительных экспериментов высоты порожденных удаленными источниками волн цунами у Дальневосточного побережья России. Для выполнения этой работы использовался тот же подход, что и при оценке цунамиопасности подводных землетрясений из ближней зоны – в качестве начальных данных использовались смещения свободной поверхности, порожденные набором модельных источников с наиболее вероятными (или, при недостатке данных, наиболее опасными с точки зрения их цунамигенности) параметрами очага. При этом вертикальные смещения дна океана рассчитывались по алгоритму, описанному в работе (Гусяков, 1978), и затем использовались в качестве начальных данных в программе расчета распространения цунами в океане с реальным рельефом дна.

Рассматриваемые источники цунами аппроксимировались системой модельных очагов подводных землетрясений с магнитудой  $M_w = 9.0$ . Такой очаг представляет собой площадку разрыва длиной  $L = 430$  км и шириной  $W = 150$  км с величиной подвижки по ней  $D_0 = 11.6$  м. Его сейсмический момент равен  $M_0 = 3.6 \cdot 10^{22}$  н·м, что по корреляционному соотношению (Kanamori, 1977)  $M_w = (\lg M_0 - 16.1)/1.5$  соответствует магнитуде  $M_w = 9.0$ .

Параметры источников выбирались из соображений соответствия сеймотектоническим особенностям конкретного сейсмогенного региона, вытекающим из концепции поддвига океанических плит под континентальные в районах активных континентальных окраин. При этом азимут простирания очага в большинстве случаев определялся контуром береговой (островной) линии, а

угол падения площадки разрыва (угол DE) выбирался совпадающим с главной литосферной границей раздела между надвигающейся континентальной и поддвигающейся океанической корой, меняясь в диапазоне от  $10^\circ$  до  $45^\circ$ . Направление подвижки по плоскости разрыва (угол LA) во всех случаях, кроме очагов западной оконечности Алеуто-Аляскинской группы, имелся равным  $90^\circ$ , что соответствует наиболее цунамиопасному варианту механизма очага.

Как уже было указано выше, создаваемые такими источниками остаточные смещения дна, рассчитанные по алгоритму, изложенному в работе (Гусяков, 1978), использовались в качестве начальных условий в задаче расчета распространения цунами на реальном рельефе дна Тихого океана. Контуры положительных и отрицательных фрагментов начальных смещений от модельных очагов приведены на рисунке (Рис. 15).



**Рис. 15. Схема размещения потенциально опасных очагов цунамигенных землетрясений с магнитудой  $M_W = 9.0$ . Для удобства вычислений восточная граница расчетной области здесь указывается в  $300^\circ$**

Все вычислительные эксперименты проводились с использованием созданного исполнителями программного инструментария, реализующего вычислительные схемы типа МакКормака, аппроксимирующие классические уравнения теории мелкой воды. Обыкновенные дифференциальные уравнения, соответствующие законам движения квазинедеформируемого оползня, решались с помощью численных алгоритмов на основе метода Эйлера.

Для аппроксимации нелинейно-дисперсионной модели мелкой воды использовалась созданная исполнителями оригинальная конечно-разностная схема, основанная на выделении эллиптической части оператора и последующем применении методики «предиктор-корректор».

3.10.1.1 *Количество научных работ, опубликованных в ходе выполнения проекта*

27

3.10.1.2 *Из них включенных в перечень ВАК*

- 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*)  
3
- 3.10.2. *Количество научных работ, подготовленных в ходе выполнения проекта и принятых к печати в 2011 г.*  
1
- 3.11. *Участие в научных мероприятиях по тематике проекта, которые проводились при финансовой поддержке Фонда*  
3
- 3.12. *Участие в экспедициях по тематике проекта, проводимых при финансовой поддержке Фонда*
- 3.13. *Финансовые средства, полученные от РФФИ*  
320000 руб.
- 3.14. *Вычислительная техника и научное оборудование, приобретенные на средства Фонда*
- 3.15. *Адреса (полностью) ресурсов в Internet, подготовленных авторами по данному проекту*  
<http://tsunami.esemc.nsc.ru>
- 3.16. *Библиографический список всех публикаций по проекту*

#### 2011 г.

1. Beisel S., Chubarov L. Математическое моделирование оползневых волн цунами в реальных акваториях // «Mathematical and Informational Technologies» (MIT-2011), August, 27-31, 2011, Vrnjacka Banja, Serbia; August, 31 - September, 5, 2011, Budva, Montenegro, Conference Information: State Company of Textbooks, Serbia, 2011, P. 63-64.
2. Beisel S.A., Chubarov L.B., Khakimzyanov G.S., Shokin Yu.I. Some features of the landslide mechanism of surface waves generation in real basins // Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, Berlin, 2011, Vol. 115, P. 137–148.
3. Beisel S.A., Chubarov L.B., Khakimzyanov G.S. Simulation of surface waves generated by an underwater landslide moving over an uneven slope // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. VNU Science Press BV, 2011, Vol. 26, No 1, P. 17–38.
4. Chubarov L.B., Khakimzyanov G.S., Shokina N.Yu. Numerical modelling of surface water waves arising due to movement of underwater landslide on irregular bottom slope // Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, Berlin, 2011. Vol. 115. P. 75–91.
5. Gusiakov V.K. Relationship of tsunami intensity to source earthquake magnitude as retrieved from historical data // Pure and Applied Geophysics, 2011, T. 168, C. 2033–2041.
6. Shokin Y., Chubarov L. Вычислительные и информационные системы поддержки принятия решений в ходе кризисных ситуаций, связанных с катастрофическими волновыми процессами в акваториях // «Mathematical and Informational Technologies» (MIT-2011), August, 27-31, 2011, Vrnjacka Banja, Serbia; August, 31 - September, 5, 2011, Budva, Montenegro, Conference Information: State Company of Textbooks, Serbia, 2011, P. 125.
7. Бейзель С.А., Гусяков В.К., Чубаров Л.Б. Оценка воздействия удаленных

цунами на Дальневосточное побережье России // III научно-техническая конференция «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России», г. Петропавловск-Камчатский, 9–15 октября 2011 г., Сборник докладов (электронная публикация), [http://emsd.ru/files/konf111009/pdf/sb/Sekciya\\_Cunami/Gusyakow\\_CHubarow\\_Beyzel.pdf](http://emsd.ru/files/konf111009/pdf/sb/Sekciya_Cunami/Gusyakow_CHubarow_Beyzel.pdf).

8. Бейзель С.А., Хакимзянов Г.С., Худякова В.К., Чубаров Л.Б., Шокина Н.Ю. Численное моделирование поверхностных волн, генерируемых подводными оползнями в водохранилищах // Известия Кыргызского Государственного Технического Университета им. И. Раззакова. 2011. № 24. С. 146–150.

9. Бейзель С.А., Худякова В.К. Моделирование оползневых цунами в рамках двухслойной модели мелкой воды // Международная конференция «Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика», посвященная 90-летию со дня рождения академика Н.Н. Яненко. Тезисы докладов. Новосибирск, 2011. С. 83.

10. Гусяков В.К. Магнитудно-географический критерий прогнозирования цунами: анализ практики применения за 1958 – 2009гг. // Сейсмические приборы, 2010, № 3 С. 5–21.

11. Омельченко О.К., Гусяков В.К., Чебров В.Н. Предварительная оценка точности определения координат землетрясений в системе сейсмологических наблюдений для службы предупреждения о цунами (СПЦ) // Сборник трудов XI Всероссийской конференции с участием иностранных ученых «Проблемы мониторинга окружающей среды». Кемерово, КемГУ, 2011, С. 48-50.

12. Чубаров Л.Б., Бейзель С.А., Худякова В.К. Сравнительный анализ некоторых подходов к моделированию оползневого механизма генерации волн цунами // Тезисы докладов Всероссийской конференции «Нелинейные волны: теория и новые приложения», посвященной памяти чл.-корр. РАН В.М. Тешукова и приуроченной к 65-летию со дня его рождения, 2-4 марта 2011 г., Новосибирск: ИГиЛ СО РАН, 2011. С. 69-70.

13. Шокин Ю.И., Чубаров Л.Б. Школа академика Н.Н.Яненко: достижения в области численного решения задач волновой гидродинамики // Международная конференция «Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика», посвященная 90-летию со дня рождения академика Н.Н. Яненко. Тезисы докладов. Новосибирск, 2011. С. 27.

14. Noggerath J., Geller R.J., Gusiakov V.K. Fukushima: The myth of safety, reality of geoscience // Bulletin of the Atomic Scientists, 2011 (в печати).

#### **2010 г.**

15. Fedotova Z.I., Khakimzyanov G.S. Nonlinear-dispersive shallow water equations on a rotating sphere // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2010. Vol. 25, No. 1. P. 15 – 26.

16. Gusiakov V.K., Lyapidevskaya Z.A. Expert database on the Earth impact structures // Protecting the Earth against collisions with asteroids and comet nuclei, Editors: A. Finkelstein, W. Huebner, V. Shor. Proceedings of the international conference "Asteroid-Comet Hazard-2009", Saint Petersburg, "Nauka", 2010, P. 228 – 232.

17. Gusiakov, V., Abbott, D., Bryant, E., Masse, W., Breger D. Mega Tsunami of the World Oceans: Chevron Dune Formation, Micro-Ejecta, and Rapid Climate Change as the Evidence of Recent Oceanic Bolide Impacts // Geophysical Hazards: Minimizing Risk, Maximizing Awareness, Tom Beer, Editor, Springer Science - Business Media V.B., 2010. P.197 – 229.

18. Андреев А.К., Бейзель С.А., Гусяков В.К., Зыскин И.А., Камаев Д.А.,

Кузьминых И.П., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И. Алгоритмическое и программное обеспечение российской автоматизированной информационно-управляющей системы предупреждения о цунами // Тезисы II Международной конференции «Геоинформатика: технологии, научные проекты», 20.09.2010 – 25.09.2010, Барнаул. Барнаул: Изд-во АРТ, 2010. 124 с. С. 18 – 19.

19. Бейзель С.А., Гусяков В.К., Чубаров Л.Б. Численное исследование проявлений удаленных цунами у дальневосточного побережья России // Труды X Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» ГА-2010, 25.05.2010 – 27.05.2010. СПб.: Наука, 2010. 478 с. С. 250 – 253.

20. Бейзель С.А., Хакимзянов Г.С., Чубаров Л.Б. Моделирование поверхностных волн, порождаемых подводным оползнем, движущимся по пространственно неоднородному склону // Вычислительные технологии. 2010. Т.15, № 3. С. 39 – 51.

21. Бейзель С.А., Хакимзянов Г.С., Чубаров Л.Б. Пространственные эффекты оползневого волнообразования в прибрежной зоне // Труды X Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» ГА-2010, 25.05.2010 – 27.05.2010. СПб.: Наука, 2010. 478 с. С. 247 – 250.

22. Федотова З.И., Хакимзянов Г.С. Нелинейно-дисперсионные уравнения мелкой воды на вращающейся сфере // Вычислительные технологии. 2010. Т. 15, № 3. С. 135 – 145.

#### 2009 г.

23. Andreev A.K., Borodin R.V., Kamaev D.A., Chubarov L.B., Gusiakov V.K. Automated management-information the tsunami warning system // Programm and Abstracts. 24th International Tsunami Symposium. July, 14-16, 2009. Novosibirsk, Russia. Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, P.73.

24. Babajlov V.V., Beisel S.A., Chubarov L.B., Eletsky S.V., Fedotova Z.I., Gusiakov V.K., Shokin Yu.I. Some aspects of the detailed numerical modeling of tsunami along the Far East coast of the Russian Federation // Programm and Abstracts. 24th International Tsunami Symposium. July, 14-16, 2009. Novosibirsk, Russia. Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, P.52.

25. Beisel S., Chubarov L., Khudyakova V., Shokin Yu. Some features of the landslide mechanism of the surface waves generation in real basins // Programm and Abstracts. 24th International Tsunami Symposium. July, 14-16, 2009. Novosibirsk, Russia. Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, P.51.

26. Fedotova Z.I., Khakimzyanov G.S. Shallow water equations on a movable bottom // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling, 2009, Vol. 24, No. 1, P. 31–42.

27. Федотова З.И., Чубаров Л.Б., Хакимзянов Г.С. Нелинейно-дисперсионные модели волновой гидродинамики в задачах о генерации волн цунами оползнем // В сб.: Фундаментальная и прикладная гидрофизика. Санкт-Петербург, «Наука», 2009, № 2(4), С. 59 – 66.

3.17. *Приоритетное направление развития науки, технологий и техники РФ, в котором, по мнению исполнителей, могут быть использованы результаты данного проекта*  
рациональное природопользование

3.18. *Критическая технология РФ, в которой, по мнению исполнителей, могут быть использованы результаты данного проекта*

Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера

- 3.19. *Основное направление технологической модернизации экономики России, в котором, по мнению исполнителей, могут быть использованы результаты завершенного проекта не очевидно*

*Подпись руководителя проекта*

## **Форма 511. ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЗАВЕРШЕННОГО ПРОЕКТА РФФИ В ПРИКЛАДНОЙ ОБЛАСТИ**

### *11.1. Номер проекта*

09-05-00294

*11.2.1. Приоритетное направление развития науки, технологий и техники РФ, в котором, по мнению исполнителей, могут быть использованы результаты завершенного проекта*  
рациональное природопользование

*11.2.2. Критическая технология РФ, в которой, по мнению исполнителей, могут быть использованы результаты завершенного проекта*  
технологии снижения риска и уменьшения последствий природных и техногенных катастроф

*11.3. Предлагаемое авторами название работы в прикладной области*  
Совершенствование схемы принятия решений об объявлении тревоги цунами на Дальневосточном побережье Российской Федерации на основе анализа сейсмических и гидрофизических данных, а также результатов геодинамического и численного моделирования

*11.4. Ожидаемые результаты работы в прикладной области*  
Актуальность и целесообразность исследования определяется необходимостью обоснования нового регламента Службы предупреждения о цунами, предусматривающего переход к трехуровневому объявлению тревог цунами адресно по каждому защищаемому пункту с учетом показаний гидрофизических датчиков. Эти результаты будут получены с использованием информационно-вычислительных технологий, созданных и прошедших тщательную проверку в ходе выполнения завершенного проекта, а также полученных исполнителями этого проекта содержательных результатов.

Для этого необходимы исследования, направленные на определение магнитудных порогов цунамигенных землетрясений, используемых для формирования нового регламента службы предупреждения в части критериев процедуры объявления тревоги. При этом, согласно созданной технологии, будут исследованы расчетные характеристики волн цунами, порожденных гипотетическими цунамигенными землетрясениями, расположенными в наиболее опасных удаленных цунамигенных зонах Тихого океана (см. настоящий отчет) – у берегов Чили, Папуа – Новой Гвинеи, Южной и Центральной Японии, в акватории Берингова моря. Моделирование будет проводиться на телескопически вложенных сетках с целью получения результатов с достаточной для адекватных рекомендаций точностью. В ходе расчетов будут уточнены положения эпицентров опасных землетрясений, определены максимальные высоты волн в защищаемых пунктах дальневосточного побережья России.

Та же технология будет применена для оценки цунамиопасности побережья Охотского моря (Хабаровская обл., Магаданская обл., Западное побережье Камчатки, все побережье Сахалина) от системы модельных региональных и удаленных очагов цунамигенных землетрясений. С этой целью на этапе постановки задач будет построена и обоснована система модельных очагов; адаптированы к требованиям вычислительных алгоритмов и требуемой точности результатов цифровые

карты, осуществлен выбор и оптимизация расчетных областей, модифицированы расчетные алгоритмы и программные коды.

- 11.5. *Планируемая продолжительность работы* свыше 3 лет
- 11.6. *Предполагаемые авторами пути дальнейшего продвижения проекта* участие в лотах ФЦП Минобрнауки
- 11.7. *Информация, связанная с интеллектуальной собственностью* патентование не требуется
- 11.8. *Реквизиты охранных документов (номер патента, исходящий номер заявки на патент)*  
Созданные комплексы программ зарегистрированы в Реестре программ для ЭВМ Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам (№№ 2011614598, 2011614599).

*Подпись руководителя проекта*