НОМЕР ПРОЕКТА 09-05-00294		УЧЕТНАЯ КАРТОЧКА	
НАЗВАНИЕ ПРОЕКТА Детальное исследование волн цунами у Дальневосточного побережья России с использованием компьютерных моде- лей нового поколения			
ОБЛАСТЬ ЗНАНИЯ 05 - на	чуки о земле	КОД(Ы) КЛАССИФИКАТОРА	
ВИД КОНКУРСА а - Инициати	ивные проекты	05-513 01-201	
ФАМИЛИЯ, ИМЯ, ОТЧЕСТВО Р Чубаров Леонид Борисович	УКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА	ТЕЛЕФОН РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА (383)3331882	
ПОЛНОЕ НАЗВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ, ГДЕ ВЫПОЛНЯЕТСЯ Институт вычислительных технологий СО РАН		Я ПРОЕКТ	
ПОЛНОЕ НАЗВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ, ЧЕРЕЗ КОТОРУЮ ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ ФИНАНСИРОВАНИЕ Институт вычислительных технологий СО РАН		СУЩЕСТВЛЯЕТСЯ логий СО РАН	
ОБЪЕМ СРЕДСТВ, ФАКТИ- ЧЕСКИ ПОЛУЧЕННЫХ ЗА 2010 г. 340000 руб.	ОБЪЕМ ФИНАНСИРОВАНІ Следующий год 700000 руб.	ИЯ, ЗАПРАШИВАЕМЫЙ НА	
ЧИСЛО УЧАСТНИКОВ ПРО- ЕКТА (включая руководителя) 8	ЧИСЛО УЧАСТНИКОВ, ИМЕЮЩИХ УЧЕНУЮ СТЕПЕНЬ 4	ЧИСЛО МОЛОДЫХ (до 35 лет включительно) УЧАСТНИКОВ 5	
Хакимзянов Гаяз Салимович			
Гусяков Вячеслав Константино	вич		
Чубаров Дмитрий Леонидович			
Гусев Олег Игоревич			
Худякова Виктория Константиновна			
Гагарина Елена Витальевна			
Бейзель Софья Александровна			
ПОДПИСЬ РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА		ДАТА ПОДАЧИ ОТЧЕТА 13.12.2010	
ПРОХОЖД	ЕНИЕ ОТЧЕТА (заполняет	ся в РФФИ)	
РЕКОМЕНДАЦИЯ ЭКСПЕРТНОГО СОВЕТА Проект прошел полный цикл экспертизы отчета и к фи- нансированию: - рекомендован - не рекомендован (ненужный вариант зачеркнуть)		ПРЕДСЕДАТЕЛЬ ЭКСПЕРТ- НОГО СОВЕТА	
РЕШЕНИЕ СОВЕТА ФОНДА По результатам рассмотрения на заседании Совета Фонда проект к финансированию: - принят - не принят (ненужный вариант зачеркнуть)		ПРЕДСЕДАТЕЛЬ СОВЕТА ФОНДА	

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

1.5. Год представления отчета

а - Инициативные проекты
 2011

- 1.6. Вид отчета этап 2010 года
- 1.7. Аннотация

1. Определены уточненные характеристики проявления у Дальневосточного побережья РФ волн цунами, порожденных цунамигенными землетрясениями ближней зоны – значения высот волн у побережья и зоны влияния каждого из 107 рассмотренных очагов цунамигенных землетрясений с магнитудами Mw = 7.8, 8.1, 8.4, 9.0. Результат получен с помощью серийных вычислительных экспериментов на расчетных сетках высокого пространственного разрешения (15 географических секунд).

2. Обоснована методика расчетов в «малых» подобластях путем сравнения полученных результатов с результатами расчетов на детальной сетке в «глобальной» расчетной области. Получение результата оказалось возможным за счет проведения расчетов на высокопроизводительном вычислительном кластере Новосибирского государственного университета.

3. Построена система из 90 модельных очагов вероятных очагов удаленных цунамигенных землетрясений с магнитудой Mw = 9.0, охватывающая весь Тихоокеанский сейсмический по-яс.

4. Обоснована адекватность применяемых для моделирования удаленных цунами вычислительных алгоритмов путем сопоставления с материалами натурных наблюдений.

5. Определены постановки задач на исследование характеристик удаленных цунами в части конструирования необходимых батиметрических данных, расстановки виртуальных мареографов и т.п.

6. Определены характерные динамические и кинематические особенности распространения энергии цунами от очагов удаленных цунамигенных землетрясений различных географических зон.

7. Выведена полностью нелинейная модель поверхностных волн, учитывающая эффекты дисперсии, нестационарности дна и сферичности Земли.

 Предложен конечно-разностный алгоритм, основанный на идеях схем типа «предикторкорректор» для полных НЛД-уравнений Железняка-Пелиновского. При этом эффективно использовалось расщепление исходной системы на эллиптическую и гиперболическую части и для каждой из частей расщепленной системы применялись хорошо изученные алгоритмы.
 Предложен закон движения квазинедеформируемого оползня, учитывающий пространственную неоднородность склона, по которому движется оползень, и конечность его простран-

ственных размеров. 10. Определены основные особенности волновых режимов, порождаемых подводными оползнями конечных пространственных размеров, движущихся по пространственно неоднородному склону.

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.

1.8. Полное название организации, где выполняется проект Институт вычислительных технологий СО РАН

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

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 2011
- 2.5. Вид отчета этап 2010 года
- 2.6. Аннотация

1. The refined characteristics of the tsunami waves near the Russian Far East coast generated by near-zone earthquakes with magnitudes of Mw=7.8, 8.1, 8.4, 9.0 have been determined. The result has been obtained using serial computational experiments on grids of high spatial resolution (15 arc seconds).

2. The technique of calculations in the "small" sub-domains by comparing the results with detailed calculations on the grid in the "global" computational domain has been justified using high-performance computing clusters of Novosibirsk State University.

3. The system of 90 model probable distant tsunamigenic earthquakes with magnitude Mw = 9.0, covering the entire Pacific seismic belt, has been constructed.

4. The statement of problem (constructing the necessary bathymetry, placement of virtual gauges, etc) has been defined to study the characteristics of remote tsunamis.

5. The used computing algorithms in simulating distant tsunamis have been verified by comparison of calculated results with the materials of field observations.

6. The characteristic dynamic and kinematic features of propagation of the tsunami energy from sources of distant tsunami earthquakes of different geographical areas have been defined.

7. The fully nonlinear model of surface waves, taking into account the effects of dispersion, bottom nonstationarity and sphericity of the Earth, has been derived.

8. A finite-difference algorithm based on the ideas of schemes such as the "predictor-corrector" has been offered for full-NLD Zheleznyak-Pelinovskii equations.

9. The law of quasinondeforming landslide motion has been derived, taking into account the spatial heterogeneity of the slope on which the landslide is moving, and finiteness of landslide spatial dimensions.

10. The main features of wave regimes generated by underwater landslides of finite spatial dimensions, moving along a spatially non-uniform slope have been defined.

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

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
- 3.4. Объявленные ранее (в исходной заявке) цели проекта на 2010 год

Планом на 2010г. были предусмотрены исследования в четырех направлениях.

1. Детальное исследование характеристик волн цунами у Дальневосточного побережья РФ с использованием уточненной системы вероятных цунамиопасных очагов землетрясений и выделенных на основе предварительных расчетов подобластей, обеспеченных детальной цифровой батиметрической информацией.

2. Постановка задач и предварительное исследование возможного воздействия удаленных цунами на Дальневосточное побережье России: определение необходимой расчетной области, подготовка адекватной батиметрической информации, построение набора модельных источников удаленных цунамигенных землетрясений, проведение первых вычислительных экспериментов.

3. Уточнение математических моделей и вычислительных алгоритмов для исследования характеристик волн цунами: разработка численного алгоритма на основе созданной в 2009 г. полной нелинейно-дисперсионной модели для расчета поверхностных волн, движущихся над неровным подвижным дном, вывод аналога этой нелинейно-дисперсионной модели на вращающейся притягивающей сфере.

4. Развитие исследований оползневого механизма волнообразования: вывод закона движения оползня по пространственно-неоднородному подводному склону, сравнительный анализ результатов численного моделирования генерации поверхностных волн на основе классической модели мелкой воды и выведенной полной НЛД-модели.

В конце 2010 г. ожидалось получить следующие научные результаты

• Результаты детального моделирования трансформации волн у тихоокеанского побережья Камчатки, Курильских островов и о-ва Сахалин, порожденных модельными цунамигенными землетрясениями.

• Совокупность необходимых для моделирования удаленных цунами расчетных областей, массивов батиметрической информации и параметров модельных источников цунамигенных землетрясений.

• Полная нелинейно-дисперсионная модель на базе модели Железняка-Пелиновского для исследования длинных поверхностных волн на вращающейся притягивающей сфере с учетом подвижности дна.

• Новый закон движения оползня по подводному склону с учетом изменяющихся в пространстве формы оползня и рельефа склона.

• Результаты сравнительного анализа различных моделей волновой гидродинамики, в том числе, и новой нелинейно-дисперсионной модели на материалах численного моделирования процесса генерации поверхностных волн движущимся модельным оползнем при различных значениях характеристик определяющих параметров оползня и склона.

- 3.5. Степень выполнения поставленных в проекте задач Цели этапа 2010 г. в целом достигнуты, сформулированные планом задачи решены.
- 3.6. Полученные за отчетный период важнейшие результаты Краткие формулировки полученных за отчетный период важнейших результатов выглядят следующим образом.
 - 1. Определены уточненные характеристики проявления у Дальневосточного побережья РФ волн цунами, порожденных цунамигенными землетрясениями ближней зоны – значения высот волн у побережья и зоны влияния каждого из 107 рассмотренных очагов цунамигенных землетрясений с магнитудами $M_W = 7.8, 8.1, 8.4, 9.0$. Результат получен с помощью серийных вычислительных экспериментов на расчет-

ных сетках высокого пространственного разрешения (15 географических секунд).

- Обоснована методика расчетов в «малых» подобластях путем сравнения полученных результатов с результатами расчетов на детальной сетке в «глобальной» расчетной области. Получение результата оказалось возможным за счет проведения расчетов на высокопроизводительном вычислительном кластере Новосибирского государственного университета.
- 3. Построена система из 90 модельных очагов вероятных очагов удаленных цунамигенных землетрясений с магнитудой $M_W = 9.0$, охватывающая весь Тихоокеанский сейсмический пояс.
- 4. Обоснована адекватность применяемых для моделирования удаленных цунами вычислительных алгоритмов путем сопоставления с материалами натурных наблюдений.
- 5. Определены постановки задач на исследование характеристик удаленных цунами в части конструирования необходимых батиметрических данных, расстановки виртуальных мареографов и т.п.
- 6. Определены динамические и кинематические характерные особенности распространения энергии цунами от очагов удаленных цунамигенных землетрясений различных географических зон.
- 7. Выведена полностью нелинейная модель поверхностных волн, учитывающая эффекты дисперсии, нестационарности дна и сферичности Земли.
- 8. Предложен конечно-разностный алгоритм, основанный на идеях схем типа «предиктор-корректор», для полных НЛД-уравнений Железняка-Пелиновского. При этом эффективно использовалось расщепление исходной системы на эллиптическую и гиперболическую части и для каждой из частей расщепленной системы применялись хорошо изученные алгоритмы.
- Предложен закон движения квазинедеформируемого оползня, учитывающий пространственную неоднородность склона, по которому движется оползень, и конечность его пространственных размеров.
- 10. Определены основные особенности волновых режимов, порождаемых подводными оползнями конечных пространственных размеров, движущихся по пространственно неоднородному склону.

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

1. Детальное исследование характеристик волн цунами у Дальневосточного побережья РФ с использованием уточненной системы вероятных цунамиопасных очагов землетрясений и выделенных на основе предварительных расчетов подобластей, обеспеченных детальной цифровой батиметрической информацией.

В отчетный период были проведены уточняющие расчеты по определению цунамиопасности для Дальневосточного побережья РФ очагов модельных землетрясений, система которых была разработана в прошлом году. В эту систему входят очаги магнитудой 7.8, 8.1, 8.4 и 9.0, очаги которых располагаются вдоль Курило-Камчатского глубоководного желоба, в Карагинском заливе, а также в Алеуто-Аляскинской сейсмической зоне. (Рис. 1).

Проведенные в 2009 году предварительные расчеты на грубой сетке с шагом по пространству в одну географическую минуту показали, что рассмотренные источники представляют цунамиопасность только для восточных побережий Камчатки и Сахалина, а также для Курильских островов. Рассчитанные на побережье Приморья амплитуды, как правило, не превышали нескольких миллиметров, а на западе Сахалина – нескольких сантиметров.





Вместе с тем, как показали многочисленные методические расчеты, выполненные исполнителями ранее для представительного набора модельных акваторий, в частности, для акватории Карагинского залива, одноминутной сетки недостаточно для адекватного воспроизведения волновых характеристик вблизи берега. Удовлетворительная сходимость результатов при измельчении сетки достигается при использовании пространственного шага в 15 географических секунд. Предварительные расчеты на такой детальной сетке были проведены сначала в наборе выделенных подобластей (Рис. 2), каждая из которых содержала совокупность очагов модельных цунамигенных землетрясений и защищаемых пунктов, в которых оказывалось заметным (высоты волн не менее 50 см) проявление порожденных этими землетрясениями волн цунами. При этом в качестве источника батиметрической информации использовался 30-секундный массив Gebco-2008.



Влияние разрешающей способности сетки демонстрируется сравнением (Рис. 3) максимальных амплитуд волн (в метрах), рассчитанных для защищаемых пунктов, входящих в 6-ю подобласть, от источника 10d магнитудой 8.4. Наибольшее усиление амплитуды примерно в 4 раза отмечено в пунктах «Никольское» (№1) и «Озерное» (№13).



Рис. 3. Максимальные амплитуды, рассчитанные в защищаемых пунктах 6-й подобласти с использованием пятнадцатисекундной батиметрии для источника 84-10d с магнитудой 8.4 (красный цвет) и в глобальной области – с использованием одноминутной батиметрии (синий цвет).

Имеющаяся у исполнителей проекта возможность проведения расчетов на одном из самых высокопроизводительных компьютеров страны, размещенных в Новосибирском государственном университете, позволила провести контрольные расчеты с использованием детальной сетки во всей глобальной расчетной области, включающей все модельные очаги землетрясений и все защищаемые пункты, проявления в которых от этих источников существенны (рассматривались пункты, располагающиеся на побережье Камчатки, Курильских островов и на восточном побережье о. Сахалин). Это позволило, с одной стороны, оценить точность результатов, получаемых с использованием технологии «малых подобластей», а с другой – облегчить интерпретацию результатов за счет обеспечения возможности единого анализа проявления волн цунами вдоль всего защищаемого побережья без его искусственного разделения на фрагменты, соответствующие малым подобластям.

Изображенные на следующей серии рисунков (Рис. 4 – Рис. 5) гистограммы распределения экстремальных высот волн наглядно демонстрируют более чем удовлетворительное совпадение результатов, полученных с использованием методики «малых подобластей», с результатами, рассчитанными в глобальной области.



Рис. 4. Сравнение экстремальных значений высот волн в «защищаемых пунктах», рассчитанных на пятнадцатисекундной сетке в глобальной области (широкие столбцы) и в малых подобластях. Слева – для источника с магнитудой M_w = 9.0 (2d) расчеты проводились в подобласти 4 (столбцы средней толщины) и 5 (узкие), справа – для источника 9.0 (4d) расчеты проводились в подобласти 6 (столбцы средней толщины). По вертикальной оси отложены высоты волн в метрах, по горизонтальной – номера «защищаемых пунктов» согласно Табл. 1.



Рис. 5. То же для источника с магнитудой M_w= 8.4(3d) – слева (подобласть 1 – столбцы средней толщины и 2 – узкие), для источника 8.4(5b) – справа (подобласть 2 – столбцы средней толщины и 3 – узкие).

1 Nikol'skoe	11 Karaga	21 Lopatka	31 Komrvo
2 Apuka	12 Ivashka	22 Shumshu	32 Pogranichnoe
3 Pahachi	13 Ozernaya	23 Severo-Kuril'sk	33 M.Terpeniya
4 Tilichiki	14 Afrika	24 Simushir	34 Poronaisk
5 Korf	15 Ust'-Kamchatsk	25 Urup	35 Makarov
6 Vyvenka	16 Kronoki	26 Kuril'sk	36 Vzmor'e
7 Il'pyrskoe	17 Semyachiki	27 Burevestnik	37 Starodubskoe
8 Tymlat	18 Petropavlovskii mayak	28 Malokuril'skoe	38 Novikovo
9 Ossora	19 Petropavlovsk-Kamchatskii	29 Yuzhno-Kuril'sk	39 Korsakov
10 Kostroma	20 Vodopadnaya	30 Odoptu	40 M.Kril'on

Наиболее содержательным материалом для интерпретации результатов моделирования с целью определения зон влияния потенциально опасных цунамигенных землетрясений и последующего возможного уточнения базовых положений регламента национальной системы предупреждения о цунами являются экстремальные высоты волн, рассчитанные в виртуальных мареографах, соответствующих защищаемым пунктам. Существенного повышения информативности этих распределений позволяет добиться расширение набора мареографных пунктов за счет включения в число виртуальных мареографов «дополнительных» мареографов, размещенных вдоль всего защищаемого побережья с достаточным пространственным шагом (в качестве такого шага было выбрано расстояние порядка 10 – 15 километров). Таким образом, в дополнение к уже использовавшимся 40 мареографным точкам (соответствующим защищаемым населенным пунктам) было добавлено 643 точки, установленные вдоль восточного побережья Сахалина, Курильских островов, Камчатки и Корякии (Рис. 6).



Рис. 6. Схема размещения виртуальных мареографов в глобальной области. Синими кружочками указаны защищаемые пункты, красными – остальные. Номера указаны у каждого 20-го.

Следующая серия рисунков представляет характерные расчетные гистограммы для источников различной магнитуды и соответствующие им картины свечений. Вспомогательные штриховые горизонтальные линии на уровне 0.5 м (мелкий пунктир) и 2 м (крупный пунктир) разделяют слабые (≤ 0.5 м), ощутимые (> 0.5 м и ≤ 2 м) и сильные (> 2 м) цунами. Для облегчения интерпретации в непосредственной близости к гистограммам изображены схемы размещения соответствующих очагов потенциально опасных цунамигенных землетрясений. Так, Рис. 7 показывает, что мощное землетрясение 90-1d с магнитудой $M_w = 9.0$, очаг которого расположен напротив одного из Курильских проливов, очень сильно (с амплитудами около 10 м) проявляется на Курильских островах, проникает к Восточному побережью о-ва Сахалин и порождает волны с амплитудами около 5 м на юге Камчатки.



Рис. 7. Распределение максимальных (красный цвет) и минимальных (синий цвет) высот волн цунами вдоль Дальневосточного побережья РФ (с шагом 10 – 15 км), рассчитанных для очага цунамигенного землетрясения ближней зоны 90-1d с магнитудой $M_w = 9.0$ на пятнадцатисекундной расчетной сетке.

Размещенный у Северной оконечности Камчатки источник 84-6b с магнитудой $M_w = 8.4$ (Рис. 8) совершенно безопасен для Восточного побережья о-ва Сахалин и Курильских островов. Волны с амплитудами до 10 м порождаются этим источником на Севе-

ре Камчатки и на побережье о-ва Беринга. Двухметровые колебания уровня океана регистрируются в Южной части побережья Карагинского залива.(около 2м).



Рис. 8. То же для очага цунамигенного землетрясения ближней зоны 84-6b с магнитудой $M_w = 8.4$.

Цунамигенное землетрясение ближней зоны 81-2е с магнитудой $M_w = 8.1$ демонстрирует узкую направленность, проявляясь в Северной части побережья Курильских островов и в Южной части побережья Камчатки (около 2м), оставаясь практически незамеченным для оставшейся части защищаемого побережья.



Рис. 9. То же для очага цунамигенного землетрясения ближней зоны 81-2е с магнитудой $M_w = 8.1$.

Наконец, последний из рассматриваемых здесь модельных источников (78-28с) с наименьшей магнитудой $M_w = 7.8$ расположен непосредственно в северной части акватории Карагинского залива. Влияние порождаемого соответствующим землетрясением цунами (Рис. 10) оказывается локализованным в Северной части побережья этого залива, почти не выходит за пределы полуметровой границы вдоль остальной части побережья Корякского автономного округа и, уж тем более, за его пределами.



Рис. 10. же для очага цунамигенного землетрясения ближней зоны 78-28с с магнитудой $M_w = 7.8$.

Серия рисунков (Рис. 11 – Рис. 14) позволяет расширить представление, полученное с помощью анализа гистограмм. Изображенные здесь диаграммы направленности (картины свечения) демонстрируют воздействие волн цунами за пределами набора виртуальных мареографов, в частности, вдоль западного побережья Охотского моря.



Рис. 11. Распределение максимальных высот волн цунами в глобальной расчетной области после 17.5 часов трансформации волны цунами, рассчитанное для очага цунамигенного землетрясения ближней зоны 90-1d с магнитудой $M_w = 9.0$ на пятнадцатисекундной расчетной сетке. Справа – цветовая шкала высот волн в метрах.







Рис. 13. То же для очага цунамигенного землетрясения ближней зоны 81-2е с магнитудой $M_w = 8.1$.



Рис. 14. То же для очага цунамигенного землетрясения ближней зоны 78-28с с магнитудой $M_w = 7.8$.

2. Постановка задач и предварительное исследование возможного воздействия удаленных цунами на Дальневосточное побережье России: определение необходимой расчетной области, подготовка адекватной батиметрической информации, построение набора модельных источников удаленных цунамигенных землетрясений, проведение первых вычислительных экспериментов.

Удаленные источники цунами аппроксимировались системой модельных очагов подводных землетрясений с магнитудой $M_w = 9.0$. Очаг такого землетрясения представляет собой площадку разрыва длиной L = 430 км и шириной W = 150 км с величиной подвижки по ней $D_0 = 11.6$ м. Всего исполнителями составлен набор из 90 удаленных (по отношению к Дальневосточному региону РФ) модельных очагов землетрясений, принадлежащих 8 географическим зонам: Алеуто-Аляскинской, Североамериканской, Центральноамериканской, Южноамериканской, зоне Новой Зеландии – Тонга, Папуа-Новой Гвинеи – Соломоновых островов, Филиппинской, зоне Гуама (Рис. 15).

Для проведения вычислительных экспериментов по моделированию трансформации удаленных цунами была выбрана акватория (Рис. 15), ограниченная с запада 100° В.Д., с востока 60° З.Д., с юга 60° Ю.Ш. и с севера 65° С.Ш. Соответствующий массив цифровой батиметрической информации был получен прореживанием одноминутной батиметрии «GEBCO-2009» на регулярную сетку с шагом 5 географических минут.



Рис. 15. Слева – схема размещения потенциально опасных очагов цунамигенных землетрясений с магнитудой M_W = 9.0. Справа – рельеф дна расчетной области, использованной для предварительных расчетов трансформации волн цунами, порожденных удаленными относительно Дальневосточного побережья РФ потенциально опасными очагами цунамигенных землетрясений.

В отчетный период были проведены предварительные расчеты для 6 очагов из разных сейсмических зон. В расчетах физическое время распространения волны составляло 162000 секунд (45 часов). Результаты моделирования фиксировались в 248 точках, установленных вдоль восточного побережья Сахалина, Курильских островов, Камчатки, Корякии и острова Беринга с интервалом порядка 20-30 километров (Рис. 16).



Рис. 16. Схема расположения мареографов вдоль защищаемого побережья РФ (красные кружочки с номерами у каждого 10-го).

Ниже на серии рисунков представлены картины свечения (распределения максимальных амплитуд цунами во всей расчетной области), а также гистограммы распределений максимальных и минимальных высот волн в мареографных пунктах.



Рис. 17. Сверху – картина свечения (распределение максимальных амплитуд цунами во всей расчетной области), снизу – гистограммы распределений максимальных и минимальных высот волн в мареографных пунктах, порожденных цунамигенным землетрясением «За», входящим в Алеуто-Аляскинскую сейсмическую зону.



Рис. 18. То же для источника «15а», входящего в Североамериканскую сейсмическую зону.



Рис. 19. То же для источника «26а», входящего в Центральноамериканскую сейсмическую зону.



Рис. 20. То же для источника «42а», входящего в Южноамериканскую (Чили) сейсмическую зону.



Рис. 21. То же для источника «59а», входящего в сейсмическую зону Соломоновых островов.



Рис. 22. То же для источника «71а», входящего в Новогвинейскую сейсмическую зону.

Как показывают представленные на этих рисунках диаграммы направленности излучения цунами и соответствующие им гистограммы распределений максимальных и минимальных высот волн в мареографных пунктах, наибольшие амплитуды волн для каждого из рассмотренных модельного очага наблюдаются вдоль восточного побережья Курильских островов, Камчатки, севера Корякии и острова Беринга. Соответственно, наименьшие – у полуострова Сахалин, а также южной и центральной части восточного побережья Корякии.

Среди рассмотренных в предварительных расчетах модельных очагов наименьшей степенью опасности характеризуется «Центральноамериканское цунами» (Рис. 19), направляющее свой энергетический поток к юго-западу. Для него размах волн не превышает полуметра при использовании расчетной сетки с разрешающей способностью 5 географических минут. Размах волн вдоль защищаемого побережья до 1-го метра наблюдается от Североамериканского очага (Рис. 18). Достаточно серьезную угрозу Дальневосточному побережью России могут представить «Южноамериканское – Чилийское» (Рис. 20) и «Соломоново» (Рис. 21Рис. 22) цунами, при которых размах волн достигает 2-х метров у Курильских островов и Камчатки и 1-го – у севера Корякии.

Наибольшую опасность для Дальневосточного побережья РФ, естественно, представляют волны цунами, порожденные одним из очагов Алеуто-Аляскинской зоны (Рис. 17), воздействию которого подвергается непосредственно примыкающее к очаговой зоне побережье о-ва Беринга, северная часть побережья Карагинского залива, Восточное побережье Камчатки и Северной части Курильского архипелага. Отмечаются также ощутимые волны и у Северного побережья Японии.

Значительный интерес вызывает четко выраженная направленность «Новогвинейского» (Рис. 22Рис. 22) цунами, распространяющего свою энергию к побережью Японии и России. Наряду с Алеуто-Аляскинским цунами, оно представляет наибольшую угрозу для защищаемого побережья, приводя к волнам вдоль него с размахом порядка 2–2.5 метра.

Качество применяемого исполнителями авторского вычислительного инструментария тщательно исследуется на специальных тестовых задачах, результаты решения которых подтверждают достоверность получаемых расчетных результатов. Соответствующие результаты с необходимой полнотой были изложены в отчетах по ранее выполнявшимся грантам РФФИ.

В отчетном году исполнителям удалось сопоставить результаты моделирования удаленных цунами с данными приборной регистрации недавнего исторического события. На следующих двух рисунках изображены расчетные (черные кривые) и отфильтрованные реальные мареограммы (красные кривые) для пунктов «Midway» (177.35° W, 28.21° N) (Рис. 23) и «Wake» (166.62° E, 19.28° N) (Рис. 24). Расчетные мареограммы были получены в ходе моделирования цунами, порожденного модельным «Южноамериканским (42а)» очагом, а реальные были записаны при регистрации чилийского (27.02.2010) цунами, порожденного сейсмическим очагом с магнитудой $M_w = 8.8$. На каждом из рисунков эти мареограммы совмещены по времени первого вступления, а реальные мареограммы (любезно предоставленные А.Б.Рабиновичем) претерпели двойную фильтрацию – сначала из них была удалена приливная долгопериодная составляющая, а затем они были подвергнуты высокочастотной фильтрации четырехчасовым фильтром с окном Кайзера-Бесселя.

Результаты этого сравнения представляются более чем удовлетворительными как по амплитудным характеристикам, так и по форме зарегистрированных колебаний и их частотным параметрам. Здесь также следует учесть недостаточную детальность расчетной сетки (пять географических минут) и несовпадение мест размещения виртуальных и реальных мареографов, а также весьма приблизительную близость модельного очага «42а» и очага чилийского землетрясения, задача моделирования которого в этих расчетах и не ставилась.



Рис. 23. Сравнение расчетной (черная кривая, модельный очаг «42а») и реальной (красная, чилийское цунами 2010 г., порожденное сейсмическим очагом с магнитудой $M_w = 8.8$) мареограмм для мареографного пункта Midway. Глубина под виртуальным мареографом – 531 м.



Рис. 24. То же для мареографного пункта Wake. Глубина под виртуальным мареографом – 1037 м.

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. На следующих рисунках (Рис. 25 – Рис. 28) представлены гистограммы распределения высот цунами и некоторые кинематические (временные) характеристики **исключительно** в защищаемых пунктах Дальневосточного побережья РФ для четырех рассмотренных удаленных источников (очаг землетрясения с магнитудой $M_W = 9.0$). По горизонтальной оси на этих рисунках отложены номера защищаемых пунктов (Табл.3, номер справа от названия). Вдоль **левой** вертикальной оси отложены – высоты волн в метрах (им соответствуют столбики), вдоль **правой** – время в секундах прихода:

- максимальной положительной фазы (розовые линии и маркеры),
- максимальной отрицательной фазы (голубые линии и маркеры),
- первой положительной волны (красные линии и маркеры),
- расчетное время прибытия цунами ETA (Expected Tsunami Arrival), полученное в рамках кинематических расчетов (желтая линия).

Прежде всего здесь следует отметить хорошее (можно даже сказать очень хорошее) совпадение времен ЕТА (Expected Tsunami Arrival) ожидаемого прихода цунами, рассчитанных по кинематической и динамической задаче (в последней временем ЕТА считается момент прихода максимума в первой (головной) волне). Обе задачи совершенно различны по своим алгоритмам и решаются на разных сетках, тем не менее результаты практически совпадают. Это означает, что быстрым алгоритмам расчета карт TTT (Tsunami Travel Time), реализованным в оболочке WinITDB, а также алгоритмам моделирования динамики волн цунами в используемом для расчетов комплексе MassGlobalCalcul можно доверять.

Вторым важным обнаруженным эффектом является то, что в некоторых случаях 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 обсуждаемых гистограммах максимальных высот в защищаемых пунктах Дальневосточного побережья РФ особенности совпадают с известным представлением о том, что в случае трансокеанских цунами имеют место достаточно различные по своей физике процессы. Первый – это процесс динамического распространения начального энергетического пакета, излученного очагом. Второй – процесс раскачки всего Тихого океана, как единого, но очень сложного по своей конфигурации бассейна, который при достаточно сильном вбросе энергии в эту колебательную систему может продолжаться несколько суток. Третий связан с распространением систем краевых волн, порождаемых волнами цунами, вдоль побережья.

В случае «Центральноамериканского» очага (Рис. 25), который «светит» 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. 26, Рис. 27) 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 (Рис. 28), 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 вовлекается резонансные процессы окраинных морей (Охотского и Берингового).



Рис. 25. Распределение максимальных (столбики красного цвета) и минимальных (столбики синего цвета) высот волн цунами для защищаемых пунктов Дальневосточного побережья РФ (пронумерованных согласно Табл. 1), рассчитанных для «Центральноамериканского– 26а» очага цунамигенного землетрясения на пятиминутной расчетной сетке. Голубыми линиями и маркерами отмечены времена прихода экстремального отрицательного значения в соответствующий защищаемый пункт, розовыми – экстремального положительного, черной линией с красными маркерами отмечено время прихода первого локального положительного экстремума, желтой линией – «ожидаемое время подхода волны цунами», рассчитанное с помощью алгоритмов информационно-вычислительной системы WinITDB.



Рис. 26. То же для «Алеутского – За» очага цунамигенного землетрясения.

Указанные обстоятельства сильно осложняют регламентацию рационального выбора времен объявления и, в особенности, отмены тревоги цунами по удаленным событиям, а также влияет на выбор пороговых магнитуд. Здесь можно надеяться на то, что полный анализ (по завершению планируемого на 2011 г. всей 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, Guam, Johston и др).

Возможность практического использования системы буев DART сможет быть реализована только, если они будут установлены непосредственно перед Курило-Камчатским побережьем.



Рис. 27. То же для «Новогвинейского – 71а» очага цунамигенного землетрясения.



Рис. 28. То же для «Южноамериканского (Чили) – 42а» очага цунамигенного землетрясения.

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.

3. Уточнение математических моделей и вычислительных алгоритмов для исследования характеристик волн цунами: разработка численного алгоритма на основе созданной в 2009 г. полной нелинейно-дисперсионной модели для расчета поверхностных волн, движущихся над неровным подвижным дном, вывод аналога этой нелинейно-дисперсионной модели на вращающейся притягивающей сфере.

Актуальность запланированных работ по расширению набора используемых нелинейнодисперсионных моделей волновой гидродинамики обусловлена необходимостью корректного учета дисперсии при моделировании распространения поверхностных волн в больших акваториях и в некоторых прибрежных областях, а также при исследовании волн, порожденных оползнями.

В настоящее время при описании крупномасштабных волновых процессов в атмосфере и океане используется, в основном, классическая бездисперсионная модель мелкой воды, записанная в сферических координатах и выведенная в предположении о гидростатичности давления в тонком слое воды или воздуха, лежащего на поверхности планеты. В последние годы отчетливо вырисовывается тенденция к применению более содержательных моделей для изучения задач, связанных с катастрофическими волновыми процессами в океане. Основное заключение последних концептуальных работ по поводу выбора математических (гидродинамических) моделей выглядит следующим образом: для приемлемого описания явления на продолжительное время и в больших по широтному и долготному направлениям акваториях требуются модели, способные воспроизводить дисперсию, отражающую в определенной степени неоднородность процесса в вертикальном направлении, и учитывать эффекты, связанные со сферичностью и вращением Земли. В совокупности, это приводит к необходимости применять учитывающие подвижность дна нелинейно-дисперсионные (НЛД-) модели на сфере.

В 2009 г. был разработан простой способ получения нелинейно-дисперсионных (НЛД-) моделей волновой гидродинамики для поверхностных волн конечной амплитуды, распространяющихся над неровным подвижным дном. С помощью этого способа были выведены известные НЛД-уравнения Грина-Нагди, а также было дано обобщение НЛДуравнений Железняка-Пелиновского, известных лишь для стационарного дна, на случай подвижного дна. Было показано, что, как и в случае стационарного дна, системы уравнений Грина-Нагди и Железняка-Пелиновского для подвижного дна, хотя и имеют различный вид определяющих уравнений, эквивалентны и являются разными формами записи одной и той же системы уравнений теории мелкой воды второго приближения. Однако уравнение движения модели Грина-Нагди неудобно для численной реализации, поскольку оно содержит вторые производные по времени от функции, описывающей свободную границу. Уравнение движения модели Железняка-Пелиновского свободно от этого недостатка: в его правой части содержатся только первые производные по времени от компонент вектора скорости.

Поэтому в 2010 г. конечно-разностный алгоритм конструировался на основе полных НЛД-уравнений Железняка-Пелиновского. При этом эффективно использовалось расщепление исходной системы на эллиптическую и гиперболическую части и для каждой из частей расщепленной системы применялись хорошо изученные алгоритмы.

Уравнения НЛД-модели для безразмерных величин имеют следующий вид: $H_{\iota} + \nabla \cdot (Hu) = 0,$ (1)

$$\boldsymbol{u}_{t} + (\boldsymbol{u} \cdot \nabla)\boldsymbol{u} + \nabla \eta = \frac{1}{H} \nabla \left(\frac{H^{3}}{3} R_{1} + \frac{H^{2}}{2} R_{2} \right) - \nabla h \left(\frac{H}{2} R_{1} + R_{2} \right),$$
(2)

где $\boldsymbol{u} = (u, v)$ – усредненная по глубине горизонтальная составляющая вектора скорости трехмерного течения, $H = \eta + h$, $z = \eta(x, y, t)$ – уравнение свободной границы, z = -h(x, y, t) – известное уравнение подвижного дна, $\nabla = (\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}), \nabla \cdot \boldsymbol{u} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y},$ $R_1 = D(\nabla \cdot \mathbf{u}) - (\nabla \cdot \mathbf{u})^2, \qquad R_2 = D^2 h,$ (3)

 $D = \partial/\partial t + \boldsymbol{u} \cdot \nabla$ – оператор полной производной.

Выполним расщепление системы (1), (2) на две части: уравнение эллиптического типа и систему уравнений гиперболического типа. Обозначим через $\mathbf{d} = \mathbf{u}_t + (\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u}$ вектор ускорения. Тогда уравнение движения (2) может быть записано как

$$H\mathbf{d} = \nabla \varphi - \psi \nabla h \,, \tag{4}$$

где

$$\varphi = \frac{H^3}{3}R_1 + \frac{H^2}{2}R_2 - \frac{H^2}{2}, \qquad \psi = \frac{H^2}{2}R_1 + HR_2 - H.$$
(5)

Если обратить равенства (5)

$$R_{1} = \frac{1}{H^{3}} (12\varphi - 6H\psi), \qquad R_{2} = \frac{1}{H^{2}} (-6\varphi + 4H\psi + H^{2}),$$

выражения (3) записать через вектор ускорения

$$R_1 = \nabla \cdot \mathbf{d} - 2(\nabla \cdot \mathbf{u})^2 + 2 \left| \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{x}} \right|, \qquad R_2 = \mathbf{d} \cdot \nabla h + \mathbf{u} \cdot \left((\mathbf{u} \cdot \nabla) \nabla h \right) + B$$

и для **d** использовать формулу (4), то получается система из двух уравнений

$$\left[\nabla \cdot \left(\frac{1}{H} \nabla \varphi - \frac{1}{H} \psi \nabla h \right) - 2 \left(\nabla \cdot \mathbf{u} \right)^2 + 2 \left| \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{x}} \right| = \frac{1}{H^3} (12\varphi - 6H\psi), \\ \left(\frac{1}{H} \nabla \varphi - \frac{1}{H} \psi \nabla h \right) \cdot \nabla h + \mathbf{u} \cdot \left((\mathbf{u} \cdot \nabla) \nabla h \right) + B = \frac{1}{H^2} (-6\varphi + 4H\psi + H^2),$$

$$(6)$$

где $B = h_{tt} + 2\mathbf{u} \cdot \nabla h_t$ – слагаемое, связанное с подвижностью дна. Из второго уравнения этой системы находится функция

$$\psi = \frac{1}{Hr} \Big(H\nabla \varphi \cdot \nabla h + 6\varphi + H^2 \mathbf{u} \cdot \big((\mathbf{u} \cdot \nabla) \nabla h \big) - H^2 + H^2 B \Big)$$
(7)

где $r = (\nabla h)^2 + 4$. Подставляя это выражение в первое уравнение системы (6), приходим к уравнению относительно скалярной функции φ :

$$\nabla \cdot \left(\frac{\nabla \varphi}{H} - \frac{\nabla h}{H} \frac{\nabla h \cdot \nabla \varphi}{r}\right) - \left(6\nabla \cdot \left(\frac{\nabla h}{H^2 r}\right) + \frac{12}{H^3} \frac{r-3}{r}\right)\varphi = F, \qquad (8)$$

где

$$F = \nabla \cdot \left(\frac{\nabla h}{r} \left(B + \mathbf{u} \cdot \left((\mathbf{u} \cdot \nabla) \nabla h \right) - 1 \right) \right) - \frac{6}{Hr} \left(B + \mathbf{u} \cdot \left((\mathbf{u} \cdot \nabla) \nabla h \right) - 1 \right) + 2 \left(\nabla \cdot \mathbf{u} \right)^2 - 2 \left| \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{x}} \right|$$

Показано, что уравнение (8) является равномерно эллиптическим, поэтому для нахождения численного решения этого уравнения можно использовать эффективные итерационные методы решения уравнений эллиптического типа с переменными коэффициентами.

Уравнение (8) решается на каждом шаге по времени с использованием предварительно вычисленных значений H и **u**, для нахождения которых численно решается система уравнений (1), (4), записанная в следующем виде:

$$\begin{cases} H_t + \nabla \cdot (H\mathbf{u}) = 0, \\ \mathbf{u}_t + (\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} + \nabla H = \frac{1}{H} \left(\nabla (\varphi + \frac{H^2}{2}) - \psi \nabla h \right). \end{cases}$$
(9)

В уравнениях движения этой системы левые части совпадают с левыми частями системы уравнений мелкой воды, поэтому для численного решения использовалась схема предиктор-корректор, хорошо зарекомендовавшая себя при моделировании в рамках модели мелкой воды волновых процессов, вызванных подвижностью дна.

Алгоритм расчета на произвольном шаге по времени с номером *n* состоит в следующем. Сначала решается конечно-разностное уравнение для нахождения функции φ^n , аппроксимирующее уравнение (8). Коэффициенты уравнения вычисляются по известным значениям H^n и \mathbf{u}^n с *n*-го слоя по времени. Затем по формуле (7) вычисляется функция ψ^n . На шаге предиктор схемы предиктор-корректор аппроксимируется недивергентная система (9), правая часть которой содержит уже известные значения φ^n , ψ^n и H^n . После этого находится φ^* , для чего вновь решается численно уравнение (8) с использованием величин H^* и \mathbf{u}^* , вычисленных на предикторе. Значения φ^* используются затем в правой части уравнений шага корректор, аппроксимирующих систему (9), левая часть которой записана в дивергентной форме. На этом шаге определяются окончательные значения H^{n+1} и \mathbf{u}^{n+1} и происходит переход к вычислению величин на следующем шаге по времени.

В отчетном году исполнителями выведены НЛД-уравнения на вращающейся притягивающей сфере с учетом подвижности донной поверхности на основе подхода, развитого на предыдущем этапе выполнения проекта. Эти уравнения имеют следующий вид:

$$\begin{cases} (hR\sin\theta)_t + (hu)_{\varphi} + (hv\sin\theta)_{\theta} = 0, \\ (huR\sin\theta)_t + (hu^2)_{\varphi} + (huv\sin\theta)_{\theta} = -(\omega R\sin 2\theta + u\cos\theta)hv + \Phi_{\varphi} + \Psi H_{\varphi}, \\ (hvR\sin\theta)_t + (huv)_{\varphi} + (hv^2\sin\theta)_{\theta} = (\omega R\sin 2\theta + u\cos\theta)hu + \Phi_{\theta} + \Psi H_{\theta}. \end{cases}$$

Здесь R – средний радиус Земли, ψ – географическая широта, φ – географическая долгота, $\theta = \pi/2 - \psi$ – дополнение до широты ψ , t – время, $h = H + \eta$ – полная глубина, H – глубина невозмущенного слоя жидкости, η – смещение свободной поверхности, g – ускорение силы тяжести; u и v – усредненные по глубине компоненты вектора скорости по направлениям φ и ψ соответственно, ω – угловая скорость вращения Земли,

$$\Phi = \frac{h^3}{3}R_1 + \frac{h^2}{2}R_2 - g\frac{h^2}{2}, \ \Psi = gh - \frac{h^2}{2}R_1 - hR_2,$$

$$R_1 = (\nabla \cdot \mathbf{c})_t + \frac{1}{R\sin\theta} \Big(u(\nabla \cdot \mathbf{c})_{\varphi} + v\sin\theta(\nabla \cdot \mathbf{c})_{\theta} \Big) - (\nabla \cdot \mathbf{c})^2,$$

$$R_2 = (DH)_t + \frac{1}{R\sin\theta} \Big(u(DH)_{\varphi} + v\sin\theta(DH)_{\theta} \Big),$$

$$\nabla \cdot \mathbf{c} = \frac{1}{R\sin\theta} \Big(u_{\varphi} + (v\sin\theta)_{\theta} \Big), \ DH = H_t = \frac{1}{R\sin\theta} \Big(uH_{\varphi} = v\sin\theta H_{\theta} \Big).$$

4. Развитие исследований оползневого механизма волнообразования: вывод закона движения оползня по пространственно-неоднородному подводному склону, сравнительный анализ результатов численного моделирования генерации поверхностных волн на основе классической модели мелкой воды и выведенной полной НЛД-модели.

В рамках изучения оползневого механизма генерации волн цунами выполнены работы по конструированию нового закона движения оползня, рассматриваемого в виде твердого, квазинедеформируемого тела, перемещающегося по подводному склону. Новизна подхода заключается в том, что в рамках этого закона масса оползня движется под действием сил тяжести, трения, сопротивления воды, архимедовой силы с учетом присоединенной массы по пространственно неоднородному склону произвольной формы.

Рассматривается слой жидкости, ограниченный сверху свободной поверхностью $z = \eta(x, y, t)$, а снизу – подвижной границей $z = -h(x, y, t) = h_{bt}(x, y) + h_{st}(x, y, t)$. Здесь t – время, система координат *Охуг* выбрана так, что x, y – горизонтальные координаты, z – вертикальная, при этом плоскость z = 0 совпадает с поверхностью покоящейся жидкости. Подвижность нижней границы слоя обусловлена тем, что по непроницаемому дну, заданному однозначной функцией

$$z = h_{bt}(x, y), \tag{10}$$

движется оползень, форма которого описывается функцией $z = h_{sl}(x, y, t)$.

Предполагается, что в начальный момент времени оползень имеет конечную протяженность и толщину, а его поверхность описывается функцией $z = h_{bt}(x, y) + h_{sl}^0(x, y)$, где $z = h_{sl}^0(x, y)$ – неотрицательная ограниченная функция с конечным носителем \mathcal{D}_0 . При t > 0оползень может начать движение по наклонному дну.

Вывод закона движения оползня основан на следующих предположениях:

- * оползень в каждый момент времени отождествляется с некоторой материальной точкой $\mathbf{x}_{c}(t) = (x_{c}(t), y_{c}(t), z_{c}(t))$, скользящей вдоль неровного дна (10) согласно закону движения материальной точки по заданной поверхности, при этом $x_{c}(0) = x_{c}^{0}$, $y_{c}(0) = y_{c}^{0}$, где $(x_{c}^{0}, y_{c}^{0}) \in \mathcal{D}_{0}$;
- * при t > 0 поверхность оползня описывается функцией

$$z = h_{ht}(x, y) + h_{sl}(x, y, t),$$

где $h_{sl}(x, y, t) = h_{sl}^0(x + x_c^0 - x_c(t), y + y_c^0 - y_c(t));$

* поверхность (10) не имеет особых точек и допускает регулярную параметризацию $x = x(q^1, q^2), y = y(q^1, q^2), z = z(q^1, q^2),$

где q^1 , q^2 – параметры. Тогда

$$x_c(t) = x(q^1(t), q^2(t)), y_c(t) = y(q^1(t), q^2(t)), z_c(t) = z(q^1(t), q^2(t)),$$

где $(q^{1}(t), q^{2}(t))$ – положение рассматриваемой точки в момент времени *t* в параметрическом пространстве. При выводе закона использовалась следующая параметризация: $x = q^{1}$, $y = q^{2}$, $z = h_{bt}(x, y)$. Таким образом, функция $h_{sl}(x, y, t)$ является финитной, и ее носитель \mathcal{D}_t в каждый момент времени полностью определяется носителем \mathcal{D}_0 функции h_{sl}^0 и положением точки $\mathbf{x}_c(t): \mathcal{D}_t = \{(x, y) | (x + x_c^0 - x_c(t), y + y_c^0 - y_c(t)) \in \mathcal{D}_0\}.$

Пусть v_1 , v_2 – ковариантные компоненты вектора скорости, $v^1 = \dot{q}^1$, $v^2 = \dot{q}^2$ – контравариантные:

$$v_1 = g_{11}v^1 + g_{12}v^2$$
, $v_2 = g_{12}v^1 + g_{22}v^2$,
 $v^1 = g^{11}v_1 + g^{12}v_2$, $v^2 = g^{12}v_1 + g^{22}v_2$,

где $g^{\alpha\beta}$ ($\alpha, \beta = 1, 2$) – контравариантные компоненты метрического тензора поверхности:

$$g^{11} = \frac{g_{22}}{G}, \ g^{12} = g^{21} = -\frac{g_{12}}{G}, \ g^{22} = \frac{g_{11}}{G}, \ G = \begin{vmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{12} & g_{22} \end{vmatrix},$$

 $g_{\alpha\beta}$ – его ковариантные компоненты:

$$g_{11} = 1 + \left(\frac{\partial h_{bt}}{\partial x}\right)^2, \ g_{12} = g_{21} = \frac{\partial h_{bt}}{\partial x} \cdot \frac{\partial h_{bt}}{\partial y}, \ g_{22} = 1 + \left(\frac{\partial h_{bt}}{\partial y}\right)^2.$$

Тогда закон движения оползня конечных размеров по пространственно неоднородному дну описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} m \frac{dv_{\alpha}}{dt} = \frac{m}{2} \Big[(g_{11})_{q^{\alpha}} (v^{1})^{2} + 2(g_{12})_{q^{\alpha}} v^{1} v^{2} + (g_{22})_{q^{\alpha}} (v^{2})^{2} \Big] + F_{\tau_{\alpha}} \sqrt{g_{\alpha\alpha}}, \\ \frac{dq^{\alpha}}{dt} = v^{\alpha}, \end{cases}$$

где величина $F_{\tau_{\alpha}}$ представляет собой сумму сил, действующих на оползень – силы тяжести и плавучести $F_{g,\tau_{\alpha}}$, силы сопротивления воды $F_{r,\tau_{\alpha}}$ и силы трения оползня о дно $F_{fr,\tau_{\alpha}}$: $F_{\tau_{\alpha}} = F_{g,\tau_{\alpha}} + F_{r,\tau_{\alpha}} + F_{fr,\tau_{\alpha}}$. Здесь:

$$\begin{split} F_{g,\tau_{\alpha}}(t) &= \iint_{\mathcal{D}_{t}} f_{g,\tau_{\alpha}}\left(x,y,t\right) dxdy, \ f_{g,\tau_{1}} = \frac{f}{\sqrt{g_{11}}} \frac{\partial h_{bt}}{\partial x}, \ f_{g,\tau_{2}} = \frac{f}{\sqrt{g_{22}}} \frac{\partial h_{bt}}{\partial y}, \\ f\left(x,y\right) &= -g\left(\rho_{sl} - \rho_{w}\right) h_{sl}\left(x,y,t\right) dxdy; \\ F_{r,\tau_{\alpha}} &= -\frac{f_{r}}{v_{c}\sqrt{g_{\alpha\alpha}}} v_{\alpha}, \ f_{r} = \frac{1}{2} C_{d} \rho_{w} \Pi v_{c}^{2}, \ C_{d}$$
 – коэффициент сопротивления воды, v_{c} – модулн

вектора скорости $\boldsymbol{v}_{c}(t)$ движения точки $\boldsymbol{x}_{c}(t)$: $v_{c}^{2} = |\boldsymbol{v}_{c}|^{2} = uv_{1} + vv_{2};$

$$\boldsymbol{F}_{fr}(t) = -\frac{\boldsymbol{v}_c}{\boldsymbol{v}_c} \iint_{\mathcal{D}_t} f_{fr}\left(x, y, t\right) dx dy, \quad f_{fr} = -\frac{C_{fr}f}{\sqrt{G}} \left[1 + \frac{1}{g} \left(u^2 \frac{\partial^2 h_{bt}}{\partial x^2} + 2uv \frac{\partial^2 h_{bt}}{\partial x \partial y} + v^2 \frac{\partial^2 h_{bt}}{\partial y^2} \right) \right], \quad C_{fr} = -\kappa 0 - \kappa 0$$

эффициент трения скольжения.

Отметим, что силы сопротивления и трения являются пассивными, т.е. при $v_c = 0$ они полагаются равными нулю.

С целью демонстрации зависимости волнового режима от начального положения оползня относительно особенности подводного рельефа (Рис. 29) рассматривались два случая: в первом оползень располагался в момент времени t = 0 по центру желоба, а во втором – сбоку.

В первом случае траектория движения центра масс оползня очень проста (Рис. 30), ускорения и скорости в направлении *Oy* равны нулю, а графики изменения во времени этих характеристик в направлении *Ox* демонстрируют также достаточно простую картину динамики процесса – по мере продвижения оползня вдоль желоба (горизонтальные размеры модельного оплзня соответствют примерно двум третям максимальной ширины желоба) ускорение возрастает, достигая максимума примерно через 600 секунд после начала движения. Скорость оползня принимает свое максимальное значение в тот момент (750 секунд), когда ускорение переходит через нуль и начинается процесс торможения. Скорость стремится к нулю достаточно плавно и, выйдя на пологий участок рельефа, оползень останавливается через примерно 1900 секунд.



Рис. 30. Характеристики движения центра масс оползня, стартовавшего по центру желоба: слева – траектория движения (жирная линия) на фоне изолиний глубин; справа – соответствующие скорость (пунктир) и ускорение (сплошная линия) вдоль оси *Ox*.

Анализ аналогичных параметров для второго случая начального расположения оползня оказывается более интересным. Траектория движения центра масс теряет здесь свой прямолинейный характер и показывает, что смещаясь с края желоба в сторону увеличения глубин, оползень по инерции забирается на противоположный склон желоба, затем опять скатывается вниз и оказывается на склоне, с которого начал свое движение, после чего, претерпевая малое и очень пологое колебание относительно центральной оси желоба, приближается к месту своей остановки, которая происходит примерно в тот же момент времени, что и в первом, простейшем случае. Кривые, изображенные на Рис. 31, показывают, что характер изменения *x*-компонент скорости и ускорения оползня практически сохраняются, разве что график динамики ускорения становится менее монотонным. Динамика скорости и ускорения в направлении оси *Oy* имеет выраженный колебательный характер, полностью соответствуя приведенному выше характеру динамики траектории движения в целом.



Рис. 31. Характеристики движения центра масс оползня, стартовавшего с края желоба: слева – траектория движения (жирная линия) на фоне изолиний глубин; справа – соответствующие скорости (штриховые линии) и ускорения (сплошные); кривые без маркеров соответствуют значениям вдоль оси Ox, с маркерами – Oy.

Общее представление о порождаемом движением оползня волновом процессе может быть получено с помощью картин свечения – пространственных распределений максимальных значений амплитуд за все время расчета (Рис. 32). Они показывают, что естественная в первом случае симметричная картина разительно меняется во втором, когда основная часть волновой энергии оказывается направленной в сторону первоначального сдвига слоя жидкости, который происходит на малой глубине.



Рис. 32. Картины «свечения» – максимальных значений амплитуд за все время расчета: слева – в случае оползня, стартовавшего по центру желоба, справа – с его края.

Проявления волновых режимов на берегу иллюстрируются распределениями максимальных и минимальных высот волн, рассчитанных в береговых точках (Рис. 33). Графики этих распределений показывают, что в первом случае практически вся волновая энергия распространялась в стороны от центральной оси желоба. В центре береговой линии положительные амплитуды имеют строгий минимум, и их абсолютное значение в 7-8 раз меньше, чем в точках максимума, наблюдаемых на некотором расстоянии от центра. Для отрицательных амплитуд локальный максимум в центре хоть и имеется, но значения там также намного меньше (примерно в 5 раз), чем по бокам, на том же расстоянии.



Рис. 33. Распределения максимальных и минимальных высот волн, рассчитанные в береговых точках: сплошные линии соответствуют оползню, стартовавшему по центру желоба, штриховые – с его края. Треугольниками отмечены начальные у-координаты центров масс: сплошной соответствует первому случаю, контурный – второму. Вертикальные штриховые линии указывают границы желоба.

При постановке оползня в начальный момент на край желоба в части береговой линии, находящейся в стороне начального движения тела, амплитуды в два с небольшим раза больше, чем в противоположной и чем в предыдущем случае. По центру береговой линии амплитуды, в сравнении с максимальными, по-прежнему незначительные.

Запланированные на 2010 г. работы по сравнительному анализу результатов численного моделирования генерации поверхностных волн на основе классической модели мелкой воды и выведенной полной НЛД-модели исполнители решили перенести на заключительный этап работы (2011 г.) и выполнить их после завершения углубленного теоретического и экспериментального исследования созданных вычислительных алгоритмов.

3.7. Степень новизны полученных результатов

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

• уточненные значения высот волн у Дальневосточного побережья РФ и зоны влияния каждого из 107 рассмотренных очагов цунамигенных землетрясений; • система модельных очагов вероятных очагов удаленных цунамигенных землетрясений;

• полностью нелинейная модель поверхностных волн, учитывающая эффекты дисперсии, нестационарности дна и сферичности Земли;

• закон движения квазинедеформируемого оползня, учитывающий пространственную неоднородность склона, по которому движется оползень, и конечность его пространственных размеров;

• основные особенности волновых режимов, порождаемых подводными оползнями конечных пространственных размеров, движущихся по пространственно неоднородному склону.

Отдельные результаты, полученные в отчетном году вошли в содержание успешно защищенной одним из исполнителей (С.А.Бейзель) диссертации "Численное моделирование генерации и распространения волн цунами в модельных и реальных акваториях" на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

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:

* Теоретический семинар «Нелинейные волны», посвященный памяти чл.-к. РАН В.М. Тешукова. 2 марта 2010, Новосибирск;

* X Всероссийская конференция «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». 25 – 27 мая 2010, Санкт-Петербург;

* Symposium NH-05 The AGU 2010 Joint Assembly in Iguassu Falls, Brazil. August 8 – 13, 2010;

* II Международная конференция «Геоинформатика: технологии, научные проекты». 20 – 25 сентября 2010, Барнаул;

* Вторая международная школа-конференция «Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач». 21 – 29 сентября 2010, Новосибирск.

3.9. Методы и подходы, использованные в ходе выполнения проекта

В ходе выполнения проекта для построения представительного набора модельных цунамигенных удаленных землетрясений использовались современные сейсмологические подходы и методики моделирования очагов землетрясений.

Для повышения точности результатов моделирования распространения волн цунами применялась методика использования подобластей для расчетов на измельченной сетке, основанная на анализе направлений распространения волновой энергии, а также общего характера проявления модельных цунами в каждом из защищаемых пунктов по материалам предварительных расчетов в глобальной области на грубой сетке.

Новизна исследований оползневого механизма генерации волн цунами обеспечивалась выводом и использованием нового закона движения оползня как твердого квазинедеформируемого тела, при выводе которого применялись методы и подходы классической механики и учитывались пространственная неоднородность донной поверхности и конечность размеров оползня.

Для вывода нелинейно-дисперсионных модели волновой гидродинамики на вращающейся притягивающей сфере с учетом конечности амплитуды поверхностных волн, распространяющихся над неровным подвижным дном, исполнителями применялся предложенный и проверенный в прошлом году простой способ, основанный на интегральных законах сохранения.

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.

- 3.10.1 Количество научных работ, опубликованных в ходе выполнения проекта 14
- 3.10.2 Количество научных работ, подготовленных в ходе выполнения проекта и принятых к печати в 2010 г. 5

- 3.11. Участие в научных мероприятиях по тематике проекта, которые проводились при финансовой поддержке Фонда
- 3.12. Участие в экспедициях по тематике проекта, проводимых при финансовой поддержке Фонда 0
- *3.13.* Финансовые средства, полученные от РФФИ 340000 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://conf.nsc.ru/reportview/25836 http://www.ict.nsc.ru/sitepage.php?PageID=571

3.16. Библиографический список всех публикаций по проекту

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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. 5. 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. 6. 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.

7. Федотова З.И., Хакимзянов Г.С. Нелинейно-дисперсионные уравнения мелкой воды на вращающейся сфере // Вычислительные технологии. 2010. Т. 15, № 3. С. 135 – 145. 8. Бейзель С.А., Хакимзянов Г.С., Чубаров Л.Б. Пространственные эффекты оползневого волнообразования в прибрежной зоне // Труды Х Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» ГА-2010, 25.05.2010 – 27.05.2010. СПб.: Наука, 2010. 478 с. С. 247 – 250.

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

10. 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.

11. Beisel S.A., Khakimzyanov G.S., Chubarov L.B., Shokin Yu.I. Modeling of the landslide mechanism of tsunami wave generation near the Mediterranean coast of Israel // Zbornik radova Konferencije MIT-2009 («Mathematical and Informational Technologies 2009», 27.08.2009– 31.08.2009, Kopaonik, Serbia; 31.08.2009–05.09.2009, Budva, Montenegro). University of Pristina, Prirodno-matematicki fakultet. 2010. P. 42 – 45.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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, 2010 (в печати).

16. 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, 2010 (в печати).

17. Бейзель С.А., Чубаров Л.Б., Хакимзянов Г.С. Моделирование поверхностных волн, возникающих при движении подводного оползня по неровному склону // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling, 2010 (в печати).

18. Gusiakov V.K. Relationship of tsunami intensity to source earthquake magnitude as retrieved from historical data // Pure and Applied Geophysics, 2010 (в печати).

19. Гусяков В.К. Магнитудно-географический критерий прогнозирования цунами: анализ практики применения за 1958 – 2009гг. // Сейсмические приборы, 2010, № 3 (в печати).

- 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 мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы и гидросферы

UT4ETOB)		
41.1.	<i>Номер проекта</i> 09-05-00294	
41.2.1.	Первый автор Бейзель С.А.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН	
41.2.2.	Первый автор (для издания библиографических сборников) Бейзель С.А.	
41.3.1.	<i>Другие авторы</i> Хакимзянов Г.С.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН Чубаров Л.Б.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН	
41.3.2.	Другие авторы (для издания библиографических сборников) Хакимзянов Г.С. Чубаров Л.Б.	
41.4.	Название публикации Моделирование поверхностных волн, порождаемых подводным оползнем, движущимся по пространственно неоднородному склону	
41.5.	Язык публикации русский	
41.6.1.	Полное название издания Вычислительные технологии	
41.6.2.	ISSN издания 1560-7534	
41.7.	Вид публикации статья в журнале	
41.8.	Завершенность публикации опубликовано	
41.9.	Год публикации 2010	
41.10.1	Том издания 15	
41.10.2	Номер издания 3	
41.11.	Страницы 39-51	
41.12.1.	Полное название издательства ИВТ СО РАН	
41.12.2.	Город, где расположено издательство Новосибирск	
41.13.	<i>Краткий реферат публикации</i> Рассмотрена задача численного моделирования поверхностных волн, генерируемых дви- жением затопленного оползня по пространственно неоднородному склону. Представлен закон движения оползня под действием сил тяжести, трения, выталкивания и гидродина- мического сопротивления окружающей жидкости с учетом эффекта присоединенной мас- сы. Обсуждаются результаты вычислительных экспериментов для модельной акватории.	
41.14.	Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи	
41.15.	Общее число ссылок в списке использованной литературы 9	

ОТЧЕТ	OB)
41.1.	<i>Номер проекта</i> 09-05-00294
41.2.1.	Первый автор Бейзель С.А.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
41.2.2.	Первый автор (для издания библиографических сборников) Бейзель С.А.
41.3.1.	Другие авторы Хакимзянов Г.С.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН Чубаров Л.Б.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
41.3.2.	Другие авторы (для издания библиографических сборников) Хакимзянов Г.С. Чубаров Л.Б.
41.4.	Название публикации Пространственные эффекты оползневого волнообразования в прибрежной зоне
41.5.	Язык публикации русский
41.6.1.	Полное название издания Труды X Всероссийской конференции "Прикладные технологии гидроакустики и гидро- физики" ГА–2010, 25.05.2010–27.05.2010
41.6.2.	ISSN издания
41.7.	Вид публикации статья в сборнике
41.8.	Завершенность публикации опубликовано
41.9.	Год публикации 2010
41.10.1	Том издания
41.10.2	Номер издания
41.11.	Страницы 247–250
41.12.1.	Полное название издательства Наука
41.12.2.	Город, где расположено издательство Санкт-Петербург
41.13.	Краткий реферат публикации Представлены результаты численного моделирования оползневого механизма генерации поверхностных волн с учетом пространственной неоднородности рельефа подводного склона. Оползень представляется квазинедеформируемым твердым телом, движущимся по склону произвольного рельефа под слоем несжимаемой невязкой тяжелой жидкости. Моделирование волновых процессов выполняется в рамках уравнений теории мелкой во-

ды с помощью конечно-разностной схемы Мак-Кормака на равномерной сетке. Обсуждаются вопросы волнообразования на модельных и реальных рельефах в зависимости от ряда параметров задачи.

- 41.14. Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи
- *41.15.* Общее число ссылок в списке использованной литературы 1

ОТЧЕТ	OB)
41.1.	Номер проекта 09-05-00294
41.2.1.	Первый автор Бейзель С.А.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
41.2.2.	Первый автор (для издания библиографических сборников) Бейзель С.А.
41.3.1.	<i>Другие авторы</i> Гусяков В.К.; 1; Россия; Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН Чубаров Л.Б.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
41.3.2.	Другие авторы (для издания библиографических сборников) Гусяков В.К. Чубаров Л.Б.
41.4.	Название публикации Численное исследование проявлений удаленных цунами у дальневосточного побережья России
41.5.	Язык публикации русский
41.6.1.	Полное название издания Труды X Всероссийской конференции "Прикладные технологии гидроакустики и гидро- физики" ГА–2010, 25.05.2010–27.05.2010
41.6.2.	ISSN издания
41.7.	Вид публикации статья в сборнике
41.8.	Завершенность публикации опубликовано
41.9.	Год публикации 2010
41.10.1	Том издания
41.10.2	Номер издания
41.11.	Страницы 250—253
41.12.1.	Полное название издательства Наука
41.12.2.	Город, где расположено издательство Санкт-Петербург
41.13.	<i>Краткий реферат публикации</i> Содержание основано на результатах численного моделирования цунами, порожденных удалении ми относители но Дали невосточного побережи я России сейсминескими источник-

содержание основано на результатах численного моделирования цунами, порожденных удаленными относительно Дальневосточного побережья России сейсмическими источниками, примыкающими к Тихоокеанскому побережью Америки. Обсуждаются особенности распространения волновой энергии от ряда модельных сейсмических источников, часть которых может быть сопоставлена с известными историческими событиями. Анализ показал, что наиболее опасным для защищаемого побережья является источник, моделирующий Чилийское цунами 1960-го года, когда основная часть энергии направилась к Японии, Курилам и Камчатке.

- 41.14. Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи
- 41.15. Общее число ссылок в списке использованной литературы 2

- 41.1. Номер проекта 09-05-00294
- 41.2.1. Первый автор Андреев А.К.; 2; Россия; ГУП НПО "Тайфун"
- 41.2.2. Первый автор (для издания библиографических сборников) Андреев А.К.
- 41.3.1. Другие авторы Бейзель С.А.; 1; Россия; Новосибирский государственный университет Гусяков В.К.; 1; Россия; Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН Зыскин И.А.; 2; Россия; ГУП НПО "Тайфун" Камаев Д.А.; 2; Россия; ГУП НПО "Тайфун" Кузьминых И.П.; 2; Россия; ГУП НПО "Тайфун" Чубаров Л.Б.; 1; Россия; Новосибирский государственный университет Шокин Ю.И.; 2; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 41.3.2. Другие авторы (для издания библиографических сборников)

Бейзель С.А. Гусяков В.К. Зыскин И.А. Камаев Д.А. Кузьминых И.П. Чубаров Л.Б. Шокин Ю.И.

- 41.4. Название публикации Алгоритмическое и программное обеспечение российской автоматизированной информационно-управляющей системы предупреждения о цунами
- 41.5. Язык публикации русский
- 41.6.1. Полное название издания
 Тезисы II Международной конференции «Геоинформатика: технологии, научные проекты», 20–25 сентября 2010 г., Барнаул
- 41.6.2. ISSN издания
- 41.7. Вид публикации тезисы доклада
- 41.8. Завершенность публикации опубликовано
- 41.9. Год публикации 2010
- 41.10.1 Том издания
- 41.10.2 Номер издания
- 41.11. Страницы 18-19
- 41.12.1. Полное название издательства АРТ
- 41.12.2. Город, где расположено издательство Барнаул
- 41.13. Краткий реферат публикации
 - В докладе излагаются результаты разработки алгоритмического и программного обеспечения российской автоматизированной информационно-управляющей системы предупреждения о цунами. В частности, Институт вычислительных технологий СО РАН созданы алгоритмы и программы для определения характеристик проявления волн цунами у Дальневосточного побережья РФ методами математического (численного) моделирования. Результаты этого моделирования предназначены для заполнения информационных хранилищ с целью последующего использования в ходе анализа возможных сценариев проявления волн цунами у защищаемого побережья.
- 41.14. Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи
- 41.15. Общее число ссылок в списке использованной литературы

ОТЧЕТ	OB)
41.1.	Номер проекта 09-05-00294
41.2.1.	Первый автор Бейзель С.А.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
41.2.2.	Первый автор (для издания библиографических сборников) Beisel S.A.
41.3.1.	Другие авторы Хакимзянов Г.С.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН Чубаров Л.Б.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН Шокин Ю.И.; 2; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
41.3.2.	Другие авторы (для издания библиографических сборников) Khakimzyanov G.S., Chubarov L.B., Shokin Yu.I.
41.4.	Название публикации Modeling of the landslide mechanism of tsunami wave generation near the Mediterranean coast of Israel
41.5.	Язык публикации русский
41.6.1.	Полное название издания Zbornik radova Konferencije MIT 2009 ("Mathematical and Informational Technologies 2009", 27.08.2009–31.08.2009, Kopaonik, Serbia; 31.08.2009–05.09.2009, Budva, Montenegro)
41.6.2.	ISSN издания
41.7.	Вид публикации статья в сборнике
41.8.	Завершенность публикации опубликовано
41.9.	Год публикации 2010
41.10.1	Том издания
41.10.2	Номер издания
41.11.	Страницы 42–45
41.12.1.	Полное название издательства University of Pristina, Prirodno-matematicki fakultet
41.12.2.	Город, где расположено издательство Косовска Митровица
41.13.	<i>Краткий реферат публикации</i> Представлены результаты численного моделирования поверхностных волн, генерируе-

- Представлены результаты численного моделирования поверхностных волн, генерируемых движением подводного деформируемого тела, движущегося вдоль склона, имитирующего реальный прибрежный рельеф. В рамках уравнений теории мелкой воды выполнены многопараметрические вычисления по определению зависимости процесса волнообразования от начального заглубления оползня, его длины и толщины, относительной плотности, силы трения и геометрии подводного склона. Основное внимание уделено влиянию неоднородностей донной поверхности, имитирующих особенности реальных подводных рельефов.
- 41.14. Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи
- *41.15.* Общее число ссылок в списке использованной литературы 1

OTTET	OB)
41.1.	<i>Номер проекта</i> 09-05-00294
41.2.1.	Первый автор Гусяков В. К.; 1; Россия; ИВМ и МГ СО РАН
41.2.2.	Первый автор (для издания библиографических сборников) Gusiakov V.K.
41.3.1.	Другие авторы Ляпидевская З.А.; 1; Россия; ИВМ и МГ СО РАН
41.3.2.	Другие авторы (для издания библиографических сборников) Lyapidevskaya Z.A.
41.4.	Название публикации Expert database on the Earth impact structures
41.5.	Язык публикации английский
41.6.1.	Полное название издания Proceedings of the International Conference «Asteroid-Comet Hazard-2009» (ACH-2009). September 21–25, 2009, St. Petersburg, Russia
41.6.2.	ISSN издания
41.7.	Вид публикации статья в сборнике
41.8.	Завершенность публикацииопубликовано
41.9.	Год публикации 2010
41.10.1	Том издания
41.10.2	Номер издания
41.11.	Страницы 228-232
41.12.1.	Полное название издательства Nauka
41.12.2.	Город, где расположено издательство Санкт-Петербург
41.13.	Краткий реферат публикации Рассматривается структура и содержание базы данных для импактных структур Земли, а также возможности визуализация ее содержания с помощью графической оболочки PDM_IMP, представляющей удобный пользовательский интерфейс для работы с данны-

PDM_IMP, представляющей удобный пользовательский интерфейс для работы с данными этого типа. Основой базы данных является Каталог импактных структур, содержащий около 1000 структур, относимых к настоящему времени с разной степенью достоверности к импактным образованиям. Количество полей каталога равно 50-ти, и они отражают все многообразие накопленных в литературе данных о характеристиках импактных кратеров. Графическая оболочка разработана специально для данного импактного каталога. Она имеет вид меню с кнопками и представляет пользователю удобные возможности для выборки и визуализации данных, а также средства их обработки и может функционировать на любом персональном компьютере с использованием операционной системы Windows.

- 41.14. Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи
- 41.15. Общее число ссылок в списке использованной литературы

UT IET	
41.1.	Номер проекта 09-05-00294
41.2.1.	Первый автор Федотова З.И.; 2; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
41.2.2.	Первый автор (для издания библиографических сборников) Федотова З.И.
41.3.1.	<i>Другие авторы</i> Хакимзянов Г.С.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
41.3.2.	Другие авторы (для издания библиографических сборников) Хакимзянов Г.С.
41.4.	<i>Название публикации</i> Нелинейно-дисперсионные уравнения мелкой воды на вращающейся сфере
41.5.	Язык публикации русский
41.6.1.	Полное название издания Вычислительные технологии
41.6.2.	ISSN издания 1560-7534
41.7.	<i>Вид публикации</i> статья в журнале
41.8.	Завершенность публикации опубликовано
41.9.	Год публикации 2010
41.10.1	Том издания 15
41.10.2	Номер издания 3
41.11.	Страницы 135-145
41.12.1.	Полное название издательства Институт вычислительных технологий СО РАН
41.12.2.	Город, где расположено издательство Новосибирск
41.13.	Краткий реферат публикации Получены нелинейно-дисперсионные уравнения мелкой воды на сфере, которые могут использоваться при моделировании распространения волн цунами на большие расстоя- ния с учетом вращения Земли, сферичности поверхности океана и дисперсии волн
41.14.	Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи
41.15.	Общее число ссылок в списке использованной литературы 23

OI ILI	
41.1.	Номер проекта 09-05-00294
41.2.1.	Первый автор Федотова З.И.; 2; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
41.2.2.	Первый автор (для издания библиографических сборников) Fedotova Z.I.
41.3.1.	<i>Другие авторы</i> Хакимзянов Г.С.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
41.3.2.	Другие авторы (для издания библиографических сборников) Khakimzyanov G.S.
41.4.	<i>Название публикации</i> Nonlinear-dispersive shallow water equations on a rotating sphere
41.5.	Язык публикации английский
41.6.1.	Полное название издания Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling
41.6.2.	ISSN издания
41.7.	Вид публикации статья в журнале
41.8.	Завершенность публикации опубликовано
41.9.	Год публикации 2010
41.10.1	Том издания 25
41.10.2	Номер издания 1
41.11.	Страницы 15-26
41.12.1.	Полное название издательства de Gruyter
41.12.2.	Город, где расположено издательство Berlin
41.13.	Краткий реферат публикации Получены нелинейно-дисперсионные уравнения мелкой воды на сфере, которые могут использоваться при моделировании распространения волн цунами на большие расстоя- ния с учетом вращения Земли, сферичности поверхности океана и дисперсии волн
41.14.	Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи
41.15.	Общее число ссылок в списке использованной литературы 22

- 41.1. Номер проекта 09-05-00294
- 41.2.1. Первый автор Гусяков В.; 1; Россия; ИВМ и МГ СО РАН
- 41.2.2. Первый автор (для издания библиографических сборников) Gusiakov, V.
- 41.3.1. Другие авторы Эббот, Д; 2; США; ; Бриант Е; 2; США; ; Массе В; 2; США; ; Бриджер Д; 2; США; ;
- 41.3.2. Другие авторы (для издания библиографических сборников) Abbott, D. Bryant, E. Masse, W. Breger D.
- *41.4. Название публикации* Mega Tsunami of the World Oceans: Chevron Dune Formation, Micro-Ejecta, and Rapid Climate Change as the Evidence of Recent Oceanic Bolide Impacts
- 41.5. Язык публикации английский
- *41.6.1.* Полное название издания Geophysical Hazards: Minimizing Risk, Maximizing Awareness
- 41.6.2. ISSN издания
- 41.7. Вид публикации монография
- 41.8. Завершенность публикации опубликовано
- 41.9. Год публикации 2010
- 41.10.1 Том издания
- 41.10.2 Номер издания
- 41.11. Страницы 197-229
- *41.12.1. Полное название издательства* Springer Science Business Media V.B.
- 41.12.2. Город, где расположено издательство Berlin
- 41.13. Краткий реферат публикации

Статья посвящена анализу возможных геофизических и геологических последствий, сопровождающих падение в океан крупных комет и астероидов, включая эффекты воздействия на берег возникающих при этом волн цунами. Рассматриваются два возможных сценария, имевших место при падении в юго-западной части Индийского океана кометы около 2800 лет до н.э. и двойному кометному удару в заливе Карпентария (Северная Австралия) в 536 году н.э. Свидетельств в пользу реальности обоих сценариев включают в себя (1) обнаружение подводных кратеров в указанных районах (29-км кратер Буркле в 1500 км юго-восточнее Мадагаскара, 18-км кратер Канмаре и 12-км кратер Таббан в юговосточной части залива Карпентария), (2) наличие развитых шевронных дюн на ближайших к кратерам участках побережья о-ва Мадагаскар и залива Карпентария, (3) присутствия высокомагнитных микросферул, тектитов со следами абляции, стекловидных микрочастиц, (4) повышенное содержание Fe, Cr, Ni в верхних частях осадочных колонок вблизи предполагаемых кратеров.

- 41.14. Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи
- 41.15. Общее число ссылок в списке использованной литературы

- *41.1. Номер проекта* 09-05-00294
- 41.2.1. Первый автор Гусяков В.К.; 1; Россия; ИВМ иМГ СО РАН
- 41.2.2. Первый автор (для издания библиографических сборников)
- 41.3.1. Другие авторы Гусяков В.К.
- 41.3.2. Другие авторы (для издания библиографических сборников)
- 41.4. Название публикации Магнитудно-географический критерий прогнозирования цунами: анализ практики применения за 1958-2009гг.
- 41.5. Язык публикации русский
- 41.6.1. Полное название издания Сейсмические приборы
- 41.6.2. ISSN издания
- 41.7. Вид публикации статья в сборнике
- 41.8. Завершенность публикации принято в печать
- 41.9. Год публикации 2010
- 41.10.1 Том издания
- 41.10.2 Номер издания
- 41.11. Страницы
- *41.12.1. Полное название издательства* Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН
- 41.12.2. Город, где расположено издательство Москва
- 41.13. Краткий реферат публикации

В статье рассматриваются итоги работы службы за истекшие 52 года по прогнозированию цунами от подводных земле трясений, происшедших в акватории Курило-Камчатской зоны, Японского и Охотского морей. Уточнение магнитудногеографического критерия является одним из основных направлений по совершенствованию службы предупреждения о цунами, действующей на Дальневосточном побережье РФ. Основные направления этой работы состоят в тщательном анализе статистики тревог, выпущенных службой за период ее существования (с 1958 года), определение причин ложных тревог и пропусков событий, определения границ цунамигенных зон, возникновение цунами в которых представляет опасность для Дальневосточного побережья РФ, выбора пороговых значений магнитуд по каждой зоне, оценке ожидаемого отношения между оправдавшимися/пропущенными/ложными тревогами, определении степени влияния других параметров очага (глубина, механизм), оценке вероятности возникновения цунами несейсмического происхождения.

- 41.14. Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи
- 41.15. Общее число ссылок в списке использованной литературы

- *41.1. Номер проекта* 09-05-00294
- 41.2.1. Первый автор Гусяков В.К.; 1; Россия; ИВМ и МГ СО РАН
- 41.2.2. Первый автор (для издания библиографических сборников) Gusiakov V.K.
- 41.3.1. Другие авторы
- 41.3.2. Другие авторы (для издания библиографических сборников)
- *41.4. Название публикации* Relationship of tsunami intensity to source earthquake magnitude as retrieved from historical data
- 41.5. Язык публикации английский
- *41.6.1. Полное название издания* Pure and Applied Geophysics
- 41.6.2. ISSN издания
- 41.7. Вид публикации статья в продолжающемся издании
- 41.8. Завершенность публикации принято в печать
- 41.9. Год публикации 2010
- 41.10.1 Том издания
- 41.10.2 Номер издания
- 41.11. Страницы
- 41.12.1. Полное название издательства Springer
- 41.12.2. Город, где расположено издательство Berlin
- 41.13. Краткий реферат публикации

В статье на основе полного исторического каталога наблюдений цунами исследуется зависимость интенсивности цунами от магнитуды подводного землетрясения. Интенсивность цунами определяется по шкале Соловьева-Имамуры на основе данных о распределении высот цунами на ближайшем побережье. Анализируются графики зависимости интенсивности цунами от магнитуды Ms и Mw. Выполненный анализ показывает, что разброс фактических данных оказывается весьма значительным, и для интервала магнитуд 7.0 – 8.0, котором происходит большинство цунамигенных землетрясений, он превышает 6 баллов по шкале интенсивности, что соответствует различию в 64 раза в средних высотах цунами на побережье. Результаты анализа подтверждают важный для службы предупреждения о цунами вывод о том, что по магнитуде землетрясения очень трудно, если вообще возможно, прогнозировать интенсивность возникшего цунами. Можно только констатировать общую тенденцию роста интенсивности цунами с увеличением магнитуды. Обсуждаются возможные причины разброса интенсивности цунами для землетрясений с близкими магнитудами.

- 41.14. Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи
- 41.15. Общее число ссылок в списке использованной литературы

Форма 510. ЗАЯВКА НА 2011 г.

- *10.1. Номер проекта* 09-05-00294
- 10.2. Коды классификатора 05-513 01-201
- 10.3. Ключевые слова волны цунами, математическое моделирование, нелинейно-дисперсионные модели, цунамирайонирование, оползневый механизм генерации волн
- 10.4. Цели очередного годичного этапа, связь с основной задачей проекта

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 оползневым механизмом.

4. Завершение работ по проекту, включающее содержательную интерпретацию результатов, всесторонний анализ совокупности результатов моделирования, сопоставление с историческими и натурными данными, формирование практических рекомендаций.

10.5. Ожидаемые в конце 2011 г. 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. Результат будет получен с помощью серийных вычислительных экспериментов на расчетных сетках высокого пространственного разрешения с использованием методики вложенных расчетных подобластей (методика «заморозки»).

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. С использованием обновленного программного и алгоритмического инструментария будут проведены оригинальные 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 оползневым механизмом.

4. Будут завершены содержательная интерпретация результатов моделирования, их сопоставление с историческими и натурными данными, будут сформулированы практические рекомендации.

- 10.6. Общий объем финансирования на 2011 год 700000
- 10.7.1. Сроки проведения в 2011 г. экспедиции по тематике проекта
- 10.7.2. Ориентировочная стоимость экспедиции (в руб.)
- 10.7.3. Регион проведения экспедиции
- 10.7.4. Название района проведения экспедиции
- 10.8. Планируемая численность участников проекта в 2011 году
 - 1. Чубаров Леонид Борисович
 - 2. Хакимзянов Гаяз Салимович
 - 3. Гусяков Вячеслав Константинович
 - 4. Бейзель Софья Александровна
 - 5. Худякова Виктория Константиновна

- Чубаров Дмитрий Леонидович
 Гагарина Елена Витальевна
 Гусев Олег Игоревич
 Соммер Анна Федоровна