

НОМЕР ПРОЕКТА <b>06-05-64869</b>		УЧЕТНАЯ КАРТОЧКА
НАЗВАНИЕ ПРОЕКТА <b>Исследование особенностей генерации оползнями поверхностных волн в прибрежных зонах океана с помощью гидродинамических моделей, с улучшенными дисперсионными характеристиками</b>		
ОБЛАСТЬ ЗНАНИЯ <b>05 - науки о земле</b>		КОД(Ы) КЛАССИФИКАТОРА <b>05-513 01-201</b>
ВИД КОНКУРСА <b>а - Инициативные проекты</b>		
ФАМИЛИЯ, ИМЯ, ОТЧЕСТВО РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА <b>Чубаров Леонид Борисович</b>		ТЕЛЕФОН РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА <b>3833331882.</b>
ПОЛНОЕ НАЗВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ, ГДЕ ВЫПОЛНЯЕТСЯ ПРОЕКТ <b>Институт вычислительных технологий СО РАН</b>		
ПОЛНОЕ НАЗВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ, ЧЕРЕЗ КОТОРУЮ ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ ФИНАНСИРОВАНИЕ <b>Институт вычислительных технологий СО РАН</b>		
ОБЪЕМ СРЕДСТВ, ФАКТИЧЕСКИ ПОЛУЧЕННЫХ ЗА 2008 г. <b>400000 руб.</b>		
ЧИСЛО УЧАСТНИКОВ ПРОЕКТА (включая руководителя) <b>8</b>	ЧИСЛО УЧАСТНИКОВ, ИМЕЮЩИХ УЧЕНУЮ СТЕПЕНЬ <b>4</b>	ЧИСЛО МОЛОДЫХ (до 35 лет включительно) УЧАСТНИКОВ <b>5</b>
<b>Федотова Зинаида Ивановна</b>		
<b>Хакимзянов Гаяз Салимович</b>		
<b>Бейзель Софья Александровна</b>		
<b>Елецкий Станислав Викторович</b>		
<b>Комаров Виктор Анатольевич</b>		
<b>Гагарина Елена Витальевна</b>		
<b>Бабайлов Вадим Валерьевич</b>		
ПОДПИСЬ РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА		ДАТА ПОДАЧИ ОТЧЕТА <b>11.01.2009</b>
<b>ПРОХОЖДЕНИЕ ОТЧЕТА (заполняется в РФФИ)</b>		
РЕКОМЕНДАЦИЯ ЭКСПЕРТНОГО СОВЕТА <b>Проект прошел полный цикл экспертизы отчета и к финансированию: - рекомендован - не рекомендован (ненужный вариант зачеркнуть)</b>		ПРЕДСЕДАТЕЛЬ ЭКСПЕРТНОГО СОВЕТА
РЕШЕНИЕ СОВЕТА ФОНДА <b>По результатам рассмотрения на заседании Совета Фонда проект к финансированию: - принят - не принят (ненужный вариант зачеркнуть)</b>		ПРЕДСЕДАТЕЛЬ СОВЕТА ФОНДА

## ОТЧЕТ ЗА 2008 ГОД ПО ПРОЕКТУ РФФИ 06-05-64869-а

### Форма 501. КРАТКИЙ НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ

1.1. *Номер проекта*

06-05-64869

*Руководитель проекта*

1.2. Чубаров Леонид Борисович

*Название проекта*

1.3. Исследование особенностей генерации оползнями поверхностных волн в прибрежных зонах океана с помощью гидродинамических моделей, с улучшенными дисперсионными характеристиками

1.4. *Вид конкурса*

а - Инициативные проекты

1.5. *Год представления отчета*

2009

1.6. *Вид отчета*

итоговый (2006-2008)

*Аннотация*

В ходе выполнения проекта основные усилия были направлены на разработку математического инструментария для моделирования оползневого механизма генерации волн цунами. Были рассмотрены также и сопутствующие явления, такие как накат порожденных движением оползня волн на берег, а также стоковый механизм генерации волн, связанный с образованием трещин в толще дна и сопутствующим изменением структуры донных пород при землетрясениях в прибрежной зоне.

Исполнителями создана иерархия математических моделей волновой гидродинамики, учитывающих динамику донной поверхности, и соответствующие вычислительные алгоритмы. Для повышения достоверности результатов моделирования предложены и реализованы алгоритмы построения криволинейных сеток, адаптирующихся к динамически изменяющемуся рельефу дна и линии уреза. Разработаны, реализованы и проверены алгоритмы расчета на этих сетках.

1.7. В качестве моделей движения оползня использованы простейшая модель движения твердого тела по подстилающей поверхности, а также модель, в которой оползень представляется жидкостью со специальными свойствами. Упомянутая выше совокупность математических моделей волновой гидродинамики наряду с полными моделями содержит ряд приближенных, в который включены не только классические модели мелкой воды (линейный и нелинейный варианты), но и модели, учитывающие дисперсию волн как в линейном, так и в нелинейном приближениях.

Для оценки диапазонов применения моделей различного порядка гидродинамической аппроксимации выполнено их взаимное сопоставление и сравнение с данными лабораторных экспериментов, выполненных в сотрудничестве со специалистами НИИ 26 МО РФ.

С помощью содержательных вычислительных экспериментов определены зависимости основных характеристик порождаемых волновых режимов от законов движения оползня и его геометрических параметров. Результаты исследования стокового механизма генерации волн цунами сопоставлялись с результатами

лабораторных экспериментов, проведенных в ИМГиГ ДВО РАН. Такое сопоставление позволило оценить возможности разработанных моделей и алгоритмов.

Предложена и реализована методика исследований, предусматривающая постановку и решение последовательно усложняющихся задач от простейших модельных одномерных (в плане) до задач, учитывающих реальное пространственное распределение рельефа дна акватории и топографии суши. Эта методика, опробованная на задачах наката волн на фрагмент побережья Бенгальского залива и генерации волн оползнем в акваториях Восточного Средиземноморья, позволила выявить базовые, независимые от неоднородности рельефа, характеристики процесса и тонкие эффекты, порождаемые особенностями реального рельефа донной поверхности.

*Полное название организации, где выполняется проект*

1.8. Институт вычислительных технологий СО РАН

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

*Подпись руководителя проекта*

## Форма 502. КРАТКИЙ НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

2.1. *Номер проекта* 06-05-64869

2.2. *Руководитель проекта* Chubarov Leonid Borisovich

*Название проекта*

2.3. Study of the process of generation of surface waves by landslides in the near-shore areas of the ocean using hydrodynamic models with improved dispersion characteristics

2.4. *Год представления отчета*

2009

2.5. *Вид отчета*

ИТОГОВЫЙ (2006-2008)

*Аннотация*

In the course of the project implementation main efforts were directed to the development of mathematical instrument for modeling landslide mechanism of tsunami wave generation.

Accompanying phenomena were also analyzed such as run-up of waves, generated by the landslide, and drainage mechanism of wave generation, associated with bottom shakes formation by earthquakes in the near-shore zone.

The hierarchy of wave hydrodynamic models, accounting for bottom dynamics, and of associated computational algorithms is created. To improve reliability of simulated results algorithms are suggested and implemented of generation of curvilinear grids adapting to dynamically changing bottom relief and shore horizon. Algorithms of computation on such grids are developed, implemented and verified.

As models of landslide movement, the simplest model of rigid body movement over the underlying surface, as well as model with landslide in terms of liquid with special properties were utilized. The set of hydrodynamic models mentioned above contains complete models and a number of approximated ones, such as classical linear and nonlinear models of shallow water and models with linear and nonlinear dispersion.

2.6. To bound the range of applicability of models with different orders of hydrodynamic approximation, their comparison was done with each other and with results of laboratory experiments, executed in cooperation with specialists of Research Institute No 26 of MD RF.

By comprehensive numerical experiments, the dependence of main properties of generated wave regimes on motion law and geometrical parameters of the landslide is defined. The results of investigation of drainage mechanism of tsunami wave generation are compared with results of laboratory experiments, carried out at the IMGG FEB RAS. Such comparison enabled to estimate abilities of models and algorithms developed.

The research methodology is suggested and implemented of the setting and solving of gradually becoming more complicated problems, from the simplest one-dimensional (in plane) problems to the ones, accounting for the real spatial distribution of bottom relief and dry land topography. Such technique was verified on the problems of wave run-up on the coast of Bay of Bengal and on the problems of wave generation by landslides in the East part of the Mediterranean Sea, that enabled to identify process characteristics, which are not dependent on bottom irregularity, and effects generated by features of real bottom relief.

*Полное название организации, где выполняется проект*

2.7. Institute of Computational Technologies SB RAS

*Подпись руководителя проекта*

## Форма 503. РАЗВЕРНУТЫЙ НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ

- 3.1. *Номер проекта*  
06-05-64869  
*Название проекта*
- 3.2. Исследование особенностей генерации оползнями поверхностных волн в прибрежных зонах океана с помощью гидродинамических моделей, с улучшенными дисперсионными характеристиками  
*Коды классификатора, соответствующие содержанию фактически проделанной работы*
- 3.3. *работы*  
05-513 01-201  
*Объявленные ранее (в исходной заявке) цели проекта на 2008 год*  
Цель заключительного этапа 2008 г. состояла в завершение разработки вычислительного инструментария для исследования оползневого механизма генерации волн в прибрежной зоне с учетом нелинейных и дисперсионных эффектов и в проведении содержательного вычислительного моделирования волновых режимов, возникающих в близких к реальным акваториях для определения наиболее важных характеристик исследуемого процесса. В ходе планируемых работ предполагалось использовать предложенные в 2007 г. подходы к повышению качества, точности и достоверности численного моделирования. На этапе 2008 г. предполагалось завершить тестирование методик моделирования оползневого механизма генерации волн в рамках полной гидродинамической модели с использованием адаптивных сеток, определить эффективные способы управления свойствами этих сеток и соответствующих алгоритмов для обеспечения желательной точности результатов.  
Аналогичную работу планировалось провести и для двумерных в плане моделей, основанных на приближенных гидродинамических моделях.  
В плане работы значилось создание версии вычислительных алгоритмов, предназначенных для совместного моделирования генерации волн оползнем и наката этих волн, на побережье модельных и реальных акваторий.  
Для упомянутых «плановых» моделей предполагалось разработать вычислительные методики моделирования изучаемых явлений с использованием локально вложенных измельчающихся сеток.  
Содержательные вычислительные эксперименты планировалось провести для совокупности модельных акваторий с целью определения зависимости волновых характеристик от расположения оползня на близких к реальным структурах рельефа дна и от специфических особенностей движения оползней.
- 3.4. *Степень выполнения поставленных в проекте задач*  
Цели этапа 2008 г. достигнуты, сформулированные задачи в целом выполнены.  
*Полученные за отчетный период важнейшие результаты*  
Обнаруженная на этапе 2007 г. необходимость учета негидростатичности давления при моделировании оползневого механизма генерации волн привела к необходимости продолжения теоретических исследований нелинейно-дисперсионных моделей изучаемого круга явлений. В этой части на основе единого подхода получены определяющие уравнения нелинейно-дисперсионных моделей Грина-Нагди, Железняк-Пелиновского и Алешкова для случая деформирующегося или подвижного дна. Для вывода уравнений Грина-Нагди предполагалось, что
- 3.5. *Полученные за отчетный период важнейшие результаты*  
Обнаруженная на этапе 2007 г. необходимость учета негидростатичности давления при моделировании оползневого механизма генерации волн привела к необходимости продолжения теоретических исследований нелинейно-дисперсионных моделей изучаемого круга явлений. В этой части на основе единого подхода получены определяющие уравнения нелинейно-дисперсионных моделей Грина-Нагди, Железняк-Пелиновского и Алешкова для случая деформирующегося или подвижного дна. Для вывода уравнений Грина-Нагди предполагалось, что
- 3.6. *Полученные за отчетный период важнейшие результаты*  
Обнаруженная на этапе 2007 г. необходимость учета негидростатичности давления при моделировании оползневого механизма генерации волн привела к необходимости продолжения теоретических исследований нелинейно-дисперсионных моделей изучаемого круга явлений. В этой части на основе единого подхода получены определяющие уравнения нелинейно-дисперсионных моделей Грина-Нагди, Железняк-Пелиновского и Алешкова для случая деформирующегося или подвижного дна. Для вывода уравнений Грина-Нагди предполагалось, что

вертикальная компонента скорости течения является линейной функцией от вертикальной координаты, а компоненты скорости в горизонтальной плоскости от этой координаты не зависят вовсе. При выводе уравнений Железняк-Пелиновского и Алешкова сохранено то же самое предположение относительно вертикальной компоненты скорости, однако компоненты скорости в горизонтальной плоскости считаются квадратичными функциями от вертикальной координаты, а также предполагается потенциальность течения и разномасштабность процессов по вертикали и в горизонтальной плоскости. Показано, что несмотря на разные условия вывода, системы уравнений Грина-Нагди и Железняк-Пелиновского эквивалентны и являются разными формами записи одной и той же системы уравнений теории мелкой воды второго приближения.

В направлении разработки методик моделирования оползневого механизма генерации волн в рамках полной гидродинамической модели с использованием адаптивных сеток создана компьютерная программа для построения двумерных криволинейных сеток, адаптирующихся к сложной форме береговой линии водохранилища и к его батиметрии.

Значительные усилия были направлены на разработку алгоритмов и программ для совместного моделирования генерации волн оползнем и наката этих волн. Необходимость этих работ обусловлена тем, что локализация оползневых масс в прибрежных зонах акваторий приводит к тому, что уже на начальных стадиях генерации поверхностных волн движением оползня этот процесс совмещается с накатом возникшей волны на берег. Это обстоятельство требует от математических моделей и численных алгоритмов способности с одинаковой степенью адекватности воспроизводить оба явления. Надежные оценки наката можно получить только при использовании достаточно мелких расчетных сеток, подробных сведений о реальной топографии дна, использовании полных нелинейных математических моделей, что приводит к неприемлемо большим затратам машинных ресурсов и, как следствие, к невозможности исследования явления в широком диапазоне определяющих параметров. Более того, даже те немногие расчеты, которые удастся выполнить, не позволяют дать обоснованную оценку силового воздействия волн, поскольку получающаяся после решения задачи картина волновых процессов обычно оказывается настолько сложной и запутанной, что вызывает затруднения при интерпретации численных результатов.

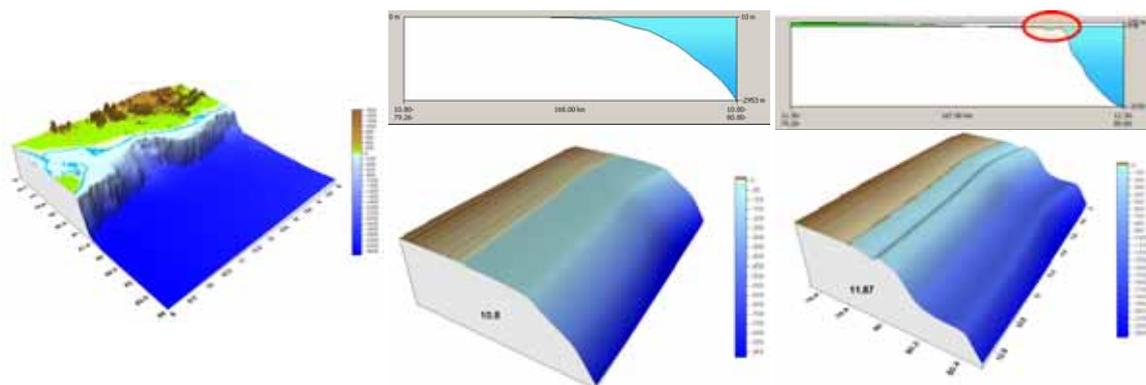
Для повышения степени достоверности результатов моделирования волновой картины в областях с реальной геометрией береговых границ исполнителями разработана методика, предусматривающая поэтапное проведение вычислительных экспериментов. При этом вначале решаются задачи в рамках приближенных моделей, с упрощенной геометрией береговой линии и упрощенной топографией дна, с использованием хорошо обоснованных численных алгоритмов.

Затем уже осуществляется переход к более полным моделям, к использованию в расчетных алгоритмах вложенных и адаптивных сеток, более сложной геометрии береговых границ. Каждый новый шаг сопровождается тщательным сопоставлением с результатами, полученными на предыдущих этапах, выявлением и интерпретацией новых закономерностей и особенностей, которые появляются в результате использования более полных моделей и алгоритмов. На таких модельных задачах выявляются базовые характеристики исследуемого явления, в дальнейшем претерпевающие детализацию и уточнение по мере

приближения к реальным условиям, определяется степень чувствительности вычислительных алгоритмов к параметрам реальных практических задач. На заключительном этапе эксперимента проводятся расчеты трансформации волн с учетом реального рельефа дна.

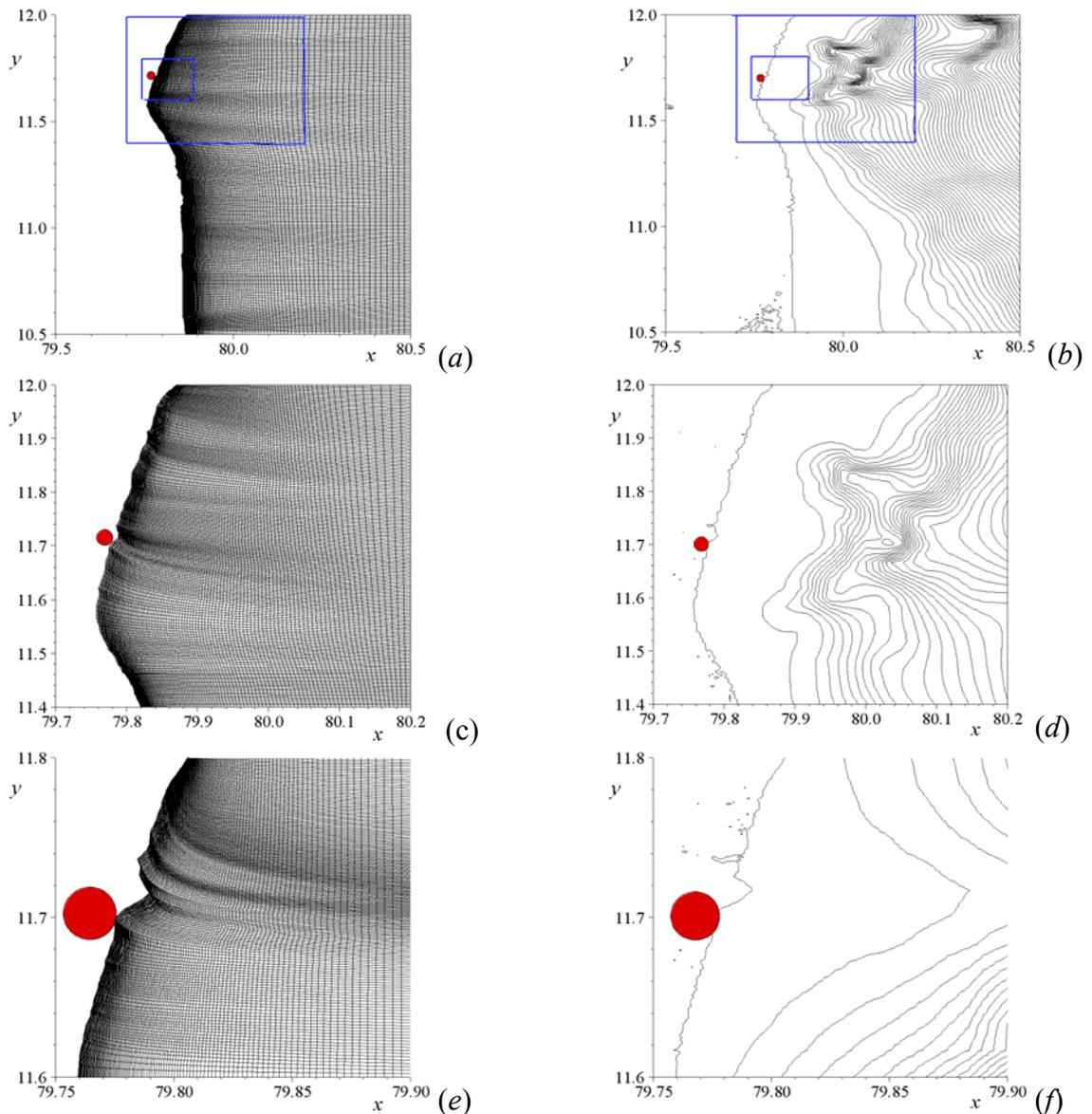
Предложенная методика реализована в ходе вычислительных экспериментов по моделированию наката волн на побережье Бенгальского залива (Рис. 1).

Эта задача вначале решалась в одномерном приближении, затем использовались двумерные модели для упрощенных топографий дна и, наконец, рассматривалась реальная ситуация. Предложенный подход облегчил интерпретацию результатов и позволил отделить реальные физические эффекты от эффектов, порожденных особенностями численных алгоритмов.



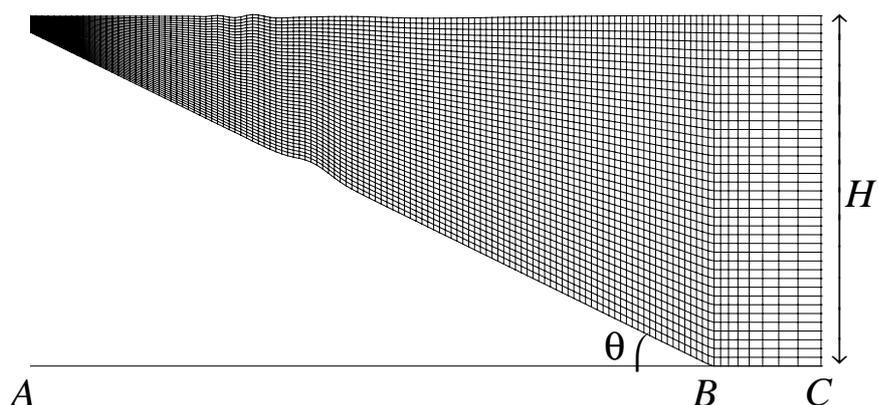
**Рис. 1.** Реальный рельеф дна, а также модельные профили и построенные на их основе рельефы дна модельных акваторий для задачи о накате волн на побережье Бенгальского залива.

Для лучшей детализации моделирования изучаемого явления процесса в непосредственной окрестности защищаемого пункта использовался метод вложенных областей, согласно которому расчет до некоторого момента времени выполнялся на сетке, покрывающей всю акваторию (Рис. 2 *a*), а полученные («замороженные») результаты служили начальными данными для последующего расчета в уменьшенной области (Рис. 2 *a*, внешний прямоугольник), содержащей защищаемые пункты на побережье. Во вложенной области использовалась сетка с прежним количеством узлов, поэтому ее шаги были мельче шагов исходной сетки. Поскольку момент «заморозки» выбирается так, чтобы к его наступлению основная волна уже находилась во вложенной области, то картина подхода волны к защищаемому пункту воспроизводилась на измельченной сетке лучше, чем на исходной. Кроме того, начиная со следующего момента «заморозки», использовалась вторая вложенная область (Рис. 2 *a*, внутренний прямоугольник), что позволило воспроизвести детальную картину в ближайшей окрестности защищаемого пункта.



**Рис. 2. Методика использования вложенных сеток для повышения детальности моделирования: (a) – сетка в исходной области, (b) – изолинии рельефа; прямоугольниками выделены две вложенные расчетные подобласти, кружочком отмечено размещение защищаемого пункта; (c), (d), (e), (f) – то же для первой и второй вложенных областей.**

В отчетном году был значительно расширен круг практических задач, решаемых в ходе содержательных вычислительных экспериментов с помощью созданного исполнителями инструментария. Так, впервые была рассмотрена задача о генерации и трансформации поверхностных волн в глубоких водохранилищах, порожденных оползнями на его береговых склонах. Изучена зависимость основных характеристик генерируемой в водохранилище волны от угла наклона дна, толщины оползня, его формы и закона движения. Созданы алгоритмы для расчета наката возникших волн на вертикальную плотину гидроэлектростанции и на участки реального побережья. Проведена серия расчетов взаимодействия волн с берегом и плотиной (Рис. 3).

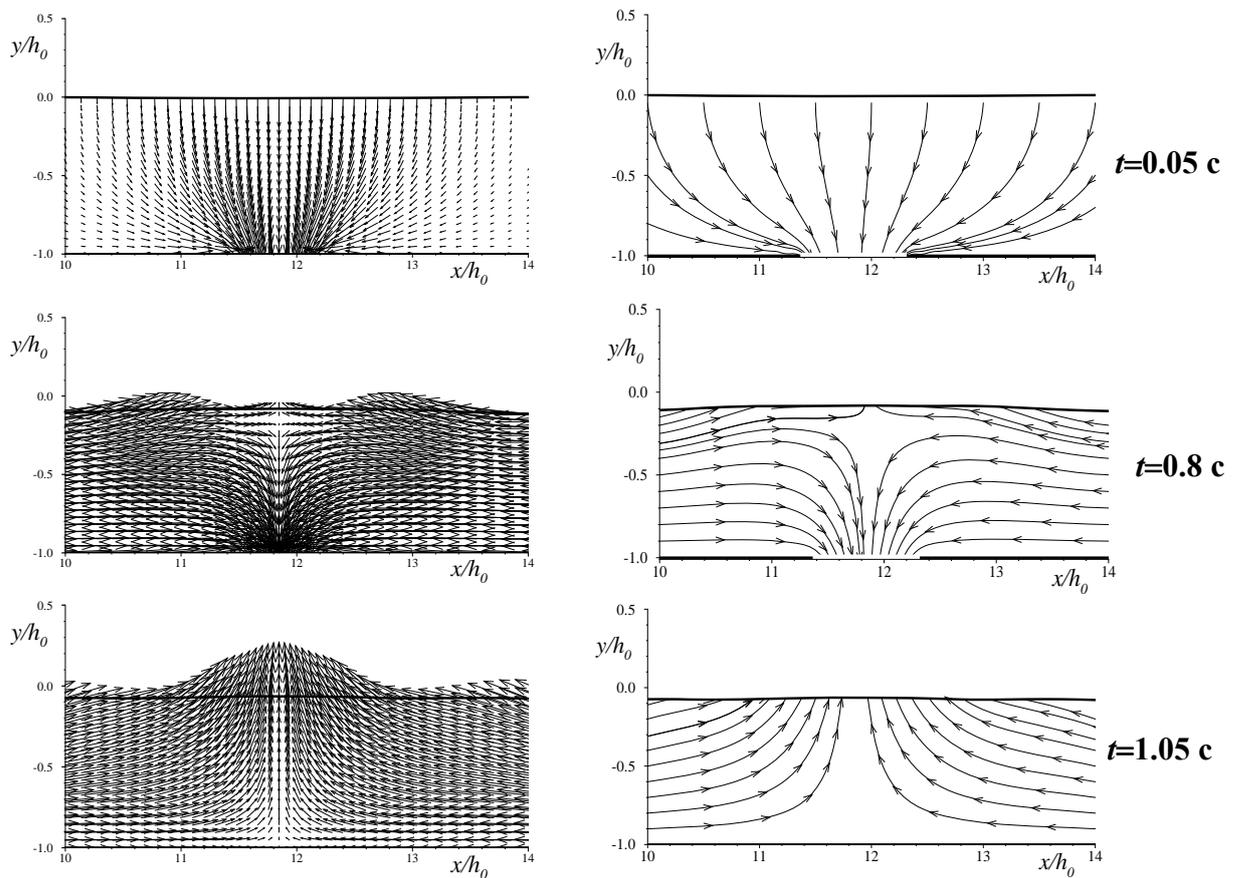


**Рис. 3.** Генерация поверхностных волн подводным оползнем, движущимся по склону дна водохранилища слева направо (плотина справа).

Начало движения затопленного оползня часто бывает связано с сейсмическими событиями даже небольшой мощности. Сопутствующим явлением при этом может быть также и трещинообразование в донных породах, запускающее стоковый механизм волнообразования. В отчетном году методами численного моделирования исследован механизм возникновения поверхностных волн в результате образования во время землетрясений трещин на дне акватории. Для этого «стокового» механизма генерации волн характерны быстротечность раскрытия и схлопывания трещин, ярко выраженная нелинейность гидродинамических процессов. Определены амплитуды возникающих волн в зависимости от объема трещин, времен их раскрытия и схлопывания.

Для моделирования процесса использованы нелинейная модель мелкой воды и нелинейная модель потенциальных течений жидкости со свободной границей. Построенные численные алгоритмы опробованы на модельной задаче о генерации волн на поверхности воды в лотке с горизонтальным дном, непроницаемым всюду, кроме щели (или системы щелей), в которую начинает стекать вода и которая остается открытой до некоторого заданного момента времени. Сравнение с известными экспериментальными данными, полученными сотрудниками ИМГиГ ДВО РАН (г. Южно-Сахалинск), показало, что созданные алгоритмы позволяют вполне адекватно описывать такие эффекты, как первоначальное понижение уровня воды над щелью с образованием в последующие моменты времени значительного возвышения, дальнейший распад этого возвышения на две волны большой амплитуды, одна из которых движется в сторону берега и может представлять существенную опасность. Показано, что если вслед за раскрытием щели происходит ее схлопывание, то амплитуда генерируемых волн может существенно увеличиться.

При образовании трещины вода устремляется в нее и образуются три области: центральная, расположенная непосредственно над щелью, в которой вектора скорости направлены вертикально вниз, и две боковых, в которых векторы скорости сначала направлены в сторону щели, но постепенно разворачиваются в горизонтальном направлении навстречу друг другу.



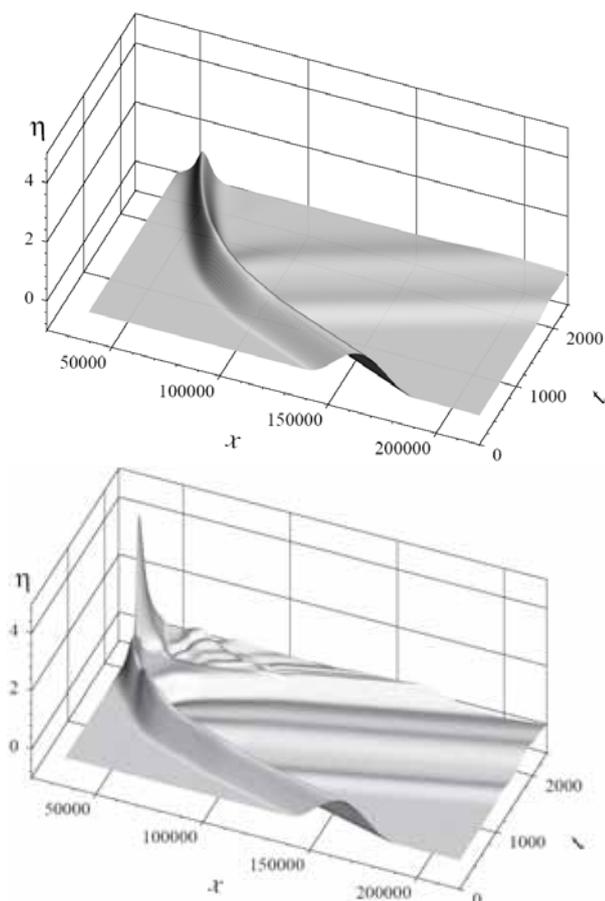
**Рис. 4. Поле вектора скорости (слева) и треки частиц жидкости (справа), рассчитанные в рамках нелинейной модели потенциальных течений жидкости со свободной границей с использованием адаптивных сеток.**

После плавного понижения уровня жидкости над щелью (Рис. 4) два боковых потока, направленных навстречу друг другу, вытесняют центральный, полностью обеспечивая расход жидкости и препятствуя дальнейшему понижению уровня непосредственно над щелью, в окрестности которой образуется волнистая поверхность с постоянным в некотором временном промежутке средним уровнем. Векторы скорости жидкости в этой области разворачиваются в направлении свободной границы, что приводит к повышению уровня жидкости непосредственно над щелью, которое распадается на две волны, расходящиеся к стенкам бассейна.

Далее над трещиной возникает более заметный всплеск, образование которого обусловлено заполнением трещины водой. Образовавшаяся над щелью одиночная волна распадается на две волны, движущиеся в противоположных направлениях навстречу отраженным от берегов волнам. Если после заполнения трещины водой происходит ее схлопывание, то выдавленная из щели вода приводит к дополнительному росту высоты всплеска и, как следствие, к опасной величине заплеска.

При исследовании явлений наката, непосредственно сопутствующих генерации оползневых цунами, на первом этапе решались модельные одномерные задачи (Рис. 1). При этом было отмечено появление последовательности отраженных от берегового склона волн, распространяющихся в мористую часть

акваторий (Рис. 5). С усложнением рельефа дна число таких волн возрастает, усложняются и их конфигурации. Наличие протяженных мелководных зон приводит к естественному замедлению скорости набегающей волны.



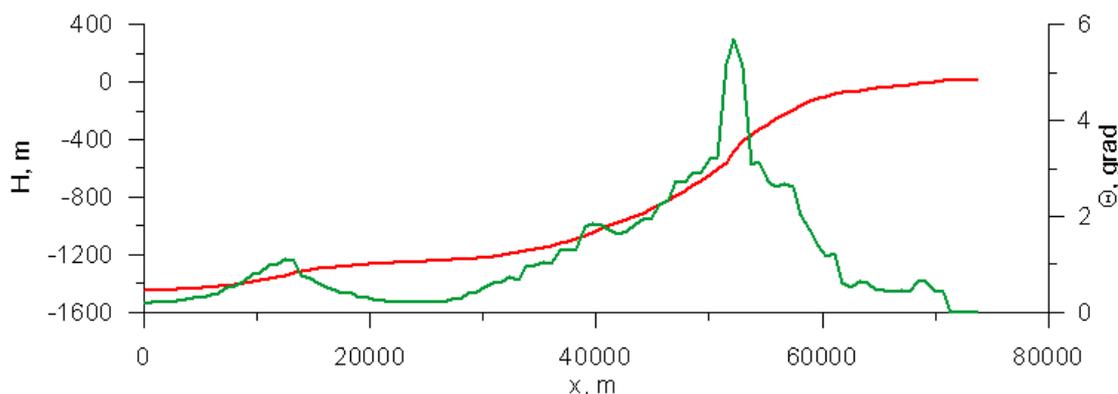
**Рис. 5. Распространение уединенной волны в первые 40 мин. в одномерных модельных акваториях.**

На следующем этапе вычислительного эксперимента определялись эффекты, связанные с двумерным характером течения в модельных акваториях (Рис. 1). Топография дна модельных двумерных акваторий получалась параллельным сдвигом по широте выбранных ранее одномерных профилей дна так, что точка уреза одномерного рельефа скользила по сглаженной линии уреза реальной акватории. Двумерность топографии приводила к рефракции волны, изменению ее высот вдоль гребня, к откату волны на одних участках побережья, тогда как в соседних еще продолжался накат, и как следствие, к сложной картине взаимодействующих между собой волн.

При моделировании наката волны ее первоначально прямолинейный фронт по мере приближения к берегу начинает искривляться и становится подобным линии уреза. На мелководье высота волны существенно увеличивается, появляется волна, отраженная от подводного склона и уходящая вправо. С этого момента фронт волны практически повторяет контур линии уреза. Кроме того, появляется вторая отраженная волна, возникшая после взаимодействия набегающей волны с крутым подводным участком, расположенным ближе к берегу.



На первом этапе исследования решались одномерные задачи в модельных акваториях, рельеф дна которых строился на базе пятого профиля (Рис. 7). Этот выбор обусловлен наличием компактного фрагмента дна с углами наклона от 4 до 6 градусов, что соответствует значениям, повышающим вероятность схода оползня даже при слабых внешних воздействиях, например, сейсмического характера (Martinez J.F. et al).



**Рис. 7. Рельеф дна вдоль пятого профиля (красная линия), зеленым цветом отрисовано распределение углов наклона донной поверхности.**

Простейший вариант задачи был сформулирован для линейного распределения глубин, в котором склон с постоянным углом наклона 1.7 градуса, начинающийся с глубины 10 метров, сопрягается с участком постоянной глубины (1230 метров) в точке, где у реального профиля угол наклона становился равен 0.5 градуса. Вблизи берега глубины, меньшие 10 метров, заменялись ступенькой глубины 10 метров (Рис. 8).

В вычислительных экспериментах использовалась простейшая модель оползня – твердое тело с гладким профилем, движущееся по заданному закону. Так как функция, задающая форму оползня, имеет бесконечный носитель, его характерная длина определялась по значению, равному 10% максимальной толщины. Это учитывалось при определении начального и конечного положения оползня в терминах координат его центра масс. Используемый в расчетах модельный оползень имел характерную длину  $L \approx 6000 - 6500$  метров, толщину  $T = 25$  метров, начальное положение его центра масс определялось координатой максимального угла наклона реального профиля  $x_{c_0} = 18050$  метров, в этой точке глубина слоя воды в случае реального профиля равнялась  $H_{c_0} = 540 - T = 515$  метрам. В случае линейного склона  $H_{c_0} = 522 - T = 497$  метров.

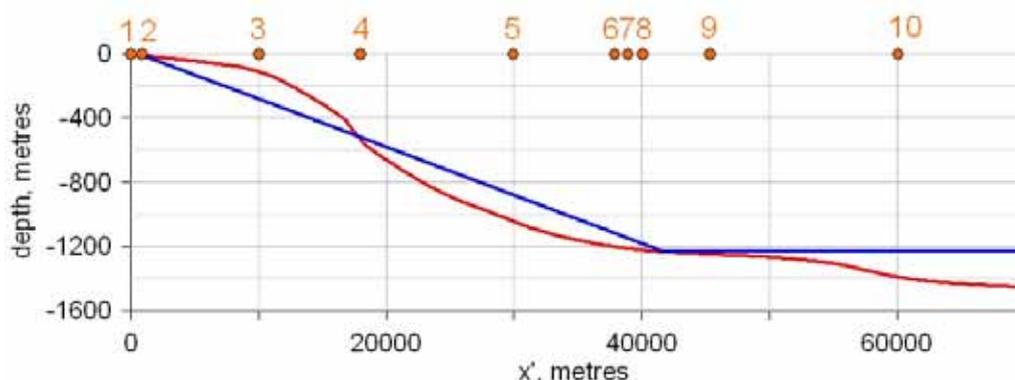


Рис. 8. Рельеф дна пятого профиля (красная кривая) и его кусочно-линейная аппроксимация (синяя линия). Красными кружочками указаны позиции размещения виртуальных мареографов.

Для задания закона движения центра масс использовалось эмпирическое соотношение, предложенное в работе Watts P., Imamura F., Grilli S. T. Comparing model simulations of three benchmark tsunami generation cases (Science of Tsunami Hazards. – 2000. – Vol. 18. – No 2. – P. 107-123) для движения оползня типа «слайд (slide)». Следуя этому закону, сначала оползень движется с ускорением

$$a = \frac{g \sin(\theta)}{3}, \text{ а при достижении скорости } u = \sqrt{\frac{gL\pi}{2} \sin(\theta)} \text{ он начинает двигаться}$$

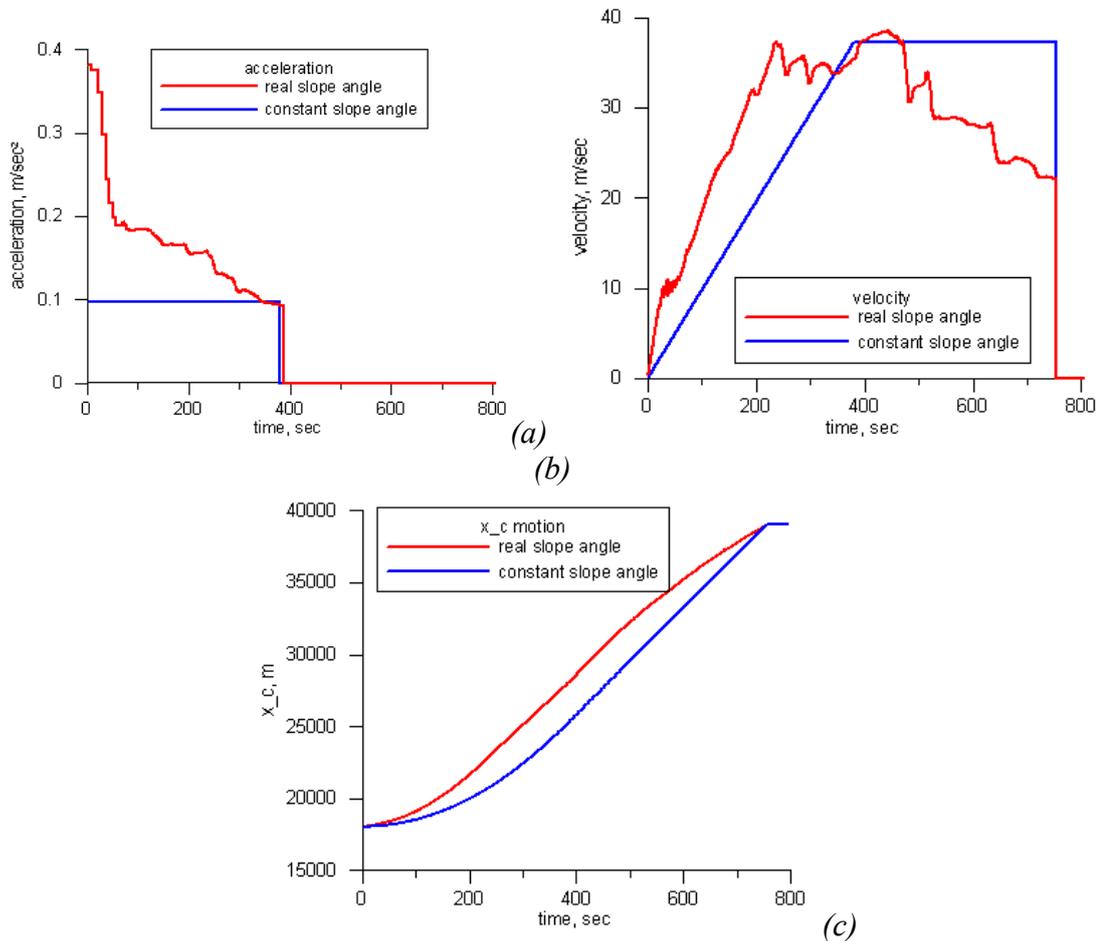
равномерно с этой скоростью. Здесь  $g$  – ускорение свободного падения,  $\theta$  – угол наклона дна. Оползень останавливался в тот момент, когда его центр масс оказывался в точке, где угол наклона реального дна становился равен 0.5 градуса:  $x_{c\_stop} = 39000$  метров. Глубина дна в этой точке составляла  $H_{c\_stop} = 1150$  метров для линейного и  $H_{c\_stop} = 1213$  метров – для реального склонов.

Для записи результатов было установлено 10 виртуальных мареографов, их координаты (в метрах) указаны в таблице.

М 1	М2	М3	М4 – точка старта ( $x_{c\_0}$ )	М5	М6	М7 – точка остановки ( $x_{c\_stop}$ )	М8	М9	М10
0	100 0	1000 0	18050	3000 0	3800 0	39000	4000 0	4500 0	6000 0

Законы движения, использовавшиеся в расчетах, иллюстрируются графиками ускорения, скорости и траектории (Рис. 9). Из этих графиков видно, что на линейном склоне оползень вплоть до остановки двигался сначала равноускоренно, а затем равномерно (**задача 1**). Для случая реального дна рассматривались два варианта. В первом из них (**задача 2**) в формуле для определения ускорения использовался постоянный «линейный» угол, равный 1.7 градуса, т.е. оползень двигался с той же скоростью, что и на линейном склоне. Во втором варианте (**задача 3**) для расчета ускорения и скорости использовался реальный угол, соответствующий углу в точке нахождения центра масс оползня, так что ускорение и скорость были не постоянны. Введение в рассмотрение явно

искусственного случая движения по реальному склону с ускорением и скоростью, рассчитанными с учетом постоянного угла наклона подстилающей поверхности, обусловлено желанием отделить эффекты, порожденные неоднородностью формы подстилающей поверхности, от эффектов, связанных с изменчивостью скорости и ускорения.



**Рис. 9.** Иллюстрация законов движения оползня: (а) – ускорение, (б) – скорость, (с) – траектория движения. Красные линии соответствуют закону движения по реальному рельефу с учетом реального угла наклона дна, синие – движению, определяемому углом наклона линейного склона (1.7 градуса).

Предварительные расчеты проводились с использованием классических уравнений теории мелкой воды и их линейного аналога. Результаты, полученные авторами ранее [Fedotova Z.I., Chubarov L.B., Shokin Yu.I. Simulation of surface waves induced by landslides // International Journal of Fluid Mechanics Research – Redding, 2006 – Vol. 33. – No. 1. – P. 2-14], дают основание утверждать, что эти математические модели позволяют получить достаточно адекватное качественное представление об исследуемом волновом процессе в простых акваториях. На левой границе ставилось условие отражения, на правой – свободный проход волн. Расчеты проводились на расчетной сетке с количеством узлов 1000, при этом на длину склона приходилось около 600, собственно на оползень – около 85, а на трассу его движения – около 300 узлов, так что за время движения оползень проходил около 3 своих длин.

Общие характеристики исследуемого волнового режима иллюстрируются совместными изображениями свободной поверхности и оползня, движущегося по склону (Рис. 10).

Анализ простейшей задачи 1 (линейный склон) показывает, что в начале движения тела над задней его частью образуется впадина, которая затем распадается на две, одна из которых идет к берегу, а вторая связана с оползнем и движется все время над ним. При этом минимальное значение уровня постоянно находится над центром масс оползня, абсолютная величина этого значения увеличивается по мере ускорения движения, длина волны примерно равна длине оползня. При движении с ненулевым ускорением оползень все время толкает перед собой волну повышения, амплитуда которой со временем растет, передний фронт движется в мористом направлении быстрее оползня (со скоростью  $\sqrt{gh}$ ), а задний движется непосредственно перед телом, так что волна постоянно «подпитывается» новым возмущением и ее длина также увеличивается. После перехода от равноускоренного к равномерному режиму движения оползня ( $t = 380$  сек) волна повышения полностью отделяется от оползня и уходит в мористом направлении. При этом ее тыловая часть выходит на отрицательные значения, образуя зону с почти постоянным уровнем понижения. Длина этой зоны со временем растет так, что передний ее край следует за волной повышения со скоростью  $\sqrt{gh}$ , а задний движется перед оползнем. Абсолютная величина понижения в этой зоне постепенно уменьшается. Наконец, после резкой остановки оползня ( $t = 750$  сек) волна понижения, движущаяся над оползнем, значительно увеличивает абсолютную величину своей амплитуды, отделяется от оползня и уходит в «море». Одновременно с этим левее оползня возникает волна повышения, которая направляется к берегу.

В задаче 2 (реальный склон, постоянный угол формулах для расчета ускорения и скорости оползня) картина в целом сохраняется. Однако следует учесть, что здесь в отличие от линейного склона (задача 1) левее точки начального положения центра масс оползня глубины меньше, а правее – больше. Это обстоятельство проявляется в скорости движения порожденных оползнем волн, которая определяется по формуле  $c = \sqrt{gh}$ . Из-за упомянутой разности в глубинах, несколько отличаются и амплитуды волн, создаваемых движением оползня (см. Рис. 11).

В задаче 3 (реальный склон, переменный угол формулах для расчета ускорения и скорости оползня) волновая картина заметно усложняется. В ходе перестроек траектории движения порождаются отделяющиеся от оползня небольшие волны, распространяющиеся в обе стороны, и возникает некоторый эффект, который можно назвать «дисперсией», обусловленной «немонотонностью» закона движения оползня. Эта «дисперсия» никак не связана ни с используемой математической моделью, ни с численной дисперсией используемой разностной схемы. Так как здесь ускорение тела в начале движения почти в четыре раза больше, чем в первых двух задачах, амплитуды волн, возникающих в это время и направляющихся как к берегу, так и вместе с оползнем в открытое море, также заметно больше. Со временем оползень постепенно замедляется, вместе с этим уменьшаются и амплитуды связанных с оползнем волн. Перед остановкой скорость оползня в задаче 3 меньше, и поэтому амплитуда волны повышения, возникающей после его остановки, оказывается меньше.

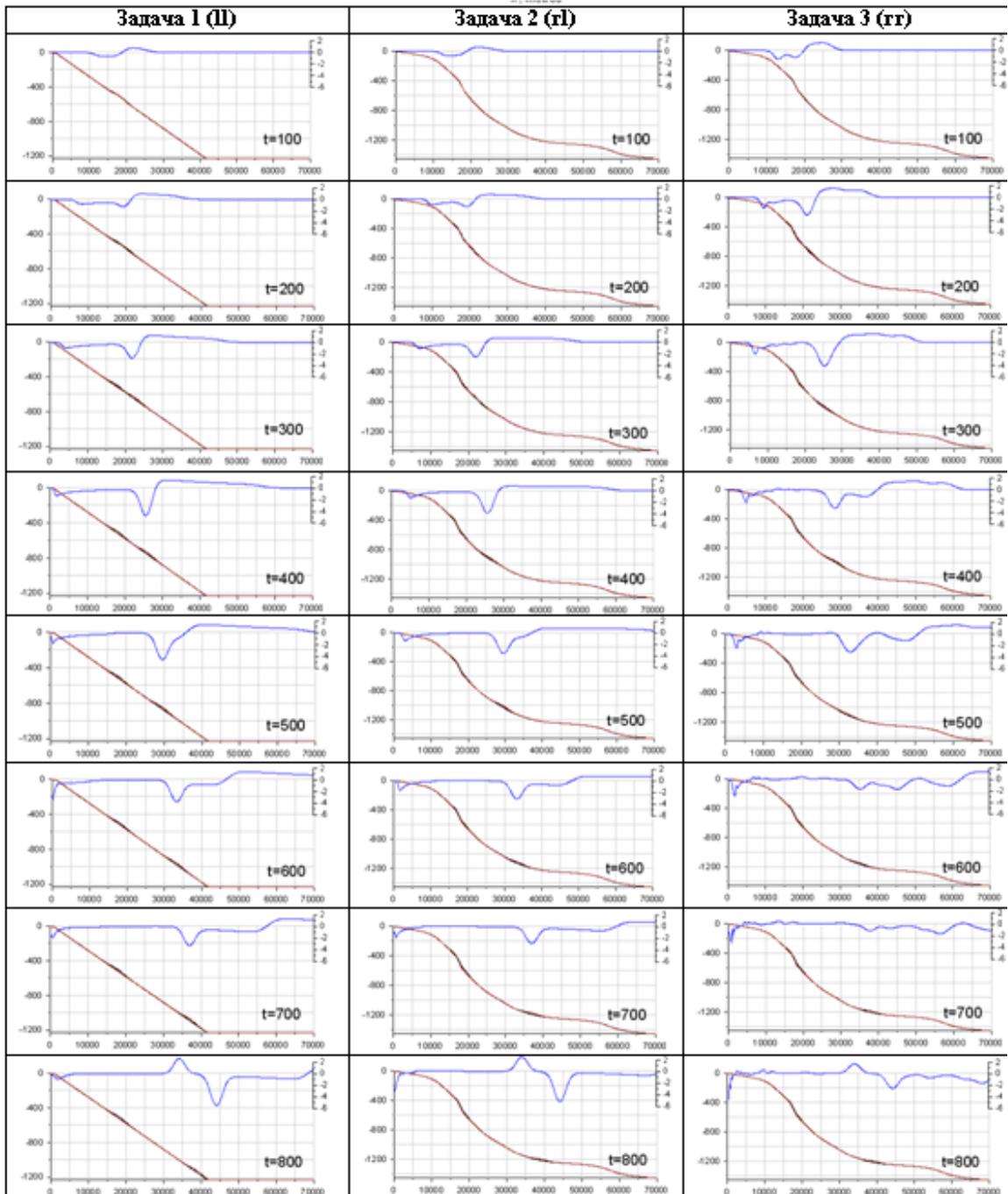
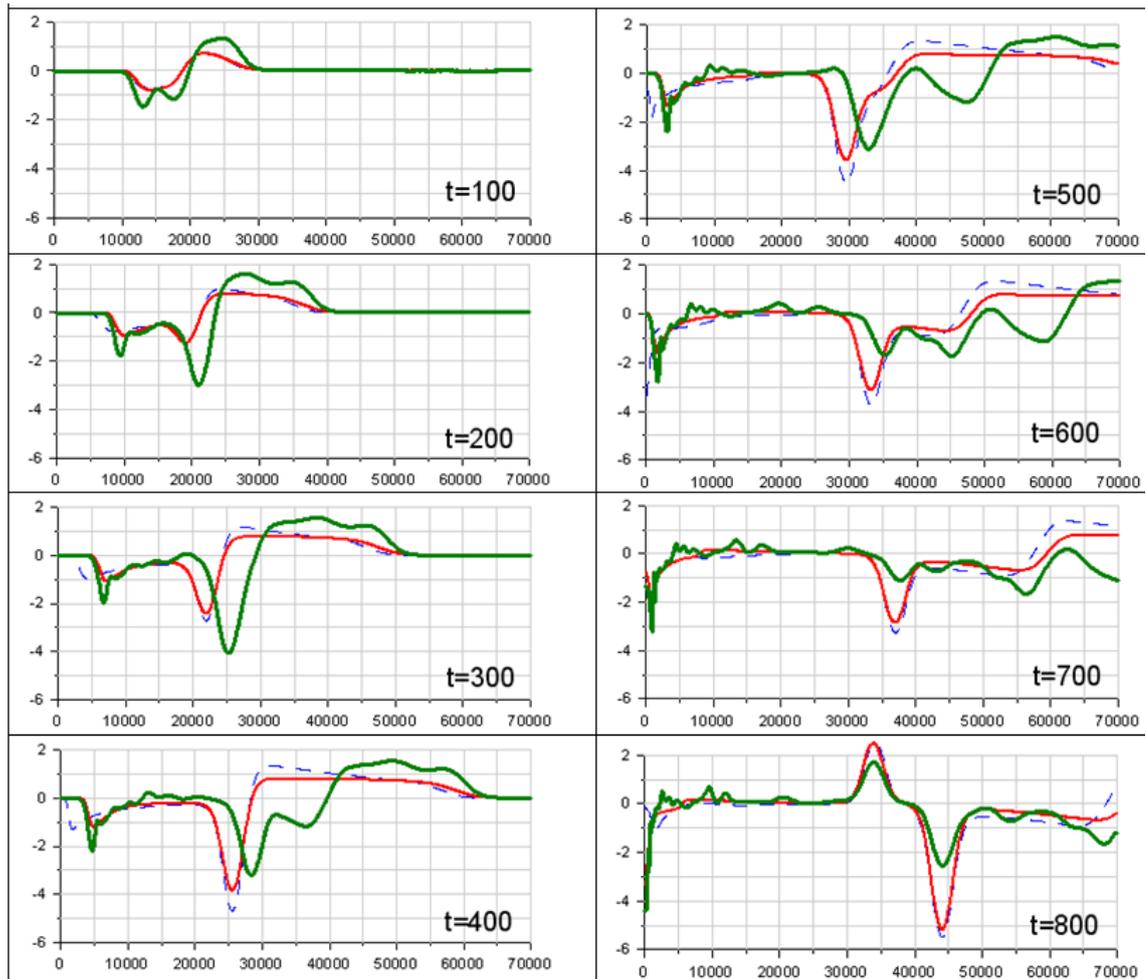


Рис. 10. Формы свободной поверхности (синие кривые), рассчитанные для трех решаемых задач в рамках классической нелинейной теории мелкой воды на различные моменты времени. Черным цветом отрисовано начальное состояние подстилающей поверхности, коричневым – ее текущее состояние. Шкалы справа соответствуют уровням свободной поверхности, слева – рельефу дна, на горизонтальной оси отложено расстояние от стенки.



**Рис. 11.** Сравнение форм свободной поверхности, рассчитанных для трех решаемых задач в рамках классической нелинейной теории мелкой воды на различные моменты времени: синим пунктиром отрисованы результаты решения задачи 1, красными тонкими кривыми – задачи 2, жирными зелеными – задачи 3. Высоты волн (вертикальная ось) и расстояние от стенки (горизонтальная ось) указаны в метрах.

Проведенные ранее с использованием результатов лабораторных экспериментов сопоставления различных математических моделей оползневого механизма генерации поверхностных волн [Shokin Yu.I., Fedotova Z.I., Khakimzyanov G.S., Chubarov L.B., Beisel S.A. Modelling surfaces waves generated by a moving landslide with allowance for vertical flow structure// *Rus. J. Numer. Anal. Math. Modelling.* – 2007. – Vol. 22. – №1. – pp. 63–85.] показали, что наилучшего соответствия экспериментальным данным и результатам моделирования по полной гидродинамической модели авторам удалось добиться с помощью нелинейно-дисперсионной (НЛД) модели, предложенной в работе Lynett P.J., Liu P.L.-F. A two-layer approach to water wave modeling (*Proc. Royal Society of London. A.* – 2004. – Vol. 460. – P. 2637-2669). Это обстоятельство побудило исполнителей настоящего проекта привлечь к решению упомянутых выше трех задач одно- и двухслойный варианты этой модели, принадлежащей к классу полностью нелинейных.

В прибрежной зоне (1-й и 2-й мареографы) рассчитанная по НЛД-моделям волна понижения (Рис. 12), образующаяся в момент начала движения оползня и

направляющаяся к берегу, практически совпадает с волной, рассчитанной по классической нелинейной модели, и несколько отличается от волны, рассчитанной с помощью ее линейризованного аналога. Основное отличие результатов, полученных с использованием НЛД-моделей, проявляется в волне повышения, возникающей в момент остановки оползня. Ее амплитуда примерно в полтора раза меньше, чем амплитуда, рассчитанная без учета дисперсии. Время прихода – чуть больше, чем полученное по нелинейным уравнениям теории мелкой воды, и несколько меньше, чем по их линейризованному аналогу. На мареограммах наблюдается идущий за головной волной цуг волн, порожденных учитываемой моделью дисперсией. На удалении от стенки (3-й и 4-й мареографы) форма волны понижения, распространяющейся к берегу, практически не зависит от математической модели, использовавшейся для ее расчета, а та же волна, направляющаяся в сторону моря после отражения от стенки и прохода над мелководной прибрежной зоной, рассчитанная по линейной модели мелкой воды, заметно отличается по форме и амплитуде от своих аналогов, определенных с учетом нелинейности и дисперсии. Учет дисперсии заметно сказывается на амплитудах и временах прихода волн повышения, как при подходе к стенке, так и после отражения от нее.

Характеристики волны повышения, образующейся перед оползнем и зарегистрированной (Рис. 12 и Рис. 13) в морских мареографах (с 5-го по 10-й), не зависят от учета или не учета нелинейности и дисперсии в том случае, если оползень движется с постоянным ускорением, и несколько отличается по форме при расчете по НЛД-моделям в задаче 3. В мареографах с 5-го по 7-й практически совпадает и идущая над оползнем волна понижения. Небольшие отличия при учете дисперсии возникают также в 3-й задаче для движения с переменным ускорением. В мареографах с 8-го по 10-й, расположенных в мористом направлении за точкой остановки центра масс оползня, регистрируемая волна понижения при расчете по НЛД-моделям отличается по амплитуде уже во всех трех задачах. За этой волной постепенно также возникает диспергирующий цуг волн.

Изложенные результаты позволили выделить базовые характеристики волновых режимов, порождаемых движением оползня по реальному дну, определить изменчивость этих характеристик в зависимости от особенностей рельефа подстилающей поверхности и влияния таких особенностей не только на процесс трансформации волн при их распространении, но и на явления, сопутствующие генерации этих волн. Полученные знания значительно облегчат интерпретацию результатов моделирования исследуемого явления в акваториях с реальным переменным по двум пространственным координатам рельефом дна.

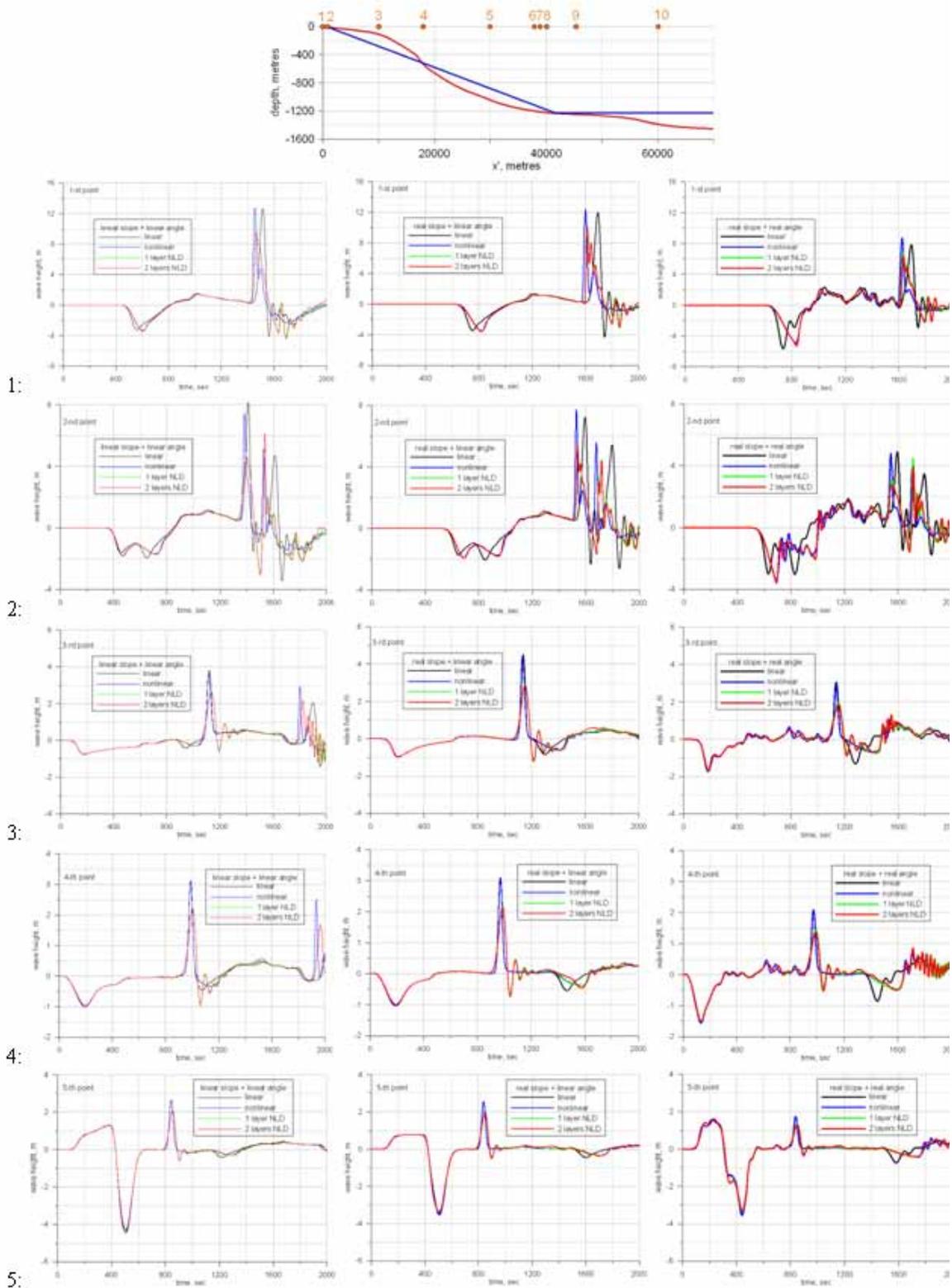


Рис. 12. Результаты, рассчитанные в 1-м – 5-м мареографах с использованием различных математических моделей при решении трех тестовых задач: задача 1 – левый столбец, задача 2 – центральный столбец, задача 3 – правый столбец. Мареограммы, полученные с использованием двухслойной НЛД-модели, отрисованы красным цветом, однослойной – зеленым, классических уравнений теории мелкой воды – синим, их линейного аналога – черным. Сверху – схема размещения виртуальных мареографов.

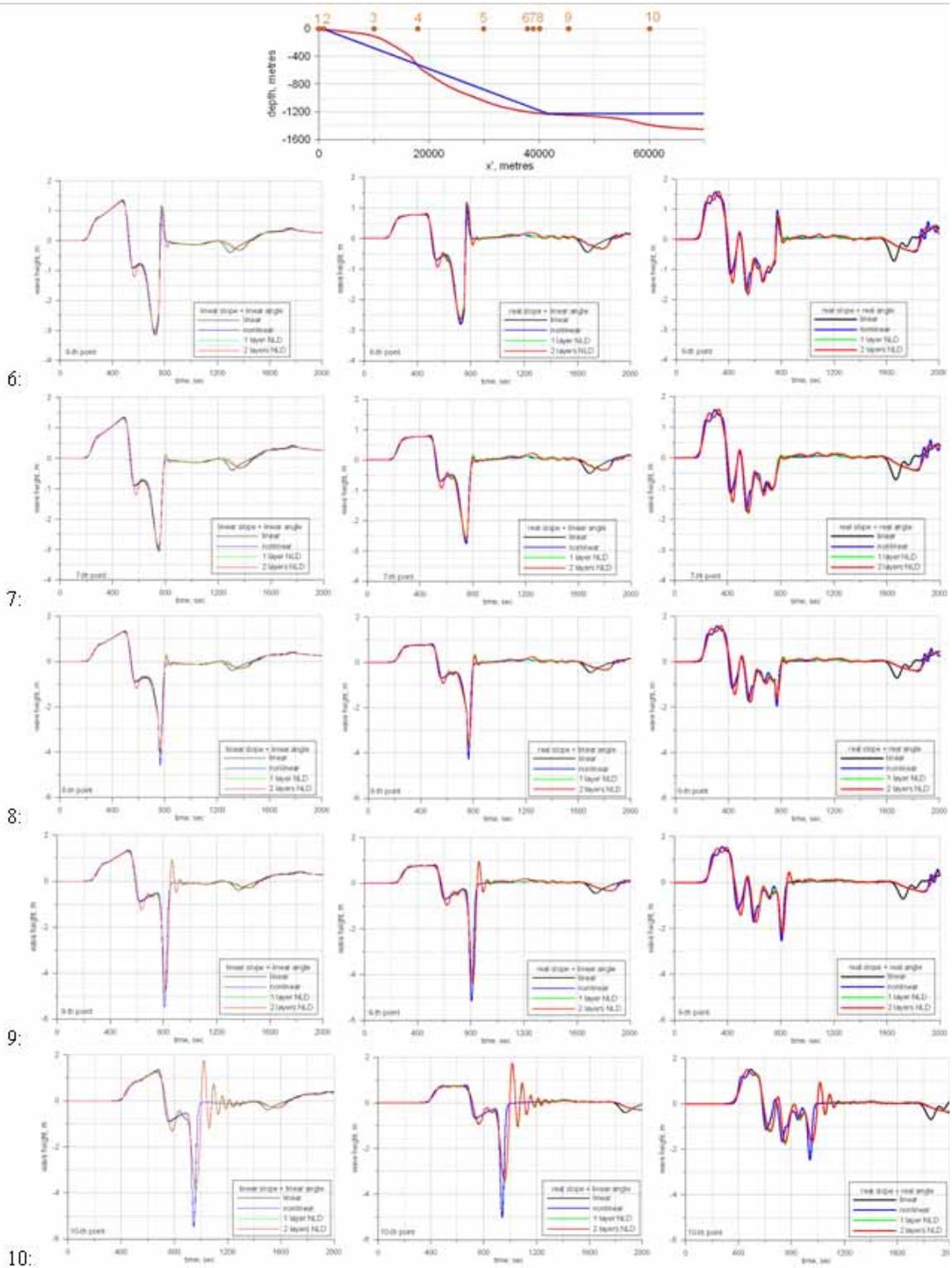


Рис. 13. Результаты, рассчитанные в 6-м – 10-м мареографах с использованием различных математических моделей при решении трех тестовых задач: задача 1 – левый столбец, задача 2 – центральный столбец, задача 3 – правый столбец. Мареограммы, полученные с использованием двухслойной НЛД-модели, отрисованы красным цветом, однослойной – зеленым, классических уравнений теории мелкой воды – синим, их линейного аналога – черным. Сверху – схема размещения виртуальных мареографов.

3.7. Степень новизны полученных результатов

Результаты, полученные исполнителями в 2007 году являются безусловно новыми и в значительной степени базируются на заделе, созданном при выполнении предыдущих этапов проекта. Особо следует отметить оригинальность методик и алгоритмов, основанных на использовании криволинейных адаптивных сеток, а также исследования особенностей оползневого механизма генерации волн цунами в акваториях с реальным рельефом дна.

*Сопоставление полученных результатов с мировым уровнем*

Все результаты соответствуют мировому уровню исследований в данной области.

3.8. Разработанные математические модели, численные алгоритмы и результаты моделирования оползневого механизма генерации волн цунами в прибрежной зоне опубликованы в авторитетных отечественных и международных научных журналах, представлены на крупных научных форумах:

\* Всероссийская конференция «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», 37-29 мая 2008 г., Санкт-Петербург, Россия

\* Международная конференция «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании», 10-14 сентября 2008 г., Алматы, Казахстан

*Методы и подходы, использованные в ходе выполнения проекта*

В ходе выполнения проекта использовались современные математические модели волновой гидродинамики, включая полные и приближенные модели, учитывающие нелинейность и дисперсию исследуемых явлений. Оригинальные вычислительные программы основаны на конечно-разностных схемах типа предиктор-корректор, в том числе, схемах, реализуемых на криволинейных адаптивных сетках, приспособляющихся к динамически изменяемой свободной поверхности и рельефу дна.

3.9. Построение таких сеток выполнялось с помощью уникальных авторских моделей и алгоритмов, частично модифицированных для решения задач рассматриваемого класса. Следует отметить также комплексный характер применяемых методик, а также использование альтернативных подходов. Так, часть расчетов проводилась с использованием метода граничных элементов, а для моделирования движения оползня наряду с моделью твердого тела использовалась его жидкостная модель.

Предложенная и реализованная исполнителями проекта технология вычислительных экспериментов предусматривала многоуровневую постановку задач, продвигающуюся от простейших задач на модельных рельефах к задачам, сформулированным для реальных акваторий. Эта технология позволила выделить «инвариантные» к изменениям рельефа характеристики волновых процессов от явлений, непосредственно связанных с неоднородностью подстилающей поверхности дна.

Выполненное на широком наборе тестовых задач, в том числе, с привлечением результатов специально проведенных лабораторных экспериментов исследование различных моделей и алгоритмов позволило учесть их особенности и адекватное толкование численных решений. Выполнение расчетов на последовательностях вложенных сеток позволило отфильтровывать нефизические эффекты.

3.10.1. *Количество научных работ, опубликованных в ходе выполнения проекта*  
31

*Количество научных работ, подготовленных в ходе выполнения проекта и*

3.10.2. *принятых к печати в 2008 г.*

13

3.11. *Участие в научных мероприятиях по тематике проекта, которые проводились*

*при финансовой поддержке Фонда*

1

3.12. *Участие в экспедициях по тематике проекта, проводимых при финансовой поддержке Фонда*

0

3.13. *Финансовые средства, полученные от РФФИ*

400000 руб.

3.14. *Вычислительная техника и научное оборудование, приобретенные на средства*

*Фонда*

Цветной лазерный принтер HP 3600-dn и расходные материалы к нему

*Адреса (полностью) ресурсов в Internet, подготовленных авторами по данному*

3.15. *проекту*

*Библиографический список всех публикаций по проекту*

2008 г.

1. Gusyakov V.K., Fedotova Z.I., Khakimzyanov G.S., Chubarov L.B., Shokin Yu.I. Некоторые подходы к локальному моделированию наката волн цунами на побережье // *Rus. J. Numer. Anal. Math. Modelling*. 2008, vol. 23 (6) (в печати).
2. Дамбиева Д.Б., Хахимзянов Г.С. Численное исследование стокового механизма генерации волн в рамках модели потенциальных течений жидкости // *Вычислительные технологии*. 2008. Т.13. №.1. С. 48–55.
3. Федотова З.И., Хахимзянов Г.С. Нелинейно-дисперсионные уравнения мелкой воды на нестационарном дне // *Вычислительные технологии*, 2008. Т. 13, № 4, С. 114-126.
4. Федотова З.И. Хахимзянов Г.С. Уравнения мелкой воды на подвижном дне // *Rus. J. Numer. Anal. Math. Modelling*. 2008 (в печати)
5. Beisel S.A., Chubarov L.B., Kit E., Levin A., Shokin Yu.I., Sladkevich M. Tsunami near the Israeli coast: preliminary results of numerical modeling // *Вычислительные технологии*, Том 13, Вестник КАЗНУ им аль-Фараби. Серия математика, механика, информатика N 3(58), Совместный выпуск по материалам Международной конференции "Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании", 10-14 сентября 2008 г. ISSN 1560-7534, ISSN 1563-0285, часть I, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Институт вычислительных технологий Сибирского отделения РАН, Алматы-Новосибирск, 2008. С. 17-24
6. Бабайлов В.В., Дамбиева Д.Б., Хахимзянов Г.С., Чубаров Л.Б. Численное моделирование стокового механизма генерации волн цунами // *Труды IX Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»*. Санкт-Петербург: Наука, 2008. С. 444-447
7. Бейзель С.А., Гусяков В.К., Елецкий С.В., Федотова З.И., Чубаров Л.Б. Экономичные вычислительные технологии повышения точности моделирования волн цунами // *Вычислительные технологии*, Том 13, Вестник КАЗНУ им аль-Фараби. Серия математика, механика, информатика N 3(58), Совместный выпуск по материалам Международной конференции "Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании", 10-14 сентября 2008 г. ISSN 1560-7534, ISSN 1563-0285, часть I, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Институт вычислительных технологий Сибирского отделения РАН, Алматы-Новосибирск, 2008, стр. 240-254

8. Бейзель С.А., Елецкий С.В., Федотова З.И., Чубаров Л.Б. Вычислительные особенности моделирования волн цунами в реальных акваториях // Труды IX Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – Санкт-Петербург: Наука. 2008. С. 432–436.
9. Гусяков В.К., Федотова З.И., Хакимзянов Г.С., Чубаров Л.Б. О некоторых приемах повышения достоверности результатов численного моделирования наката волны цунами на берег // В кн.: Труды IX Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Наука, 2008. 750 стр., С. 448-452
10. Елецкий С.В., Майоров Ю.В., Максимов В.В., Нуднер И.С., Федотова З.И., Хакимзянов Г.С., Чубаров Л.Б. Особенности поверхностных волн, создаваемых движением подводного оползня // Труды IX Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – Санкт-Петербург: Наука. 2008. С. 428–432.
11. Федотова З.И., Чубаров Л.Б., Хакимзянов Г.С. Нелинейно-дисперсионные модели волновой гидродинамики в задачах о генерации волн цунами оползнем // Сборник научных трудов «Фундаментальная и прикладная геофизика». 2008 (в печати).
12. Федотова З.И., Хакимзянов Г.С. Нелинейно-дисперсионные модели волновой гидродинамики для подвижного дна // Труды IX Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – Санкт-Петербург: Наука. – 2008. – С. 326 – 331.
13. Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И. Математическое моделирование в задачах поддержки принятия решений в ходе кризисных ситуаций, связанных с катастрофическими волновыми процессами в океане // Труды IX Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Наука, 2008. 750 стр., С. 5-10

2007 г.

1. Beisel S.A., Chubarov L.B., Fedotova Z.I., and Khakimzyanov G.S. On the approaches to a numerical modeling of landslide mechanism of tsunami wave generation // Communications in Applied Analysis. 11 (2007). No. 1, pp.121-135
2. Shokin Yu.I., Fedotova Z.I., Khakimzyanov G.S., Chubarov L.B., Beisel S.A. Modelling surfaces waves generated by a moving landslide with allowance for vertical flow structure// Rus. J. Numer. Anal. Math. Modelling. – 2007. – Vol. 22. – №1. – pp. 63–85.
3. Березин Е.Н., Бейзель С.А. Параллельная реализация алгоритма для расчета генерации длинных поверхностных волн цунами движением оползня // Вычислительные технологии, 2009. Т. 14, № 1, (в печати)
4. Хажоян М.Г. Численное моделирование поверхностных волн над подвижным дном // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12. № 4. С. 96-105
5. Шокин Ю.И., Федотова З.И., Чубаров Л.Б. Об использовании методов численного моделирования для оценки катастрофических воздействий длинных волн на прибрежную территорию // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2007, № 4, стр. 104-113
6. Гусяков В.К., Елецкий С.В., Федотова З.И., Чубаров Л.Б. Обзор и сравнение некоторых программных систем для моделирования цунами // In: Study of natural catastrophes in Sakhalin and Kuril Islands. Proceedings of the I (XIX) International

Conference of Young Scientists, devoted to the 60-anniversary of the Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, June, 15-20, 2006 / Eds. ON. Likhacheva. - Institute of Marine Geology and Geophysics FES RAS, 2007. - 263 p. ISBN 5-7442-1439-9, pp. 214-221

7. Елецкий С.В. Программная система моделирования волн цунами NEREUS, опыт разработки: предназначение и реализация // В кн.: Изучение природных катастроф на Сахалине и Курильских островах: сборник материалов I (XIX) Международной конференции молодых ученых, посвященной 60-летию Института морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, 15-20 июня 2006г. / отв. ред. О.Н. Лихачева, Южно-Сахалинск. Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН. 2007. - 263 с. ISBN 5-7442-1439-9, стр. 230-236

8. Федотова З.И., Хакимзянов Г.С., Чубаров Л.Б. Некоторые подходы к моделированию наката волн цунами на участок побережья Бенгальского залива // В кн.: Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф. Тезисы IX Всероссийской конференции (17–22 сентября 2007 г., Барнаул). – Барнаул : Изд-во Алт. ун-та, 2007. – 138 с. ISBN 978-5-7904-0709-3 стр. 110

9. Бабайлов В.В., Чубаров Л.Б. Моделирование стокового механизма генерации волн цунами в рамках уравнений теории мелкой воды // В кн.: Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф. Тезисы IX Всероссийской конференции (17–22 сентября 2007 г., Барнаул). – Барнаул : Изд-во Алт. ун-та, 2007. – 138 с. ISBN 978-5-7904-0709-3 стр. 12

10. Шокин Ю.И., Чубаров Л.Б., Федотова З.И., Гусяков В.К., Бабайлов В.В., Елецкий С.В., Бейзель С.А. Информационно-вычислительные аспекты совершенствования камчатского фрагмента национальной системы предупреждения о цунами // В кн.: Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф. Тезисы IX Всероссийской конференции (17–22 сентября 2007 г., Барнаул). – Барнаул : Изд-во Алт. ун-та, 2007. – 138 с. ISBN 978-5-7904-0709-3 стр. 119

11. Chubarov Leonid B. Mathematical modelling in constructing Kamchatka regional tsunami warning systems // In: Abstracts of The Fourth International Conference of Applied Mathematics and Computing, V. 1, August 12-18, 2007 Plovdiv, Bulgaria. Editor Svetoslav Nenov, pp. 76-77

2006 г.

1. Fedotova Z.I., Chubarov L.B., Shokin Yu.I. Simulation of surface waves induced by landslides // International Journal of Fluid Mechanics Research – Redding, 2006 – Vol. 33. – No. 1. – P. 2-14.

2. Shokin, Yu. I., L. B. Chubarov, Z. I. Fedotova, S. A. Beizel, and S. V. Eletsy (2006), Principles of numerical modeling applied to the tsunami problem, // Russ. J. Earth Sci., 8, ES6004, doi:10.2205/2006ES000216. ISSN: 1681–1208 (online) 23 p.

3. Shokin Yu.I., Sergeeva Yu.V., Khakimzyanov G.S. Predictor-corrector scheme for shallow water equations // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling - Utrecht, Tokyo, 2006. - Vol. 21. - No. 5. - P. 459-479.

4. Федотова З.И., Чубаров Л.Б. Особенности численного моделирования оползневой генерации волн цунами // Вестник ИрГТУ – Иркутск, 2006 – №2 (26). – С. 134-140.

5. Шокин Ю.И., Чубаров Л.Б. О подходах к численному моделированию

- оползневом механизме генерации волн цунами // Вычислительные технологии. Специальный выпуск, посвященный 85-летию со дня рождения академика Н.Н. Яненко – Новосибирск, 2006. – Т. 11. – С. 100-111.
6. Beisel S.A., Chubarov L.B., Fedotova Z.I., Khakimzyanov G.S. Modeling of generation of tsunami waves by movement of a landslides in view of vertical structure of flow // High Speed Hydrodynamics and Numerical Simulation: Proceedings of the Third International Summer Scientific Workshop – Kemerovo, 2006 – P. 97-104.
7. Бабайлов В.В., Дамбиева Д.Б., Хакимзянов Г.С., Чубаров Л.Б. Численное моделирование стокового механизма генерации волн цунами // Труды международной конференции «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании» – Павлодар, 2006. – Т. 1. – С. 160-171.
8. Шокин Ю.И., Федотова З.И., Хакимзянов Г.С., Чубаров Л.Б., Бейзель С.А. Моделирование генерации цунами движением оползня с учетом вертикальной структуры течения // Труды VIII Всероссийской конференции «Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф» – Кемерово, 2005. – С. 3-27.
9. Chubarov L.B., Beisel S.A., Fedotova Z.I. Modeling of generation of tsunami waves by movement of a landslide // Third International Conference Of Applied Mathematics – Plovdiv, 2006. – P. 62.
- Приоритетное направление развития науки, технологий и техники РФ, в котором, по мнению исполнителей, могут быть использованы результаты данного проекта*
- 3.17. рациональное природопользование
- Критическая технология РФ, в которой, по мнению исполнителей, могут быть использованы результаты данного проекта*
- 3.18. технологии снижения риска и уменьшения последствий природных и техногенных катастроф

*Подпись руководителя проекта*

## Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА

- 9.1. *Номер проекта*  
06-05-64869
- 9.2.1. *Первый автор*  
Бейзель С.А.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*  
Бейзель С.А.
- Другие авторы*  
Гусьяков В.К.; 2; Россия; Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
- 9.3.1. *Елецкий С.В.*; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
*Федотова З.И.*; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
*Чубаров Л.Б.*; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
*Другие авторы (для издания библиографических сборников)*  
Гусьяков В.К.
- 9.3.2. *Елецкий С.В.*  
*Федотова З.И.*  
*Чубаров Л.Б.*
- Название публикации*
- 9.4. Экономичные вычислительные технологии повышения точности моделирования волн цунами
- 9.5. *Язык публикации*  
русский
- Полное название издания*
- 9.6.1. Совместный выпуск по материалам Международной конференции «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании»
- 9.6.2. *ISSN издания*  
1560-7534 1563-0285
- 9.7. *Вид публикации*  
статья в сборнике
- 9.8. *Завершенность публикации*  
опубликовано
- 9.9. *Год публикации*  
2008
- 9.10.1 *Том издания*  
13
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы*  
240-254
- 9.12.1. *Полное название издательства*  
Казак университеті
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство*  
Алматы
- 9.13. *Краткий реферат публикации*  
Обсуждаются эффективные методы повышения точности моделирования волн

цунами. Приведены примеры успешного применения этих методов в модельных и реальных акваториях.

*Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной*

9.14. *научной статьи*

9.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*  
8

*Подпись руководителя проекта*

## Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА

- 9.1. *Номер проекта*  
06-05-64869
- 9.2.1. *Первый автор*  
Beisel S.A.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*  
Beisel S.A.
- Другие авторы*  
Chubarov L.B.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
Kit E.; 2; Израиль; Tel-Aviv University
- 9.3.1. Levin A.; 2; Израиль; Coastal and Marine Engineering Research Institute  
Shokin Yu.I.; 2; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
Sladkevich M.; 2; Израиль; Coastal and Marine Engineering Research Institute  
*Другие авторы (для издания библиографических сборников)*  
Chubarov L.B.  
Kit E.
- 9.3.2. Levin A.  
Shokin Yu.I.  
Sladkevich M.
- 9.4. *Название публикации*  
Tsunami near the Israeli coast: preliminary results of numerical modeling
- 9.5. *Язык публикации*  
английский
- Полное название издания*
- 9.6.1. Совместный выпуск по материалам Международной конференции  
«Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании»
- 9.6.2. *ISSN издания*  
1560-7534 1563-0285
- 9.7. *Вид публикации*  
статья в сборнике
- 9.8. *Завершенность публикации*  
опубликовано
- 9.9. *Год публикации*  
2008
- 9.10.1 *Том издания*  
13
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы*  
17-24
- 9.12.1. *Полное название издательства*  
Казак университеті
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство*  
Алматы
- 9.13. *Краткий реферат публикации*  
В работе представлен обзор исторических цунами в Средиземном море. С

помощью оригинальных алгоритмов, разработанных в ИВТ СО РАН и тщательно протестированных на модельных задачах, проведено численное моделирование цунами в Эгейском море, произошедшего в июле 1956г. На основе анализа исторических данных определено место расположения очагов цунамигенных землетрясений, критических для Израильского побережья. Проведено моделирование этих событий и определено их возможное воздействие на побережья Израиля и Египта.

*Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи*

9.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*  
5

*Подпись руководителя проекта*

## Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА

- 9.1. *Номер проекта*  
06-05-64869
- 9.2.1. *Первый автор*  
С.В. Елецкий; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*  
Елецкий С.В.  
*Другие авторы*  
Ю.Б. Майоров; 2; Россия; ГП НИЦ 26 ЦНИИ МО РФ  
В.В. Максимов; 2; Россия; ГП НИЦ 26 ЦНИИ МО РФ
- 9.3.1. И.С. Нуднер; 2; Россия; ГП НИЦ 26 ЦНИИ МО РФ  
З.И. Федотова; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
Г.С. Хакимзянов; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
Л.Б. Чубаров; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
*Другие авторы (для издания библиографических сборников)*  
Майоров Ю.Б.  
Максимов В.В.
- 9.3.2. Нуднер И.С.  
Федотова З.И.  
Хакимзянов Г.С.  
Чубаров Л.Б.
- 9.4. *Название публикации*  
Особенности поверхностных волн, создаваемых движением подводного оползня
- 9.5. *Язык публикации*  
русский  
*Полное название издания*
- 9.6.1. Труды IX Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»
- 9.6.2. *ISSN издания*
- 9.7. *Вид публикации*  
статья в сборнике
- 9.8. *Завершенность публикации*  
опубликовано
- 9.9. *Год публикации*  
2008
- 9.10.1 *Том издания*
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы*  
428-432
- 9.12.1. *Полное название издательства*  
Наука
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство*  
Санкт-Петербург

*Краткий реферат публикации*

Представлены результаты лабораторных экспериментов и численного моделирования процесса генерации и трансформации поверхностных волн движением твердого фрагмента дна по береговому склону. Для проведения лабораторных экспериментов был использован гидроволновой лоток, в котором движение подводного оползня моделировалось движением твердого тела, целиком погруженного в жидкость. Математическое моделирование выполнялось в рамках уравнений линейной, нелинейной и нелинейно-дисперсионной моделей мелкой воды и полной гидродинамической модели идеальной жидкости со свободной поверхностью. В качестве вычислительных алгоритмов использовались конечно-разностные схемы, включая (для полной модели) криволинейные адаптивные сетки. Определены основные характеристики изучаемого явления, изучены особенности различных математических моделей.

9.13. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи*

9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*  
11

*Подпись руководителя проекта*



## Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА

- 9.1. *Номер проекта*  
06-05-64869
- 9.2.1. *Первый автор*  
В.В. Бабайлов; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*  
Бабайлов В.В.
- Другие авторы*
- 9.3.1. Д.Б. Дамбиева; 2; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
Г.С. Хакимзянов; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
Л.Б. Чубаров; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
*Другие авторы (для издания библиографических сборников)*
- 9.3.2. Дамбиева Д.Б.  
Хакимзянов Г.С.  
Чубаров Л.Б.
- 9.4. *Название публикации*  
Численное моделирование стокового механизма генерации волн цунами
- 9.5. *Язык публикации*  
русский
- Полное название издания*
- 9.6.1. Труды IX Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»
- 9.6.2. *ISSN издания*
- 9.7. *Вид публикации* статья в сборнике
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2008
- 9.10.1 *Том издания*
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы* 444-447
- 9.12.1. *Полное название издательства* Наука
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство*  
Санкт-Петербург
- Краткий реферат публикации*  
В докладе рассматриваются результаты моделирования поверхностных волн, возникающих при кратковременном стоке жидкости в донные трещины, образующиеся в результате землетрясения. Моделирование выполнялось на основе нелинейной модели потенциальных течений жидкости со свободной границей и нелинейной модели мелкой воды. Выполнено сравнение результатов расчетов по разным моделям с экспериментальными данными.
- 9.13. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи*
- 9.14.
- 9.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*  
3

*Подпись руководителя проекта*



## Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА

- 9.1. *Номер проекта*  
06-05-64869
- 9.2.1. *Первый автор*  
Федотова З.И.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*  
Федотова З.И.
- 9.3.1. *Другие авторы*  
Хакимзянов Г.С.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*  
Хакимзянов Г.С.
- 9.4. *Название публикации*  
Нелинейно-дисперсионные уравнения мелкой воды на нестационарном дне
- 9.5. *Язык публикации*  
русский
- 9.6.1. *Полное название издания*  
Вычислительные технологии
- 9.6.2. *ISSN издания*  
1560-7534
- 9.7. *Вид публикации*  
статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации*  
опубликовано
- 9.9. *Год публикации*  
2008
- 9.10.1. *Том издания*  
13
- 9.10.2. *Номер издания*  
4
- 9.11. *Страницы*  
114-126
- 9.12.1. *Полное название издательства*  
Институт Вычислительных технологий СО РАН
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство*  
Новосибирск
- 9.13. *Краткий реферат публикации*  
В статье на основе единого подхода получены определяющие уравнения нелинейно-дисперсионных моделей Грина-Нагди, Железняк-Пелиновского и Алешкова для случая деформирующегося или подвижного дна. Для вывода уравнений Грина-Нагди предполагалось, что вертикальная компонента скорости течения является линейной функцией от вертикальной координаты  $z$ , а компоненты скорости в горизонтальной плоскости от  $z$  не зависят вовсе. При выводе уравнений Железняк-Пелиновского и Алешкова оставлено то же самое предположение относительно вертикальной компоненты скорости, однако компоненты скорости в горизонтальной плоскости считаются квадратичными функциями от  $z$ , а также предполагается потенциальность течения и разномасштабность процессов по

вертикали и в горизонтальной плоскости.

Показано, что несмотря на разные условия вывода, системы уравнений Грина–Нагди и Железняк–Пелиновского эквивалентны и являются разными формами записи одной и той же системы уравнений теории мелкой воды второго приближения.

*Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной*

9.14. *научной статьи*

9.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*  
16

*Подпись руководителя проекта*

## Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА

- 9.1. *Номер проекта*  
06-05-64869
- Первый автор*
- 9.2.1. Гусьяков В.К.; 2; Россия; Институт Вычислительной Математики и Математической Геофизики СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*  
Гусьяков В.К.
- Другие авторы*  
Федотова З.И.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.1. 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
- Другие авторы (для издания библиографических сборников)*  
Федотова З.И.
- 9.3.2. Хакимзянов Г.С.  
Чубаров Л.Б.  
Шокин Ю.И.
- Название публикации*
- 9.4. Некоторые подходы к локальному моделированию наката волн цунами на побережье
- 9.5. *Язык публикации*  
английский
- 9.6.1. *Полное название издания*  
Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling
- 9.6.2. *ISSN издания*
- 9.7. *Вид публикации*  
статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации*  
принято в печать
- 9.9. *Год публикации*  
2008
- 9.10.1 *Том издания*
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы*
- 9.12.1. *Полное название издательства*  
VNU Science Press BV
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство*
- 9.13. *Краткий реферат публикации*  
Настоящая статья посвящена изложению методики расчета наката цунами на реальное побережье, заключающейся в предварительном исследовании

особенностей волновой картины вблизи берега для ряда упрощенных модельных акваторий, наследующих базовые характеристики изучаемого фрагмента прибрежной зоны, и последующем использовании получаемых результатов для интерпретации сложной картины наката на реальное побережье. Излагаются результаты, непосредственно связанные с моделированием наката цунами на участок побережья Бенгальского залива.

*Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной*

9.14. *научной статьи*

9.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*  
15

*Подпись руководителя проекта*

## Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА

- 9.1. *Номер проекта*  
06-05-64869
- 9.2.1. *Первый автор*  
Федотова З.И.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*  
Федотова З.И.
- 9.3.1. *Другие авторы*  
Хакимзянов Г.С.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*  
Хакимзянов Г.С.
- 9.4. *Название публикации*  
Уравнения мелкой воды на подвижном дне
- 9.5. *Язык публикации*  
английский
- 9.6.1. *Полное название издания*  
Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling
- 9.6.2. *ISSN издания*
- 9.7. *Вид публикации*  
статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации*  
принято в печать
- 9.9. *Год публикации*  
2008
- 9.10.1 *Том издания*
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы*
- 9.12.1. *Полное название издательства*  
VNU Science Press BV
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство*
- Краткий реферат публикации*  
В статье дан вывод нелинейно-дисперсионных уравнений Железняк–Пелиновского, описывающих поверхностные волны на воде, для случая нестационарной донной поверхности. Показана эквивалентность полученных уравнений и известных уравнений Грина–Нагди.
- 9.13. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи*
- 9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*  
16

*Подпись руководителя проекта*



## Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА

- 9.1. *Номер проекта*  
06-05-64869
- 9.2.1. *Первый автор*  
Дамбиева Д.Б.; 2; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*  
Дамбиева Д.Б.
- 9.3.1. *Другие авторы*  
Хакимзянов Г.С.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*  
Хакимзянов Г.С.
- 9.4. *Название публикации*  
Численное исследование стокового механизма генерации волн в рамках модели потенциальных течений жидкости.
- 9.5. *Язык публикации*  
русский
- 9.6.1. *Полное название издания*  
Вычислительные технологии
- 9.6.2. *ISSN издания* 1560-7534
- 9.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2008
- 9.10.1 *Том издания* 13
- 9.10.2 *Номер издания* 1
- 9.11. *Страницы*  
48-55
- 9.12.1. *Полное название издательства*  
Институт Вычислительных технологий СО РАН
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство*  
Новосибирск
- 9.13. *Краткий реферат публикации*  
В статье представлены результаты численного моделирования процесса генерации поверхностных волн в результате стока жидкости в донные трещины, образующиеся во время землетрясений. Численный алгоритм основан на конечно-разностной схеме для уравнений в подвижной системе координат, описывающих потенциальные течения идеальной жидкости со свободной границей. Выполнено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными, показавшее, что нелинейная модель позволяет более точно воспроизводить форму генерируемых поверхностных волн.
- 9.14. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи*
- 9.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*  
3

*Подпись руководителя проекта*



