


НОМЕР ПРОЕКТА 10-05-91052		УЧЕТНАЯ КАРТОЧКА
НАЗВАНИЕ ПРОЕКТА Численное моделирование сильно нелинейных волн на воде		
ОБЛАСТЬ ЗНАНИЯ 05 - науки о земле	КОД(Ы) КЛАССИФИКАТОРА 01-201 05-513	
ВИД КОНКУРСА НЦНИ_а - Совместный конкурс с НЦНИ: инициативные PICS		
ФАМИЛИЯ, ИМЯ, ОТЧЕСТВО РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА Шокин Юрий Иванович		ТЕЛЕФОН РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА
ПОЛНОЕ НАЗВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ, ГДЕ РЕАЛИЗУЕТСЯ ПРОЕКТ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук		
ОБЪЕМ СРЕДСТВ, ФАКТИЧЕСКИ ПОЛУЧЕННЫХ ЗА 2012 г. 600000 руб.		
ЧИСЛО УЧАСТНИКОВ ПРОЕКТА (включая руководителя) 10	ЧИСЛО УЧАСТНИКОВ, ИМЕЮЩИХ УЧЕНУЮ СТЕПЕНЬ 5	ЧИСЛО МОЛОДЫХ (до 35 лет включительно) УЧАСТНИКОВ 6
Соммер Анна Федоровна		
Кутергин Виктор Александрович		
Худякова Виктория Константиновна		
Хакимзянов Гаяз Салимович		
Чубаров Леонид Борисович		
Шокина Нина Юрьевна		
Гусев Олег Игоревич		
Бейзель Софья Александровна		
Мартемьянычева Ярославна Евгеньевна		
ПОДПИСЬ РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА		ДАТА ПОДАЧИ ОТЧЕТА 31.01.2013

ОТЧЕТ ЗА 2012 ГОД ПО ПРОЕКТУ РФФИ 10-05-91052-НЦНИ_а

Форма 501. КРАТКИЙ НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ

1.1. Номер проекта

10-05-91052

1.2. Руководитель проекта

Шокин Юрий Иванович

1.3. Название проекта

Численное моделирование сильно нелинейных волн на воде

1.4. Вид конкурса

НЦНИ_а - Совместный конкурс с НЦНИ: инициативные PICS

1.5. Год представления отчета

2013

1.6. Вид отчета

итоговый (2010-2012)

1.7. Аннотация

В ходе выполнения проекта исполнителями:
получены уравнения, описывающие движение подводного оползня по пространственно неоднородному криволинейному склону;
выведены нелинейно-дисперсионные уравнения мелкой воды, описывающая распространение поверхностных волн над подвижным дном и допускающие в качестве своего следствия закон изменения полной энергии;
разработаны конечно-разностные алгоритмы с расщеплением для расчета поверхностных волн на основе нелинейно-дисперсионных уравнений волновой гидродинамики с учетом подвижности дна;
выведены нелинейно-дисперсионные уравнения второго приближения теории мелкой воды на вращающейся притягивающей сфере;
разработаны новые аппроксимации краевых условий на подвижной линии уреза, основанные на использовании локально-аналитических решений уравнений мелкой воды;
исследованы волновые режимы, возникающие в прибрежной зоне при сходе оползня с подводного склона;
проведены совместные рабочие семинары, сделаны доклады по результатам совместных исследований, опубликованы и подготовлены к печати совместные статьи.

1.8. Полное название организации, где реализуется проект

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

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

Подпись руководителя проекта

Форма 502. КРАТКИЙ НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

2.1. Номер проекта

10-05-91052

2.2. Руководитель проекта

Shokin Yurii Ivanovich

2.3. Название проекта

Numerical simulation of highly nonlinear water waves

2.4. Год представления отчета

2013

2.5. Вид отчета

ИТОГОВЫЙ (2010-2012)

2.6. Аннотация

Within the project:

the equations are derived describing the motion of an underwater landslide on spatially inhomogeneous curved slope;

nonlinear dispersive shallow water equations are derived describing the propagation of surface waves on moving bottom and admitting as its effect the variation of the total energy;

finite difference splitting algorithms are developed for the calculation of the surface waves on the basis of nonlinear dispersive wave hydrodynamics equations with non-stationary bottom;

nonlinear dispersion equations of the second approximation of the theory of shallow water on a rotating attracting sphere are derived;

new approximation of the boundary conditions on the moving shoreline is developed, based on the use of locally-analytical solutions of the shallow water;

wave regimes, generated by the submarine landslide in the coastal zone, are investigated;

joint workshops are held, presentations on the results of joint research are made, joint articles are published and prepared for printing.

2.7. Полное название организации, где реализуется проект

Institute of Computational Technologies SB RAS

Подпись руководителя проекта

Форма 503М. РАЗВЕРНУТЫЙ НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ

- 3.1. *Номер проекта*
10-05-91052
- 3.2. *Название проекта*
Численное моделирование сильно нелинейных волн на воде
- 3.3. *Коды классификатора, соответствующие содержанию фактически проделанной работы (в порядке значимости)*
01-201 05-513
- 3.4. *Объявленные ранее цели проекта на 2012 год*
Конкретная фундаментальная задача проекта состояла в создании и исследовании нового математического инструментария для изучения сильно нелинейных волн на воде.
Согласованный с зарубежными партнерами план научных исследований на весь срок выполнения проекта включал решение следующих задач:
вывод и исследование нелинейно-дисперсионных (НЛД-) моделей для описания поверхностных волн над подвижным дном; вывод закона движения деформируемого оползня по неровному подводному склону; разработка адаптивных конечно-разностных алгоритмов на основе иерархии нелинейных моделей волновой гидродинамики для расчета поверхностных волн, распространяющихся над подвижным дном;
вывод нелинейно-дисперсионных уравнений старших приближений для моделирования распространения на трансокеанические расстояния длинных поверхностных волн типа цунами с учетом эффектов сферичности Земли;
разработка численных алгоритмов решения этих уравнений;
разработка численных алгоритмов в рамках нелинейной модели мелкой воды для расчета наката волн на берег с учетом неровности дна и рельефа суши в прибрежной зоне;
применение разработанных алгоритмов для численного исследования процессов генерации нелинейных поверхностных волн, порожденных подводными оползнями, стоком воды в донные трещины водохранилища, а также процессов взаимодействия поверхностных волн с подвижными волнозащитными стенками.
В 2012 году предполагалось:
выполнить численное моделирование поверхностных волн, возникающих при движении оползня по неровному склону, на основе плановой модели мелкой воды первого приближения, полной и приближенных НЛД-моделей и модели трехмерных потенциальных течений жидкости со свободной границей;
на основе нелинейной модели плоских потенциальных течений жидкости разработать алгоритм и выполнить численное моделирование процесса взаимодействия поверхностных волн с подвижными волнозащитными стенками;
разработать конечно-разностную схему второго порядка аппроксимации для моделирования распространения длинных поверхностных волн в рамках нелинейно-дисперсионной модели Буссинеска на сфере;
в рамках плановой модели мелкой воды выполнить расчеты наката поверхностных волн на реальное побережье с использованием расчетных схем на подвижных сетках, адаптирующихся к сложной форме береговой линии.
- 3.5. *Степень выполнения поставленных в проекте задач*
Все поставленные в проекте задачи решены.
- 3.6.1. *Полученные за отчетный год важнейшие результаты*
получены уравнения, описывающие движение подводного оползня по пространственно неоднородному криволинейному склону;
выведена система полных нелинейно-дисперсионных уравнений мелкой воды,

описывающая распространение поверхностных волн над подвижным дном. Для полной НЛД- модели получен закон изменения полной энергии при движении жидкости со свободной границей над подвижным дном и закон изменения потенциального вихря.

получены НЛД-модели типа Буссинеска, допускающие в качестве своего следствия закон сохранения полной энергии;

разработаны конечно-разностные алгоритмы с расщеплением для расчета поверхностных волн на основе полных и приближенных нелинейно-дисперсионных уравнений волновой гидродинамики с учетом подвижности дна; выведены нелинейно-дисперсионные уравнения второго приближения теории мелкой воды на вращающейся притягивающей сфере;

разработаны новые аппроксимации краевых условий на подвижной линии уреза, основанные на использовании локально-аналитических решений уравнений мелкой воды;

исследованы волновые режимы, возникающие в прибрежной зоне при сходе оползня с подводного склона;

важнейшим результатом следует считать и наладившееся тесное плодотворное сотрудничество исполнителей проекта. Были проведены совместные рабочие семинары в 2011 и 2012 годах, выступления на семинарах по месту работы по результатам совместных исследований. В ноябре-декабре 2011 года были организованы поездки российских участников проекта к французским коллегам с целью обсуждения результатов работ, критического сравнения различных методов и подходов, применяющихся для решения задач волновой гидродинамики.

Предметом совместных исследований российских и французских исполнителей проекта стали задача о влиянии горизонтальных перемещений дна океана при подводном землетрясении на характеристики генерируемых волн цунами, задача о генерации нелинейных поверхностных волн подводным оползнем, движущимся по неровному склону под действием сил тяжести, плавучести, гидродинамического сопротивления и трения о дно, проблема вывода и исследования нелинейно-дисперсионных уравнений. Исполнителям удалось выполнить сравнение результатов, полученных на основе иерархии нелинейных математических моделей, вычислительных методов и алгоритмов, разработанных как российскими участниками проекта, так и французскими.

3.6.2. *Работа, выполненная российскими участниками совместного проекта*

получены уравнения, описывающие движение подводного оползня по пространственно неоднородному криволинейному склону под действием сил тяжести, плавучести, трения и сопротивления воды;

с использованием подхода, основанного на предварительном масштабировании трехмерных уравнений Эйлера и введении малых параметров, выведена система полных нелинейно-дисперсионных уравнений мелкой воды, описывающая распространение поверхностных волн над подвижным дном. Для полной НЛД- модели получен закон изменения полной энергии при движении жидкости со свободной границей над подвижным дном и закон изменения потенциального вихря;

получены НЛД-модели типа Буссинеска, допускающие в качестве своего следствия закон баланса полной энергии;

разработаны конечно-разностные алгоритмы с расщеплением для расчета поверхностных волн на основе полных и приближенных нелинейно-дисперсионных уравнений волновой гидродинамики с учетом подвижности дна; выведены нелинейно-дисперсионные уравнения второго приближения теории мелкой воды на вращающейся притягивающей сфере;

разработаны новые аппроксимации краевых условий на подвижной линии уреза,

основанные на использовании локально-аналитических решений уравнений мелкой воды;
исследованы волновые режимы, возникающие при сходе оползня с подводного склона. Выполнен сравнительный анализ результатов численного моделирования процесса генерации поверхностных волн подводным оползнем в ограниченном водоеме на основе модели мелкой воды, полной нелинейно-дисперсионной модели, новых моделей Буссинеска и модели потенциальных течений жидкости со свободной границей. Береговая линия рассматривалась как вертикальная стенка, от которой происходило отражение волн;
выполнено численное моделирование реального цунами, произошедшего у побережья Папуа-Новой и порожденного сходом большого подводного оползня; детально исследованы особенности волнообразования при стоке воды в донные трещины водохранилища и процессы взаимодействия поверхностных волн с подвижными волнозащитными стенками, с неподвижными объектами и защищающими их частично проницаемыми экранами, с береговыми сооружениями сложного профиля.

- 3.6.3. *Работа, выполненная зарубежными участниками совместного проекта* усовершенствованы модели движения оползня по пространственно однородному криволинейному склону за счет учета диссипативных сил;
с использованием вариационных принципов выведены системы полных и приближенных нелинейно-дисперсионных уравнений мелкой воды, описывающие распространение поверхностных волн над подвижным дном;
разработаны конечно-объемные алгоритмы для расчета поверхностных волн на основе приближенных нелинейно-дисперсионных уравнений волновой гидродинамики с учетом подвижности дна;
исследованы волновые режимы, возникающие при сходе оползня с подводного склона ограниченного водоема. Выполнен сравнительный анализ результатов численного моделирования процесса генерации поверхностных волн подводным оползнем в ограниченном водоеме на основе модели мелкой воды и моделей Буссинеска. Исследованы величины заплесков порожденных оползнем волн на криволинейный откос и особенности передачи энергии движущегося оползня окружающей его воде;
на основе численных экспериментов открыто новое волновое явление – резонансное усиление высоты наката на берег волн определенной длины при определенных значениях угла наклона откоса. Впоследствии результаты численных экспериментов были подтверждены лабораторными экспериментами, независимо выполненными другими исследователями.

- 3.7. *Степень новизны полученных результатов*
Все перечисленные выше важнейшие результаты являются новыми и получены впервые.
Все выведенные нелинейно-дисперсионные модели на вращающейся притягивающей сфере являются новыми.
Подход, основанный на использовании решений уравнений мелкой воды для конструирования разностных краевых условий на подвижной линии уреза, является новым.
Уравнения движения квазидеформируемого оползня по пространственно-неоднородному подводному склону получены впервые.
Впервые получены слабо дисперсионные уравнения для волн малой амплитуды, допускающие, в отличие от классических уравнений Буссинеска, в качестве своего следствия закон баланса полной энергии.
Новыми являются разработанные на единой методической основе конечно-разностные алгоритмы с расщеплением для расчета поверхностных волн над

подвижным дном на основе как полных, так и приближенных нелинейно-дисперсионных уравнений волновой гидродинамики.

Впервые детально и с использованием иерархии математических моделей и вычислительных алгоритмов исследованы волновые режимы, возникающие в ограниченном водоеме при сходе оползня с крутого берегового склона.

3.8. *Сопоставление полученных результатов с мировым уровнем*

Все полученные результаты соответствуют мировому уровню исследований в области изучения поверхностных волн на воде в прибрежных акваториях и в открытом океане.

3.9. *Методы и подходы, использованные в ходе выполнения проекта*
Важнейшим результатом выполнения проекта стали уравнения, описывающие движение подводного оползня по пространственно неоднородному криволинейному склону.

В работах Harbitz С. В., Pedersen G., Gjevik, В. (1993), Pelinovsky E., Poplavsky A. (1996) выведены уравнения движения подводного оползня по плоскому откосу с учетом сил тяжести, плавучести и сопротивления воды. Эти работы послужили толчком к появлению большого числа других работ, в которых по-прежнему для плоского откоса и по-прежнему для недеформируемого оползня были выполнены аналитические, численные и экспериментальные исследования процесса генерации поверхностных волн движущимся оползнем.

Ясно, что для описания ситуаций, более близких к реальности, необходим учет кривизны донной поверхности. В рамках настоящего проекта были получены уравнения, описывающие движение подводного оползня по криволинейному склону под действием сил тяжести, плавучести, трения и сопротивления воды. При этом вначале предполагалось, что как форма оползня, так и форма подводного склона зависят лишь от одной из пространственных координат и неизменны во втором пространственном направлении, вследствие чего процесс генерации поверхностных волн можно было моделировать в рамках одномерных моделей.

Затем мы отказались от этих упрощений и перешли к более реальной ситуации, а именно, учли пространственный характер изменения формы оползня и неровного подводного склона. Для такого случая уравнения движения оползня были получены впервые участниками проекта. Эти уравнения являются обобщением уравнений, приведенных в упомянутых выше работах и справедливых только для плоского откоса. Оригинальность подхода при выводе уравнений движения заключалась в том, что оползень отождествлялся с материальной точкой, движущейся по искривленной поверхности, однако в качестве силы, действующей на эту точку, бралась интегральная сумма сил, действующих на элементарные объемы оползня. Тем самым, при подсчете сил учитывалась форма оползня и его пространственное расположение на донной поверхности.

На рис. 1 изображена модельная акватория водохранилища с пространственно неоднородным дном и показана траектория движения оползня. При варьировании определяющих параметров могут получаться другие интересные траектории движения оползня, особенно при малом трении о дно. В ходе выполнения проекта эта модельная акватория использовались многократно при тестировании новых численных алгоритмов, разработанных для исследования поверхностных волн, вызванных движением подводного оползня.

Другим результатом стал новый способ вывода системы полных нелинейно-дисперсионных уравнений мелкой воды, описывающих распространение поверхностных волн над подвижным дном, и полученные законы изменения полной энергии при движении жидкости со свободной

границей над подвижным дном и изменения потенциального вихря.

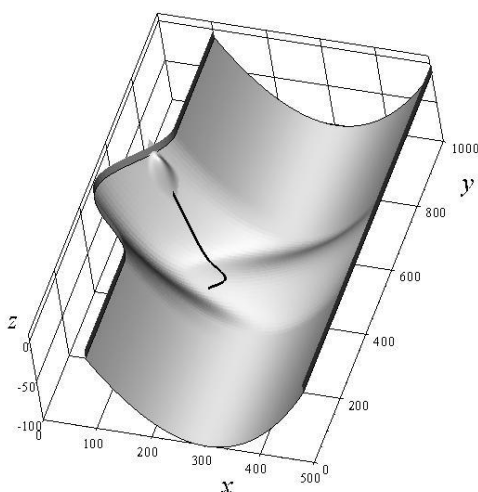


Рис.1. Траектория движения оползня по неровному дну водоема

Участниками проекта удалось при более слабых, чем в известных публикациях, ограничениях на скорость трехмерного вихревого течения жидкости над подвижным дном вывести систему полных нелинейно-дисперсионных уравнений мелкой воды. Для вывода уравнений использовался подход, основанный на предварительном масштабировании трехмерных уравнений Эйлера и введении малых параметров, позволяющих оценить вклад нелинейности, дисперсии и подвижности дна. При выводе уравнений не использовались общепринятые предположения о потенциальности течения или о неизменности горизонтальных компонент вектора скорости от вертикальной координаты. Оказалось, что эти жесткие ограничения можно заменить более слабым предположением о независимости от вертикальной координаты только первой составляющей в разложении вектора скорости по малому параметру, отвечающему за дисперсию волн. Для нелинейно-дисперсионной модели получен закон изменения полной энергии при движении жидкости со свободной границей над подвижным дном и оригинальный закон изменения потенциального вихря, до настоящего времени известный только для уравнений мелкой воды первого приближения. Оба полученных закона имеют важное значение для верификации численных алгоритмов.

К важнейшим результатам относятся и полученные НЛД-модели типа Буссинеска, допускающие в качестве своего следствия закон сохранения полной энергии.

Как уже говорилось, полная нелинейно-дисперсионная модель допускает в качестве своего следствия закон изменения энергии в случае подвижного дна (закон сохранения энергии в случае стационарного дна), являющийся аналогом закона изменения энергии (сохранения энергии) в исходной трехмерной модели течений идеальной несжимаемой жидкости со свободной границей. Известно, что модель мелкой воды первого приближения также допускает в качестве своего следствия закон изменения (сохранения) энергии. Однако, известные промежуточные НЛД-модели, находящиеся в иерархии гидродинамических моделей между бездисперсионной моделью мелкой воды на подвижном дне и полной НЛД-моделью на подвижном дне, уже не обладают законом изменения энергии. Здесь имеется в виду следующее. Если в законе сохранения энергии трехмерной модели использовать разложение компонент скорости по малому

параметру, отвечающему за дисперсию, и применить те же упрощающие предположения, при которых были получены уравнения НЛД-модели, то должен получиться закон сохранения энергии для НЛД-модели. С другой стороны, закон сохранения энергии может быть получен независимо, путем эквивалентных преобразований самих НЛД-уравнений, без привлечения трехмерной модели. Эти два закона должны совпасть, но для известных моделей типа Буссинеска они, как правило, не совпадают. В последнем случае мы и говорим, что приближенная модель не допускает в качестве своего следствия закон сохранения полной энергии. Оказалось, что это является следствием необоснованного отбрасывания некоторых членов уравнений полной НЛД-модели при переходе к упрощенным НЛД-моделям с применением известного в теории длинных волн условия Буссинеска. К примеру, для модели Перегринана аналог закона сохранения энергии не выполняется даже в случае ровного горизонтального дна. В ходе выполнения проекта получены две приближенные НЛД-модели (слабо дисперсионная, т.е. для малых амплитуд, и слабо дисперсионная при дополнительном предположении о слабой деформации дна), обладающие законом изменения энергии.

Подчеркнем главную особенность двух полученных нами слабо дисперсионных моделей типа Буссинеска: это наличие адекватных физике законов изменения энергии и дивергентная форма записи всех уравнений. Можно сказать, что эти упрощенные модели сохраняют очень важные физические свойства полных НЛД-моделей, которые, в свою очередь, наследуют эти свойства у трехмерных моделей гидродинамики. Это обстоятельство выгодно отличает полученные в настоящем проекте модели от других хорошо известных моделей типа Буссинеска.

Важнейшим результатом работы участников проекта является разработка конечно-разностных алгоритмов с расщеплением для расчета поверхностных волн на основе полных и приближенных нелинейно-дисперсионных уравнений волновой гидродинамики с учетом подвижности дна.

В ходе выполнения проекта разработаны новые численные алгоритмы расчета поверхностных волн над подвижным дном на основе полученных нами полной нелинейно-дисперсионной модели, слабо-дисперсионной модели и слабо-дисперсионной модели в условиях слабой деформации дна. В отличие от классических уравнений мелкой воды в уравнения движения НЛД-модели входят смешанные производные по времени и пространственным переменным от компонент вектора скорости, что затрудняет построение обоснованных численных алгоритмов. Используя известный в теории дифференциальных уравнений прием понижения порядка производных путем добавления к исходным неизвестным новых зависимых переменных, мы избавляемся от этих смешанных производных высокого порядка, вводя дополнительную зависимую переменную – дисперсионную составляющую давления и добавляя к исходным уравнениям НЛД-модели уравнение относительно новой зависимой переменной. В результате получается расширенная система НЛД-уравнений, состоящая из уравнения неразрывности, уравнения движения и уравнения относительно дисперсионной составляющей давления.

Оригинальность такого подхода состоит в том, что расширенная система фактически оказывается расщепленной на эллиптическую и гиперболическую части, что позволяет использовать для каждой из частей известные и хорошо изученные алгоритмы. Уравнение для дисперсионной составляющей давления является равномерно эллиптическим, и для нахождения численного решения этого уравнения можно построить разностные схемы с положительно определенными операторами. Левые части уравнений движения полностью совпадают с левыми частями системы уравнений мелкой воды первого гидродинамического

приближения, поэтому для численного решения гиперболической части НЛД-уравнений можно использовать, например, схему предиктор-корректор, хорошо зарекомендовавшую себя при исследовании волновых процессов в рамках модели мелкой воды. Оригинальность используемого нами подхода еще и в том, что структура уравнений полной НЛД-модели полностью сохраняется и в случае приближенных НЛД-моделей, что позволяет и для них выполнять расщепление на систему уравнений гиперболического типа и равномерно эллиптическое уравнение. Поэтому алгоритмы численного решения полных НЛД-уравнений не имеют принципиальных отличий от алгоритмов решения задач в рамках приближенных моделей. Единообразие алгоритмов для всей иерархии НЛД-моделей выгодно отличает наш подход от известных разнородных приемов решения приближенных НЛД-уравнений.

Важнейшим результатом работы по проекту является полученная авторами нелинейно-дисперсионная модель второго приближения теории мелкой воды на вращающейся притягивающей сфере.

В настоящее время для численного моделирования процесса распространения в океанах и морях длинных поверхностных волн используется, как правило, модель мелкой воды, полученная в предположении, что толщина слоя воды мала, вертикальная компонента вектора скорости частиц воды равна нулю, а горизонтальные компоненты не зависят от вертикальной координаты. Новые натурные данные по сильнейшим цунами последних лет свидетельствуют о том, что для моделирования распространения волн цунами в ряде случаев требуются более сложные математические модели, способные отражать вертикальную структуру течения, а также учитывать дисперсию волн и эффекты, обусловленные сферичностью и вращением Земли.

Недавно начали появляться публикации, посвященные описанию численных алгоритмов, основанных на слабо нелинейных, слабо дисперсионных моделях Буссинеска на сфере, которые выводились при весьма жестких ограничениях на определяющие параметры, в частности при условии малости амплитуды волн. Полная НЛД-модель (без предположения о малости амплитуды волн) на вращающейся притягивающей сфере была получена участниками проекта впервые. Из этой полной НЛД-модели получен целый класс новых приближенных НЛД-моделей на сфере, полезных с практической точки зрения: сферические аналоги плановых моделей Перегринна, Дорфмана-Яговдика и Буссинеска.

В 2012 г. разработана также новая схема второго порядка аппроксимации для модели Буссинеска на сфере. Новизна здесь в том, что аппроксимируемые уравнения Буссинеска записаны в виде уравнений полной НЛД-модели, из правых частей которых отброшены некоторые слагаемые, имеющие определенный порядок малости в безразмерных переменных. Полученные таким образом уравнения движения модели Буссинеска сохраняют структуру уравнений мелкой воды первого гидродинамического приближения, отличаясь от последних только правой частью, поэтому имеющаяся у нас схема второго порядка аппроксимации с оригинальными процедурами монотонизации для бездисперсионных уравнений мелкой воды удалось обобщить и для уравнений Буссинеска, при этом на каждом шаге по времени дополнительно решается задача для эллиптического уравнения, но не относительно компонент скорости, как это делается в известных подходах, а относительно осредненного по глубине негидростатического давления модели Буссинеска.

Еще одним оригинальным результатом работы коллектива стала разработка нового подхода к определению подвижной линии уреза в задачах наката волн на берег.

В настоящее время наибольшее распространение для расчета зон

затопления при выходе волны цунами на берег получили конечно-разностные методы сквозного счета, в которых нестационарная область течения с подвижной линией уреза вкладывается в большую область простой формы, например в прямоугольник, содержащий акваторию, линию уреза и прилегающую к берегу часть суши. В этой области с неподвижной границей решаются те же уравнения гидродинамики, что и в исходной области течения, в процессе расчета проводится анализ вычисленных значений полной глубины воды и линия уреза определяется, например, как граница области, в узлах которой полная глубина равна нулю или не превосходит заранее заданной малой величины. Есть и другой подход, которого мы и придерживались в настоящем проекте – счет с выделением линии уреза, т.е. счет в области с подвижной границей. Оригинальность этого подхода в том, что область течения покрывается подвижной сеткой, одна из крайних координатных линий которой совпадает с подвижной линией уреза, движущейся по береговому откосу в сторону суши при накате волн и в сторону моря – при откате. Таким образом счет выполняется только в области, занятой водой.

В настоящем проекте мы определяли положение границы вода-суша, используя в окрестности линии уреза точные аналитические решения уравнений мелкой воды. Вначале такой подход применялся исполнителями проекта для одномерных уравнений мелкой воды. Новизна была в том, что численное моделирование движения точки уреза выполнялось на основе полученного аналитически закона движения этой точки для произвольного рельефа дна и прилегающей суши. Оказалось, что взаимодействие волн с криволинейным береговым склоном имеет более сложный характер, чем в случае плоского откоса. Например, отличительной особенностью взаимодействия одиночной волны с пологим неровным склоном является колебательный характер процесса наката-отката (см. рис. 2). На основе вычислительных экспериментов установлено, что максимальная амплитуда колебаний уменьшается при возрастании крутизны склона.

В дальнейшем мы обобщили метод адаптивных сеток для плановых уравнений мелкой воды при решении задач по определению зон затопления при накате волн цунами на берег. Поскольку динамически адаптивная сетка должна перестраиваться при переходе с одного временного слоя на другой, то временные затраты на ее построение становятся столь большими, что значительно превосходят затраты на решение самих разностных уравнений использованной нами явной схемы предиктор-корректор.

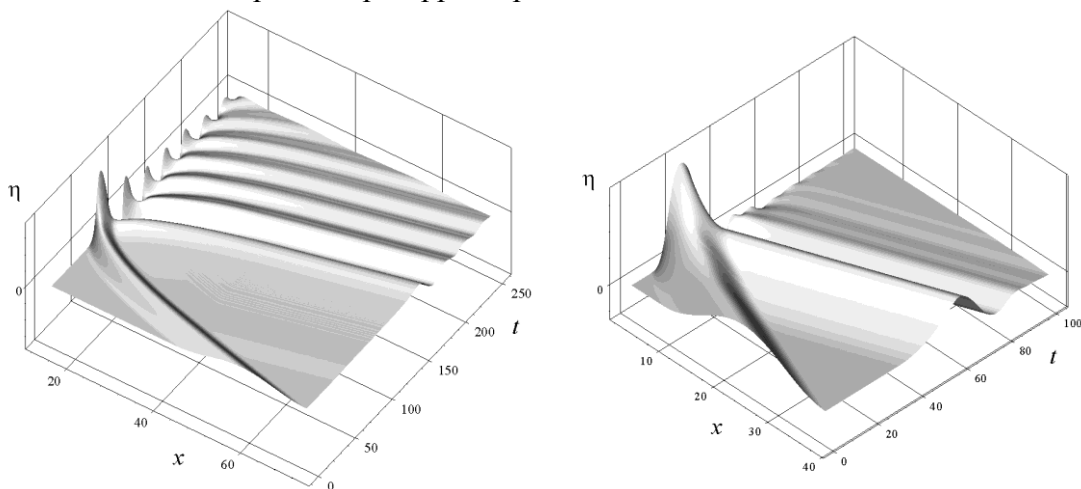


Рис.2. Динамика свободной границы при накате одиночной волны на пологий откос (слева) и на крутой (справа)

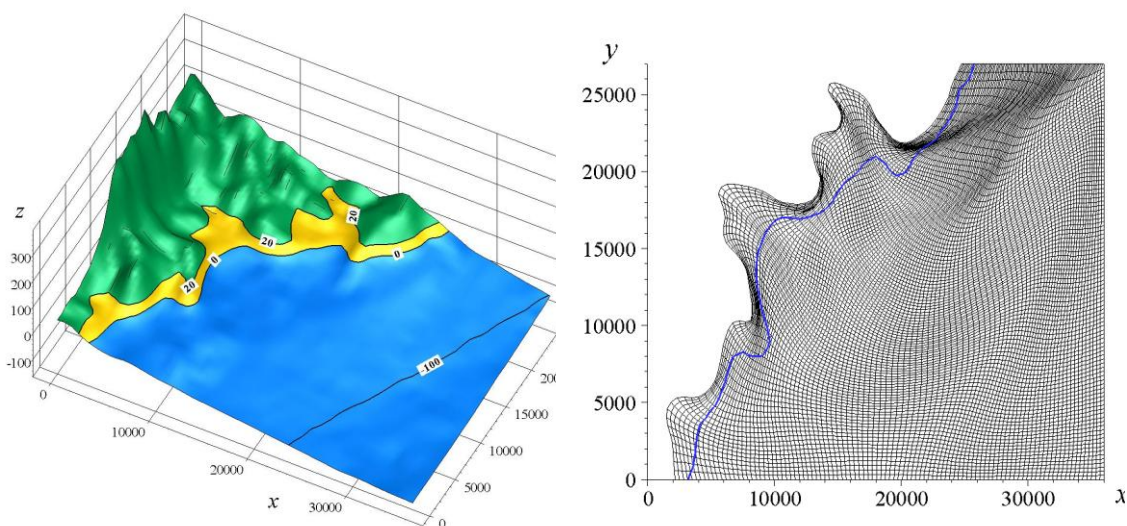


Рис. 3. Рельеф прибрежной зоны (слева) и фрагмент расчетной сетки, покрывающей часть суши и прибрежную акваторию (справа). Синим цветом выделена начальная линия уреза

Для сокращения таких затрат мы применяли следующий прием. В расчетах использовались две криволинейные сетки. Первая, называемая базовой, строилась заранее, до решения задачи, она покрывала акваторию и часть прилегающей к ней суши. На рис. 3 изображена именно базовая сетка. Ее крайняя левая координатная линия проходит по суше, например, по некоторой изолинии рельефа, на достаточном удалении от начальной линии уреза. Вторая сетка, называемая расчетной, строилась на каждом шаге по времени, адаптировалась к решению, но была в некотором смысле «одномерной» поскольку ее узлы не могли перемещаться произвольным образом в двух направлениях, а могли двигаться только вдоль координатных линий одного семейства базовой сетки. Применительно к базовой сетке, показанной на рис. 3, это означает, что узлы могли перемещаться вдоль координатных линий первого семейства, при этом крайние левые узлы расчетной сетки всегда совпадают с точками пересечения текущего положения линии уреза с координатными линиями первого семейства базовой сетки, и расположение узлов расчетной сетки определяется путем решения одномерных уравнений метода эквираспределения для построения сетки на плоских кривых, каковыми в данном случае являются координатные линии первого семейства базовой сетки. Предложенный подход дал приемлемые результаты для акваторий с плавно меняющейся линией уреза.

Из прикладных проблем предметом совместного исследования российских и французских участников проекта стала задача изучения поверхностных волн, возникающих при движении оползня по подводному склону прибрежной зоны морской акватории и крутому склону ограниченного водохранилища. Новизна этих исследований связана с использованием новых уравнений движения оползня, учитывающих неровность подводного склона и деформацию формы оползня, а также применением в расчетах адаптирующихся сеток.

Численное моделирование генерируемых оползнем поверхностных волн выполнялось с использованием разработанных авторами алгоритмов, основанных на модели потенциальных течений, полной и приближенных нелинейно-дисперсионных моделей, нелинейной модели мелкой воды первого приближения.

Установлено, что для морского склона с монотонно возрастающей глубиной генерируемая оползнем волновая картина следующая (см. рис.4). На

поверхности воды перед набирающим скорость оползнем постепенно формируется одиночная волна, которая с большей, чем у оползня скоростью, движется в сторону увеличения глубин и уходит в открытое море. Непосредственно над движущимся оползнем свободная граница имеет вид «впадины», которая вместе с оползнем удаляется от берега и исчезает через некоторое время после остановки оползня. Для береговых сооружений представляет опасность волна понижения, появляющаяся на берегу вскоре после начала оползневого процесса и генерирующая впоследствии волну наката.

Для ограниченных водохранилищ (см. рис.5) волновая картина иная: головная волна повышения после отражения от противоположного берега проходит водоем в обратном направлении, взаимодействуя по пути со «впадиной» (см. рис.5), и набегает на береговой склон, с которого сошел оползень. После отражений от противоположных берегов формируется одиночная волна значительной амплитуды, которая может многократно пересекать водоем, совершая при этом несколько больших заплесков на его берега. Более сложным является и движение оползневой массы: пройдя точку наибольшей глубины, она может по инерции подняться на некоторую высоту противоположного склона и сдвинуться затем в обратную сторону. При малом угле трения θ_* могут возникать более сложные траектории движения оползня с несколькими изменениями направления перемещения (см. рис.6).

Приведенные на рисунках 4-6 результаты получены при использовании модели мелкой воды первого приближения и водоемов с формой дна, не зависящей от одной из горизонтальных координат. Расчеты на основе модели потенциальных течений и НЛД-моделей дают не одиночную волну, а системы диспергирующих волн. Несмотря на отличие волновых картин, воспроизводимых различными математическими моделями, максимальные значения заплесков на берег оказались сопоставимыми в некоторых диапазонах изменения определяющих параметров. Установлено также, что из всех параметров, входящих в уравнение движения оползня, наиболее существенно на величину максимального заплеска влияют размеры оползня и его плотность, т.е. параметры, которые нетрудно оценить при натурных измерениях. Быстро движущиеся в мелководной зоне большие объемы оползневой массы приводят к возникновению высоких поверхностных волн, которые при накате на берег дают большие заплески. Кроме того, проведенные нами вычислительные эксперименты доказывают, что криволинейность склона оказывает существенно влияние на движение оползня и, как следствие, на величины максимальных заплесков.

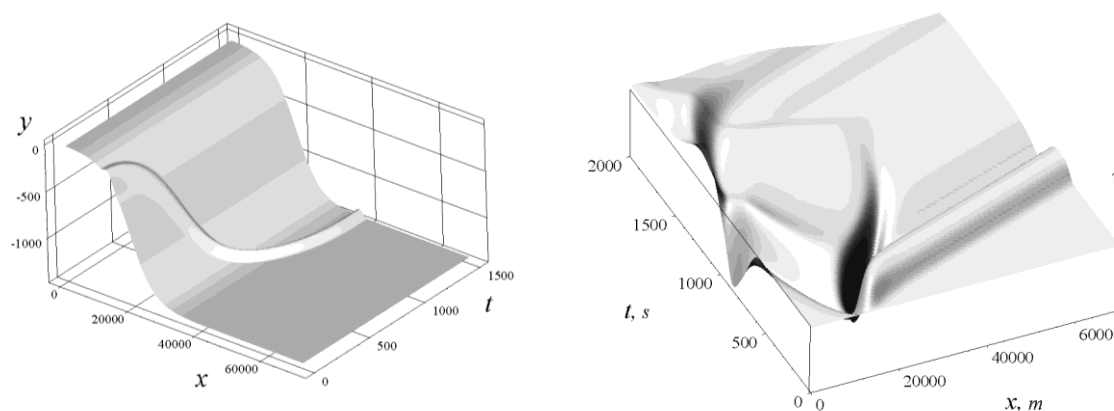


Рис.4. Динамика движения оползня по морскому склону (слева) и динамика генерируемых оползнем поверхностных волн (справа)

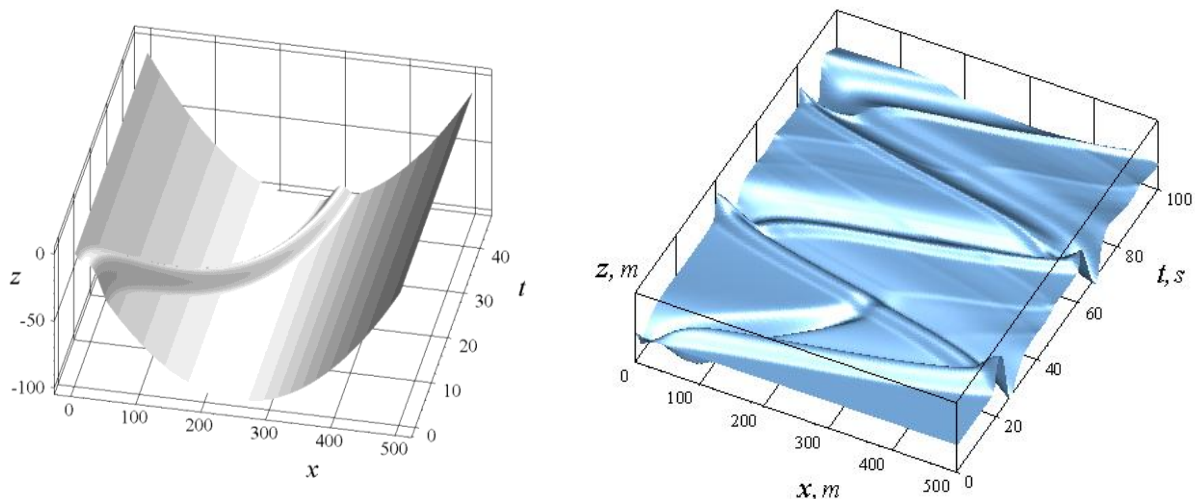


Рис.5. Динамика движения оползня по подводному склону водохранилища (слева) и динамика генерируемых оползнем поверхностных волн (справа)

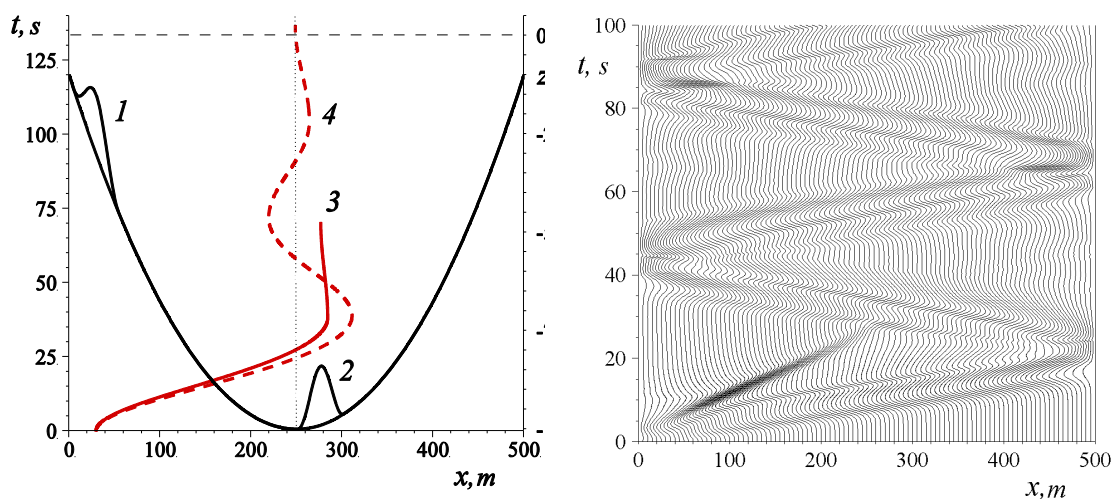


Рис.6. Слева: движение оползня по неровному дну модельного водоема: 1, 2 – форма оползня в начальный момент времени (1) и в момент остановки (2); 3, 4 – траектории движения вершины оползня; 1, 2, 3 – $\theta_* = 5^\circ$; 1, 4 – $\theta_* = 1^\circ$. Справа: траектории узлов адаптивной сетки

Разработанные алгоритмы применялись также для моделирования поверхностных волн, генерируемых оползнем пространственной формы, скользящим по пространственно неоднородному подводному склону модельного водоема (см. рис.1). Моделирование выполнялось на основе модели трехмерных потенциальных течений, полной и приближенных плановых нелинейно-дисперсионных моделей и плановой нелинейной модели мелкой воды первого приближения. Некоторые результаты изображены на рис.7 в виде поверхности воды в один и тот же момент времени. Видно, что в пространственном случае, как и в одномерном, НЛД-модель дает систему диспергирующих волн. Напротив, расчеты по плановой модели мелкой воды первого приближения показывают, что в рамках этой модели образуются ярко выраженные одиночные волны. Общим для всех моделей является образование над оползнем отрицательной волны и двух положительных «всплесков» над передним и задним его фронтами, которые сопровождают оползень во все время его движения. Амплитуды этих «сопровождающих» волн полностью определяются скоростью движения оползня и глубиной его текущего положения. Чем меньше становится скорость и чем больше глубина, тем меньше оказывается высота этих волн, и наоборот. По мере

распространения волн происходит их взаимодействие с неровностями дна и береговыми линиями. Максимальные заплески на береговой линии наблюдаются в направлении первоначального сдвига оползня.

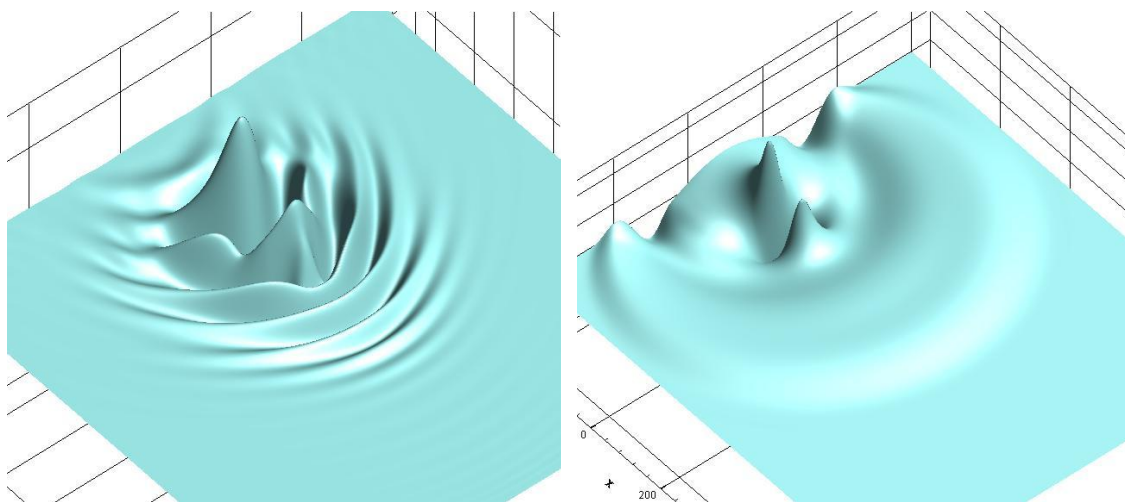


Рис.7. Фрагменты графиков свободной поверхности в момент времени $t = 10$ с, полученные в расчете по полной нелинейно-дисперсионной модели (слева), по плановой модели мелкой воды (справа)

В отчетный период было проведено также численное моделирование цунами, произошедшего у побережья Папуа-Новой Гвинеи 17 июля 1998г. Известно, что это цунами было порождено сходом большого подводного оползня. Это событие хорошо исследовано и документировано, что позволяет использовать его в качестве тестового примера для оценки различных подходов к моделированию оползневой механизма генерации цунами.

На первом этапе исследований были проведены расчеты по определению цунамиопасности различных возможных мест начального расположения оползня на склоне дна. Было рассмотрено 11 таких начальных положений, в том числе и явно не соответствующих событию 1998 г. Другие параметры, определяющие оползневый процесс в нашей модели квазинедеформируемого пространственного оползня, брались близкими к тем, что использовались другими авторами, моделировавшими историческое цунами.

На рис. 8 слева приведены траектории центра масс оползня от рассмотренных нами его начальных положений. Как показывает этот рисунок, возможна как остановка оползня посередине склона в небольшой впадине – «амфитеатре» на глубине порядка 2500 метров (траектории 1–6), так и его движение до самой глубокой части акватории (траектории 7–11). Справа на рис. 8 показано распределение максимальных высот волн вдоль береговой линии в одном из случаев. Наиболее близко соответствующими произошедшему в 1998 г. событию оказались траектории движения и распределения высот волн вдоль побережья для начальных положений оползня в точках «5» и «6», с остановкой оползня в «амфитеатре».

Далее была проведена еще одна серия расчетов с 11 разными положениями очага уже в районе этих точек. На рис. 9 слева показано распределение высот волн от одной из них, дающей наиболее близкое к натурному, изображенному на рис. 9 справа.

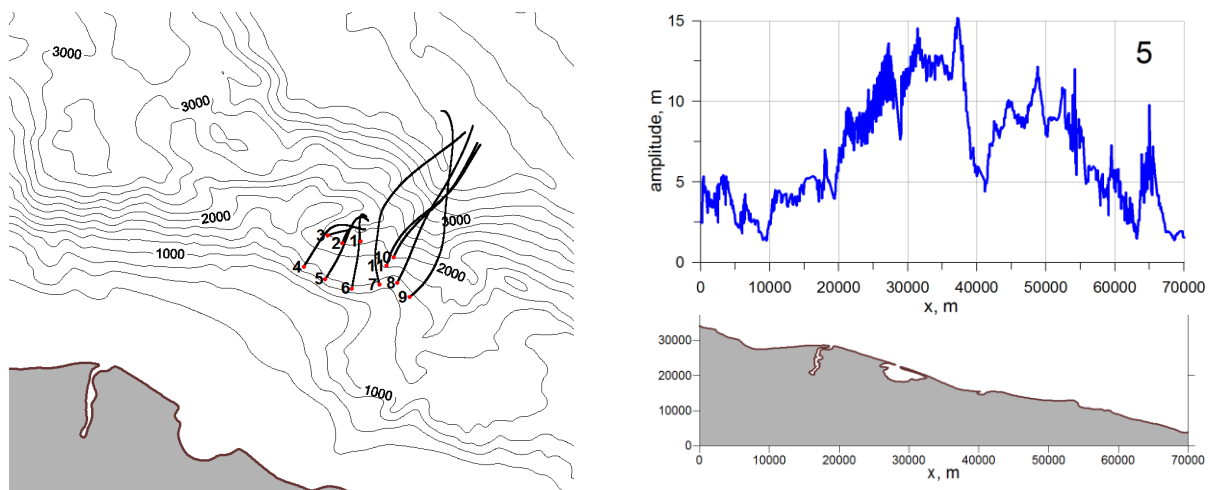


Рис. 8. Слева – траектории движения вдоль склона центра масс оползня при различных его начальных положениях. Справа – распределение высот волн вдоль береговой линии, полученных при начальном положении центра масс в точке «5».

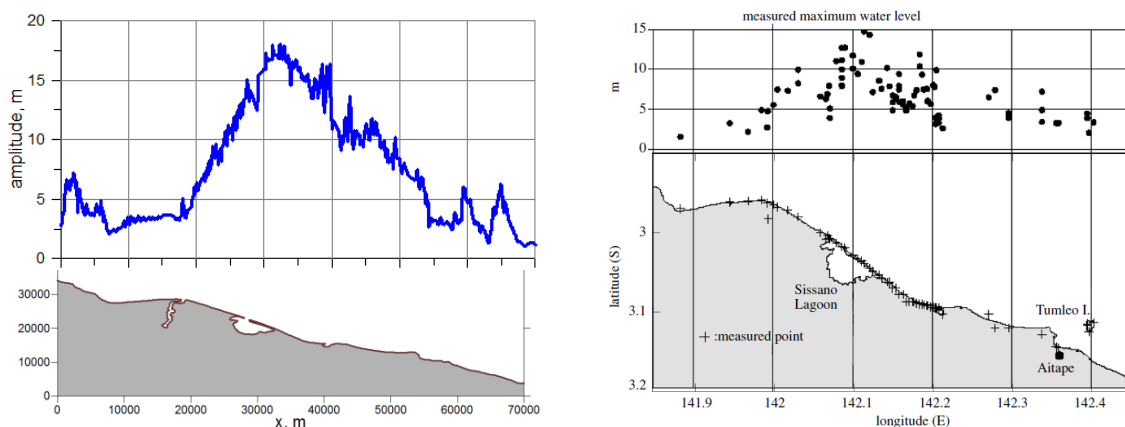


Рис. 9. Слева – распределение высот волн вдоль береговой линии, наиболее соответствующее натурному (справа).

Также в отчетный период проведено сопоставление двух математических моделей оползневой механизма генерации поверхностных волн. В первой из них оползень представляется нижним из двух слоев идеальной несжимаемой жидкости, плотность которой превосходит плотность расположенной над ним воды. Во второй модели оползень представляется в виде квазинедеформируемого тела, закон движения центра масс которого определяется совместным действием сил тяжести, плавучести, донного трения и сопротивления воды. Следует отметить, что картины генерируемых поверхностных волн качественно близки. Например, обе модели дают волну повышения, которая постепенно формируется перед набирающим скорость оползнем и отделяется от него, двигаясь со скоростью, превышающей скорость оползня, обе модели приводят к генерации волны понижения, движущейся в сторону берега. Установлены некоторые количественные различия при использовании этих моделей: «жидкий» оползень движется быстрее твердого и амплитуды генерируемых волн больше в случае «жидкого» оползня.

Разработанные алгоритмы использовались также для исследования процесса генерации поверхностных волн, возникающих в результате стока жидкости в донные трещины водохранилища, образующиеся во время землетрясений. На основе иерархии численных моделей определены амплитуды возникающих волн в зависимости от объема трещин, времен их раскрытия и схлопывания. Из рис. 10 видно, что после образования в дне водохранилища щели происходит падение уровня воды, вода над щелью устремляется вертикально вниз,

вовлекая в движение соседние слои (см. первую пару графиков на рис.10). Затем в некотором временном промежутке над щелью устанавливается почти стационарный уровень, хотя вода продолжает вытекать из щели. Причина этого кроется в том, что два сформировавшихся боковых потока, направленных с разных сторон в сторону щели (см. вторую пару графиков на рис.12), полностью обеспечивают расход жидкости и препятствуют дальнейшему понижению уровня непосредственно над щелью. Течение фактически становится двухслойным и слив происходит только из нижнего слоя. После закрытия щели боковые потоки быстро перестраиваются во встречные (см. третью пару графиков на рис.12), сталкиваются и возникает всплеск. Чем больше скорость вытекания, тем сильнее падает уровень воды над щелью в первые моменты времени и тем большую высоту имеет всплеск после закрытия щели в силу того, что большие скорости оттока жидкости в щель способствуют формированию встречных потоков с большими скоростями. 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 волн на берега.

Отметим, что все результаты расчетов, полученные на основе модели мелкой воды и касающиеся поведения свободной границы при образования трещин на дне, качественно согласуются с результатами, которые дает модель потенциальных течений жидкости, поэтому представляется возможным использовать разработанные для первой модели экономичные алгоритмы для решения практических задач о генерации поверхностных волн при возникновении трещин на неровном дне водохранилища реальной формы.

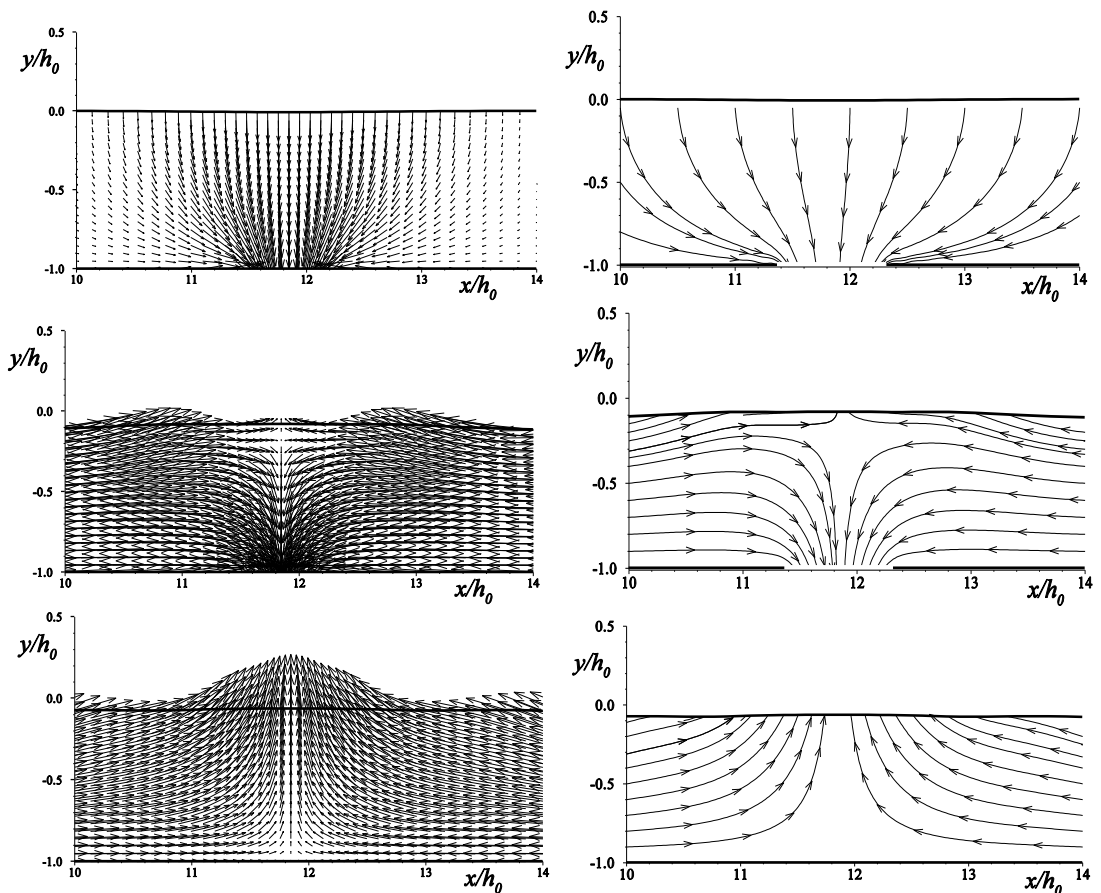


Рис.10. Поле вектора скорости (слева) и треки частиц жидкости (справа).

В настоящее время построены опытные образцы волнозащитных стенок, которые в отличие от традиционных, не являются неподвижными, а

перемещаются при воздействии на них поверхностных волн. Такая подвижная стенка обычно крепится пружинами к неподвижному блоку (например, к нефтяной платформе). Предполагается, что регулируя жесткость пружин и массу подвижной стенки, можно уменьшить величины вертикального заплеска и силовое воздействие волн. Важным результатом выполнения проекта стало решение данной задачи в полной нелинейной постановке, а также сравнение с результатами, полученными ранее на основе линейной модели.

Рис. 11 иллюстрирует изменение свободной границы со временем при накате одиночной волны на вертикальную упруго закрепленную стенку. Подвижность стенки способствует появлению цуга волн, многократно накатывающихся на стенку. Особенно это проявляется при малых значениях коэффициента жесткости пружин k . На основе численных расчетов установлено, что при накате волны на относительно легкую стенку, закрепленную слабыми пружинами, максимальный заплеск происходит от сгенерированной второй волны, а не от начальной первой, как это бывает для неподвижной стенки. Кроме того, величина максимального заплеска на подвижную стенку получается даже большей, чем на неподвижную. Причина этого кроется, видимо, в том, что возникают встречные движения стенки и поверхностных волн. Для жесткого закрепления волны при взаимодействии со стенкой ведут себя почти также, как при взаимодействии с неподвижной стенкой. Из других интересных результатов можно отметить установленные закономерности влияния безразмерного коэффициента жесткости k и относительной массы стенки m на величину максимального вертикального заплеска волн на стенку. Оказалось, что при фиксированной массе стенки зависимость максимального заплеска от k имеет немонотонный характер, при этом для каждого m существует такое значение k , что заплеск будет минимальным (см. рис. 12). С другой стороны, зависимость максимального заплеска от массы стенки носит монотонный характер. Таким образом, если масса стенки является заданной величиной, а варьируемой может быть жесткость пружин, то заплеск на стенку можно уменьшить, подобрав подходящее значения k .

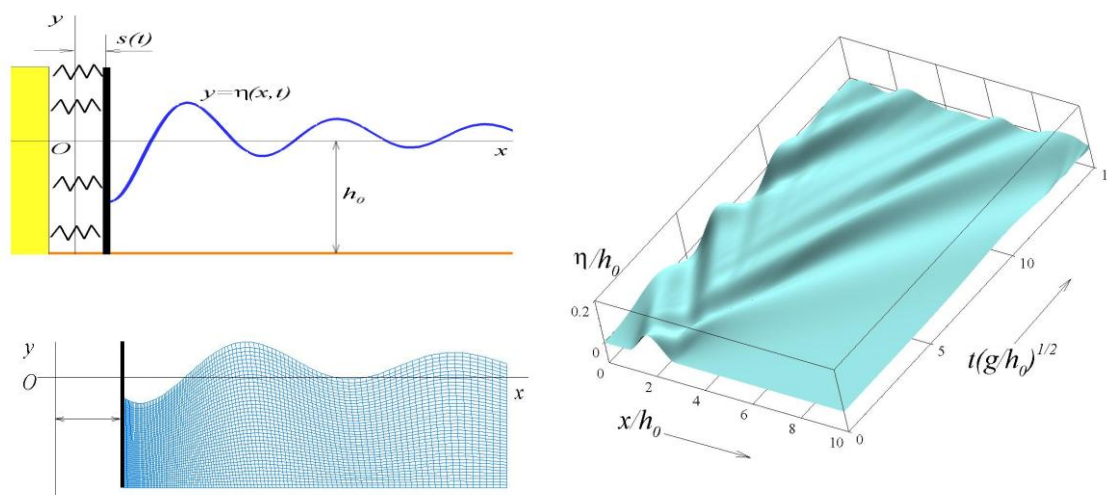


Рис.11. Схема области течения с подвижной вертикальной стенкой, адаптивная сетка (слева) и динамика свободной границы (справа) при накате одиночной волны на упруго закрепленную стенку

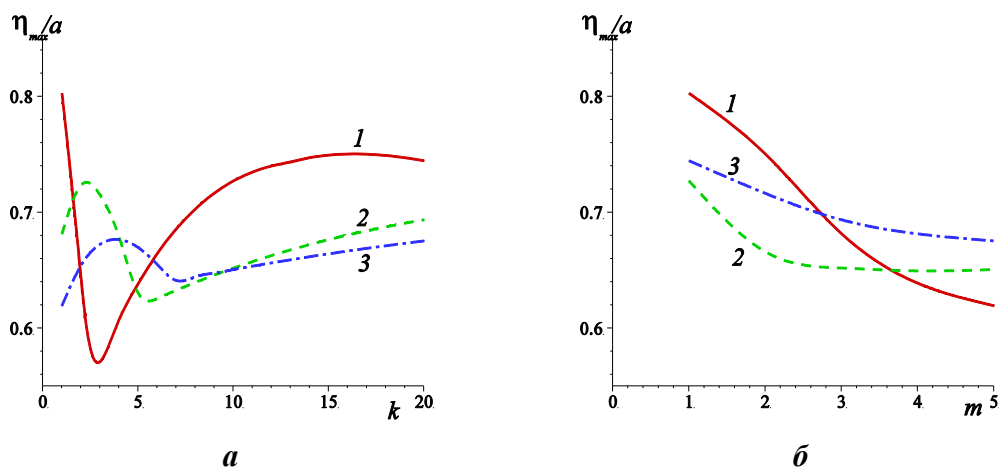


Рис.12. Зависимость величины максимального заплеска на подвижную стенку от жесткости пружин (а) и от массы стенки (б). а: 1 - $m=1$; 2 - $m=3$; 3 - $m=5$. б: 1 - $k=1$; 2 - $k=10$; 3 - $k=20$

- 3.10.1. Количество научных работ, опубликованных в ходе выполнения проекта
1. 19
- 3.10.1. Из них включенных в перечень ВАК
2. 17
- 3.10.1. Из них включенных в системы цитирования (Web of science, Scopus, Web of Knowledge, Astrophysics, PubMed, Mathematics, Chemical Abstracts, Springer, Agris, GeoRef)
3. 18
- 3.10.1. Из них в соавторстве с зарубежным партнером
4. 3
- 3.10.2. Количество научных работ, подготовленных в ходе выполнения проекта и принятых к печати
- 3
- 3.10.3. Количество совместных научных работ, подготовленных в ходе выполнения проекта и принятых к печати
- 2
- 3.11. Участие в международных научных мероприятиях по тематике проекта, которые проводились при финансовой поддержке Фонда
- 3.12. Участие в экспедициях по тематике проекта, проводимых при финансовой поддержке Фонда
- 3.13. Финансовые средства, полученные от РФФИ
600000 руб.
- 3.14. Адреса (полностью) ресурсов в Internet, подготовленных авторами по данному проекту
- 3.15. Библиографический список публикаций российских участников проекта за весь период выполнения проекта, предшествующий данному отчету, в порядке значимости: монографии, статьи в научных изданиях с указанием импакт-фактора журнала по базе данных Web of Science
1. Хакимзянов Г.С., Шокина Н.Ю. Численное моделирование поверхностных волн, возникающих при движении подводного оползня по неровному дну // Вычислительные технологии. 2010. Т.15, № 1. С. 105 – 119.
 2. 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.
3. Баутин С.П., Дерябин С.Л., Соммер А.Ф., Хакимзянов Г.С. Исследование решений уравнений мелкой воды в окрестности подвижной линии уреза // Вычислительные технологии. 2010. Т.15, № 6. С. 19 – 41.
4. 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.
5. Bautin S.P., Deryabin S.L., Sommer A.F., Khakimzyanov G.S., Shokina N.Yu. Use of analytic solutions in the statement of difference boundary conditions on a movable shore line // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2011. Vol. 26, No. 4. P. 353-377.
6. Beizel S.A., Chubarov L.B., Khakimzyanov G.S. Simulation of surface waves generated by an underwater landslide moving over an uneven slope // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. VNU Science Press BV, 2011, Vol. 26, No 1, P. 17–38.
7. Fedotova Z., Khakimzyanov G. Full nonlinear dispersion model of shallow water equations on a rotating sphere // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2011. Vol. 52, No. 6. P. 865-876.
8. Федотова З.И., Хакимзянов Г.С. Уравнения Буссинеска на вращающейся сфере // Вычислительные технологии. 2011. Т. 16, № 6. С. 74-84.
9. Федотова З.И., Хакимзянов Г.С. Уравнения полной нелинейно-дисперсионной модели мелкой воды на вращающейся сфере // ПМТФ. 2011. Т. 52, № 6. С. 22-35.
10. Shokina N.Yu. To the problem of construction of difference schemes on movable grids // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2012. Vol. 27, No. 6. P. 603-626.
11. Khakimzyanov G.S., Shokina N.Yu. Evaluation of the height of waves generated by an underwater landslide in a confined water reservoir // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2012. Vol. 53, No. 5. P. 690-699.
12. Хакимзянов Г.С., Шокина Н.Ю. Некоторые замечания о схемах, сохраняющих монотонность численного решения // Вычислительные технологии. 2012. Т. 17, № 2. С. 78-98.
13. Соммер А.Ф., Шокина Н.Ю. О некоторых проблемах конструирования разностных схем на двумерных подвижных сетках // Вычислительные технологии. 2012. Т. 17. № 4. С. 88-108.
14. Федотова З.И., Хакимзянов Г.С. Анализ условий вывода нелинейно-дисперсионных уравнений // Вычислительные технологии. 2012. Т. 17, № 5. С. 94-108.
15. Гусев О.И. Об алгоритме расчета поверхностных волн в рамках нелинейно-дисперсионной модели на подвижном дне // Вычислительные технологии. 2012. Т. 17, № 5. С. 46-64.
16. Хакимзянов Г.С., Шокина Н.Ю. Оценка высот волн, вызванных подводным оползнем в ограниченном водоеме // ПМТФ. 2012. Т. 53, № 5. С. 67-78.
- 3.16. *Библиографический список совместных публикаций (в соавторстве с зарубежным партнером) по проекту за весь период выполнения проекта, предшествующий данному отчету, в порядке значимости: монографии, статьи в научных изданиях с указанием импакт-фактора журнала по базе данных Web of Science*
17. Beisel S.A., Chubarov L.B., Dutykh D., Khakimzyanov G.S., Shokina N.Yu. Simulation of surface waves generated by an underwater landslide in a bounded reservoir // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2012. Vol. 27, No. 6. P. 539-558.
18. Dutykh D., Mitsotakis D., Chubarov L., Shokin Y. On the contribution of the

horizontal sea-bed displacements into the tsunami generation process // Ocean Modeling, 56 (2012). P. 43-56.

19. Dutykh D., Mitsotakis D., Beisel S., Shokina N. Dispersive waves generated by an underwater landslide // Proceedings of International Conference to honour Professor E.F. Toro in the month of his 65th birthday «Numerical methods for hyperbolic equations: theory and applications», 4-8 July 2011, Santiago de Compostela, Spain. Vázquez-Cendón et al. (eds). Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-62150-2. P. 245-250.

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

Подпись руководителя проекта

Форма 506. ФИНАНСОВЫЙ ОТЧЕТ

6.1. Объем средств по проекту, полученный от РФФИ в 2012 г.	600000
6.2. Заработная плата	410322
6.3. Прочие выплаты	0
6.4. Начисления на выплаты по оплате труда	82879
6.5. Услуги связи	0
6.6. Транспортные услуги	0
6.7. Арендная плата за пользование имуществом	0
6.8. Работы, услуги по содержанию имущества	0
6.9. Прочие работы, услуги	0
6.10. Прочие расходы	0
6.11. Увеличение стоимости основных средств	0
6.12. Увеличение стоимости материальных запасов	19799
6.13. ИТОГО РАСХОДОВ	513000
6.14. Организационно-техническое сопровождение проектов (до 15 %)	87000
6.15. Фактические расходы по проекту в 2012 г.	600000
6.16. Остаток (если таковой имеется)	0

II. Финансово-экономическое обоснование расходов по проекту (необходимо обосновать и расшифровать каждый использовавшийся показатель)

Расходы по 211 статье были направлены на оплату труда российских исполнителей:

С.А.Бейзель - 50144 руб.

О.И.Гусев - 11461 руб.

В.А.Кутергин - 8596 руб.

Я.Е.Мартемьянычева - 8596 руб.

Г.С.Хакимзянов - 170488 руб.

Л.Б.Чубаров - 50721 руб.

Ю.И.Шокин - 71634 руб.

Н.Ю.Шокина - 38682 руб.

Расходы в объеме 19799 рублей на увеличение стоимости материальных запасов (статья 340) связаны с приобретением (частичная оплата) следующих расходных материалов:

DVD-RW диск Verbatim 4x 4.7 Гб Cake Box (в одной коробке 25 шт.), 2 коробки - 1598 руб.,

BD-RE(Blu-Ray) диск Sony 2x 25Gb Jewel (25 шт.) - 14975 руб.,

аккумуляторная батарея APC RBC48 для ИБП APC Smart UPS 750 (SUA750I) - 3712 руб.

ИТОГО: 20285 руб.

Подпись руководителя проекта

Подпись главного бухгалтера организации, заверенная печатью

Форма 509М. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ИТОГОВЫХ ОТЧЕТОВ)

- 9.1. *Номер проекта*
10-05-91052
- 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.
- 9.3.1. *Другие авторы*
Хахимзянов Г.С.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
Чубаров Л.Б.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*
Хахимзянов Г.С.
Чубаров Л.Б.
- 9.4. *Название публикации*
Моделирование поверхностных волн, порождаемых подводным оползнем, движущимся по пространственно неоднородному склону
- 9.5. *Язык публикации* русский
- 9.6.1. *Полное название издания* Вычислительные технологии
- 9.6.2. *ISSN издания* 1560-7534
- 9.6.3. *Импакт-фактор издания по базе данных Web of Science*
- 9.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2010
- 9.10.1 *Том издания* 15
- 9.10.2 *Номер издания* 3
- 9.11. *Страницы* 39-51
- 9.12.1. *Полное название издательства*
Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство*
Новосибирск
- 9.13. *Краткий реферат публикации*
Рассмотрена задача численного моделирования поверхностных волн, генерируемых движением затопленного оползня по пространственно неоднородному склону. Представлен закон движения оползня под действием сил тяжести, трения, выталкивания и гидродинамического сопротивления окружающей жидкости с учетом эффекта присоединенной массы. Обсуждаются результаты вычислительных экспериментов для модельной акватории.
- 9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*
9

Подпись руководителя проекта

Форма 509М. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ИТОГОВЫХ ОТЧЕТОВ)

- 9.1. *Номер проекта*
10-05-91052
- 9.2.1. *Первый автор*
Fedotova Z.I. @Федотова Зинаида Ивановна; 2; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*
Fedotova Z.I.
- 9.3.1. *Другие авторы*
Khakimzyanov G.S. @Хакимзянов Гаяз Салимович; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*
Khakimzyanov G.S.
- 9.4. *Название публикации*
Nonlinear-dispersive shallow water equations on a rotating sphere
- 9.5. *Язык публикации* английский
- 9.6.1. *Полное название издания*
Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling
- 9.6.2. *ISSN издания* 0927-6467
- 9.6.3. *Импакт-фактор издания по базе данных Web of Science*
0.925
- 9.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2010
- 9.10.1 *Том издания* 25
- 9.10.2 *Номер издания* 1
- 9.11. *Страницы* 15-26
- 9.12.1. *Полное название издательства*
Walter de Gruyter GmbH & Co. KG
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство*
Москва
- 9.13. *Краткий реферат публикации*
Получены нелинейно-дисперсионные уравнения мелкой воды на сфере, которые могут использоваться при моделировании распространения волн цунами на большие расстояния с учетом вращения Земли, сферичности поверхности океана и дисперсии волн.
- 9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*
22

Подпись руководителя проекта

Форма 509М. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ИТОГОВЫХ ОТЧЕТОВ)

- 9.1. *Номер проекта*
10-05-91052
- 9.2.1. *Первый автор*
Хакимзянов Г.С.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*
Хакимзянов Г.С.
- 9.3.1. *Другие авторы*
Шокина Н.Ю.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*
Шокина Н.Ю.
- 9.4. *Название публикации*
Численное моделирование поверхностных волн, возникающих при движении подводного оползня по неровному дну
- 9.5. *Язык публикации* русский
- 9.6.1. *Полное название издания* Вычислительные технологии
- 9.6.2. *ISSN издания* 1560-7534
- 9.6.3. *Импакт-фактор издания по базе данных Web of Science*
- 9.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2010
- 9.10.1 *Том издания* 15
- 9.10.2 *Номер издания* 1
- 9.11. *Страницы* 105-119
- 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 настоящей работе сделана попытка моделирования генерации поверхностных волн оползнем, движущимся по неровному склону. В многочисленных статьях других авторов, исследовавших эту проблему в последнее десятилетие, рассматривалось движение недеформируемого оползня только по плоскому откосу. В статье впервые получены уравнения, описывающие движение подводного оползня по криволинейному склону под действием сил тяжести, плавучести, трения и сопротивления воды. С использованием нового закона движения выполнены расчеты волновых режимов при различных значениях начального заглубления модельного оползня, его размеров и крутизны модельного склона. Моделирование поверхностных волн, генерируемых при движении оползня по неровному дну, осуществлялось в рамках нелинейной модели мелкой воды. Для расчетов использовалась схема предиктор-корректор на адаптивной сетке, сохраняющая монотонность профилей численного решения. Схема опробована на тестовой задаче с известным аналитическим решением, описывающим генерацию поверхностных волн недеформируемым телом, движущимся с постоянной скоростью по горизонтальному дну. Результаты численного моделирования поверхностных волн, возникающих при движении оползня по неровному склону, подтвердили интуитивно ожидаемый вывод о том, что наибольшую опасность для береговых сооружений представляют волны,

генерируемые оползнями больших размеров, происходящими вблизи берега на крутых склонах.

9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*
6

Подпись руководителя проекта

Форма 509М. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ИТОГОВЫХ ОТЧЕТОВ)

- 9.1. *Номер проекта*
10-05-91052
- 9.2.1. *Первый автор*
Баутин С.П.; 2; Россия; Уральский государственный университет путей сообщения
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*
Баутин С.П.
- 9.3.1. *Другие авторы*
Дерябин С.Л.; 2; Россия; Уральский государственный университет путей сообщения
Соммер А.Ф.; 1; Россия; Новосибирский государственный университет
Хакимзянов Г.С.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*
Дерябин С.Л.
Соммер А.Ф.
Хакимзянов Г.С.
- 9.4. *Название публикации*
Исследование решений уравнений мелкой воды в окрестности подвижной линии уреза
- 9.5. *Язык публикации* русский
- 9.6.1. *Полное название издания* Вычислительные технологии
- 9.6.2. *ISSN издания* 1560-7534
- 9.6.3. *Импакт-фактор издания по базе данных Web of Science*
- 9.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2010
- 9.10.1 *Том издания* 15
- 9.10.2 *Номер издания* 6
- 9.11. *Страницы* 19-41
- 9.12.1. *Полное название издательства*
Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство* Новосибирск
- 9.13. *Краткий реферат публикации*
Для уравнений мелкой воды построены решения начально-краевых задач в виде рядов, локально сходящихся в окрестности подвижной границы вода-суша для произвольного рельефа дна. Определены закон и скорость движения этой границы при различных режимах взаимодействия волны с берегом. Полученные результаты аналитического исследования решений использованы для разработки новых аппроксимаций краевых условий на подвижной линии уреза. Приведены результаты численного решения тестовых задач с помощью явной схемы предиктор-корректор второго порядка аппроксимации на адаптивных сетках, отслеживающих положение границы вода-суша.
- 9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*
26

Подпись руководителя проекта

Форма 509М. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ИТОГОВЫХ ОТЧЕТОВ)

- 9.1. *Номер проекта* 10-05-91052
- 9.2.1. *Первый автор* Bautin S.P. @Баутин Сергей Петрович; 2;
Россия; Уральский государственный университет путей сообщения
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)* Bautin S.P.
- 9.3.1. *Другие авторы*
Deryabin S.L. @Дерябин Сергей Львович; 2; Россия; Уральский государственный университет путей сообщения
Sommer A.F. @Соммер Анна Федоровна; 1; Россия; Новосибирский государственный университет
Khakimzyanov G.S. @Хакимзянов Гаяз Салимович; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
Shokina N.Yu. @Шокина Нина Юрьевна; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*
Deryabin S.L., Sommer A.F., hakimzyanov G.S., Shokina N.Yu.
- 9.4. *Название публикации* Use of analytic solutions in the statement of difference boundary conditions on a movable shore line
- 9.5. *Язык публикации* английский
- 9.6.1. *Полное название издания* Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling
- 9.6.2. *ISSN издания* 0927-6467
- 9.6.3. *Импакт-фактор издания по базе данных Web of Science* 0.925
- 9.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2011
- 9.10.1 *Том издания* 26
- 9.10.2 *Номер издания* 4
- 9.11. *Страницы* 353-377
- 9.12.1. *Полное название издательства* Walter de Gruyter GmbH & Co. KG
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство* Москва
- 9.13. *Краткий реферат публикации*
Для уравнений мелкой воды построены решения начально-краевых задач в виде рядов, локально сходящихся в окрестности подвижной границы вода-суша для произвольного рельефа дна. Определены закон и скорость движения этой границы при различных режимах взаимодействия волны с берегом. Полученные результаты аналитического исследования решений использованы для разработки новых аппроксимаций краевых условий на подвижной линии уреза. Приведены результаты численного решения тестовых задач с помощью явной схемы предиктор-корректор второго порядка аппроксимации на адаптивных сетках, отслеживающих положение границы вода-суша.
- 9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*
23

Подпись руководителя проекта

Форма 509М. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ИТОГОВЫХ ОТЧЕТОВ)

- 9.1. *Номер проекта*
10-05-91052
- 9.2.1. *Первый автор*
Fedotova Z.I. @Федотова Зинаида Ивановна; 2; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*
Fedotova Z.I.
- 9.3.1. *Другие авторы*
Khakimzyanov G.S. @Хакимзянов Гаяз Салимович; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*
Khakimzyanov G.S.
- 9.4. *Название публикации*
Full nonlinear dispersion model of shallow water equations on a rotating sphere
- 9.5. *Язык публикации* английский
- 9.6.1. *Полное название издания*
Journal of Applied Mechanics and Technical Physics
- 9.6.2. *ISSN издания* 0021-8944
- 9.6.3. *Импакт-фактор издания по базе данных Web of Science*
- 9.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2011
- 9.10.1 *Том издания* 52
- 9.10.2 *Номер издания* 6
- 9.11. *Страницы* 865-876
- 9.12.1. *Полное название издательства* Издательство СО РАН
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство* Новосибирск
- 9.13. *Краткий реферат публикации*
Приведен подробный вывод нелинейно-дисперсионных уравнений мелкой воды на сфере с учетом центробежной силы, обусловленной вращением Земли.
- 9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*
14

Подпись руководителя проекта

Форма 509М. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ИТОГОВЫХ ОТЧЕТОВ)

- 9.1. *Номер проекта*
10-05-91052
- 9.2.1. *Первый автор*
Федотова З.И.; 2; 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 Буссинеска на вращающейся сфере
- 9.5. *Язык публикации* русский
- 9.6.1. *Полное название издания* Вычислительные технологии
- 9.6.2. *ISSN издания* 1560-7534
- 9.6.3. *Импакт-фактор издания по базе данных Web of Science*
- 9.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2011
- 9.10.1 *Том издания* 16
- 9.10.2 *Номер издания* 6
- 9.11. *Страницы* 74-84
- 9.12.1. *Полное название издательства*
Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство*
Новосибирск
- 9.13. *Краткий реферат публикации*
Выведена система нелинейно-дисперсионных уравнений типа Буссинеска на поверхности вращающейся притягивающей сферы. С помощью перехода к линейной скорости и линейным координатам на поверхности сферы установлена связь с известными моделями Буссинеска на плоскости. Приведена запись уравнений Буссинеска в виде, удобном для конструирования вычислительного алгоритма.
- 9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*
7

Подпись руководителя проекта

Форма 509М. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ИТОГОВЫХ ОТЧЕТОВ)

- 9.1. *Номер проекта*
10-05-91052
- 9.2.1. *Первый автор*
Федотова З.И.; 2; 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 полной нелинейно-дисперсионной модели мелкой воды на вращающейся сфере
- 9.5. *Язык публикации* русский
- 9.6.1. *Полное название издания*
Прикладная механика и теоретическая физика
- 9.6.2. *ISSN издания* 0869-5032
- 9.6.3. *Импакт-фактор издания по базе данных Web of Science*
0.234
- 9.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2011
- 9.10.1 *Том издания* 52
- 9.10.2 *Номер издания* 6
- 9.11. *Страницы* 22-35
- 9.12.1. *Полное название издательства* Издательство СО РАН
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство* Новосибирск
- 9.13. *Краткий реферат публикации*
Получены нелинейно-дисперсионные уравнения мелкой воды, описывающие распространение длинных поверхностных волн на сферической поверхности с учетом вращения Земли и подвижности дна океана. Вывод уравнений основан на разложении решения уравнений гидродинамики для сферы по малым параметрам, зависящим от относительной толщины слоя воды и дисперсии поверхностных волн.
- 9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*
14

Подпись руководителя проекта

Форма 509М. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ИТОГОВЫХ ОТЧЕТОВ)

- 9.1. *Номер проекта*
10-05-91052
- 9.2.1. *Первый автор*
Beizel S.A. @Бейзель Софья Александровна; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*
Beizel S.A.
- 9.3.1. *Другие авторы*
Chubarov L.B. @Чубаров Леонид Борисович; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
Khakimzyanov G.S. @Хакимзянов Гаяз Салимович; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*
Chubarov L.B.
Khakimzyanov G.S.
- 9.4. *Название публикации* Simulation of surface waves generated by an underwater landslide moving over an uneven slope
- 9.5. *Язык публикации* английский
- 9.6.1. *Полное название издания*
Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling
- 9.6.2. *ISSN издания* 0927-6467
- 9.6.3. *Импакт-фактор издания по базе данных Web of Science* 0.925
- 9.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2011
- 9.10.1 *Том издания* 26
- 9.10.2 *Номер издания* 1
- 9.11. *Страницы* 17-38
- 9.12.1. *Полное название издательства* Walter de Gruyter GmbH & Co. KG
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство* Москва
- 9.13. *Краткий реферат публикации*
Работа посвящена исследованию влияния неровности подводного склона на характеристики волнового режима, порождаемого движением оползня по такому склону. Используя в качестве модели оползня простейшее представление в виде твердого тела, авторы рассматривают два модельных рельефа, в той или иной степени учитывающих особенности средиземноморского побережья Израиля. Моделирование волновых процессов выполняется в рамках уравнений теории мелкой воды. Обсуждаются результаты сопоставления волновых режимов, анализируются зависимости характеристик этих режимов от геометрических и физических параметров изучаемых явлений – от глубины залегания оползня, его длины и толщины, а также от геометрии склона и величины силы трения.
- 9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*
25

Подпись руководителя проекта

Форма 509М. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ИТОГОВЫХ ОТЧЕТОВ)

- 9.1. *Номер проекта*
10-05-91052
- 9.2.1. *Первый автор*
Хакимзянов Г.С.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*
Хакимзянов Г.С.
- 9.3.1. *Другие авторы*
Шокина Н.Ю.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*
Шокина Н.Ю.
- 9.4. *Название публикации*
Некоторые замечания о схемах, сохраняющих монотонность численного решения
- 9.5. *Язык публикации* русский
- 9.6.1. *Полное название издания* Вычислительные технологии
- 9.6.2. *ISSN издания* 1560-7534
- 9.6.3. *Импакт-фактор издания по базе данных Web of Science*
- 9.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2012
- 9.10.1 *Том издания* 17
- 9.10.2 *Номер издания* 2
- 9.11. *Страницы* 78-98
- 9.12.1. *Полное название издательства* Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство* Новосибирск
- 9.13. *Краткий реферат публикации*
Рассмотрена процедура монотонизации явных двухслойных схем с помощью специального схемного параметра, выбор которого основывается на исследовании дифференциальных приближений схем. Подробно рассмотрен вопрос о влиянии постоянного, «квазипостоянного» и переменного схемного параметра на монотонность двухслойных разностных схем. Для постоянного схемного параметра построен пример схемы с отсутствием дисперсии в решении второго дифференциальном приближении, но не сохраняющей монотонность численного решения. Приведен пример схемного параметра, при котором явная двухслойная схема на подвижной неравномерной сетке является монотонной. Подчеркнута связь согласованной аппроксимации якобиана и скоростей движения узлов сетки с геометрическим законом сохранения. Предложен новый подход к построению дивергентных схем на подвижных сетках.
Кроме того, рассмотрены особенности построения сеток, адаптирующихся к разрывным решениям. Некоторые из этих особенностей продемонстрированы на примере метода эквираспределения. Приведены примеры, связанные с разрешимостью уравнений для сетки и качеством адаптации сетки к решению. Многие схемы, сохраняющие монотонность численного решения, дают на разрывных решениях осциллирующие профили разностных производных, что может негативно сказаться при использовании метода адаптивных сеток: если управляющая функция, регулирующая расстановку узлов, зависит от разностных

производных, а они осциллируют, то адаптивная сетка будет иметь чередования длинных и коротких ячеек, что приведет к потере точности численного решения. Осциллирование разностных производных численного решения может быть вызвано, в частности, и "нефизичным" ростом количества экстремумов решения при переходе с одного шага по времени на другой. На примере схемы предиктор-корректор с постоянными коэффициентами показано, что даже TVD-схемы могут увеличивать количество экстремумов.

Для устранения проблем, связанных с резкими изменениями значений управляющей функции, предлагается использовать процедуру неявного сглаживания управляющей функции, после применения которой в окрестность разрыва попадает большее количество узлов и происходит плавное изменение длин соседних ячеек, что способствует лучшему воспроизведению решений с разрывами. Приведены примеры, показывающие преимущества метода адаптивных сеток.

9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*
21

Подпись руководителя проекта

Форма 509М. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ИТОГОВЫХ ОТЧЕТОВ)

- 9.1. *Номер проекта*
10-05-91052
- 9.2.1. *Первый автор*
Соммер А.Ф.; 1; Россия; Новосибирский государственный университет
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*
Соммер А.Ф.
- 9.3.1. *Другие авторы*
Шокина Н.Ю.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*
Шокина Н.Ю.
- 9.4. *Название публикации*
О некоторых проблемах конструирования разностных схем на двумерных подвижных сетках
- 9.5. *Язык публикации* русский
- 9.6.1. *Полное название издания* Вычислительные технологии
- 9.6.2. *ISSN издания* 1560-7534
- 9.6.3. *Импакт-фактор издания по базе данных Web of Science*
- 9.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2012
- 9.10.1 *Том издания* 17
- 9.10.2 *Номер издания* 4
- 9.11. *Страницы* 88-108
- 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 последние годы большое распространение получили алгоритмы решения задач наводнения-осушения на основе метода конечных элементов. Тем не менее, для таких задач продолжает оставаться актуальной проблема разработки новых и совершенствования существующих конечно-разностных методов, в частности, разностных схем на адаптивных сетках, так как на их основе тоже можно получать вполне адекватное представление о картине волновых процессов в областях с криволинейной формой подвижных границ. Использование подвижных сеток, адаптирующихся к решению, может приводить к заметному повышению точности расчета. Однако решать задачу на адаптивной сетке значительно сложнее, чем на равномерной, поскольку при применении адаптивных сеток приходится кроме основных уравнений задачи дополнительно решать нелинейные уравнения для определения координат узлов, причем для нестационарных задач уравнения для сетки необходимо решать на каждом временном шаге. При конструировании схем на адаптивных сетках возникают и другие трудности, на которые в публикациях, как правило, не обращается внимания. В настоящей работе описываются практические рецепты преодоления такого рода трудностей. Основное внимание в ней уделяется тем вопросам, которые не были затронуты в предыдущих публикациях или были недостаточно подробно освещены.

Приводится, в частности, конечно-разностная схема второго порядка аппроксимации на адаптивной сетке, выводится геометрический закон сохранения в разностной форме, рассматриваются особенности построения сеток, адаптирующихся к разрывным решениям, обсуждаются реализации краевых условий на подвижной сетке.

9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*
24

Подпись руководителя проекта

Форма 509М. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ИТОГОВЫХ ОТЧЕТОВ)

- 9.1. *Номер проекта*
10-05-91052
- 9.2.1. *Первый автор*
Shokina N.Yu. @Шокина Нина Юрьевна; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*
Shokina N.Yu.
- 9.3.1. *Другие авторы*
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*
- 9.4. *Название публикации*
To the problem of construction of difference schemes on movable grids
- 9.5. *Язык публикации* английский
- 9.6.1. *Полное название издания*
Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling
- 9.6.2. *ISSN издания* 0927-6467
- 9.6.3. *Импакт-фактор издания по базе данных Web of Science*
0.925
- 9.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2012
- 9.10.1 *Том издания* 27
- 9.10.2 *Номер издания* 6
- 9.11. *Страницы* 603-626
- 9.12.1. *Полное название издательства* Walter de Gruyter GmbH & Co. KG
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство* Москва
- 9.13. *Краткий реферат публикации*
В настоящей работе схема предиктор–корректор, исследованная ранее для одномерного линейного уравнения переноса с постоянным коэффициентом, обобщена для двумерного линейного уравнения переноса с переменными коэффициентами. К наиболее значимым результатам работы относятся следующие.
Описан способ аппроксимации контравариантных компонент скорости, гарантирующий выполнение уравнения неразрывности для сеточных функций на подвижных криволинейных сетках. Указан выбор схемных параметров, при котором сохраняется монотонность численного решения.
Доказано выполнение разностного аналога геометрического закона сохранения, что гарантирует сохранение схемой предиктор-корректор постоянной функции.
Предложена модификация классического метода эквираспределения построения подвижных сеток, позволяющая избежать возникновения осцилляций траекторий узлов и резкого изменения площадей соседних ячеек сетки. Указан метод построения сетки на границе подвижной области. Для решения проблем, связанных с разрешимостью уравнений для сетки и с адаптацией сетки к разрывному решению, предложено использование неявной процедуры двумерного сглаживания управляющей функции.
Приведено сравнение результатов решения тестовых задач с гладким и разрывным решениями на неподвижных и динамически адаптивных сетках.

Результаты, полученные в данной работе для двумерного линейного уравнения переноса с переменными коэффициентами, имеют общий характер и могут быть использованы для численного решения задач наводнения-осушения в рамках модели мелкой воды.

9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*
24

Подпись руководителя проекта

Форма 509М. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ИТОГОВЫХ ОТЧЕТОВ)

- 9.1. *Номер проекта*
10-05-91052
- 9.2.1. *Первый автор*
Федотова З.И.; 2; 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*
Анализ условий вывода нелинейно-дисперсионных уравнений
- 9.5. *Язык публикации* русский
- 9.6.1. *Полное название издания* Вычислительные технологии
- 9.6.2. *ISSN издания* 1560-7534
- 9.6.3. *Импакт-фактор издания по базе данных Web of Science*
- 9.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2012
- 9.10.1 *Том издания* 17
- 9.10.2 *Номер издания* 5
- 9.11. *Страницы* 94-108
- 9.12.1. *Полное название издательства*
Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство* Новосибирск
- 9.13. *Краткий реферат публикации*
При более слабых, чем в работе Green A.E., Naghdi P.M. (J. Fluid Mech. 1976), ограничениях на скорость трехмерного вихревого течения жидкости над подвижным дном выведена система нелинейно-дисперсионных (НЛД) уравнений мелкой воды для приближенного описания течений со свободной границей. Система НЛД-уравнений получена путем введения малого параметра и разложения компонент скорости в ряды по этому параметру. Определены порядки аппроксимации основных гидродинамических величин и уравнений, реализованные при переходе от пространственной модели к приближенной. К наиболее значимым результатам относятся полученные для нелинейно-дисперсионной модели закон изменения полной энергии при движении жидкости со свободной границей над подвижным дном и закон изменения потенциального вихря для такого течения жидкости.
- 9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*
11

Подпись руководителя проекта

Форма 509М. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ИТОГОВЫХ ОТЧЕТОВ)

- 9.1. *Номер проекта*
10-05-91052
- 9.2.1. *Первый автор*
Гусев О.И.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*
Гусев О.И.
- 9.3.1. *Другие авторы*
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*
- 9.4. *Название публикации*
Об алгоритме расчета поверхностных волн в рамках нелинейно-дисперсионной модели на подвижном дне
- 9.5. *Язык публикации* русский
- 9.6.1. *Полное название издания* Вычислительные технологии
- 9.6.2. *ISSN издания* 1560-7534
- 9.6.3. *Импакт-фактор издания по базе данных Web of Science*
- 9.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2012
- 9.10.1 *Том издания* 17
- 9.10.2 *Номер издания* 5
- 9.11. *Страницы* 46-64
- 9.12.1. *Полное название издательства*
Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство* Новосибирск
- 9.13. *Краткий реферат публикации*
Настоящая работа посвящена численной реализации полной НЛД-модели. Проведено расщепление системы полных нелинейно-дисперсионных уравнений мелкой воды, учитывающих подвижность дна, на эллиптическую и гиперболическую части. Описан конечно-разностный алгоритм решения расщеплённой системы. На ряде модельных задач выполнено сравнение численного решения с аналитическим решением задач о распространении поверхностных волн над ровным дном, с экспериментальными данными, результатами расчетов на основе бездисперсионной (классической) модели мелкой воды и полной гидродинамической модели. На основе сравнений обсуждается важность учёта дисперсионных свойств, а также оцениваются диапазоны изменения параметров, характеризующих движущийся оползень, для которых разработанная НЛД-модель даёт удовлетворительное соответствие с полной гидродинамической моделью.
- 9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*
35

Подпись руководителя проекта

Форма 509М. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ИТОГОВЫХ ОТЧЕТОВ)

- 9.1. *Номер проекта*
10-05-91052
- 9.2.1. *Первый автор*
Khakimzyanov G.S. @Хакимзянов Гаяз Салимович; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*
Khakimzyanov G.S.
- 9.3.1. *Другие авторы*
Shokina N.Yu. @Шокина Нина Юрьевна; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*
Shokina N.Yu.
- 9.4. *Название публикации*
Evaluation of the height of waves generated by an underwater landslide in a confined water reservoir
- 9.5. *Язык публикации* английский
- 9.6.1. *Полное название издания*
Journal of Applied Mechanics and Technical Physics
- 9.6.2. *ISSN издания* 0021-8944
- 9.6.3. *Импакт-фактор издания по базе данных Web of Science*
- 9.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2012
- 9.10.1 *Том издания* 53
- 9.10.2 *Номер издания* 5
- 9.11. *Страницы* 690-699
- 9.12.1. *Полное название издательства* Издательство СО РАН
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство* Новосибирск
- 9.13. *Краткий реферат публикации*
В рамках нелинейной модели мелкой воды выполнено численное моделирование поверхностных волн, генерируемых при движении оползня по неровному дну водохранилища. Исследовано влияние размеров оползня, плотности материала оползня, коэффициентов трения, сопротивления и присоединенной массы на величину максимального заплеска порожденных оползнем волн на берега водоема с параболической формой дна.
- 9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*
17

Подпись руководителя проекта

Форма 509М. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ИТОГОВЫХ ОТЧЕТОВ)

- 9.1. *Номер проекта*
10-05-91052
- 9.2.1. *Первый автор*
Хакимзянов Г.С.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*
Хакимзянов Г.С.
- 9.3.1. *Другие авторы*
Шокина Н.Ю.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*
Шокина Н.Ю.
- 9.4. *Название публикации*
Оценка высот волн, вызванных подводным оползнем в ограниченном водоеме
- 9.5. *Язык публикации* русский
- 9.6.1. *Полное название издания* Прикладная механика и техническая физика
- 9.6.2. *ISSN издания* 0869-5032
- 9.6.3. *Импакт-фактор издания по базе данных Web of Science*
0.234
- 9.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2012
- 9.10.1 *Том издания* 53
- 9.10.2 *Номер издания* 5
- 9.11. *Страницы* 67-78
- 9.12.1. *Полное название издательства* Издательство СО РАН
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство* Новосибирск
- 9.13. *Краткий реферат публикации*
При выводе уравнения движения оползня в работе (Хакимзянов Г.С., Шокина Н.Ю. Численное моделирование поверхностных волн, возникающих при движении подводного оползня по неровному дну // Вычислительные технологии. 2010. Т.15, N.1. С. 105-119) предполагалось, что форма оползня и форма подводного склона зависят лишь от одной пространственной координаты и неизменны во втором направлении. Однако способ вывода этого уравнения не удалось обобщить на случай движения подводного оползня пространственно неоднородной формы по пространственно неоднородному подводному склону. Допускающее такое обобщение уравнение движения оползня по “одномерному” неровному склону произвольной формы выведено в настоящей работе.
- 9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*
17

Подпись руководителя проекта

Форма 509М. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ИТОГОВЫХ ОТЧЕТОВ)

- 9.1. *Номер проекта*
10-05-91052
- 9.2.1. *Первый автор*
Beisel S.A. @Бейзель Софья Александровна; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*
Beisel S.A.
- 9.3.1. *Другие авторы*
Chubarov L.B. @Чубаров Леонид Борисович; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
Dutykh D. @Дутых Денис; 1; Франция;
Khakimzyanov G.S. @Хакимзянов Гаяз Салимович; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
Shokina N.Yu. @Шокина Нина Юрьевна; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*
Chubarov L.B.
Dutykh D.
Khakimzyanov G.S.
Shokina N.Yu.
- 9.4. *Название публикации*
Simulation of surface waves generated by an underwater landslide in a bounded reservoir
- 9.5. *Язык публикации* английский
- 9.6.1. *Полное название издания*
Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling
- 9.6.2. *ISSN издания* 0927-6467
- 9.6.3. *Импакт-фактор издания по базе данных Web of Science*
0.925
- 9.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2012
- 9.10.1 *Том издания* 27
- 9.10.2 *Номер издания* 6
- 9.11. *Страницы* 539-558
- 9.12.1. *Полное название издательства* Walter de Gruyter GmbH & Co. KG
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство* Москва
- 9.13. *Краткий реферат публикации*
Важность учета оползневых механизмов генерации поверхностных волн при исследовании катастрофических явлений в акваториях различного масштаба не вызывает сомнений. Этот механизм имел место, например, при генерации цунами вблизи Папуа-Новой Гвинеи в 1998 г. В кругу специалистов существуют гипотезы о заметном влиянии оползневых эффектов при формировании мегацунами 2004 г. (Суматра) и 2011 г. (Тохоку, Япония).
В последние годы были предприняты попытки экспериментального изучения поверхностных волн, возникающих при движении твердой модели оползня по плоскому подводному склону. Ряд работ посвящен численному моделированию

такой задачи с использованием закона движения твердого оползня по плоскому откосу. Моделирование реальных ситуаций требует учета неровности подводного склона. В работе (Хакимзянов Г.С., Шокина Н.Ю. Численное моделирование поверхностных волн, возникающих при движении подводного оползня по неровному дну // Вычислительные технологии. 2010. Т.15, N.1. С. 105-119) предложено уравнение движения оползня по неровному склону с учетом сил тяжести, плавучести, трения и сопротивления воды. При выводе уравнения движения оползня предполагалось, что оползень и подводный склон являются «одномерными», т.е. их форма зависит лишь от одной из пространственных координат и неизменна во втором пространственном направлении. Численное исследование частных случаев (Beisel S.A., Chubarov L.B., Khakimzyanov G.S. Simulation of surface waves generated by an underwater landslide moving over an uneven slope // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2011. Vol. 26, No. 1. P. 17-38) показало, что при движении оползня по неровному дну картина генерируемых поверхностных волн существенно отличается от той, которая возникает в случае плоского откоса.

В настоящей работе излагается вывод уравнений в общем случае движения подводного оползня пространственно неоднородной формы по пространственно неоднородному подводному склону. При этом оползень представляется "квазинедеформируемым" объемом сплошной среды, форма поверхности которого меняется в соответствии с встречающимися по ходу движения неровностями склона (как у деформируемого тела), а горизонтальные компоненты вектора скорости одинаковы в каждой точке оползня (как у твердого тела, движущегося поступательно).

9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*

20

Подпись руководителя проекта

Форма 509М. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ИТОГОВЫХ ОТЧЕТОВ)

- 9.1. *Номер проекта* 10-05-91052
- 9.2.1. *Первый автор* Dutykh D.; 1; Франция; Universite de Savoie
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*
Dutykh D.
- 9.3.1. *Другие авторы*
Mitsotakis D.; 1; США; University of Minnesota
Chubarov L.V. @Чубаров Леонид Борисович; 1; Россия, Институт вычислительных технологий СО РАН
ShokinYu.I. @Шокин Юрий Иванович; 1; Россия, Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*
Mitsotakis D.
Chubarov L.V.
ShokinYu.I.
- 9.4. *Название публикации* On the contribution of the horizontal sea-bed displacements into the tsunami generation process
- 9.5. *Язык публикации* английский
- 9.6.1. *Полное название издания* Ocean Modelling
- 9.6.2. *ISSN издания* 1463-5003
- 9.6.3. *Импакт-фактор издания по базе данных Web of Science*
- 9.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2012
- 9.10.1 *Том издания* 56
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы* 43-56
- 9.12.1. *Полное название издательства* Elsevier Science Publishing Company, Inc.
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство*
- 9.13. *Краткий реферат публикации*
Основной причиной генерации цунами являются деформации дна океана, вызванные подводными землетрясениями. Как правило, учитываются только вертикальные движения, а горизонтальные сейсмические смещения в отсутствие оползней – нет. В настоящем исследовании предлагается методология, основанная на известном решении Окада и более детально воспроизводящая все компоненты сейсмических смещений дна. Уравнения движения морского дна в сочетании с трехмерными слабо нелинейными уравнениями движения волн на воде позволяют моделировать генерацию волн цунами. Особое внимание уделяется изменению кинетической и потенциальной энергий возникающих волн, также количественно оценивается вклад горизонтальных смещений в энергетический баланс волн. Методы, предложенные в исследовании, иллюстрируются на примере цунами 17 июля 2006 у берегов Ява и некоторых более поздних событий.
- 9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*
98

Подпись руководителя проекта

Форма 509М. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ИТОГОВЫХ ОТЧЕТОВ)

- 9.1. *Номер проекта*
10-05-91052
- 9.2.1. *Первый автор*
Dutykh D.; 1; Франция; Universite de Savoie
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*
Dutykh D.; 1; Франция; Universite de Savoie
- 9.3.1. *Другие авторы*
Mitsotakis D.; 2; США; University of Minnesota
Beisel S. @Бейзелъ Софья Александровна; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
Shokina N. @Шокина Нина Юрьевна; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*
Mitsotakis D.
Beisel S.
Shokina N.
- 9.4. *Название публикации*
Dispersive waves generated by an underwater landslide
- 9.5. *Язык публикации* английский
- 9.6.1. *Полное название издания* Numerical methods for hyperbolic equations: theory and applications
- 9.6.2. *ISSN издания*
- 9.6.3. *Импакт-фактор издания по базе данных Web of Science*
- 9.7. *Вид публикации* статья в сборнике
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2012
- 9.10.1 *Том издания*
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы* 245-250
- 9.12.1. *Полное название издательства* CRC Press/Balkema
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство*
- 9.13. *Краткий реферат публикации*
В работе исследуется процесс генерации волн подводными оползнями. Течение жидкости моделируется с использованием системы уравнений Перегринна в консервативной форме. Оползень представляется как твердое квазинедеформируемое тело, чья траектория описывается движением центра масс. Выведены дифференциальные уравнения движения оползня вдоль произвольного криволинейного склона, путем проецирования всех сил, действующих на погруженное в воду тело, на локальную движущуюся систему координат.
- 9.14. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*
26

Подпись руководителя проекта