

|                                                                                                                                                                            |                                            |                                                                                   |                  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| НОМЕР ПРОЕКТА <b>10-05-91052</b>                                                                                                                                           |                                            |  | УЧЕТНАЯ КАРТОЧКА |
| НАЗВАНИЕ ПРОЕКТА <b>Численное моделирование сильно нелинейных волн на воде</b>                                                                                             |                                            |                                                                                   |                  |
| ОБЛАСТЬ ЗНАНИЯ <b>05 - науки о земле</b>                                                                                                                                   |                                            | КОД(Ы) КЛАССИФИКАТОРА<br><b>01-201 05-513</b>                                     |                  |
| ВИД КОНКУРСА <b>НЦНИ_а - Совместный конкурс с НЦНИ: инициативные PICS</b>                                                                                                  |                                            |                                                                                   |                  |
| ФАМИЛИЯ, ИМЯ, ОТЧЕСТВО РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА<br><b>Шокин Юрий Иванович</b>                                                                                                  |                                            | ТЕЛЕФОН РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА <b>(383)3306150</b>                                  |                  |
| ПОЛНОЕ НАЗВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ, ГДЕ ВЫПОЛНЯЕТСЯ ПРОЕКТ<br><b>Институт вычислительных технологий СО РАН</b>                                                                    |                                            |                                                                                   |                  |
| ПОЛНОЕ НАЗВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ, ЧЕРЕЗ КОТОРУЮ ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ ФИНАНСИРОВАНИЕ <b>Институт вычислительных технологий СО РАН</b>                                                  |                                            |                                                                                   |                  |
| ОБЪЕМ СРЕДСТВ, ФАКТИЧЕСКИ ПОЛУЧЕННЫХ ЗА 2010 г.<br><b>400000 руб.</b>                                                                                                      |                                            | ОБЪЕМ ФИНАНСИРОВАНИЯ, ЗАПРАШИВАЕМЫЙ НА СЛЕДУЮЩИЙ ГОД<br><b>600000 руб.</b>        |                  |
| ЧИСЛО УЧАСТНИКОВ ПРОЕКТА (включая руководителя)<br><b>10</b>                                                                                                               | ЧИСЛО УЧАСТНИКОВ, ИМЕЮЩИХ УЧЕНУЮ СТЕПЕНЬ 5 | ЧИСЛО МОЛОДЫХ (до 35 лет включительно) УЧАСТНИКОВ<br><b>6</b>                     |                  |
| <b>Чубаров Леонид Борисович</b>                                                                                                                                            |                                            |                                                                                   |                  |
| <b>Хакимзянов Гаяз Салимович</b>                                                                                                                                           |                                            |                                                                                   |                  |
| <b>Шокина Нина Юрьевна</b>                                                                                                                                                 |                                            |                                                                                   |                  |
| <b>Бейзель Софья Александровна</b>                                                                                                                                         |                                            |                                                                                   |                  |
| <b>Гагарина Елена Витальевна</b>                                                                                                                                           |                                            |                                                                                   |                  |
| <b>Гусев Олег Игоревич</b>                                                                                                                                                 |                                            |                                                                                   |                  |
| <b>Кузьминых Дмитрий Викторович</b>                                                                                                                                        |                                            |                                                                                   |                  |
| <b>Худякова Виктория Константиновна</b>                                                                                                                                    |                                            |                                                                                   |                  |
| <b>Соммер Анна Федоровна</b>                                                                                                                                               |                                            |                                                                                   |                  |
| ПОДПИСЬ РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА                                                                                                                                               |                                            | ДАТА ПОДАЧИ ОТЧЕТА<br><b>25.01.2011</b>                                           |                  |
| <b>ПРОХОЖДЕНИЕ ОТЧЕТА (заполняется в РФФИ)</b>                                                                                                                             |                                            |                                                                                   |                  |
| РЕКОМЕНДАЦИЯ ЭКСПЕРТНОГО СОВЕТА<br>Проект прошел полный цикл экспертизы отчета и к финансированию:<br>- рекомендован<br>- не рекомендован<br>(ненужный вариант зачеркнуть) |                                            | ПРЕДСЕДАТЕЛЬ ЭКСПЕРТНОГО СОВЕТА                                                   |                  |
| РЕШЕНИЕ СОВЕТА ФОНДА<br>По результатам рассмотрения на заседании Совета Фонда проект к финансированию:<br>- принят<br>- не принят<br>(ненужный вариант зачеркнуть)         |                                            | ПРЕДСЕДАТЕЛЬ СОВЕТА ФОНДА                                                         |                  |

## 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*

2011

1.6. *Вид отчета*

этап 2010 года

1.7. *Аннотация*

1. выведены нелинейно-дисперсионные уравнения второго приближения теории мелкой воды на вращающейся притягивающей сфере;
2. предложен новый подход к монотонизации разностных схем, аппроксимирующих уравнения гиперболического типа, основанный на анализе дифференциальных приближений схем;
3. разработаны новые аппроксимации краевых условий в подвижной точке уреза;
4. выведены уравнения, описывающие движение подводного оползня по пространственно неоднородному криволинейному склону;
5. разработаны конечно-разностные схемы для расчета на подвижных адаптирующихся к решению сетках двумерных и трехмерных течений жидкости, вызванных подводными оползнями.

1.8. *Полное название организации, где выполняется проект*

Институт вычислительных технологий СО РАН

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

*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*

2011

2.5. *Вид отчета*

этап 2010 года

2.6. *Аннотация*

1. nonlinear dispersive equations of the second approximation of shallow water theory on a rotating attracting sphere are derives;
2. a new approach is suggested to monotonization of difference schemes approximating the hyperbolic equations, based on the analysis of scheme differential approximations;
3. new approximations of boundary conditions on moving water boundary are developed;
4. equations describing the motion of underwater landslide in spatially inhomogeneous curvilinear slope are derived;
5. finite-difference schemes are developed for the computation of two-and three-dimensional fluid flows, caused by underwater landslides, on moving adaptive grids.

2.7. *Полное название организации, где выполняется проект*

Institute of Computational Technologies SB RAS

*Подпись руководителя проекта*

## Форма 503. РАЗВЕРНУТЫЙ НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ

3.1. *Номер проекта*

10-05-91052

3.2. *Название проекта*

Численное моделирование сильно нелинейных волн на воде

3.3. *Коды классификатора, соответствующие содержанию фактически проделанной работы*

01-201 05-513

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

1. Вывод сильно нелинейных дисперсионных уравнений старших приближений теории мелкой воды с учетом эффектов сферичности Земли на основе модели Грина-Нагди.

2. Разработка нового подхода к монотонизации разностных схем, аппроксимирующих системы нелинейных уравнений гиперболического типа, основанного на анализе дифференциальных приближений схем.

3. Систематизация подходов к построению эффективных конечно-разностных схем для задач волновой гидродинамики в полной постановке.

4. Разработка конечно-разностных схем на основе модели потенциальных течений жидкости для расчета на подвижных адаптирующихся к решению сетках двумерных и трехмерных течений жидкости со свободной границей, вызванных подводными оползнями в глубоких водохранилищах с крутыми склонами.

3.5. *Степень выполнения поставленных в проекте задач*

Сформулированные в плане на 2010 год задачи 1, 2 и 4 решены.

Задача 3 перенесена в план 2012 года, поскольку стало ясно, что систематизация подходов к построению эффективных конечно-разностных схем для задач волновой гидродинамики в полной постановке возможна только после завершения работ, запланированных на следующие этапы выполнения проекта, в том числе и работ, запланированных для французских участников проекта.

С другой стороны, в 2010 году полностью решена важная задача, планировавшаяся в первоначальной заявке на 2011 год: «вывод законов движения деформируемого оползня по неровному склону дна».

Кроме того, в 2010 году частично выполнена задача третьего этапа – этапа 2012 года: «выполнение в рамках плановых моделей мелкой воды уточненных расчетов наката поверхностных волн на реальное побережье с использованием оригинальных расчетных схем на подвижных сетках, адаптирующихся к сложной форме береговой линии выделенной акватории, к заданной батиметрии и к подвижной линии уреза».

3.6. *Полученные за отчетный период важнейшие результаты*

1. выведены нелинейно-дисперсионные уравнения второго приближения теории мелкой воды на вращающейся притягивающей сфере;

2. предложен новый подход к монотонизации разностных схем, аппроксимирующих уравнения гиперболического типа, основанный на анализе дифференциальных приближений схем;

3. разработаны новые аппроксимации краевых условий в подвижной точке уреза;

4. выведены уравнения, описывающие движение подводного оползня по пространственно неоднородному криволинейному склону;

5. разработаны конечно-разностные схемы для расчета на подвижных адаптирующихся к решению сетках двумерных и трехмерных течений жидкости, вызванных подводными оползнями.

Предметом совместных исследований российских и французских исполнителей проекта в 2010 году стала задача о влиянии горизонтальных перемещений дна океана при подводном землетрясении на характеристики генерируемых волн цунами. Этот эффект особенно важен при изучении генерации и распространения волн цунами над реальным неоднородным рельефом дна. Исполнителям удалось предложить новый подход, включающий как аналитические, так и численные методики, обеспечивающий количественную оценку вклада горизонтальных перемещений в деформацию свободной поверхности океана. Рассмотрение ведется в рамках трехмерной слабонелинейной модели. Особое внимание уделено трансформации кинетической и потенциальной энергий порождаемого землетрясением волнового режима, отдельно

оценивается вклад горизонтальной компоненты смещения дна. В частности, показано, что во время цунами 17 июля 2006 года у берегов Явы около 10% вклада в общую волновую энергию следует связывать с горизонтальными подвижками. По материалам исследования подготовлена статья (Dutykh D., Mitsotakis D., Chubarov L., Shokin Yu.), которая в ближайшее время будет направлена в один из международных журналов.

### 3.7. *Степень новизны полученных результатов*

Полученная НЛД-модель на сфере является не просто новой, а единственной в мире, не имеющей аналогов.

Подход, основанный на анализе дифференциальных приближений разностных схем, можно считать новым направлением вычислительной математики в области построения монотонных разностных схем для гиперболических уравнений и систем таких уравнений.

Подход, основанный на использовании решений уравнений мелкой воды для конструирования разностных краевых условий на подвижной линии уреза, является оригинальным и позволяет утверждать, что дальнейшее развитие численных методик решения задач наката-отката пойдет теперь по этому новому направлению.

Уравнения движения квазинедеформируемого оползня по пространственно-неоднородному подводному склону являются новыми и несомненно станут основой многих исследовательских работ в мире по численному изучению поверхностных волн, вызванных движением подводных оползней.

Конечно-разностный алгоритм для расчета в рамках модели потенциальных течений процесса генерации поверхностных волн подводным оползнем, движущимся по неровному склону согласно закону, выведенному в 2010 году, является новым.

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

Работ, связанных с выводом полных НЛД-уравнений мелкой воды на вращающейся притягивающей сфере, не известно.

Для построения монотонных разностных схем впервые в мире предложен подход, основанный на анализе их дифференциальных приближений.

Разностные краевые условия в подвижной точке уреза, основанные на локально аналитических решениях уравнений мелкой воды, получены впервые в мире.

Уравнения движения оползня по пространственно-неоднородному подводному склону получены впервые в мире.

Результаты, связанные с разработкой конечно-разностного алгоритма для расчета в рамках модели потенциальных течений процесса генерации поверхностных волн подводным оползнем, движущимся по неровному склону, соответствуют мировому уровню исследований в данной области.

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

1. Для приемлемого описания крупномасштабных волновых процессов в больших по широтному и долготному направлениям акваториях и на продолжительное время требуются модели, способные воспроизводить дисперсию волн и учитывать эффекты, связанные со сферичностью и вращением Земли. В настоящее время для этого используется, в основном, классическая бездисперсионная модель мелкой воды, записанная в сферических координатах и выведенная в предположении о гидростатичности давления.

В ходе выполнения проекта НЛД-уравнения на вращающейся притягивающей сфере были выведены вначале на основе подхода, предложенного для плоских течений в работах Грина-Нагди и заключающегося в представлении решения по вертикальной координате в виде полинома. Успешный вывод уравнений на сфере был обусловлен, в частности, тем, что исходные уравнения Эйлера на сфере были записаны нами в очень компактной и обозримой форме благодаря использованию подвижной криволинейной системы координат.

Для проверки правильности полученных НЛД-уравнений был выполнен повторный вывод на основе подхода Л.В. Овсянникова, подразумевающего разложение решения в ряд по малым параметрам. Предварительное масштабирование полных уравнений и введение малых параметров позволило оценить вклад нелинейности и дисперсии и получить НЛД-уравнения на сфере в форме, вполне аналогичной представлению НЛД-модели на плоскости.

Подход, основанный на использовании малых параметров при анализе полученных уравнений, позволяет в качестве частных случаев рассматривать полезные с практической точки зрения промежуточные модели типа Буссинеска, открывает путь к получению целого класса

новых приближенных НЛД-моделей на сфере. Таким образом, можно сказать, что разработанный подход предоставляет возможность иерархической преемственности в классе НЛД-уравнений на сфере и соответствующих численных алгоритмов для описания поверхностных волн в океане в зависимости от превалирующих масштабов и геометрии моделируемого волнового процесса.

2. Предложен новый подход к построению конечно-разностных схем второго порядка аппроксимации, сохраняющих монотонность численного решения. В отличие от идеологии построения TVD-схем второго порядка аппроксимации, в основе которой лежит идея переключения в зонах возникновения осцилляций численного решения на схемы первого порядка аппроксимации за счет использования специальных ограничителей потока, в новом подходе такое переключение предлагается производить на основе исследования дифференциального приближения разностной схемы. Новый подход к построению монотонных схем второго порядка аппроксимации демонстрируется на явной схеме предиктор-корректор со свободным схемным параметром – скалярной функцией в случае скалярных уравнений или вектор-функцией для систем уравнений гиперболического типа.

В тех подобластях области решения, в которых возникает угроза появления осцилляций численного решения, необходимо изменить в нужную сторону дисперсию разностной схемы. Оказывается, что управлять дисперсией можно с помощью свободного схемного параметра, при этом возможные формулы для задания этой функции непосредственно следуют из анализа дифференциального приближения разностной схемы и во все эти формулы всегда входят первая и вторая разностные производные численного решения. Выбирая схемный параметр из допустимого множества, мы добиваемся того, что получающаяся нелинейная схема обладает такими дисперсионными свойствами, которые исключают возникновение нефизичных осцилляций численного решения. Например, для одной из возможных формул задания схемного параметра получается известная TVD-схема Хартена (1983). Все известные и широко используемые на практике TVD-схемы также могут быть получены на основе предлагаемого подхода.

Предложенный подход был применен ранее для построения монотонных разностных схем решения линейного и нелинейного уравнения переноса, системы уравнений мелкой воды с одной пространственной переменной, как на равномерных, так и на подвижных неравномерных сетках. В отчетный период этот подход удалось адаптировать для решения задач наката-отката в одномерной постановке и для решения задач о распространении и трансформации поверхностных волн в рамках плановой модели мелкой воды. В соответствии с целями проекта в дальнейшем планируется использовать эту новую вычислительную технологию и для разностных схем, аппроксимирующих нелинейно-дисперсионные уравнения мелкой воды. Отметим, что это направление работы имеет важное значение для задач моделирования катастрофических процессов в природной среде и аварийных ситуаций в техносфере, поскольку эти процессы всегда сопровождаются скачкообразными изменениями определяющих параметров. Новый подход позволяет легко и обоснованно строить новые разностные схемы с высоким разрешением в области разрывов решения.

3. Начиная с основополагающей работы Cartier G.F., Greenspan H.P. (1958), начались и уже более 50 лет ведутся интенсивные исследования поведения решения уравнений мелкой воды в окрестности подвижной линии уреза. Несмотря на большое количество работ, посвященных аналитическому исследованию решений, все они посвящены изучению решения при взаимодействии волны только с плоским откосом и основаны на одном и том же преобразовании уравнений мелкой воды к одному скалярному вырождающемуся уравнению, решение которого записывается в виде интегралов с использованием преобразования Фурье.

Реальный береговой склон представляет собой криволинейную поверхность, поэтому взаимодействие волн с таким берегом имеет более сложный характер, чем в случае плоского откоса, и для детального описания процессов наката-отката необходимо использование методов численного моделирования. Самым трудным при этом оказывается моделирование движения линии уреза. Но из имеющихся на сегодняшний день работ по аналитическому исследованию решения в окрестности линии уреза мало или, говоря точнее, ничего нельзя извлечь для корректной постановки разностных краевых условий. Эти результаты не дают (в общем случае

криволинейного дна) ответа на вопрос о том, как, зная положение линии уреза и скорость ее точек на текущем временном слое, сделать правильные вычисления этих величин на следующем слое. Поэтому так необходимы теоретические исследования решения в малом по времени интервале (на интервалах порядка временного шага схемы), исследования локальных свойств решения в окрестности линии уреза, на основе которых можно было бы корректно конструировать на ней численные краевые условия.

В 2010 г. начато новое направление исследования аналитических свойств решений около линии вода-суша, основанное на идеях, высказанных много лет назад Л.В. Овсянниковым и получивших широкое применение в газовой динамике при исследовании поведения границы газ-вакуум. Эти исследования отражены в монографиях С.П. Баутина и С.Л. Дерябина (2005, 2009). В задаче об истечении идеального газа в вакуум разделяющая их граница является кратной характеристикой. То же имеет место и на границе вода-суша. Отмеченная аналогия позволяет использовать в случае уравнений мелкой воды разработанный С.П. Баутиным и С.Л. Дерябиным подход для получения аналитических решений уравнений идеального газа в окрестности границы газ-вакуум.

К настоящему времени выполнено аналитическое исследование решений нелинейных уравнений мелкой воды в окрестности границы вода-суша не только для плоского откоса, но и для произвольного рельефа дна и прилегающей суши. Рассмотрены три различных режима взаимодействия волны с берегом: накат необрушенной волны в общем случае, накат необрушенной волны в частном случае совпадения в начальный момент времени касательных в точке уреза к свободной границе и рельефу дна, накат с обрушением. Решения поставленных начально-краевых задач построены в виде локально сходящихся рядов. Получен закон движения точки уреза и найдены условия и моменты времени, когда один режим течения переходит в другой. Этот результат является совершенно новым и легко адаптируется для численных расчетов.

В 2010 г. удалось удачно применить результаты аналитического исследования при разработке новых аппроксимаций краевых условий на подвижной линии уреза, аппроксимаций, основанных на полученных результатах аналитического исследования решений и показавших на тестовых задачах наката-отката неоспоримое преимущество перед известными аппроксимациями, использовавшимися ранее. Более того, на некоторых тестовых задачах получено полное совпадение численного решения (с точностью до ошибок округления) с аналитическим по положению точки уреза и ее скорости. Причину успеха можно объяснить на примере схемы С.К. Годунова для уравнений газовой динамики. Фактически в схеме Годунова в каждой ячейке сетки разыскивается локальное аналитическое решение, которое и берется в качестве численного решения. Потому-то численное решение сохраняет многие свойства и особенности решения исходной задачи. То же самое происходит при использовании в численной схеме полученных в окрестности точки уреза локальных аналитических решений уравнений мелкой воды.

4. В работах Harbitz C. B., Pedersen G., Gjevik, B. (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 2009 г. впервые в мире получены уравнения, описывающие движение подводного оползня по криволинейному склону под действием сил тяжести, плавучести, трения и сопротивления воды. Результат опубликован в статье Г.С. Хакимзянова, Н.Ю. Шокиной (2010). В этой статье 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.

В 2010 г. 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 не известны и в 2010 г. они были полу-

чены участниками проекта от ИВТ СО РАН. 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.

Кроме того, на основе классической модели мелкой воды в одномерном приближении разработан алгоритм расчета на адаптивных сетках процесса генерации поверхностных волн оползнем, движущимся в ограниченном водоеме с криволинейным склоном. Для пространственно-неоднородных рельефа подводного склона и формы оползня выполнено моделирование волновых процессов в рамках плановой модели мелкой воды с помощью конечно-разностной схемы МакКормака на равномерной сетке. Выявлены особенности волнообразования на модельных и реальных рельефах в зависимости от ряда параметров задачи.

5. Математическая постановка задачи в рамках модели потенциальных течений идеальной несжимаемой жидкости заключается в определении функции, описывающей свободную поверхность жидкости, и потенциала скорости, удовлетворяющего в области, занятой жидкостью, уравнению Лапласа. На подвижном дне, а также на вертикальных стенках, ограничивающих область течения, ставилось условие непротекания, на свободной поверхности – кинематическое и динамическое условия. В рамках этой модели разработан конечно-разностный алгоритм для расчета на криволинейных подвижных сетках процесса генерации поверхностных волн подводным оползнем, движущимся по неровному склону согласно закону, выведенному в 2010 году и описанному выше. В расчетах использовался пошаговый численный алгоритм, в котором на каждом временном промежутке сначала, на основе динамического условия, вычислялись новые значения потенциала на свободной границе, которые использовались затем в качестве граничного условия Дирихле для расчета потенциала, удовлетворяющего 9-точечному конечно-разностному аналогу уравнения Лапласа, записанного в криволинейной системе координат. С использованием полученных значений потенциала находилось новое положение свободной границы. В последнюю очередь строилась сетка для следующего временного слоя, которая адаптировалась к геометрии береговой линии, форме движущегося оползня и форме свободной поверхности. Описанная последовательность действий на данном временном промежутке повторялась несколько раз.

Оригинальность метода расчета заключается в том, что в используемой криволинейной системе координат, в отличие от исходной декартовой, дно уже не является подвижным и искривленным, а представляет собой плоскую неподвижную область, что облегчает аппроксимацию уравнений в приграничных узлах. Второй оригинальной особенностью разработанной схемы является то, что условия Неймана на непроницаемых участках границы отдельно не аппроксимируются, поскольку разностные уравнения выписываются единообразно как для внутренних узлов, так и для граничных.

К настоящему времени алгоритм опробован на задаче, для которой имеется обширный экспериментальный материал. Это задача о взаимодействии уединенной волны с неподвижным частично затопленным телом прямоугольной формы, расположенным над плоским откосом. Проведенные исследования позволили определить величины заплесков на тело и волнового давления на него в зависимости от амплитуды набегающей волны, протяженности тела и его осадки, угла наклона откоса. Сравнение с данными экспериментов показало надежность разработанного алгоритма, что дает основание сделать вывод о возможности его использования для решения других практических задач волновой гидродинамики, обозначенных в исходной заявке.

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

8

3.10.2. *Количество научных работ, подготовленных в ходе выполнения проекта и принятых к печати в 2010 г.*

1

3.11. *Участие в научных мероприятиях по тематике проекта, которые проводились при финансовой поддержке Фонда*

- 3.12. *Участие в экспедициях по тематике проекта, проводимых при финансовой поддержке Фонда*
- 3.13. *Финансовые средства, полученные от РФФИ*  
400000 руб.
- 3.14. *Вычислительная техника и научное оборудование, приобретенные на средства Фонда*
- 3.15. *Адреса (полностью) ресурсов в Internet, подготовленных авторами по данному проекту*
- 3.16. *Библиографический список всех публикаций по проекту*
  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. 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.
  6. Бейзель С.А., Хакимзянов Г.С., Чубаров Л.Б. Пространственные эффекты оползневой волнообразования в прибрежной зоне // Труды X Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» ГА-2010, 25.05.2010 – 27.05.2010. СПб.: Наука, 2010. 478 с. С. 247 – 250.
  7. Камынин Е.Ю., Максимов В.В., Нуднер И.С., Семёнов К.К., Хакимзянов Г.С. Численное и экспериментальное исследования воздействия уединённой волны на частично проницаемые сооружения // Труды X Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» ГА-2010, 25.05.2010 – 27.05.2010. СПб.: Наука, 2010. 478 с. С. 193 – 196.
  8. Dutykh D., Mitsotakis D., Chubarov L., Shokin Yu. Horizontal displacements contribution to tsunami wave energy balance // <http://arxiv.org/abs/1011.1741v1>. 22 p.
  9. Федотова З.И., Хакимзянов Г.С. Нелинейно-дисперсионные уравнения волновой гидродинамики на вращающейся притягивающей сфере // ПМТФ. 2011. Т. 52 (в печати).
- 3.17. *Приоритетное направление развития науки, технологий и техники РФ, в котором, по мнению исполнителей, могут быть использованы результаты данного проекта*  
рациональное природопользование
- 3.18. *Критическая технология РФ, в которой, по мнению исполнителей, могут быть использованы результаты данного проекта*  
технологии мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы и гидросферы

*Подпись руководителя проекта*

**Форма 541. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ОТЧЕТОВ)**

- 41.1. *Номер проекта* 10-05-91052
- 41.2.1. *Первый автор*  
Бейзель С.А.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 41.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)* Бейзель С.А.
- 41.3.1. *Другие авторы*  
Хакимзянов Г.С.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
Чубаров Л.Б.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 41.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*  
Хакимзянов Г.С.  
Чубаров Л.Б.
- 41.4. *Название публикации*  
Моделирование поверхностных волн, порождаемых подводным оползнем, движущимся по пространственно неоднородному склону
- 41.5. *Язык публикации* русский
- 41.6.1. *Полное название издания* Вычислительные технологии
- 41.6.2. *ISSN издания* 1560-7534
- 41.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 41.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 41.9. *Год публикации*  
2010
- 41.10.1 *Том издания*  
15
- 41.10.2 *Номер издания*  
3
- 41.11. *Страницы*  
39-51
- 41.12.1. *Полное название издательства*  
ИВТ СО РАН
- 41.12.2. *Город, где расположено издательство*  
Новосибирск
- 41.13. *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.
- 41.14. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи*
- 41.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*  
9

*Подпись руководителя проекта*

**Форма 541. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ОТЧЕТОВ)**

- 41.1. *Номер проекта* 10-05-91052
- 41.2.1. *Первый автор*  
Бейзель С.А.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 41.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)* Бейзель С.А.
- 41.3.1. *Другие авторы*  
Хакимзянов Г.С.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
Чубаров Л.Б.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 41.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*  
Хакимзянов Г.С.  
Чубаров Л.Б.
- 41.4. *Название публикации*  
Пространственные эффекты оползневого волнообразования в прибрежной зоне
- 41.5. *Язык публикации* русский
- 41.6.1. *Полное название издания*  
Труды X Всероссийской конференции "Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики" ГА–2010, 25.05.2010–27.05.2010
- 41.6.2. *ISSN издания*
- 41.7. *Вид публикации* статья в сборнике
- 41.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 41.9. *Год публикации* 2010
- 41.10.1 *Том издания*
- 41.10.2 *Номер издания*
- 41.11. *Страницы* 247–250
- 41.12.1. *Полное название издательства* Наука
- 41.12.2. *Город, где расположено издательство* Санкт-Петербург
- 41.13. *Краткий реферат публикации*  
Представлены результаты численного моделирования оползневого механизма генерации поверхностных волн с учетом пространственной неоднородности рельефа подводного склона. Оползень представляется квазинедеформируемым твердым телом, движущимся по склону произвольного рельефа под слоем несжимаемой невязкой тяжелой жидкости. Моделирование волновых процессов выполняется в рамках уравнений теории мелкой воды с помощью конечно-разностной схемы Мак-Кормака на равномерной сетке. Обсуждаются вопросы волнообразования на модельных и реальных рельефах в зависимости от ряда параметров задачи.
- 41.14. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи*
- 41.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*  
1

*Подпись руководителя проекта*

**Форма 541. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ОТЧЕТОВ)**

- 41.1. *Номер проекта* 10-05-91052
- 41.2.1. *Первый автор*  
Fedotova Z.I.; 2; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 41.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)*  
Fedotova Z.I.
- 41.3.1. *Другие авторы*  
Khakimzyanov G.S.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 41.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*  
Khakimzyanov G.S.
- 41.4. *Название публикации*  
Nonlinear-dispersive shallow water equations on a rotating sphere
- 41.5. *Язык публикации*  
английский
- 41.6.1. *Полное название издания*  
Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling
- 41.6.2. *ISSN издания*
- 41.7. *Вид публикации*  
статья в журнале
- 41.8. *Завершенность публикации*  
опубликовано
- 41.9. *Год публикации*  
2010
- 41.10.1 *Том издания*  
251
- 41.10.2 *Номер издания*  
1
- 41.11. *Страницы*  
15-26
- 41.12.1. *Полное название издательства*  
de Gruyter
- 41.12.2. *Город, где расположено издательство*  
Berlin
- 41.13. *Краткий реферат публикации*  
Получены нелинейно-дисперсионные уравнения мелкой воды на сфере, которые могут использоваться при моделировании распространения волн цунами на большие расстояния с учетом вращения Земли, сферичности поверхности океана и дисперсии волн.
- 41.14. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи*
- 41.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*  
22

*Подпись руководителя проекта*

**Форма 541. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ОТЧЕТОВ)**

- 41.1. *Номер проекта* 10-05-91052
- 41.2.1. *Первый автор* Dutykh D.; 2; Франция; LAMA
- 41.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)* Dutykh D.
- 41.3.1. *Другие авторы*  
Mitsotakis D.; 2; Франция; UMR de Mathematiques  
Чубаров Л.Б.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
Шокин Ю.И.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 41.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*  
Mitsotakis D.  
Chubarov L.  
Shokin Yu.
- 41.4. *Название публикации*  
Horizontal displacements contribution to tsunami wave energy balance
- 41.5. *Язык публикации* английский
- 41.6.1. *Полное название издания* Journal of Geophysical Research
- 41.6.2. *ISSN издания*
- 41.7. *Вид публикации* прочие
- 41.8. *Завершенность публикации* принято в печать
- 41.9. *Год публикации* 2010
- 41.10.1 *Том издания*
- 41.10.2 *Номер издания*
- 41.11. *Страницы*
- 41.12.1. *Полное название издательства* American Geophysical Union
- 41.12.2. *Город, где расположено издательство* Вашингтон
- 41.13. *Краткий реферат публикации*  
Основной причиной возникновения волн цунами являются деформации дна океана, вызванные подводным землетрясением. Как правило, учитывается только вертикальное движение дна, а горизонтальные смещения пренебрегаются. В настоящей работе изучаются как вертикальные, так и горизонтальные движения дна, и предлагается новая методология для реконструкции поля сейсмических смещений дна, которое передается на свободную поверхность с использованием нового трехмерного слабо нелинейного подхода. Особое внимание уделяется эволюции кинетической и потенциальной энергий результирующей волны, а также количественно оценивается вклад горизонтальных перемещений в баланс энергии волн. Подходы, предложенные в этом исследовании, иллюстрируются примере цунами 17 июля 2006 у берегов о. Ява.
- 41.14. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи*
- 41.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*  
76

*Подпись руководителя проекта*

**Форма 541. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ОТЧЕТОВ)**

- 41.1. *Номер проекта* 10-05-91052
- 41.2.1. *Первый автор* Beisel S.A.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 41.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)* Beisel S.A.
- 41.3.1. *Другие авторы*  
Chubarov L.B.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН  
Khakimzyanov G.S.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 41.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*  
Chubarov L.B.  
Khakimzyanov G.S.
- 41.4. *Название публикации*  
Simulation of surface waves generated by an underwater landslide moving over an uneven slope
- 41.5. *Язык публикации* английский
- 41.6.1. *Полное название издания*  
Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling
- 41.6.2. *ISSN издания*
- 41.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 41.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 41.9. *Год публикации* 2011
- 41.10.1 *Том издания* 26
- 41.10.2 *Номер издания* 1
- 41.11. *Страницы* 17-38
- 41.12.1. *Полное название издательства* de Gruyter
- 41.12.2. *Город, где расположено издательство* Berlin
- 41.13. *Краткий реферат публикации*  
Настоящая 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.
- 41.14. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи*
- 41.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*  
25

*Подпись руководителя проекта*

**Форма 541. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ОТЧЕТОВ)**

- 41.1. *Номер проекта* 10-05-91052
- 41.2.1. *Первый автор* Хакимзянов Г.С.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 41.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)* Хакимзянов Г.С.
- 41.3.1. *Другие авторы* Шокина Н.Ю.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 41.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)* Шокина Н.Ю.
- 41.4. *Название публикации*  
Численное моделирование поверхностных волн, возникающих при движении подводного оползня по неровному дну
- 41.5. *Язык публикации* русский
- 41.6.1. *Полное название издания* Вычислительные технологии
- 41.6.2. *ISSN издания* 1560-7534
- 41.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 41.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 41.9. *Год публикации* 2010
- 41.10.1 *Том издания* 15
- 41.10.2 *Номер издания* 1
- 41.11. *Страницы* 105-119
- 41.12.1. *Полное название издательства* ИВТ СО РАН
- 41.12.2. *Город, где расположено издательство* Новосибирск
- 41.13. *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.
- 41.14. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи*
- 41.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы* 6

*Подпись руководителя проекта*

**Форма 541. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ОТЧЕТОВ)**

- 41.1. *Номер проекта* 10-05-91052
- 41.2.1. *Первый автор*  
Баутин С.П.; 2; Россия; Уральский государственный университет путей сообщения
- 41.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)* Баутин С.П.
- 41.3.1. *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
- 41.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*  
Дерябин С.Л.  
Соммер А.Ф.  
Хакимзянов Г.С.
- 41.4. *Название публикации*  
Исследование решений уравнений мелкой воды в окрестности подвижной линии уреза
- 41.5. *Язык публикации* русский
- 41.6.1. *Полное название издания* Вычислительные технологии
- 41.6.2. *ISSN издания* 1560-7534
- 41.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 41.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 41.9. *Год публикации* 2010
- 41.10.1 *Том издания* 15
- 41.10.2 *Номер издания* 6
- 41.11. *Страницы* 19-41
- 41.12.1. *Полное название издательства* ИВТ СО РАН
- 41.12.2. *Город, где расположено издательство* Новосибирск
- 41.13. *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.
- 41.14. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи*
- 41.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*  
26

*Подпись руководителя проекта*

**Форма 541. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ОТЧЕТОВ)**

- 41.1. *Номер проекта* 10-05-91052
- 41.2.1. *Первый автор* Камынин Е.Ю.; 2; Россия; Филиал ОАО "26-й ЦНИИ"
- 41.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)* Камынин Е.Ю.
- 41.3.1. *Другие авторы*  
Максимов В.В.; 2; Россия; Филиал ОАО "26-й ЦНИИ"  
Нуднер И.С.; 2; Россия; Филиал ОАО "26-й ЦНИИ"  
Семёнов К.К.; 2; Россия; Филиал ОАО "26-й ЦНИИ"  
Хакимзянов Г.С.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 41.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)*  
Максимов В.В.  
Нуднер И.С.  
Семёнов К.К.  
Хакимзянов Г.С.
- 41.4. *Название публикации* Численное и экспериментальное исследования воздействия уединённой волны на частично проницаемые сооружения
- 41.5. *Язык публикации* русский
- 41.6.1. *Полное название издания* Труды X Всероссийской конференции "Прикладные технологии гидроакустики и гидродинамики" ГА-2010, 25.05.2010–27.05.2010
- 41.6.2. *ISSN издания*
- 41.7. *Вид публикации* статья в сборнике
- 41.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 41.9. *Год публикации* 2010
- 41.10.1 *Том издания*
- 41.10.2 *Номер издания*
- 41.11. *Страницы* 193-196
- 41.12.1. *Полное название издательства* Наука
- 41.12.2. *Город, где расположено издательство* Санкт-Петербург
- 41.13. *Краткий реферат публикации*

При проектировании морских сооружений типа плавучих доков, платформ, понтонов одной из важнейших задач является определение воздействия на них уединенных волн. При изучении взаимодействия поверхностных волн с частично погруженными сооружениями решающую роль играют лабораторные исследования, позволяющие оценить волновые нагрузки в широком диапазоне таких определяющих параметров, как размеры тела, его осадка, амплитуда уединенной волны и др. Вычислительный эксперимент также представляет практический интерес, так как с его помощью можно достаточно точно воспроизводить картину взаимодействия волн с сооружением, находясь в области применимости используемых математических моделей.

Для снижения высоты волны, воздействующей на сооружение, и тем самым для уменьшения волновой нагрузки на него, применяют различные защитные экраны. Это могут быть непроницаемые вертикальные экраны, не достигающие до дна и частично пропускающие набегающую волну снизу, или пористые экраны, пропускающие через себя ослабленную волну той или иной интенсивности в зависимости от заданной пористости экрана. Воздействие уединенной волны на конструкции, состоящие из защищаемого сооружения и защитного экрана, изучено недостаточно как численными методами, так и с помощью лабораторных экспери-

ментов, особенно в случае пористых преград. Восполнению этого пробела и посвящена настоящая работа, в которой выполнено экспериментальное и численное исследование величин заплесков на полупогруженное тело и силового воздействия на него при различных значениях амплитуды набегающей волны, пористости экрана, зазора между дном и непроницаемым вертикальным экраном.

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

41.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*

9

*Подпись руководителя проекта*

**Форма 541. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ОТЧЕТОВ)**

- 41.1. *Номер проекта* 10-05-91052
- 41.2.1. *Первый автор* Федотова З.И.; 2; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 41.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)* Федотова З.И.
- 41.3.1. *Другие авторы*  
Хакимзянов Г.С.; 1; Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН
- 41.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)* Хакимзянов Г.С.
- 41.4. *Название публикации* Нелинейно-дисперсионные уравнения волновой гидродинамики на вращающейся притягивающей сфере
- 41.5. *Язык публикации* русский
- 41.6.1. *Полное название издания* Прикладная механика и техническая физика
- 41.6.2. *ISSN издания* 0869-5032
- 41.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 41.8. *Завершенность публикации* принято в печать
- 41.9. *Год публикации* 2011
- 41.10.1 *Том издания* 52
- 41.10.2 *Номер издания*
- 41.11. *Страницы*
- 41.12.1. *Полное название издательства* Сибирское отделение РАН
- 41.12.2. *Город, где расположено издательство* Новосибирск
- 41.13. *Краткий реферат публикации*  
В работе выведены нелинейно-дисперсионные уравнения волновой гидродинамики на вращающейся сфере, пригодные для математического моделирования продолжительного по времени распространения длинных волн в протяженных акваториях Мирового океана. Полученные уравнения являются полностью нелинейными, учитывают подвижность донной поверхности и влияние силы Кориолиса.  
В предыдущих работах авторов был разработан единообразный вывод известных НЛД-уравнений, описывающих поверхностные волны на воде в локальной декартовой системе координат с учетом подвижности донной поверхности, что обеспечило возможность моделирования волн цунами, вызванных и(или) сопровождающихся оползневыми процессами. Далее путем формальных выкладок была получена НЛД-модель на вращающейся сфере. В настоящей работе эти известные подходы дополнены предварительным масштабированием полных уравнений и введением малых параметров, позволивших оценить вклад нелинейности и дисперсии и предложить новый способ получения НЛД-модели на сфере.
- 41.14. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи*
- 41.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы*  
14

*Подпись руководителя проекта*

## Форма 510. ЗАЯВКА НА 2011 г.

10.1. *Номер проекта* 10-05-91052

10.2. *Коды классификатора* 01-201 05-513

10.3. *Ключевые слова*

волны на воде, нелинейность, дисперсия, математическое моделирование, численные методы

10.4. *Цели очередного годовичного этапа, связь с основной задачей проекта*

В исходной заявке были поставлены следующие цели на второй год выполнения проекта:

1. разработка и обоснование схемы расчета на основе нелинейно-дисперсионных уравнений с учетом подвижности дна;
2. вывод законов движения деформируемого оползня по неровному склону дна;
3. моделирование на основе иерархии численных моделей процесса генерации поверхностных волн, возникающих в результате стока жидкости в донные трещины водохранилища, образующиеся во время землетрясений;
4. построение и исследование конечно-разностных схем для аппроксимации на неподвижных и динамически адаптивных сетках сильно нелинейных дисперсионных уравнений старших приближений теории мелкой воды с учетом эффектов сферичности Земли на основе модели Грина-Нагди.

Поскольку вторая задача из этого плана уже выполнена в 2010 году, то вместо нее в 2011 году планируется

- выполнить сравнительный анализ результатов численного моделирования генерации поверхностных волн на основе иерархии математических моделей и разработанных авторами численных алгоритмов с использованием полученного в отчетный период закона движения подводного оползня по пространственно неоднородному криволинейному склону.

Кроме того, в соответствии с основной задачей проекта, нацеленной на разработку новых аналитических и численных подходов для уточнения решения ряда традиционных задач, и основываясь на новейших результатах, полученных в отчетный период для одномерных задач теории мелкой воды, предполагается обобщить эти результаты на случай плановых задач наката-отката:

- использование аналитических решений плановых уравнений мелкой воды при постановке разностных краевых условий на подвижной криволинейной линии уреза.

10.5. *Ожидаемые в конце 2011 г. научные результаты*

1. будет разработан и обоснован конечно-разностный алгоритм расчета на прямоугольных и криволинейных сетках на основе полных нелинейно-дисперсионных уравнений гидродинамики поверхностных волн с учетом подвижности дна;
2. будет выполнен сравнительный анализ результатов численного моделирования генерации поверхностных волн подводным оползнем на основе модели мелкой воды, нелинейно-дисперсионной модели и модели потенциальных течений жидкости со свободной границей;
3. будет выполнено моделирование на основе иерархии адаптивных численных алгоритмов процесса генерации поверхностных волн, возникающих в результате стока жидкости в донные трещины водохранилища, образующиеся во время землетрясений, в ходе которого будут определены амплитуды возникающих волн в зависимости от объема трещин, времен их раскрытия и схлопывания, степень опасности этих волновых явлений для береговых сооружений;
4. будет разработан конечно-разностный алгоритм для расчета распространения поверхностных волн в рамках полученной авторами полной НЛД-модели на сфере с использованием расщепления системы уравнений на эллиптическую и гиперболическую части;
5. будут разработаны новые аппроксимации краевых условий на криволинейной подвижной линии уреза, основанные на использовании локально-аналитических решений плановых уравнений мелкой воды в окрестности этой линии.

Если на первом этапе выполнения проекта совместные усилия российских и французских исполнителей проекта были сосредоточены на усовершенствовании математических моделей и алгоритмов, то результатом совместной работы на втором этапе станут тщательно исследо-

ванные и проверенные на тестах вычислительные алгоритмы моделирования задач волновой гидродинамики, созданные на основе как методов конечных разностей, так и методов конечных объемов. Планируются:

1. совместные рабочие семинары с целью обсуждения результатов работ, критического сравнения различных методов и подходов, применяющихся для решения задач волновой гидродинамики;
2. публикация совместных статей;
3. совместные доклады на Международной конференции «Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика», посвященной 90-летию со дня рождения академика Н.Н. Яненко, Новосибирск, Россия, 30 мая – 4 июня 2011 г., и, возможно, на Международной конференции "Математические и информационные технологии, МИТ-2011" (27–31 августа 2011 г., Врнячка Баня, Сербия; 31 августа – 5 сентября 2011 г., Будва, Черногория).

10.6. *Общий объем финансирования на 2011 год*  
600000

10.7.1. *Сроки проведения в 2011 г. экспедиции по тематике проекта*

10.7.2. *Ориентировочная стоимость экспедиции (в руб.)*

10.7.3. *Регион проведения экспедиции*

10.7.4. *Название района проведения экспедиции*

10.8. *Планируемая численность участников проекта в 2011 году*

1. Шокин Юрий Иванович
2. Чубаров Леонид Борисович
3. Хакимзянов Гаяз Салимович
4. Шокина Нина Юрьевна
5. Бейзель Софья Александровна
6. Худякова Виктория Константиновна
7. Sommer Анна Федоровна
8. Гусев Олег Игоревич

*Подпись руководителя проекта*