ОТЧЕТ ЗА 2011 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 2012
- *1.6. Вид отчета* этап 2011 года
- 1.7. Аннотация

За отчетный период исполнителями:

1. разработан конечно-разностный алгоритм расчета поверхностных волн на основе полных нелинейно-дисперсионных уравнений гидродинамики с учетом подвижности дна;

2. исследованы волновые режимы, возникающие в водохранилище ГЭС при сходе оползня с крутого берегового склона;

3. выведены новые приближенные НЛД-модели на вращающейся притягиваю-щей сфере. Разработана разностная схема для расчета распространения волн на сфере в рамках приближенной НЛД-модели Буссинеска;

4. разработаны новые аппроксимации краевых условий на подвижной линии уреза, основанные на использовании локально-аналитических решений плановых уравнений мелкой воды в окрестности этой линии;

5. важнейшим результатов отчетного периода следует считать и наладившееся тесное плодотворное сотрудничество исполнителей проекта.

1.8. Полное название организации, где выполняется проект

Учреждение Российской академии наук Институт вычислительных технологий Сибирского отделения РАН

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

Подпись руководителя проекта

Форма 502. КРАТКИЙ НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

- 2.1. Номер проекта 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 2012
- 2.5. Вид отчета этап 2011 года

2.6. Аннотация

1. A finite-difference algorithm for calculation of surface waves is developed on the basis of the full

nonlinear dispersive equations of hydrodynamics with movable bottom.

2. Wave regimes are investigated arising in hydroelectric reservoir due to the landslide motion from the steep coastal slope.

3. New approximate NLD models on a rotating attracting sphere are derived. Difference scheme is developed for calculating the propagation of waves on a sphere within the framework of the approximate NLD model of Boussinesq.

4. New approximations of the boundary conditions on the moving coastline are developed based on the use of locally analytic solutions of plan shallow water equations in the vicinity of this line.

5. As the most important result of the reporting period the establishing of close fruitful cooperation of project's executors should be considered.

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 цели проекта на 2011 год
 - 1. разработка и обоснование схемы расчета на основе нелинейно-дисперсионных уравнений с учетом подвижности дна;
 - выполнить сравнительный анализ результатов численного моделирования генерации поверхностных волн на основе иерархии математических моделей и разработанных численных алгоритмов с использованием полученного авторами нового закона движения подводного оползня по криволинейному склону;
 - 3. моделирование на основе иерархии численных моделей процесса генерации поверхностных волн, возникающих в результате стока жидкости в донные трещины водохранилища, образующиеся во время землетрясений;
 - 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;
 - 5. использование аналитических решений плановых уравнений мелкой воды при постановке разностных краевых условий на подвижной криволинейной линии уреза.

3.5. Степень выполнения поставленных в проекте задач

Для расчета трансформации поверхностных волн при их распространении над неровным подвижным дном разработана, программно реализована и протестирована на модельных задачах конечно-разностная схема на прямоугольных равномерных сетках, аппроксимирующая плановые нелинейно-дисперсионные уравнения мелкой воды.

Сравнительный анализ результатов численного моделирования процесса генерации поверхностных волн подводным оползнем выполнен в рамках модели мелкой воды, полной нелинейно-дисперсионной модели и модели потенциальных течений жидкости со свободной границей.

На основе нелинейных моделей мелкой воды и потенциальных течений жидкости выполнено численное моделирование процесса генерации поверхностных волн, возникающих в результате стока жидкости в донные трещины водохранилища, образующиеся во время землетрясений. Определены амплитуды возникающих волн в зависимости от объема трещин, времен их раскрытия и схлопывания.

Выведены новые приближенные НЛД-модели на вращающейся притягивающей сфере. Разработана разностная схема для расчета распространения поверхностных волн на сфере в рамках приближенной НЛД-модели Буссинеска.

К настоящему времени в основном завершена работа по применению точных аналитических решений плановых уравнений мелкой воды в окрестности линии уреза при постановке разностных краевых условий на подвижной границе вода-суша.

3.6. Полученные за отчетный период важнейшие результаты

- 1. разработан конечно-разностный алгоритм расчета поверхностных волн на основе полных нелинейно-дисперсионных уравнений гидродинамики с учетом подвижности дна;
- 2. исследованы волновые режимы, возникающие в водохранилище ГЭС при сходе оползня с крутого берегового склона;
- 3. выведены новые приближенные НЛД-модели на вращающейся притягивающей сфере. Разработана разностная схема для расчета распространения волн на сфере в рамках приближенной НЛД-модели Буссинеска;
- 4. разработаны новые аппроксимации краевых условий на подвижной линии уреза, основанные на использовании локально-аналитических решений плановых уравнений мелкой воды в окрестности этой линии;
- 5. важнейшим результатов отчетного периода следует считать и наладившееся тесное сотрудничество исполнителей проекта. плодотворное Ha Международной конференции 27–31 августа 2011 г., Врнячка Баня, Сербия; 31 августа – 5 сентября 2011 г., Будва, Черногория) были проведены совместные рабочие семинары. В ноябре-декабре 2011 годы 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 в 2011 году стала задача о генерации нелинейных поверхностных волн подводным оползнем, движущимся по неровному склону под действием сил тяжести, плавучести, гидродинамического сопротивления и трения о дно. Исполнителям удалось выполнить сравнение результатов, полученных на основе иерархии нелинейных математических моделей и вычислительных методов и алгоритмов, разработанных как российскими проекта, французскими. По материалам участниками так И совместных исследований одна статья принята в печать, вторая сдана в печать и третья готовится к печати в одном из авторитетных международных журналов.

3.7. Степень новизны полученных результатов

Все перечисленные выше важнейшие результаты являются новыми и получены впервые.

Новым является разработанный конечно-разностный алгоритм расчета поверхностных волн на основе полных нелинейно-дисперсионных уравнений гидродинамики с учетом подвижности дна.

Впервые детально и с использованием иерархии математических моделей и вычислительных алгоритмом исследованы волновые режимы, возникающие в водохранилище ГЭС при сходе оползня с крутого берегового склона.

Все выведенные приближенные НЛД-модели на вращающейся притягивающей сфере являются новыми.

Способ аппроксимации краевых условий на подвижной линии уреза, основанный на использовании локально-аналитических решений плановых уравнений мелкой воды, применен впервые.

3.8. Сопоставление полученных результатов с мировым уровнем

Все полученные результаты соответствуют мировому уровню исследований в данной области. Основные результаты работ по проекту были представлены на международных конференциях:

VII Совещание Российско-Казахстанской рабочей группы по

вычислительным и информационным технологиям (Новосибирск, 1-2 июня 2011 г.);

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

• Международная конференция по механике и баллистике «VII Окуневские чтения». 20–24 июня 2011 г., Санкт-Петербург, Россия;

• VI Международная конференция по математическому моделированию. 3–8 июля 2011 г., Якутск, Россия;

• Международная конференция «Математические и информационные технологии, МІТ-2011». 27–31 августа 2011 г., Врнячка Баня, Сербия; 31 августа–5 сентября 2011 г., Будва, Черногория;

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

3.9. Методы и подходы, использованные в ходе выполнения проекта

1. Актуальность запланированных работ по расширению набора используемых нелинейно-дисперсионных моделей волновой гидродинамики обусловлена необходимостью корректного учета дисперсии при моделировании распространения поверхностных волн в больших акваториях, в прибрежных областях, а также при исследовании волн, порожденных оползнями. Ранее исполнителями проекта было получено обобщение НЛД-уравнений Железняка-Пелиновского, известных лишь для стационарного дна, на случай подвижного дна. Достоинством полученных уравнений является то, что в правой части уравнения движения содержатся только первые производные по времени от компонент вектора скорости, в то время как в других известных полных НЛД-моделях в правые части уравнений входят вторые производные по времени от искомых функций. Это позволяет использовать расщепление исходной системы на эллиптическую и гиперболическую части и для каждой из частей расщепленной системы применялись хорошо изученные алгоритмы.

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

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

где $\boldsymbol{u} = (u, v)$ – усредненная по глубине горизонтальная составляющая вектора скорости трехмерного течения, $H = \eta + h$, $z = \eta(x, y, t)$ – уравнение свободной границы, z = -h(x, y, t) – известное уравнение подвижного дна, $\nabla = (\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}), \nabla \cdot \boldsymbol{u} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y},$ $Q_1 = D(\nabla \cdot \mathbf{u}) - (\nabla \cdot \mathbf{u})^2, \qquad Q_2 = D^2 h,$ (3)

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

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

 $H\mathbf{d} + H\nabla\eta = \nabla\varphi - \psi\nabla h \,,$

где

(4)

$$\varphi = \frac{H^3}{3}Q_1 + \frac{H^2}{2}Q_2, \qquad \psi = \frac{H^2}{2}Q_1 + HQ_2.$$
(5)

Если обратить равенства (5)

$$Q_1 = \frac{1}{H^3} (12\varphi - 6H\psi), \qquad Q_2 = \frac{1}{H^2} (-6\varphi + 4H\psi),$$

выражения (3) записать через вектор ускорения

$$Q_1 = \nabla \cdot \mathbf{d} - 2(\nabla \cdot \mathbf{u})^2 + 2\det\left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{x}}\right), \qquad Q_2 = \mathbf{d} \cdot \nabla h + \mathbf{u} \cdot \left((\mathbf{u} \cdot \nabla)\nabla h\right) + B$$

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

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

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

$$\psi = \frac{\nabla \varphi \cdot \nabla h}{r} + RH + \frac{6\varphi}{Hr}, \qquad R = \frac{\mathbf{u} \cdot ((\mathbf{u} \cdot \nabla)\nabla h) - \nabla \eta \cdot \nabla h + B}{r},$$
(7)

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

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

где

$$F = \nabla \cdot \left(R \nabla h + \nabla \eta \right) - \frac{6}{H} R + 2 \left(\nabla \cdot \mathbf{u} \right)^2 - 2 \det \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{x}} \right).$$

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

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

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

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

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



Рис.1. Поперечное сечение водохранилища: положение оползня в начальный момент времени (1) и в момент остановки (2); (3) - неподвижное дно; (4) - свободная граница воды

Разработанный алгоритм применялся для исследования высот волн, генерируемых оползнем в ограниченном водоеме (см. рис.1). На рис. 2 показаны мареограммы на правом берегу водоема, отражающие результаты расчетов на основе модели потенциальных течений жидкости, в которой учитываются вертикальные перемещения воды, полной НЛД-модели, учитывающей дисперсионные эффекты и бездисперсионной модели мелкой воды. Видно, что первые две модели дают не только качественно близкие результаты, но и близкие количественно. Таким образом, расчет на основе НЛД-модели, существенно более экономичной, чем модель потенциальных течений, из-за уменьшения размерности задачи, может давать вполне адекватные результаты. Отметим попутно, что хотя бездисперсионная модель мелкой воды не может хорошо передавать детали течения, тем не менее, величины максимальных заплесков на берега водоема описываются ею вполне удовлетворительно.



Рис.2. Мареограммы на правом берегу водоема при использовании модели мелкой воды (сплошная линия), модели потенциальных течений (штриховая линия) и НЛД-модели (штрих-пунктирная линия)

2. Авария на Саяно-Шушенской ГЭС в 2009 г. показала, что необходимо прорабатывать даже маловероятные сценарии возникновения и развития аварийных ситуаций. Таким маловероятным, но все же возможным, событием может быть образование во время землетрясений крупных трещин на дне водохранилища или в теле плотины ГЭС. Кроме огромных разрушений в нижнем бьефе быстрый отток воды в трещины может спровоцировать образование в самом водохранилище волн большой амплитуды, которые могут причинить разрушения береговыми склонами возможны также подводные оползни, которые могут быть вызваны слабыми землетрясениями или даже промышленными взрывами, поэтому представляет интерес изучение характеристик возникающих при этом цунамиподобных поверхностных волн.

Для морского склона с монотонно возрастающей глубиной генерируемая оползнем волновая картина следующая (см. рис.3). 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.4) волновая картина иная: головная волна повышения после отражения от противоположного берега проходит водоем в обратном направлении, взаимодействуя по пути со «впадиной» (см. рис.4), 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 коэффициенте трения могут возникать более сложные траектории движения оползня с несколькими изменениями направления перемещения (см. рис. 5).



Рис.3. Динамика движения оползня по морскому склону (слева) и динамика генерируемых оползнем поверхностных волн (справа)



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

Анализ динамики свободной границы на продолжительные промежутки времени показывает, что максимальные заплески на берегах происходят не при первом накате. Таким образом, для оползней в ограниченных водоемах волновая картина получается более сложной, чем для морского склона с монотонно возрастающей глубиной, и достоверную оценку величин максимальных заплесков на берега можно дать только на основе численного моделирования рассматриваемого процесса. При выполнении настоящего проекта для моделирования поверхностных волн, возникающих в результате схода оползня в водохранилище ГЭС, использовалась иерархия численных алгоритмов (на основе модели мелкой воды, нелинейно-дисперсионной модели и модели потенциальных течений жидкости). Повышение точности расчетов достигалось применением адаптивных сеток, которые сгущались в окрестностях подвижных вершин и впадин волн (см. рис. 5).

Далее приводятся результаты исследований по выявлению степени влияния значений параметров, входящих в уравнения движения оползня, на величину R максимального вертикального заплеска на берег водоема с неровным дном. Был проведен большой цикл вычислительных экспериментов по определению того, какие из параметров, отвечающих за движущийся объем (высота Т и длина b оползня), движущуюся массу (относительная плотность γ , равная отношению плотности материала оползня к плотности воды, и коэффициент присоединенной массы С,), за торможение оползня (угол трения θ_* И коэффициент гидродинамического сопротивления C_d) наиболее существенно влияют на величину R максимального вертикального заплеска на берег водоема с неровным дном. В этих экспериментах варьировались значения какой-либо пары параметров, значения остальных четырех фиксировались и брались равными некоторым базовым значениям.



Рис.5. 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 движ ния узлов адаптивной сетки

На рис. 6 слева изображена поверхность R = r(b,T), которая характеризует влияние размеров оползня и, следовательно, его объема, на величину максимального заплеска. Амплитуда генерируемых волн существенно зависит от параметра T, возрастая при увеличении толщины оползня. На законе движения изменение величины b при постоянных значениях остальных параметров проявляется в том, что более протяженный оползень движется с большей скоростью и, как следствие, генерирует более сильные поверхностные волны. Таким образом, увеличение длины оползня приводит к тем же качественным изменениям в значениях заплеска, что и увеличение его толщины. Отметим, что на величину R решающее влияние оказывает процесс движения оползня по мелководной части акватории, в то время как при сходе оползня в область больших глубин его движение слабо сказывается на генерируемых поверхностных волнах. Поскольку влияние объема оползня на амплитуду генерируемых волн проявляется с самого начала движения, еще в мелководной части, и скорость его перемещения возрастает с ростом объема, то размеры оползня являются важными определяющими параметрами при оценке величин заплесков волн на берега водоема.

На рис. 6 справа демонстрируется зависимость максимального заплеска от трудно поддающихся оценке параметров, отвечающих за торможение оползня – коэффициента сопротивления C_d и угла трения θ_* . Видно, что в довольно широком диапазоне

изменения этих параметров их влияние на величину R слабее, чем при варьировании объема. Анализ траекторий движения оползня показывает, что с увеличением трения уменьшаются проходимый им путь и скорость. При малых θ_* скорость оползня больше, но он быстрее уходит на глубину, где его движение, как уже отмечалось выше, оказывает малое влияние на процесс генерации поверхностных волн. Как видно из рис. 6, еще более слабое влияние на величины заплесков оказывает вариация коэффициента гидродинамического сопротивления C_d . Это связано с тем, что изменение этого коэффициента проявляется при больших скоростях движения оползня, а они также достигаются в зоне больших глубин.

Из рис. 7 видно, что из двух параметров C_w и γ , характеризующих движущуюся оползневую массу, вариация первого из них слабо влияет на значения максимального заплеска, а второго – существенно. Последнее связано с тем, что оползень с большей относительной плотностью успевает набрать значительную скорость уже в мелководной части акватории, что и приводит к генерации высоких поверхностных волн.



Рис. 6. Зависимость максимального заплеска R от длины b и высоты T подводного оползня (слева); от коэффициента сопротивления C_d и угла трения θ_* (справа)



Рис. 7. Зависимость максимального заплеска R от коэффициента присоединенной массы C_w и относительной плотности оползневой массы γ

Подводя итог, можно сказать, 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.

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 оползневого 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. Волны на поверхности покрывающего оползень слоя воды моделировались с использованием классических нелинейных уравнений мелкой воды, для решения которых применялись численные алгоритмы, основанные на конечно-разностной схеме Мак-Кормака на равномерной сетке. Береговая линия рассматривалась как вертикальная стенка, от которой происходило отражение волн.

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 оползневого 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.

Сопоставление проводилось на примере процессов, происходящих в специально выбранной модельной акватории, рельеф дна которой представляет собой идущий от начала координат линейный склон с углом наклона 6°, сопряженный с горизонтальным участком. Глубина горизонтального участка дна 4 м. Левая граница области находится в точке x = 1 м (минимальная глубина дна здесь равна примерно 0.1 м.), а правая – *x* = 101 м. В качестве краевых условий на левой границе задавалось условие отражения от неподвижной стенки, а на правой – свободный проход волны. Начальная координата центра масс оползня по оси Ox равна $x_0 = 19,5$ м, соответствующее начальное заглубление $z_0 = 2$ м. (толщина слоя воды в начальный момент времени в точке центра масс оползня). Форма оползня представляет собой один период косинуса, его максимальная толщина T = 0.05 м, длина l = 1 м, плотность $\rho_2 = 1,85$, угол трения $\delta = 1,5^{\circ}$, параметр сухого трения W = 4 м/с, параметр вязкого трения $\lambda_2 = 0$, т.е. в задаче учитывалось только сухое трение оползня о дно. Рассматривалась также упрощенная задача, в которой эффекты трения не принимались во внимание. Для модели твердого оползня задавались дополнительные параметры: коэффициенты гидродинамического сопротивления С_d и присоединенной массы С_w, равные 1.0. Для фиксации результатов расчетов в модельной акватории было поставлено десять виртуальных мареографов.

Особенности движения оползней в случае отсутствия трения представлены ниже графиками скоростей и ускорений их центров масс (Рис. 10) и показывают, что жидкий оползень движется значительно быстрее твердого. Скорость жидкого оползня линейно нарастает со временем, пока он движется по наклонному участку дна, и сохраняет свое значение постоянным, когда он выходит на горизонтальный участок. В начале своего движения по склону твердый оползень ускоряется, его скорость стремится к максимальной, потом некоторое время оползень движется по склону со своей предельной скоростью, а когда он выходит на участок ровного дна, скорость резко падает и стремится к нулю. По графикам ускорений видно, что жидкий оползень имеет постоянное ускорение при движении по наклонному участку дна, а при переходе на горизонтальный участок ускорение становится равным нулю и нигде не принимает отрицательных значений, то есть оползень не замедляет своего движения. Ускорение твердого оползня монотонно убывает за счет силы гидродинамического сопротивления, потом равняется нулю, пока оползень движется с постоянной скоростью по склону, потом резко становится отрицательным, когда оползень тормозит из-за перехода на ровный участок дна, и асимптотически стремится к нулю.



Рис. 10. Графики скоростей движения центров масс оползней (слева) и их ускорений (справа), рассчитанные без учета трения: сплошная линия – твердый оползень, пунктир – жидкий оползень.

Соответствующие рассмотренным выше движениям формы поверхностей воды и оползней приведены здесь на момент времени, когда центры масс этих оползней проходят под мареографом, расположенным в точке сопряжения склона и участка дна постоянной глубины (Рис. 11). Качественно волновые режимы, порожденные как твердым, так и жидким оползнем, похожи, однако, амплитуды волн в целом больше в случае жидкого оползня. Форма волны, распространяющейся непосредственно над оползнем зависит от его формы, длина этой волны соразмерна длине оползня, а ее амплитуда тем больше, чем выше его скорость. При прохождении точки сопряжения склона с участком дна постоянной глубины твердый оползень замедляется, поэтому амплитуда движущейся над ним волны уменьшается.



Рис. 11. Формы оползней и свободных поверхностей воды, рассчитанные без учета трения: кривые, проведенные сплошной линией, соответствуют модели твердого оползня, пунктирные – жидкого. Звездочкой обозначено начальное положение центра масс оползня.

Первыми к берегу одновременно для жидкого и твердого оползней приходят волны понижения. Отношение амплитуд этих волн примерно соответствует отношению начальных ускорений оползней. Следующие за такими волнами небольшие волны повышения образуются при переходе оползня на ровное дно, в момент резкого уменьшения ускорений. Так как жидкий оползень быстрее достигает ровного дна, то и волна эта появляется раньше, чем у твердого оползня.

К середине склона (вниз от начального положения оползня) волны положительной амплитуды приходят одновременно для твердого и жидкого оползней, но по форме они различаются. В случае жидкого оползня в записи присутствует второй пик значительно большей амплитуды. Кроме того, в этом случае волна сопрягается с волной понижения, следующей над оползнем. Так как твердый оползень движется медленнее, то и идущая вместе с ним волна понижения приходит позже.

При наличии трения значительное изменение происходит в графиках ускорений жидкого оползня: в начале движения оползень теряет свое первоначальное ускорение изза присутствия силы трения, однако по мере набора скорости сила трения начинает уменьшать свое влияние и ускорение оползня снова возрастает. При переходе на участок дна постоянной глубины ускорение центра масс резко падает и принимает отрицательные значения, скорость падает, что влечет за собой увеличение силы трения, и, в свою очередь еще сильнее замедляет оползень. Что касается твердого оползня, то характер изменения его скорости аналогичен случаю без учета трения, только теперь максимальная скорость имеет немного меньшее значение. Начальное ускорение твердого оползня также меньше соответствующих значений, рассчитанных в случае отсутствия трения.

Учет трения слабо изменяет графики поверхностей воды и оползня. Различия заметны только во временных характеристиках динамики отдельных компонент волнового режима. Однако учет трения заметно усложняет отмеченный на мареограммах характер волнового процесса.

И, наконец, еще один цикл исследований был связан с численным моделирование 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. 12 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.12). 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 и плотину ГЭС.

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

3. Полные НЛД-уравнения на вращающейся притягивающей сфере были получены участниками проекта в 2010 году с использованием подхода, основанного на предварительном масштабировании полных уравнений Эйлера на сфере и введении малых параметров, позволяющих оценить вклад нелинейности, дисперсии, подвижности дна и эффектов, связанных со сферичностью Земли и ее вращением. Эти уравнения имеют следующий вид:

$$H_{t} + \nabla \cdot (H\boldsymbol{c}) = 0,$$

$$\boldsymbol{v}_{t} + (\boldsymbol{c} \cdot \nabla) \boldsymbol{v} + g \nabla \eta = \frac{1}{H} \nabla \left(\frac{H^{3}}{3} Q_{1} + \frac{H^{2}}{2} Q_{2} \right) - \nabla h \left(\frac{H}{2} Q_{1} + Q_{2} \right) + \boldsymbol{q},$$
(10)

где $H = \eta + h$, $\mathbf{c} = \mathbf{c} (\lambda, \theta, t) = (c^1, c^2)^T$ – средняя скорость, $\mathbf{v} = (v_1, v_2)^T$, $v_1 = g_{10} + g_{11}c^1$, $v_2 = g_{22}c^2$; $g_{10} = \Omega R^2 \sin^2 \theta$, $g_{11} = R^2 \sin^2 \theta$, $g_{22} = R^2$; Ω – угловая скорость вращения Земли, $\mathbf{q} = (q_1, q_2)^T$, $q_1 = 0$, $q_2 = 1/2(\Omega + c^1)^2 \partial g_{11} / \partial \theta$; $Q_1 = D(\nabla \cdot \mathbf{c}) - (\nabla \cdot \mathbf{c})^2$, $Q_2 = D^2 h$, $D = \partial/\partial t + \mathbf{c} \cdot \nabla$, $\nabla = (\partial/\partial \lambda, \partial/\partial \theta)$, дно $r = R - h(\lambda, \theta, t)$ является подвижным, R – средний радиус Земли, $\theta = \pi/2 - \varphi$, λ – долгота, φ – широта, g – ускорение силы тяжести.

В 2011 году из этих полных НЛД-уравнений получен целый класс новых приближенных НЛД-моделей на сфере, полезных с практической точки зрения: сферические аналоги плановых моделей Перегрина, Дорфмана-Яговдика и Буссинеска. Уравнения последней модели получены нами в следующем, удобном для построения численного алгоритма виде:

$$\begin{cases} (HR\sin\theta)_t + (Hu)_{\lambda} + (Hv\sin\theta)_{\theta} = 0, \\ U_t = -uu_{\lambda} - vu_{\theta}\sin\theta - g\eta_{\lambda} - (2\Omega R\sin\theta + u)v\cos\theta + q_1, \\ V_t = -uv_{\lambda} - vv_{\theta}\sin\theta - g\eta_{\theta}\sin\theta + (2\Omega R\sin\theta + u)u\cos\theta + q_2\sin\theta, \end{cases}$$
(11)

где

$$U = uR\sin\theta - \frac{h^2}{3}\nabla^2 \left(uR\sin\theta\right), \qquad V = vR\sin\theta - \frac{h^2}{3}R\sin\theta\nabla^2 v, \qquad (12)$$

и и v – усредненные по глубине линейные компоненты вектора скорости по

направлениям λ и θ соответственно,

$$q_{1} = -g \frac{h}{2} h_{\lambda} \nabla^{2} \eta - g \frac{h}{2} \left(\frac{\eta_{\lambda} h_{\lambda}}{R^{2} \sin^{2} \theta} + \frac{\eta_{\theta} h_{\theta}}{R^{2}} \right)_{\lambda} + \frac{h}{2} h_{u\lambda},$$

$$q_{2} = -g \frac{h}{2} h_{\theta} \nabla^{2} \eta - g \frac{h}{2} \left(\frac{\eta_{\lambda} h_{\lambda}}{R^{2} \sin^{2} \theta} + \frac{\eta_{\theta} h_{\theta}}{R^{2}} \right)_{\theta} - g \frac{h^{2}}{3R^{2} \sin^{2} \theta} \left(2\eta_{\lambda\lambda} ctg \theta + \eta_{\theta} \right) + \frac{h}{2} h_{u\theta}.$$

Рис. 13. Расчетная область с вырезанными приполярными областями и кольцеобразная волна в некоторый момент времени t > 0, возникающая из заданного при t = 0 ниже экватора экспоненциального возвышения свободной границы покоящейся жидкости.

В рамках НЛД-модели Буссинеска на сфере (11), (12) разработана разностная схема первого порядка аппроксимации на равномерных сетках для расчета распространения волн на сфере. Алгоритм решения на каждом временном слое состоит из двух этапов. Сначала решаются уравнения первого порядка (11) и находятся величины H, U, V, а затем для определения компонент скорости u, v используются эллиптические уравнения (12) с вычисленными на первом этапе величинами U, V. С помощью разработанного алгоритма выполнены расчеты распространения поверхностных волн в экваториальной области, ограниченной с севера и юга непроницаемыми границами, проходящими по заданным широтам (см. рис. 13).

4. В 2010 г. было выполнено аналитическое исследование решений одномерных нелинейных уравнений мелкой воды в окрестности границы вода-суша для произвольного рельефа дна и прилегающей суши. В том же году удалось удачно аналитического исследования при применить результаты разработке новых аппроксимаций краевых условий на подвижной линии уреза, аппроксимаций, полученных результатах аналитического исследования решений и основанных на показавших на тестовых одномерных задачах наката-отката неоспоримое преимущество перед известными аппроксимациями, использовавшимися ранее. В 2011 г. С.П. Баутиным и С.Л. Дерябиным получены новые аналитические решения плановых уравнений мелкой воды в окрестности линии уреза. В настоящее время завершается работа по применению этих точных решений при постановке разностных краевых условий на криволинейной подвижной линии уреза модельной акватории (см. рис. 14).



Рис. 14. Модельная морская акватория. Стрелкой указана криволинейная линия уреза.

- 3.10.1.1. Количество научных работ, опубликованных в ходе выполнения проекта 11
- 3.10.1.2. Из них включенных в перечень ВАК 4
- 3.10.1.3. Из них включенных в системы цитирования (Web of science, Scopus, Web of Knowledge, Astrophysics, PubMed, Mathematics, Chemical Abstracts, Springer, Agris, GeoRef) 4
- 3.10.2. Количество научных работ, подготовленных в ходе выполнения проекта и принятых к печати в 2011 г. 3
- 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 500000

3.14. Вычислительная техника и научное оборудование, приобретенные на средства Фонда персональная рабочая станция стоимостью 34260 руб. (частичная оплата за счет средств гранта по статье "310 - увеличение стоимости основных средств"):

Intel Core i7-950 3.06GHz 4.8GT/s 8Mb 3xDDR3-1066 LGA1366 BOX w/cooler 1 шт. цена 11950 руб.

Видеокарта PCI-E Asus GeForce GT 240 512MB 128bit DDR3 [ENGT240/DI/512MD3] DVI HDMI 1 шт. цена 2550 руб.

Память DIMM DDR3 2048MBx3 PC10666 1333MHz Kingston [KVR1333D3N9K3/6G] Retail 1 шт. цена 4690 руб.

Плата ASUS LGA1366 P6T SE X58/ICH10R 6xDDR3-2000 3xPCI-E 8-ch 7xSATA RAID 1xU133 2x1394 1xeSATA GLAN ATX 1 шт. цена 6190 руб.

SATA DVD±RW NEC (AD-7243S) Black DVD-24x/8x/12x, R9-12x, DL-12x, RAM-12x, CD48x/32x/48x "LF"1 шт. цена 850 руб.

SATA-II 1,5Tb Seagate 5900 Barracuda LP [ST31500541AS] Cache 32MB 2 шт. цена 2790 руб.

Корпус MidiTower InWin S606 BS ATX 450W 1 шт. цена 2450 руб.

- 3.15. Адреса (полностью) ресурсов в Internet, подготовленных авторами по данному проекту
- 3.16. Библиографический список всех публикаций по проект

1. 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.

2. Beisel S., Chubarov L. Математическое моделирование оползневых волн цунами в реальных акваториях // «Mathematical and Informational Technologies» (MIT-2011), August, 27-31, 2011, Vrnjacka Banja, Serbia; August, 31 - September, 5, 2011, Budva, Montenegro, Conference Information: State Company of Textbooks, Serbia, 2011, P. 63-64.

3. Beisel S.A., Chubarov L.B., Khakimzyanov G.S., Shokin Yu.I. Some features of the landslide mechanism of surface waves generation in real basins // Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, Berlin, 2011, Vol. 115, P. 137–148.

 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.
 Chubarov L.B., Khakimzyanov G.S., Shokina N.Yu. Numerical modelling of surface water waves arising due to movement of underwater landslide on irregular bottom slope // Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, Berlin, 2011. Vol. 115. P. 75–91.

6. Fedotova Z., Khakhimzyanov 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.

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

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

9. Федотова З.И., Хакимзянов Г.С. Уравнения Буссинеска на вращающейся сфере // Вычислительные технологии. 2011. Т. 16, № 6. С. 74-84.

10. Федотова З.И., Хакимзянов Г.С. Уравнения полной нелинейно-дисперсионной модели мелкой воды на вращающейся сфере // ПМТФ. 2011. Т. 52, № 6. С. 1-14.

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

12. Dutykh D., Mitsotakis D., Beysel S., Shokina N., Khakimzyanov G. Dispersive waves generated by an underwater landslide // Сборник трудов конференции "Numerical methods for hyperbolic equations: theory and applications" (Испания, 4-8 июля 2011г.), посвященной 65-летию профессора Э.Ф.Торо (в печати).

13. Бейзель С.А., Чубаров Л.Б., Дутых Д., Гусев О.И., Хакимзянов Г.С., Кутергин В.А., Шокина Н.Ю. Моделирование поверхностных волн, порождаемых подводным оползнем в водохранилище // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2012. Vol. 27 (в печати).

14. Хакимзянов Г.С., Шокина Н.Ю. Оценка высот волн, вызванных подводным оползнем в ограниченном водоеме // 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 окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения

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

Подпись руководителя проекта

Форма 510. ЗАЯВКА НА 2012 г.

- 10.1. Номер проекта 10-05-91052
- 10.2.1. Основной код классификатора 05-513
- 10.2.2. Дополнительные коды классификатора 01-201
- 10.3. Ключевые слова

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

10.4. Цели очередного годичного этапа, связь с основной задачей проекта Согласно плану работ, на третий год выполнения проекта были поставлены следующие цели:

1. решение характерных тестовых и модельных задач в рамках сильно нелинейных дисперсионных уравнений старших приближений теории мелкой воды с учетом эффектов сферичности Земли;

2. разработка в рамках нелинейной модели плоских потенциальных течений жидкости алгоритма для моделирования взаимодействия поверхностных волн с подвижными волнозащитными стенками; с помощью которого будут исследованы зависимости величин вертикального заплеска и силового воздействия волн от жесткости пружин крепления стенок и массы этих стенок;

3. 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.

10.5. Ожидаемые в конце 2012 г. научные результаты

• Будут разработаны конечно-разностные алгоритмы для моделирования распространения длинных поверхностных волн в рамках приближенной нелинейнодисперсионной модели Буссинеска на сфере. Новым здесь будет использование схемы второго порядка аппроксимации (в 2011 году была разработана схема первого порядка аппроксимации) и расчетных сеток, адаптирующихся к особенностям рельефа дна и береговой линии.

• Будут усовершенствованы (в направлении повышения устойчивости счета при наличии существенно неровного дна) численные алгоритмы в рамках полной плановой нелинейно-дисперсионной модели на сфере.

• Для оценки важности учета дисперсионных эффектов будет выполнено сравнение с результатами расчета поверхностных волн в рамках бездисперсионной (классической) модели мелкой воды на сфере. Поэтому в рамках последней модели будет разработан новый алгоритм расчета, учитывающий центробежную силу и основанный на схеме предиктор-корректор второго порядка аппроксимации с включенными в нее новыми процедурами монотонизации численного решения.

• Завершение цикла исследований задачи о генерации поверхностных волн при движении подводного оползня пространственно неоднородной формы по пространственно неоднородному склону. Численное моделирование поверхностных волн, возникающих при движении оползня по неровному склону, будет выполнено в рамках плановой модели

мелкой воды первого приближения, полной и приближенных плановых НЛД-моделей и модели трехмерных потенциальных течений жидкости со свободной границей. Существенно новым для последних двух моделей явится использование уравнений движения оползня по неровному подводному склону. Новым для первой модели будет расчет наката генерируемых волн на криволинейный береговой склон (отказ от использования вертикальной стенки, которой ранее заменялась движущаяся линия уреза). Результатом вычислительных экспериментов должен быть обоснованный ответ на вопрос о степени влияния дисперсии и неровности подводного склона на возникающие волновые картины.

• Будет выполнено многопараметрическое исследование процесса взаимодействия поверхностных волн с подвижными волнозащитными стенками.

10.6. Общий объем финансирования на 2012 год 600000

- 10.7.1. Сроки проведения в 2012 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 2012 году
 - 1. Шокин Юрий Иванович
 - 2. Чубаров Леонид Борисович
 - 3. Шокина Нина Юрьевна
 - 4. Соммер Анна Федоровна
 - 5. Худякова Виктория Константиновна
 - 6. Гусев Олег Игоревич
 - 7. Бейзель Софья Александровна
 - 8. Хакимзянов Гаяз Салимович
 - 9. Кутергин Виктор Александрович
 - 10. Мартемьянычева Ярославна Евгеньевна

Подпись руководителя проекта