

Моделирование генерации поверхностных волн перемещением фрагмента дна по береговому склону ¹

С.В. ЕЛЕЦКИЙ¹, Ю.Б. МАЙОРОВ², В.В. МАКСИМОВ³, И.С. НУДНЕР²,
З.И. ФЕДОТОВА⁴, М.Г. ХАЖОЯН⁴, Г.С. ХАКИМЗЯНОВ⁴, Л.Б. ЧУБАРОВ⁴

¹Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

²Научно-исследовательский центр 26 ЦНИИ МО РФ, Санкт-Петербург, Россия

³Балтийский государственный технический университет

"ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

⁴Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия

e-mail: chubarov@ict.nsc.ru

In the report the results of laboratory and computing experiments on reproduction of process of generating and transformation of surface waves by movement of a unyielding piece of a floor on a coast decline are set up. For realization of laboratory experiments the hydrowave trough was used, in which one the motion of a underwater landslide was imitated by motion of a solid, completely submersed in water. The mathematical modelling was run in the frameworks of linear, non-linear and non-linear - dispersion models of shallow-water and full hydrodynamic model of ideal flow with a free surface. As computing algorithms the finite-difference schemes, including - on a curvilinear adaptive grid (for full model) were used. The base characteristics of a studied phenomenon are determined, the features of different mathematical models are detected.

1 Введение

Интерес к задачам генерации волн подводными оползнями обусловлен настойчивыми попытками связать известные факты возникновения аномальных волн цунами с оползневым механизмом их генерации в противовес традиционному сейсмическому [1, 2, 3]. Здесь под аномальностью понимается несоответствие между сопоставляемыми слабым сейсмическим событием и заметной по своим проявлениям у берега волной цунами. Подобные явления были зарегистрированы в последние годы у берегов Канады, Турции и Папуа-Новой Гвинеи.

В естественных условиях подводный оползень представляет собой движение некоторой массы грунта вдоль склона дна. Большие объёмы движущейся массы вызывают на поверхности воды волны, близкие по своим характеристикам волнам, возникающим от цунамигенного землетрясения.

Высказанная в 30-х годах прошлого века гипотеза утверждает, что даже слабое землетрясение может спровоцировать в прибрежной зоне движение значительных оползневых масс, происхождение которых объясняется накоплением илистых наносов, приносимых течением рек, сходом лавин с близлежащих возвышенностей и т.п. Возможны ситуации, когда эти массы оказываются полностью или частично затопленными. В

¹Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 03-05-64108), Программы интеграционных исследований СО РАН (проект 2003-5) и Программы поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-2314.2003.1).

последнем случае процесс генерации волн оказывается практически одновременным с процессом их наката на берег.

Цель настоящей работы состоит в создании и исследовании гидродинамической компоненты согласованной математической модели движения грунта и трансформации волн на свободной поверхности.

Известные подходы к моделированию оползней сводятся либо к моделированию перемещения абсолютно твердого тела [2, 3, 4] или совокупности таких тел [5], либо течения жидкости, отличающейся по плотности, вязкости и т.п. [7, 8, 9], либо движения некоторой упруго-пластической среды [10], перемещающейся с учетом или без учета взаимодействия с окружающей жидкостью. В некоторых ситуациях перспективным представляется моделирование явления в рамках двухслойной жидкости со слоями различных плотностей и коэффициентов вязкости [11, 12, 6]. Специфика моделирования соответствующих поверхностных волн определяется тем, что цунами оползневого происхождения зарождаются в прибрежной зоне с малой глубиной, длительность перемещения оползня весьма велика и сравнима с периодом генерируемой волны, также сравнимыми являются характерные глубина и вертикальный размер оползня.

В лабораторных исследованиях подводный оползень часто имитируют движением по откосу полностью погруженного в воду твердого тела. Именно так были проведены эксперименты в гидроволновом лотке по определению параметров образовавшегося волнового режима. При этом, естественно, не учитывались свойства реального оползневого материала. Были проведены две группы экспериментов, первая из которых воспроизводила воздействие волны на вертикальное препятствие, а вторая - накат волны на берег.

Математическое моделирование этих волновых режимов выполнялось с помощью иерархии моделей волновой гидродинамики, включающей уравнения теории мелкой воды в приближениях, обеспечивающих учет нелинейных и дисперсионных эффектов, а также полные уравнения волновой гидродинамики идеальной жидкости. Тем самым обеспечивалась возможность разрешения одной из главных задач математического моделирования - определения зон адекватности той или иной математической модели с помощью сравнения с данными лабораторных экспериментов.

В расчетах для гиперболических уравнений применялись простые, эффективные и экономичные конечно-разностные алгоритмы, построенные на базе схем второго порядка аппроксимации, содержащих ряд параметров, позволяющих управлять вкладом нелинейных и дисперсионных эффектов, а также избирательно применять процедуру сглаживания. Для аппроксимации полной гидродинамической модели использовались схемы на криволинейной сетке, адаптирующейся к геометрии расчетной области.

Результаты проведенных лабораторных и вычислительных экспериментов позволили определить наиболее существенные характеристики изучаемого явления, исследовать особенности волнового режима и их зависимость от угла наклона прибрежного участка, удаления от зоны генерации волны, наличия или отсутствия защитных сооружений, изучить относительную важность нелинейных и дисперсионных эффектов, обусловленных резкими изменениями скорости движения "оползня" в моменты начала его движения и остановки.

Статья состоит из трех основных разделов, первый из которых посвящен математическим моделям и вычислительным алгоритмам, второй - собственно описанию

модельной задачи и соответствующей экспериментальной установки, третий - обсуждению результатов.

2 Математические модели и вычислительные алгоритмы

В качестве математических моделей динамики свободной поверхности тяжелой жидкости используются линейная, нелинейная и нелинейно-дисперсионная системы уравнений мелкой воды, обобщенные на случай нестационарной донной поверхности [15]. Рассматривается случай одной пространственной переменной.

Нелинейные уравнения мелкой воды были записаны в дивергентной форме, что обеспечило использования построенных алгоритмов для моделирования близких к разрывным течений на границе вода - суша и адекватно воспроизводить движение линии уреза. Подобные волновые режимы возникают при накате волн цунами на берег и движении оползневых масс по дну в одной из упомянутых выше моделей [6].

Таким образом в качестве базовой модели рассматриваются уравнения:

$$\begin{aligned} h_t + (hu)_x &= 0, \\ (hu)_t + \left(hu^2 + \frac{gh^2}{2}\right)_x &= ghH_x, \end{aligned} \quad (1)$$

где u – усредненная скорость течения, h – полная глубина жидкости: $h = \eta + H$, η – возвышение свободной поверхности, H – глубина канала с невозмущенной жидкостью. Все перечисленные величины суть функции от переменных x, t . Глубину H представим в виде $H(x, t) = \tilde{H}(x) - b(x, t)$, причем $b(x, t) = 0$ при $t = 0$. Функция $b(x, t)$ описывает динамику донной поверхности и предполагается известной.

Система уравнений нелинейно-дисперсионной модели в этих же переменных имеет вид:

$$\begin{aligned} h_t + (hu)_x &= \left[\tilde{H} \tilde{H}_x \left(\frac{1}{2} \tilde{H}_x u + \frac{1}{6} \tilde{H} u_x - \frac{1}{2} b_t \right) \right]_x, \\ u_t + uu_x + g\eta_x &= \left[\tilde{H} \left(\frac{1}{3} \tilde{H} u_{tx} + \frac{1}{2} \tilde{H}_x u_t - \frac{1}{2} b_{tt} \right) \right]_x. \end{aligned} \quad (2)$$

Члены в правых частях этих уравнений описывают дисперсию и имеют порядок $O\left(\frac{H_0}{l_0}\right)^2$, где H_0 и l_0 – характерные глубина и горизонтальный размер.

Для аппроксимации системы уравнений (1) использовалась известная схема Мак-Кормака. Для нелинейно-дисперсионных уравнений (2) была модифицирована разностная схема, исследованная в работе [14]. Обе схемы имеют второй порядок аппроксимации. Для устранения нефизических высокочастотных осцилляций применялась процедура сглаживания.

Так как в правой части уравнения движения системы (2) содержатся производные по времени от скорости, то для построения конечно-разностной аппроксимации перепишем эту систему в виде:

$$\begin{aligned} h_t + (hu)_x &= P, \\ W_t + uu_x + g\eta_x &= Q, \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} P &= h_t + (hu)_x = \tilde{H} \tilde{H}_x \left(\frac{1}{2} \tilde{H}_x u + \frac{1}{6} \tilde{H} u_x - \frac{1}{2} b_t \right), \\ W &= u - \left(\frac{1}{3} \tilde{H}^2 u_x + \frac{1}{2} \tilde{H} \tilde{H}_x u \right)_x, \quad Q = -\frac{1}{2} b_{tt} \end{aligned} \quad (4)$$

Для аппроксимации системы уравнений 1 использована известная схема Мак-Кормака. Для нелинейно-дисперсионных уравнений 3 была модифицирована разностная схема, исследованная в работе [14]. Обе схемы имеют второй порядок аппроксимации. Для устранения нефизических высокочастотных осцилляций применялась процедура сглаживания.

На левой границе области, соответствующей вертикальной стенке, задавалось условие непротекания. На правой границе ставилось неотражающее краевое условие [13], которое обеспечивало беспрепятственный выход волн. В начальный момент при $t = 0$ задавалось состояние покоя с невозмущенной свободной границей.

Моделирование процесса генерации поверхностных волн модельным оползнем полуэллипсом выполнялось также на основе гидродинамической модели потенциальных плоскопараллельных течений. Двумерная область, занятая жидкостью, была ограничена снизу частично подвижным непроницаемым дном. На этой части границы ставилось условие непротекания, на подвижном фрагменте - совпадение нормальных составляющих векторов скорости жидкости и скорости движения дна. Сверху жидкость ограничивалась свободной поверхностью. Математическая постановка задачи при этом заключается в определении потенциала скорости, удовлетворяющего уравнению Лапласа, и функций, описывающих свободную границу, на которой должны выполняться кинематическое и динамическое условия. При проведении расчетов применялись подвижные сетки, поэтому вывод конечно - разностных уравнений осуществлялся на основе аппроксимации уравнений, записанных в подвижной криволинейной системе координат. В расчетах использовались простейшие сетки, адаптирующиеся лишь к границам области, в том числе и к подвижным. При этом второе семейство координатных линий состояло из неподвижных вертикальных прямолинейных отрезков, расставленных равномерно вдоль склона и разрежающихся по закону геометрической прогрессии в части бассейна, которая имела горизонтальное дно (см. рис. 1). Узлы подвижной сетки могли двигаться только в вертикальном направлении вдоль координатных линий.

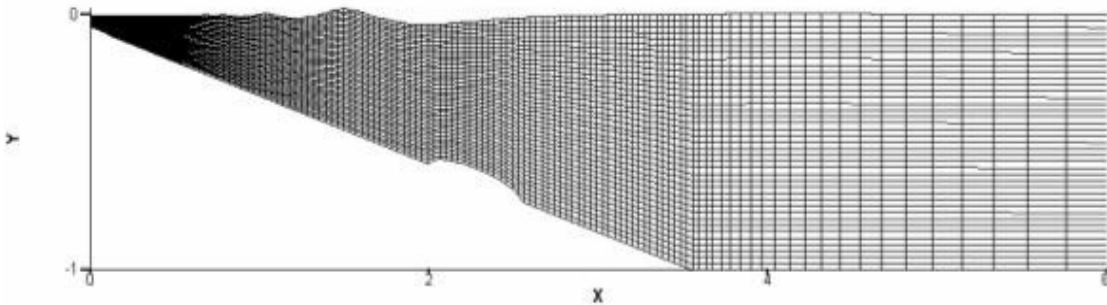


Рисунок 1. Расчетная сетка для моделирования по полной гидродинамической модели.

В расчетах использовался пошаговый численный алгоритм, в котором на каждом временном слое сначала на основе динамического условия вычислялись новые значения потенциала на свободной границе, которые использовались затем в качестве граничного условия Дирихле для расчета потенциала внутри области, удовлетворяющего конечно-разностному аналогу уравнения Лапласа. С использованием полученных значений потенциала определялось новое положение свободной границы для данного временного слоя и строилась сетка для следующего временного слоя.

3 Модельная задача и описание экспериментальной установки

Здесь и далее будет рассмотрена задача об исследовании волновых режимов, возникающих при движении твердого тела по участку берегового склона, переходящему в участок бассейна постоянной глубины. Лабораторные эксперименты проводились при глубине воды над горизонтальным участком дна гидравлического лотка 90 см. Зона откоса была обустроена выгородкой в лотке, общая длина которого равнялась 40 метрам. Урез воды размещался посередине лотка (см. рис. 2, а, б).

На левой границе в одной группе экспериментов на некотором расстоянии от вершины "оползня точка - устанавливалась отражающая стенка, в другой - левой границей акватории становилась подвижная точка уреза. Таким образом, первая группа экспериментов воспроизводила воздействие волны на вертикальное препятствие (см. рис. 2, а), а вторая - накат волны на берег (см. рис. 2, б). Для каждой из этих конфигураций выполнялись серии экспериментов с различными углами наклона (10° , 13° , 25° , 15° , 30° и 45°) берегового участка по отношению к участку дна постоянной глубины. Полная длина склона, включающая во втором случае и надводную часть, составляла 6 метров.

Необходимость в специальном устройстве для гашения волн на правой границе отсутствовала, так как запись осуществлялась на протяжении 6-7 секунд, начиная со спокойного горизонта. Кроме того, волны, достигнув конца выгородки, входили в лоток существенно большей ширины, что вызывало их естественное гашение.

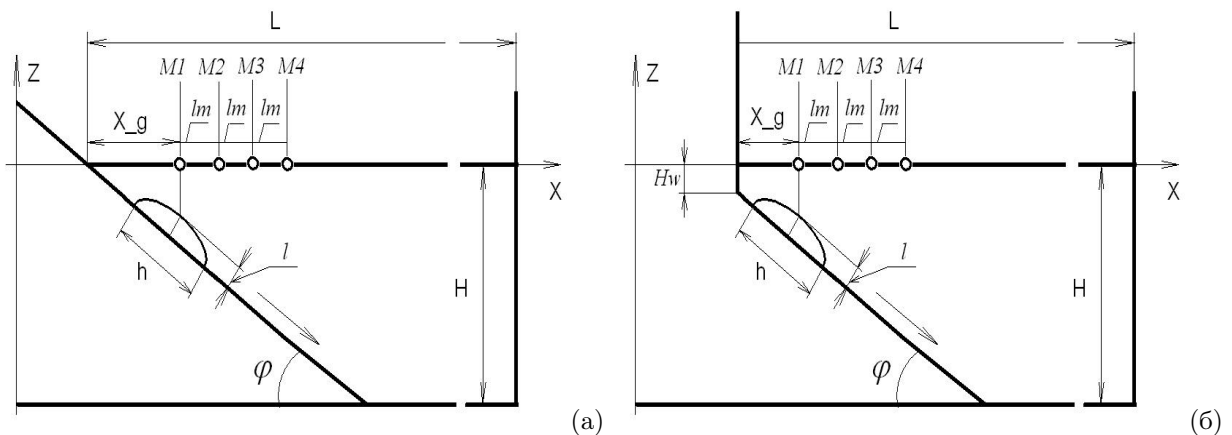


Рисунок 2. Схема лабораторного эксперимента и расчетной области.

Форма твёрдого тела, имитирующего оползень – полуэллиптическая. Модель была изготовлена из пенопласта и заполнялась листами из свинца для достижения требуемой объёмной плотности 1900 кг/м^3 . Движение тела по откосу обеспечивалось двумя парами колёс, имеющими малое трение. Большая и малая полуоси эллипса равны 25 см и 5 см соответственно, ширина модели – 10 см. Зазор между стенками лотка и модели составлял по 0,5 см, что оказалось достаточным для беспрепятственного движения модели по откосу. Таким образом, масса “оползня” и механизм его перемещения обеспечивали реализацию равноускоренного движения под действием силы тяжести, а характерные размеры бассейна допускали пренебрежение трением “оползня” о поверхность склона и сопротивлением воды.

Параметры волн фиксировались четырьмя струнными волномерами. Первый из

них устанавливался над вершиной полуэллипса в точке с абсциссой x_g , три последующих – на расстоянии $lm = 50$ см друг от друга. Положение первого волномера относительно уреза воды в первой группе экспериментов, или вертикальной стенки (во второй) изменялось в зависимости от угла откоса.

В таблице 1 приведены исходные данные экспериментов: φ – угол откоса; x_g – расстояние центра тяжести тела до уреза воды (вертикальной стенки); t – время в секундах движения модели по откосу; S – расстояние, проходимое моделью (телом) по откосу (в случае 10° для первой группы экспериментов не измерялось), глубина y препятствия и длина подводной части откоса. Все линейные размеры приведены в метрах, время – в секундах, углы – в градусах.

3.1 Таблица 1

Взаимодействие волны с препятствием					Накат волны на берег				
φ	x_g	t	S	Глубина H_W у препятствия	φ	x_g	t	S	Длина подводной части откоса
10	0.66	3.3	–	0.048	10	0.93	3.4	2.75	5.18
13,25	0.475	2.5	2.05	0.008	13,25	0.51	2.7	2.20	3.92
15	0.40	2.7	2.20	0.043	15	0.56	2.7	2.20	3.47
30	0.28	1.3	1.10	0.046	30	0.36	1.3	1.10	1.80
45	0.27	0.7	0.61	0.040	45	0.31	0.7	0.61	1.27

4 Результаты моделирования

Вычислительные эксперименты в основном воспроизводили условия лабораторного эксперимента. По линейной и нелинейным моделям мелкой воды были рассчитаны все варианты первой группы, по нелинейно-дисперсионной модели не удалось провести расчеты для откоса в 45 градусов, а по полной модели не выполнялись расчеты для откосов 10 и 13 градусов. Воспроизведение экспериментов второй группы (с накатом волны на берег) выполнялось по нелинейным уравнениям мелкой воды. Эти расчеты проводились в двух вариантах, в первом из которых в точке уреза устанавливалась жесткая стенка с условием непротекания, а во втором – линия уреза перемещалась в соответствии с граничным условием [16]. Серьезных различий в результатах при этом не наблюдалось, разве что несколько увеличивалось время подхода к мареографам волны, отраженной от “стенки” или “склона”.

Качественные характеристики моделируемого волнового процесса представлены на рисунках 3–6. Эта серия рисунков, а также примыкающий к ним по содержанию рисунок 9 состоят из двух групп изображений каждая. Во фрагментах (а) приведены рельефные изображения динамики процесса: по вертикали в положительном направлении изменяется время (от 0 до 6 секунд), а по горизонтали – расстояние вдоль центральной оси лотка. Фрагменты (б) представляют ту же информацию, но в виде изолиний уровня. В каждом из фрагментов рисунков 4–6 левые части представляет движение оползня, а правые – порожденный этим движением волновой режим. Рисунок 7 иллюстрирует

рассуждения о характере трансформации волн при их движении в модельном лотке. На всех рисунках приведены результаты, полученные для случая откоса 15 градусов. Другие материалы оставлены за рамками настоящей публикации в силу ограниченности ее объема.

Как следует из рисунков 3,4, влияние нелинейности для рассматриваемого варианта (угол откоса 15 градусов) очень мало, так что результаты, полученные по линейной и нелинейной моделям практически неразличимы. Рисунки показывают, что в момент начала движения оползня на поверхности воды образуется волна повышения, распространяющаяся в сторону увеличения глубины, длина волны постепенно растет вплоть до момента, когда форма этой волны приближается к форме оползня. Амплитуда волны практически не изменяется от мареографа к мареографу и почти в два раза превышает толщину оползня, при увеличении угла откоса амплитуда и длина волны несколько уменьшаются и, наоборот - увеличиваются при уменьшении угла откоса. За волной повышения следует волна понижения, ее амплитуда значительно больше, причем это значение увеличивается при распространении так, что ее значение в четвертом мареографе почти в 3 раза (для угла откоса 15 градусов) больше чем в первом. При изменении угла откоса сохраняются отмеченные выше тенденции.

Существенным фактором становится эффект остановки оползня, при котором возникает волна повышения, распространяющаяся в сторону берега. Амплитуда этой волны по мере продвижения слегка вырастает, а длина остается практически неизменной. На рисунках указанный эффект представляется своеобразной "тройной" конфигурацией. Следом за остановкой оползня происходит переход глубоководной волны в зону горизонтального дна, сопровождающийся изменением траектории движения этой волны. Отметим также эффект отражения мелководной волны от стенки и возникновение при этом волны возвышения, направляющейся в сторону увеличения глубины. По мере продвижения над склоном амплитуда волны уменьшается, а преследующая ее ложбина вышоложивается.

Следует отметить некоторые особенности волнового режима, рассчитанного по нелинейно-дисперсионной модели (рис. 5), в частности, сильную чувствительность математической модели к гладкости входных данных, которая иллюстрируется искажением профиля свободной поверхности в точке изменения градиента глубины - сопряжения зоны откоса с зоной горизонтального дна. Под влиянием дисперсии увеличивается число волн, усложняется процесс перестройки свободной поверхности в момент остановки оползня, уменьшаются амплитуды волн, распространяющихся в сторону мелководья. Представляется возможным объяснить указанные эффекты более точным учетом вертикальных процессов в рамках нелинейно-дисперсионной модели. Справедливость такого объяснения может быть подтверждена или опровергнута сравнением с результатами расчетов по полной (двумерной по вертикали) модели и с экспериментальными данными.

Результаты, изображенные на рисунке 6, в определенной степени подтверждают высказанное предположение и демонстрируют достаточно сложную волновую картину, в которой движение оползня порождает цуг волн, распространяющийся в зону большой глубины, имеют место указанные выше компоненты волнового режима, но выражены они гораздо слабее, нежели в линейной и нелинейной постановках теории мелкой воды. Заметим, что эти расчеты проводились в меньшей расчетной области по причине большого объема вычислительной работы.

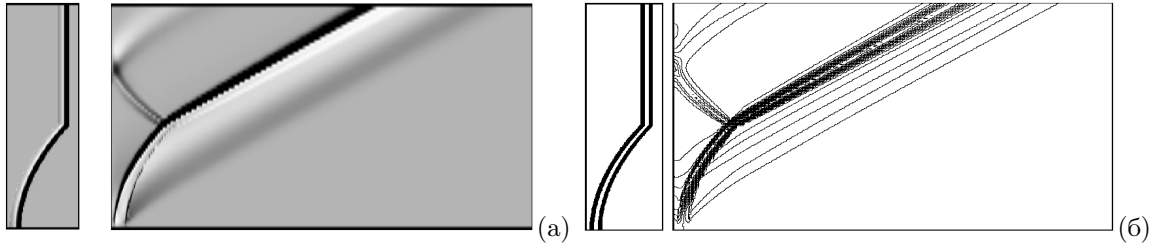


Рисунок 3. Результаты расчетов по линейной модели мелкой воды.

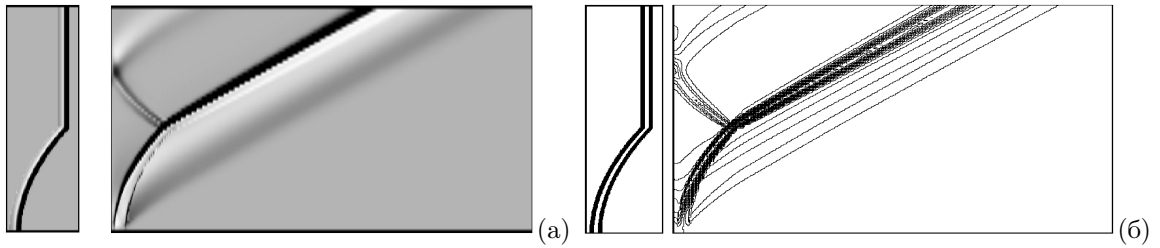


Рисунок 4. Результаты расчетов по нелинейной модели мелкой воды.

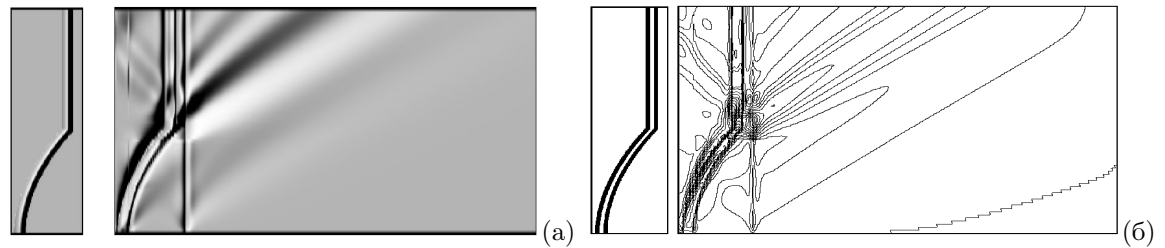


Рисунок 5. Результаты расчетов по нелинейно-дисперсионной модели мелкой воды.

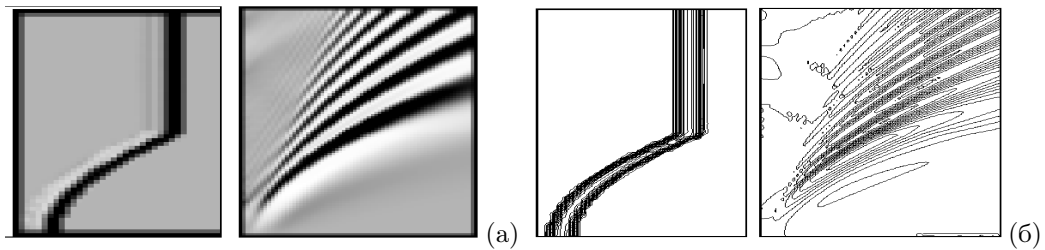


Рисунок 6. Результаты расчетов модели потенциальных течений жидкости со свободной поверхностью.

Решающий аргумент может быть получен сравнением с экспериментальными данными. С этой целью следует обратиться к рисунку 7, на фрагментах которого приведены мареограммы, измеренные в лабораторном эксперименте и рассчитанные по всем моделям в каждой из мареографных точек для угла откоса 15 градусов. Заметим, что все графики при отрисовке совмещались по первому абсолютному минимуму.

Как показывают мареограммы, наилучшее совпадение наблюдаются в первом мареографе, расположенном непосредственно над центром начального положения оползня. В последующих мареографах все используемые модели вполне адекватно воспроизводят форму первых колебаний, при этом нелинейные уравнения теории мелкой воды приводят к значительному превышению амплитуды. Линейная модель оказывается достаточна близка к экспериментальным данным в начальной части процесса, однако в дальнейшем осредненные по вертикали уравнения приводят к упрощенному волновому режиму, весьма далекому от полученного в эксперименте. Здесь хорошо различаются упомянутые выше отдельные структуры волнового режима - головная волна возвышения, следующее за ней значительное понижение уровня, волна, возникшая в момент остановки оползня, и отраженная от берега волна.

Наконец, уравнения полной гидродинамической модели воспроизводят не только частотный характер волнового режима, но и позволяют рассчитать наиболее точные значения амплитуд во всем волновом цуге, что является серьезным аргументом необходимости учета вертикальных эффектов при моделировании оползневого механизма генерации поверхностных волн.

Следующая серия изображений (рисунок 8) собственно и демонстрирует вертикальную структуру (линии тока) исследуемого течения. В начальный период движения оползня (рис. 8, а) перед ним периодически возникает зона "уплотнения", которая перекатывается через движущееся препятствие, на поверхности понижение уровня возникает непосредственно за оползнем, в приповерхностном слое линии тока принимают характерную дугообразную форму. Перед остановкой оползня (рис. 8, б) эти структуры формируются окончательно, а в момент его остановки (рис. 8, в) линии тока прижимаются к оползню, переводя заключительную стадию процесса в режим обтекания неподвижного препятствия (рисунки 8, г и 8, д). При этом также образуются зоны уплотнения клиновидной формы (см. рис. 8, г), перекатывающиеся через оползень в сторону увеличения глубины. Заметим, что некоторые искажения вносятся эффектом изменения структуры расчетной сетки в зоне, переходной от склона к участку дна постоянной глубины.

Иллюстративный характер носят результаты (см. рис. 9), полученные для одного из вариантов первой группы (15 градусов) с использованием модели мелкой воды и для описания движения оползня, рассматриваемого как жидкость с удвоенной плотностью, перемещающаяся по склону с заданной силой трения. Более подробно такая постановка задачи рассматривается в докладе представленном в настоящем сборнике трудов [17]. Как видно из этой серии рисунков, изменение модели движения оползня и, как следствие, характера этого движения полностью определяет волновой режим на свободной поверхности, который все же носит упрощенный характер. С увеличением трения уменьшается расстояние, на которое продвигается оползень, сокращается его растекание. При малой величине трения оползень в некоторый момент разворачивается в сторону увеличения глубины и ускоряет свое течение вдоль склона. При этом волна на начальной стадии полностью следует траектории движения оползня, а после

его остановки продолжает движение в область постоянной глубины. Ее амплитуда значительно уменьшается с увеличением трения. При увеличивающемся трении оползень остается практически неподвижным, в то время как слабое возмущение возникшее в момент начала движения распространяется по неизменной траектории.

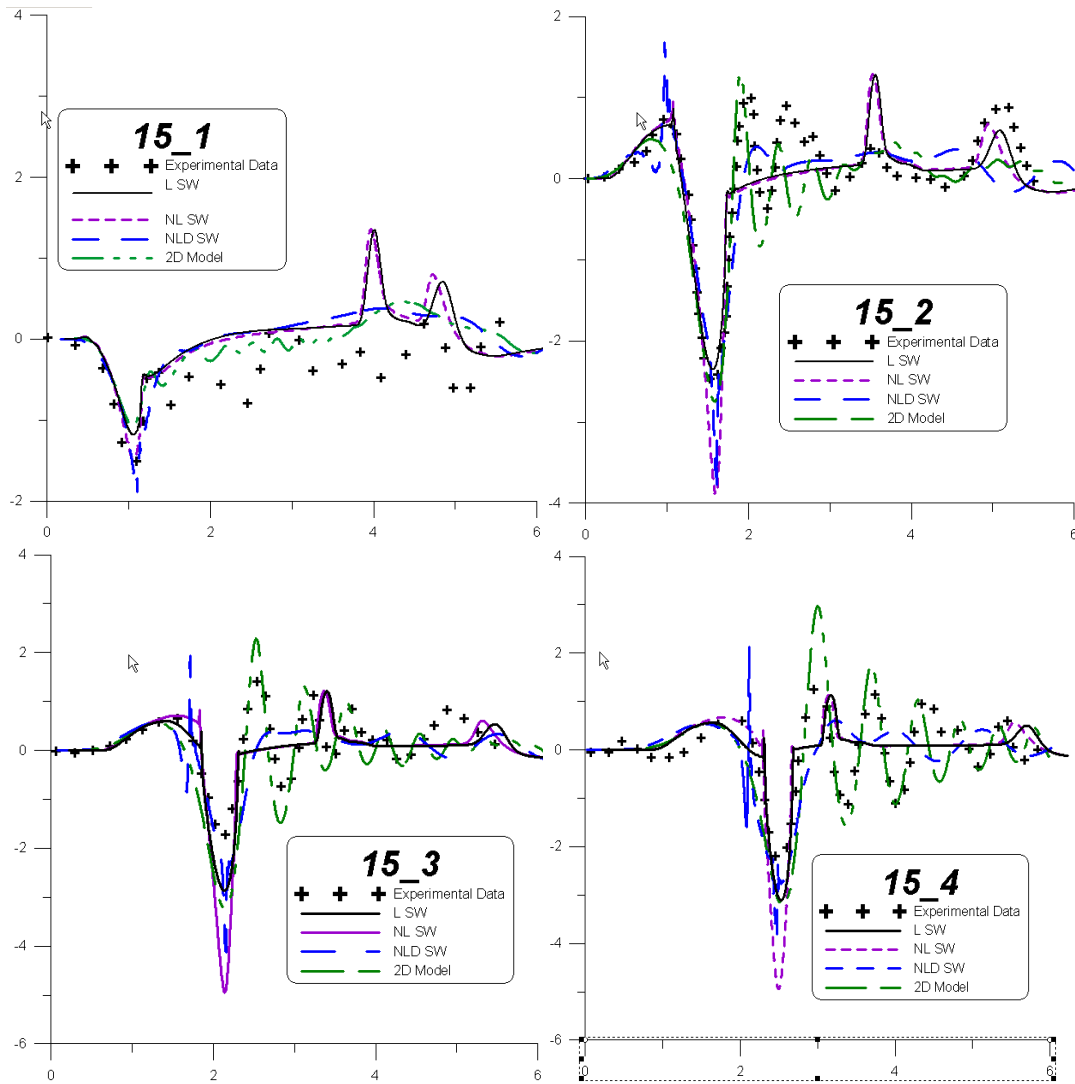


Рисунок 7. Экспериментальные и расчетные данные, угол откоса 15 градусов.

Результаты моделирования экспериментов второй группы – с накатом волн на берег – не выявили принципиально новых эффектов. Несколько увеличиваются амплитуды первых трех волновых структур, увеличивается время прихода отраженной от границы "воды-суша" волны, уменьшается ее амплитуда. Претерпевает определенное изменение и форма волны, образовавшейся в момент остановки оползня.

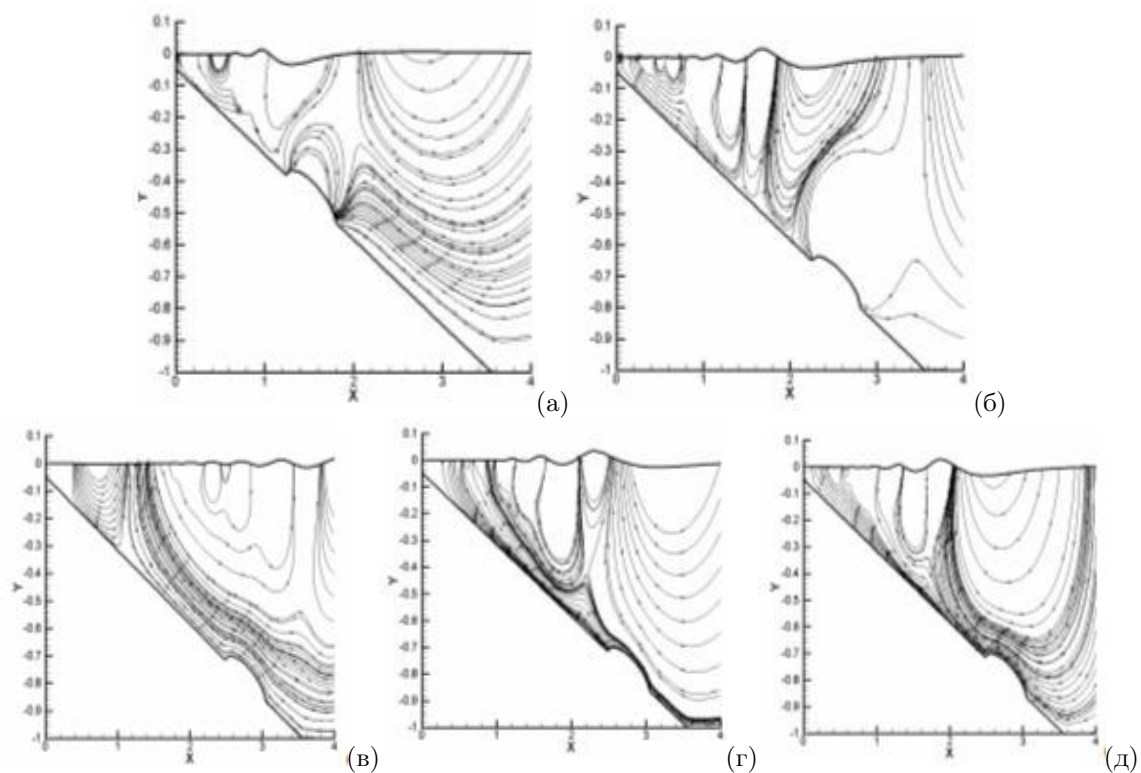


Рисунок 8. Линии тока: (а) - в начальной стадии процесса, (б) - перед остановкой оползня, (в) - в момент остановки оползня, (г) - сразу после остановки оползня, (д) - на завершающей стадии расчета.

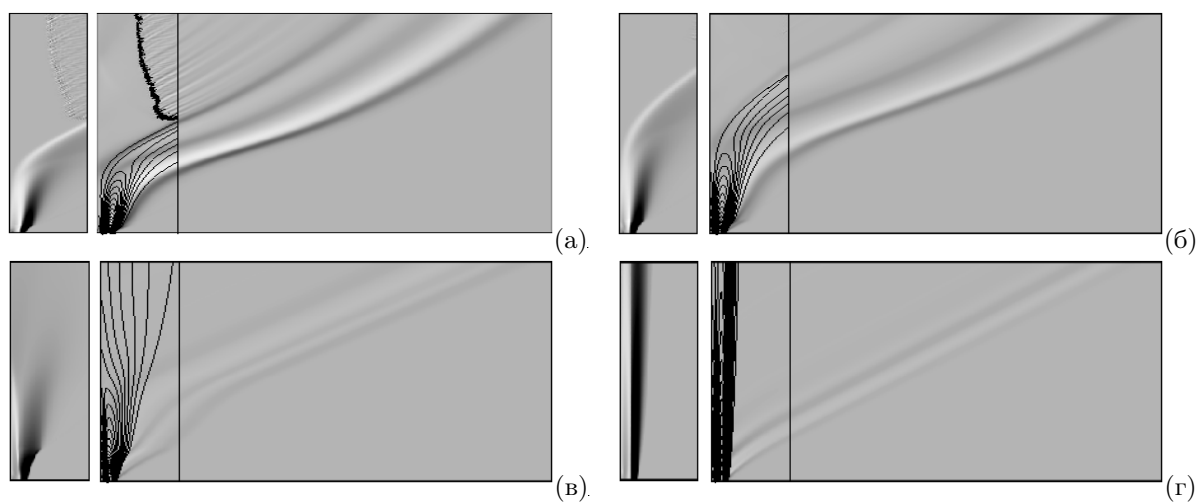


Рисунок 9. Результаты расчетов с использованием теории мелкой воды для описания движения оползня. (а) – без трения, (б) – с малым трением, (в) – с умеренным трением, (г) – с сильным трением.

5 Выводы

Приведенные в работе результаты лабораторных и вычислительных экспериментов приводят к выводу о возможности использования приближенных математических моделей для описания начальной стадии генерации поверхностных волн оползневым механизмом, и указывают на принципиальную важность учета вертикальных процессов, которые по существу определяют структуру волнового поля.

Здесь следует рассмотреть новые нелинейно-дисперсионные модели с улучшенным дисперсионным соотношением и продолжить детальное исследование с помощью весьма трудоемких полных гидродинамических моделей. Необходимо также с особым вниманием отнестись к гладкости входных данных. Что касается вычислительных алгоритмов, то особое внимание нужно уделить исследованиям по адаптации расчетных сеток к изменяемой форме дна и методам построения эффективных высокоточных схем, аппроксимирующих уравнения с производными старших порядков.

Новые перспективы открываются и в части моделирования собственно движения оползневых масс, также в значительной степени, определяющего характер волнового режима.

Список литературы

- [1] *Егоров Ю.О.* Некоторые особенности формирования подводных каньонов на континентальном склоне Восточной Камчатки // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001.
- [2] *Watts P., Imamura F., Grilli S.T.* Comparing model simulations of three benchmark tsunami generation cases // Science of Tsunami Hazards. 2000. Vol. 18. No.2. P. 107–123.
- [3] *Watts P., Grilli S.T.* Tsunami generation by submarine mass failure. Part I: Wavemaker models // Submitted J. Waterway Port Coastal and Ocean Engineering. 2003.
- [4] *Harbitz C., Pedersen G.* Model theory and analytical solutions for large water waves due to landslides // Preprint Series, Dept. of Mathematics, Univ. of Oslo, No. 4. 1992.
- [5] *Tinti S., Bortolucci E., Vannini C.* A block-based theoretical model suited to gravitational sliding // Natural Hazards. 1997. Vol. 16, P. 1–28.
- [6] *Heinrich P., Piatanesi A., Hebert H.* Numerical modeling of tsunami generation and propagation from submarine slumps: the 1998 Papua New Guinea event // Geophys J. Int. 2001. Vol. 145. P. 97–111
- [7] *Jiang L., Leblond P.* The coupling of a submarine slide and the surface waves which it generates // J. Geophys. Res. 1992. Vol. 97. P. 731–744
- [8] *Savage S., Hutter K.* The motion of a finite mass of granular material down a rough incline // J. Fluid Mech. 1989. Vol. 199. P. 177–215.

- [9] *Heinrich P., Schindele F., Guibourg S. Ihmle, P.* Modeling of the February 1996 Peruvian tsunami // *Geophys. Res. Lett.* 1998. Vol. 25. No. 14. P. 2687-2690.
- [10] *Гарагаи И.А., Лобковский Л.И.* Геометрическая оценка оползневых процессов и их мониторинг на склонах Чёрного моря в связи с реализацией проекта "Голубой поток", Материалы VI Международной научно-технической конференции "Современные методы и средства океанологических исследований". Москва. 2000. С.5–15.
- [11] *Imamura F., Imteaz M.M.A.* Long waves in two-layers: Governing equations and numerical model// *Science of Tsunami Hazards.* 1995. Vol. 13. P. 3–24.
- [12] *Jiang L., LeBlond P.H.* Numerical modeling of an underwater Bingham Plastic mudslide and the waves which it generates // *J. Geoph. Res.* 1993. Vol. 98. No. C62. P. 10303–10317.
- [13] *Хакимзянов Г. С., Шокин Ю. И., Бараннин В. Б., Шокина Н. Ю.* Численное моделирование течений жидкости с поверхностными волнами. Изд-во СО РАН, Новосибирск, 2001.
- [14] *Fedotova Z.I., Pashkova V.Yu.* On the numerical modeling of the dynamics of weakly nonlinear waves with dispersion // *Russ. J. Number. Anal. Math. Modeling.* - 1995. - Vol.10. - No.5. - P.407 - 424.
- [15] *Дорфман А.А., Яговдик Г.И.* Уравнения приближённой нелинейно-дисперсионной теории длинных волн, возбуждаемых перемещениями дна и распространяющихся в бассейне переменной глубины // *Числен. методы мех. сплошной среды.* - Новосибирск, 1977. - Т. 8. - № 1. С.36-48.
- [16] *Федотова З.И.* Обоснование численного метода для моделирования наката волн на берег // *Вычислительные технологии.* - 2002, - Т.7, - N5. – С. 58-76.
- [17] *Бабайлов В., Чубаров Л.Б.* Численное моделирование движения оползня в рамках теории мелкой воды // Доклад на Международной конференции "Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании", Алматы, Казахстан, 7-10 октября 2004 г.