

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ЭФФЕКТЫ ОПОЛЗНЕВОГО ВОЛНООБРАЗОВАНИЯ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ*

С.А.Бейзель^{1,2}, Г.С.Хакимыанов^{1,2}, д.физ.-мат.наук, Л.Б. Чубаров^{1,2}, д.физ.-мат.наук

¹Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

SPATIAL EFFECTS OF LANDSLIDE WAVE GENERATION IN A COASTAL ZONE

S.A.Beisel^{1,2}, G.S.Khakimzyanov^{1,2}, D.Sc., L.B.Chubarov^{1,2}, D.Sc.

¹Institute of Computational Technologies SB RAS, Novosibirsk, Russia

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

В докладе 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 МакКормака на равномерной сетке. Обсуждаются особенности волнообразования на модельных и реальных рельефах в зависимости от ряда параметров задачи.

In the report the results of numerical modelling of the landslide mechanism of surface waves generation with account of spatial heterogeneity of a relief of an underwater slope are presented. The landslide is represented as a quasinondeformable solid body moving along the slope of arbitrary relief under a layer of an incompressible nonviscous heavy liquid. Modelling of wave processes is carried out within the limits of the equations of the shallow water theory using the finite-difference MacCormack scheme on a uniform grid. Features of wave formation on the model and real reliefs depending on a number of parameters of a problem are discussed.

Предполагается, что оползень имеет конечную протяженность в обоих горизонтальных направлениях (длину L вдоль оси Ox и ширину W вдоль оси Oy) и толщину. В момент времени $t=0$ оползень покоится, а при $t>0$ его положение определяется положением некоторой материальной точки $\mathbf{x}_c(t) = (x_c(t), y_c(t), z_c(t))$, в качестве которой выбран центр масс тела.

Если поверхность склона, по которому движется оползень, допускает регулярную параметризацию

$$x = x(q^1, q^2), \quad y = y(q^1, q^2), \quad z = z(q^1, q^2), \quad (1)$$

где q^1, q^2 – параметры, то уравнения движения имеют вид:

$$m \frac{dv_\alpha}{dt} = \frac{m}{2} \left[(g_{11})_{q^\alpha} (v^1)^2 + 2(g_{12})_{q^\alpha} v^1 v^2 + (g_{22})_{q^\alpha} (v^2)^2 \right] + F_{\tau_\alpha} \sqrt{g_{\alpha\alpha}}, \quad (\alpha = 1, 2). \quad (2)$$

Здесь $g_{\alpha\beta}$ ($\alpha, \beta = 1, 2$) – ковариантные компоненты метрического тензора поверхности дна, v_α – ковариантные, а v^α – контравариантные компоненты вектора скорости, $F_{\tau_\alpha} = F \cdot \tau_\alpha$, τ_α – единичные векторы, касательные к поверхности склона. В уравнениях (2) m – суммарная масса оползня и присоединенной массы воды, F_{τ_1} и F_{τ_2} – вклады сил тяжести, плавучести, сопротивления воды и трения о дно.

Для решения уравнений (2) в работе используются простейшая схема Эйлера, а также естественная параметризация поверхности: $x = q^1$, $y = q^2$, $z = h_{bt}(x, y)$. Решение

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 09-05-00294, 10-05-91052-НЦНИ, 09-07-00103, 08-07-00105), программы Интеграционных исследований СО РАН (проект 116) и президентской программы «Ведущие научные школы РФ» (грант № НШ-931.2008.9).

ищется до момента остановки оползня, т.е. до такого момента, при котором впервые значение скорости оползня обратится в нуль.

Первые расчеты были проведены на модельном криволинейном склоне [1], рельеф которого является однородным в направлении Oy , так что движение оползня происходило строго вдоль оси Ox . На береговой линии (вдоль оси Oy) ставилось условие непротекания, на остальных границах – условия свободного прохода.

Анализ картин свечений (распределений максимальных и минимальных возвышений свободной поверхности за все время расчетов) показал (Рис. 1) существенную неравномерность распределения волновой энергии как в целом во всей области, так и вдоль береговой линии: наибольшие амплитуды волн наблюдаются над областью движения тела, а также в береговой части акватории, в зоне малых глубин.

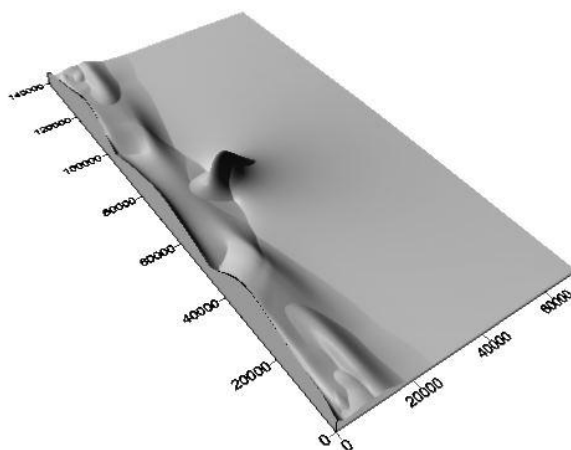


Рис. 1. Распределение максимальных возвышений свободной поверхности за все время расчетов

Распределение максимальных и минимальных заплесков волн на берег акватории (Рис. 2а) ведет себя немонотонно: в центре береговой линии, т.е. строго напротив траектории движения оползня наблюдается область длиной примерно в $2W$, в которой зафиксированы наибольшие отрицательные значения заплесков с ярко выраженным максимумом. Далее амплитуды резко уменьшаются, а потом начинают убывать медленнее. На краях береговой линии акватории, на расстоянии в $5-7W$, наблюдается зона, где амплитуды отрицательных волн опять несколько увеличились. Что касается положительных значений образовавшихся волн, то строго напротив оползня на берегу наблюдается локальный максимум, однако наибольшие амплитуды (почти в полтора раза больше, чем в центре) достигнуты чуть в стороне, на расстоянии $4W$.

Дополнительно были рассмотрены случаи с шириной оползня $2W$ при сохранении его длины, а также с длиной $2L$ при исходной ширине. Увеличение W проявляется (Рис. 2а) в двукратном увеличении амплитуды в центре береговой линии и в полуторакратном – по краям (так что локальный положительный максимум стал глобальным); общая картина в целом сохранилась. При удвоении L амплитуды отрицательных волн по центру области получились несколько ниже, чем в предыдущем случае, увеличившись только в полтора раза по сравнению со случаем исходного оползня: при этом наблюдался не один локальный минимум, а два. С удалением от центра отрицательные волны имели амплитуды, наибольшие для всех трех рассмотренных случаев. Положительные волны в центре получились примерно такими же, как и для случая $2W$, с той лишь разницей, что максимум наблюдается не в одной точке, а на некотором отрезке. С удалением от центра амплитуды положительных волн существенно больше.

Рассчитанные для исходного оползня записи мареографов, расположенных по центру береговой линии (жирная линия) и на расстоянии в $3W$ от центра (тонкая линия) показали (Рис. 2б), что по центру акватории волновой режим качественно совпадает с наблюдавшимся авторами ранее при проведении одномерных расчетов: к берегу сначала приходит максимальная отрицательная волна, за ней – максимальная положительная, после чего – некоторый хвост, вызванный захваченными в шельфовой зоне волнами, а также волнами, возникающими при замедлении и остановке тела. Вообще, если в одномерном случае при начале движения тела в обратном его движению направлении уходила волна понижения, а в попутном – повышения, то при конечной ширине тела отрицательные волны распространяются только в некотором секторе с углом раствора примерно в 90 градусов, а в остальных направлениях уходит первая положительная волна.

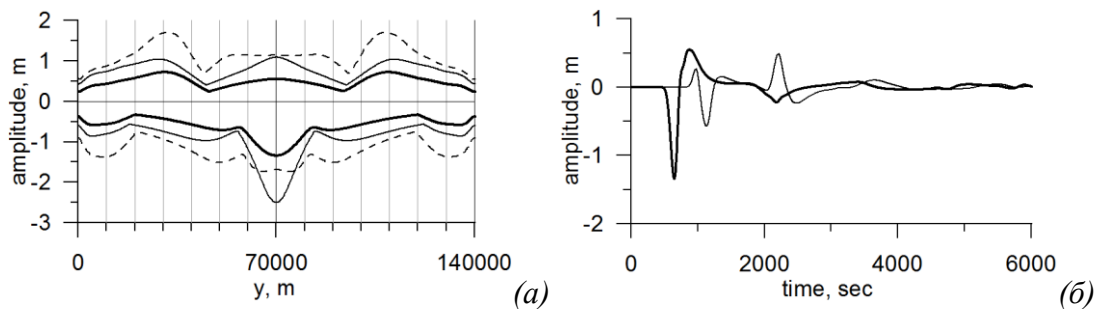


Рис. 2. (а) – заплески на береговую линию: жирные линии – исходные размеры тела, тонкие – $2W$, пунктир – $2L$; (б) – мареограммы: жирная линия – в центре береговой линии, тонкая – на расстоянии в $3W$.

Следующая серия расчетов проводилась на неоднородном рельефе, имеющем желоб вдоль центральной горизонтальной оси. Рассматривались два случая начального положения оползня на этом рельефе: по центру желоба и на его склоне.

В первом случае (Рис. 3а) волновой режим существенно отличался от того, который генерировался на квазиодномерном рельефе, хотя и остался также симметричным: практически вся волновая энергия распространялась в стороны от центральной оси желоба. В центре береговой линии (Рис. 3в) положительные амплитуды, в отличие от случая квазиодномерного рельефа, имеют уже не максимум, а строгий минимум, и их абсолютное значение в 7-8 раз меньше, чем в точках максимума, наблюдаемых на расстоянии $3W$. Для отрицательных амплитуд локальный максимум в центре хоть и имеется, но значения там также намного меньше (примерно в 5 раз), чем по бокам, на расстоянии $4W$.

При постановке оползня в начальный момент на край желоба (Рис. 3б) неоднородность рельефа оказывает свое влияние уже и на траекторию движения оползня, который начинает двигаться вниз в направлении, перпендикулярном изолиниям рельефа. Набрав скорость, он по инерции заезжает на противоположный бок желоба, откуда через некоторое время, повернув, начинается скатываться. Это повторяется еще два раза, пока оползень окончательно не остановится на нижней пологой части. Волновой режим в этом случае возникает, естественно, несимметричный (Рис. 3в). В части береговой линии, находящейся в стороне начального движения тела, амплитуды в два с небольшим раза больше, чем в противоположной и чем в предыдущей задаче. По центру береговой линии амплитуды, в сравнении с максимальными, по-прежнему незначительные. В целом распределение заплесков на берегу выглядит более немонотонно.

Последняя серия расчетов была проведена на последовательности рельефов, построенных на основе реального подводного склона у восточного побережья

Средиземного моря (Рис. 4). Первый из них (квазиодномерный) представлял собой протянутое вдоль оси Oy одномерное вертикальное сечение реального рельефа, для второго – то же сечение протягивалось вдоль реальной береговой линии, а третий – соответствовал реальному рельефу. Оползень в начальный момент располагался в точке, через которую на реальном рельефе проходило выбранное сечение на глубине, соответствующей точке максимального угла наклона в этом сечении. Если на первом рельефе тело двигалось прямолинейно вдоль оси Ox , на втором – в направлении, перпендикулярном изолиниям глубин, то на реальном – траектория незначительно отклонялась от прямолинейного направления.

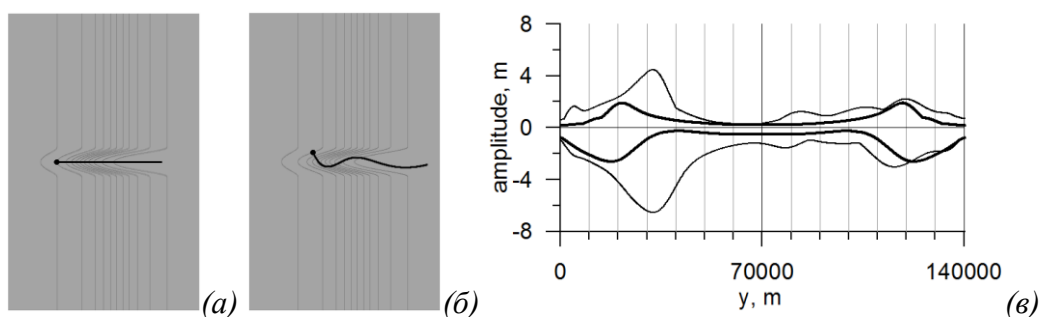


Рис. 3. (а), (б) – траектории движения оползня при его начальном положении в центре и сбоку желоба; (в) – заплески на береговую линию: жирная кривая - при начальном положении в центре, тонкая – сбоку желоба.

Рассчитанные на первом и втором рельефах заплески (Рис. 5) отличаются по сути только некоторым сдвигом, определенном изменением направления начального ускорения движения оползня. На реальном рельефе у положительных значений в два раза увеличился максимум чуть в стороне от «центральной» оси.

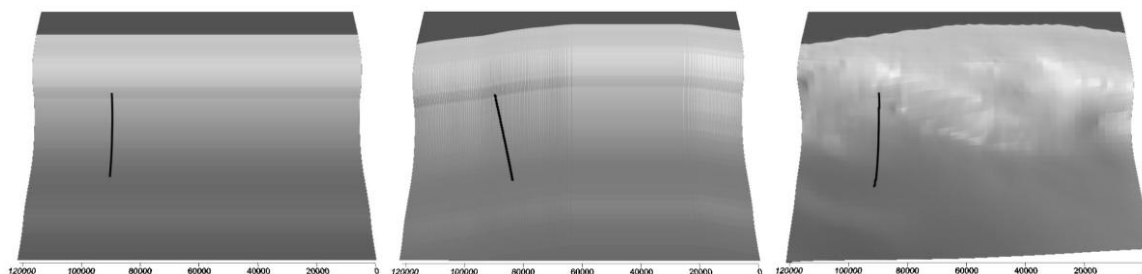


Рис. 4. Рельефы дна модельных акваторий и траектории движения оползней

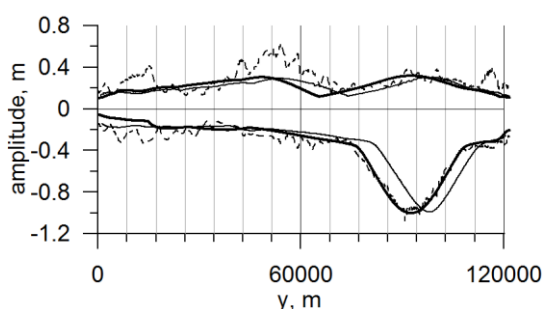


Рис. 5. Заплески на береговую линию: жирная кривая соответствует первому рельефу дна расчетной акватории, тонкая – второму, пунктир – третьему (реальному).

Литература

1. Beisel S., Chubarov L., Khakimzyanov G. Моделирование поверхностных волн, возникающих при движении подводного оползня по неровному склону. Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. (в печати) de Gruyter 2010