

УДК 550.344.4

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН ДВИЖЕНИЕМ ОПОЛЗНЯ

NUMERICAL MODELING OF GENERATION OF SURFACE WAVES BY MOVEMENT OF A LANDSLIDE

Березин Евгений Николаевич¹,

к.ф.-м.н., заместитель директора, e-mail: e-berezin@mail.ru

Berezin Evgeni N., associate Director

Березина Анна Сергеевна²,

старший преподаватель, e-mail: berezina_1979@mail.ru

Berezina Anna S., ² senior Lecturer

¹Кемеровский областной медицинский информационно - аналитический центр, 650036, Россия, г. Кемерово, ул. Волгоградская 43

¹Kemerovo regional medical information analytical center, 650036, Russia, Kemerovo, street Volgograd 43

²Кемеровский институт (филиал) «Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова», 650992 Россия, г. Кемерово, пр. Кузнецкий 39

²Plehanov Russian University of Economics (Kemerovo Branch), 650992 Russia, Kemerovo, Kuznetsk Ave., 39

Аннотация: В статье проведен анализ разных режимов волнообразования в зависимости от типа движения и геометрических параметров оползня расположенного под свободной поверхностью. Задача в полной нелинейной постановке решается методом граничных элементов. Показано влияние геометрических параметров и схем движения оползней на формирования ряда волновых возмущений различной амплитуды при движении волны к берегу и от него. Получены эффекты «опрокидывания волн» в зависимости от типов оползней.

Abstract: The paper deals with the analysis of various wave modes, depending on the movement type and geometric parameters of landslide which is under the surface. The method of boundary elements solves the task in nonlinear setting. In the paper the influence of geometric parameters and landslide movement schemes are shown on the formation of disturbance of various amplitudes when the wave is driving to the bank and from it. The results of the effects of overturning waves depending on landslide types are done.

Ключевые слова: оползень, цунами, метод граничных элементов, численное моделирование, прибрежная зона.

Key words: landslide, tsunami, boundary element method, numerical modeling, coastal zone.

По статистике в большинство случаев возникновения цунами носят сейсмический характер, но довольно частой причиной цунами являются оползни. В результате «тихого землетрясения» может произойти оползень, вызывающий цунами большой высоты. Специалисты указывают, что следы крупнейших подводных оползней находили преимущественно в районах вулканических островов: тяжелые лавовые сооружения, отложившиеся на слоях рыхлых донных осадков, часто обрушивались, сползая со склона на большие глубины. Об этом свидетельствует, например, эволюция Гавайских островов, которые со всех сторон окружены обломочными породами на общей площади более 100 тыс. км. Гавайские оползни перемещались с большой скоростью, порождая гигантские волны цунами, оставившие свой след на суше на высоте более 200 м над уровнем моря [5]. Крупные

оползни на поверхности земли также могут вызывать губительные волны цунами. На сегодняшний день взаимосвязь оползней и цунами недостаточно изучено. Последствия цунами в результате движения оползня могут быть катастрофическими. 5 декабря 2012 года на ежегодной конференции Американского геофизического союза был сделан прогноз: Гавайским островам угрожает цунами высотой более 300 метров. По расчетам в один момент в море может обрушиться около 500 млрд. тонн горной породы, что приведет к цунами. По оценкам ученых и результатам компьютерного моделирования начальная высота волны может составить от 650 метров до километра. Полученные результаты основаны на следующей схеме течения процесса: горная порода со скоростью около ста метров в секунду обрушится в долину, а затем оползень врежется в открытое

море на 60 километров, что приведет к катастрофическим последствиям. В работе Воробьева Ю.Л отмечены следующие последствия: «Вытесненные массы воды, лишённые возможности откатиться назад, двинутся в океан со скоростью от 500 до 800 километров в час. Изогнутый дугой фронт гигантской волны вызовет опустошения к юго-западу, западу и северо - западу от Канарских островов. Восточное побережье Африки накроет волна амплитудой более 100 метров. Преодолев Атлантический океан, волна – высотой всё ещё около 50 метров – захлестнёт восточное побережье США, проникнув вглубь на расстояние до 20 километров» [5].

Генерация волн цунами движением оползня с помощью различных математических моделей является актуальной задачей. Следует отметить работы по исследованию различных моделей движения оползней и по совместному лабораторному и вычислительному моделированию рассматриваемых волновых процессов [1,2,3,6, 11]. Эти исследования показали, что самые общие характеристики изучаемых волновых режимов могут быть определены с помощью простейших моделей теории мелкой воды [6, 12]. Это касается волн, распространяющихся в сторону берега, то есть противоположную направлению движения оползня. Однако волны, распространяющиеся в открытую зону, в попутном оползню направлении, требуют для своего воспроизведения учета вертикальных процессов. Этот подтверждается близостью результатов, полученных с помощью полной гидродинамической модели, и экспериментальных данных [1, 3, 7].

Постановка задачи. В расчетной области D (рис. 1), ограниченной поверхностями C , Γ_1 и Γ_2 , решается уравнение Лапласа $\Delta\varphi = 0$, $x(x, y) \in D$.

Границы C – свободная граница жидкости, Γ_1 – твердые границы бассейна, Γ_2 – граница положения оползня.

На границе Γ_1 выставляется условие не протекания $\frac{\partial\varphi}{\partial n} = 0$, $x(x, y) \in \Gamma_1$.

На границе оползня $\frac{\partial\varphi}{\partial n} = \vec{U}\vec{n}$, $x(x, y) \in \Gamma_2$.

На свободной границе должны выполняться кинематическое условие $\frac{dx}{dt} = \nabla\varphi$, $x(x, y) \in C$ и динамическое условие

$$\frac{d\varphi}{dt} - \frac{1}{2}|\nabla\varphi|^2 + y = 0, \quad x(x, y) \in C.$$

В начальный момент времени $t=0$ точка уреза совпадает с началом декартовой системы координат xOy . Граница Γ_2 образует с горизонтом угол β и переходит в ровное дно Γ_1 . На границе Γ_2 расположен оползень, который задается функцией

$$h(x, t) = x \operatorname{tg} \beta - \Delta h \frac{A \cdot B}{C \cdot D},$$

где Δh – максимальная высота оползня;

$$S = \frac{\cos \beta}{2} \text{ – параметр, характеризующий}$$

крутизну поверхности оползня.

Коэффициенты A , B , C , D определяются по следующим формулам:

$$A = 1 + \operatorname{th}\left(\frac{x - x_l(t)}{S}\right);$$

$$B = 1 - \operatorname{th}\left(\frac{x - x_r(t)}{S}\right);$$

$$C = 1 + \operatorname{th}\left(\frac{b \cos \beta}{2S}\right);$$

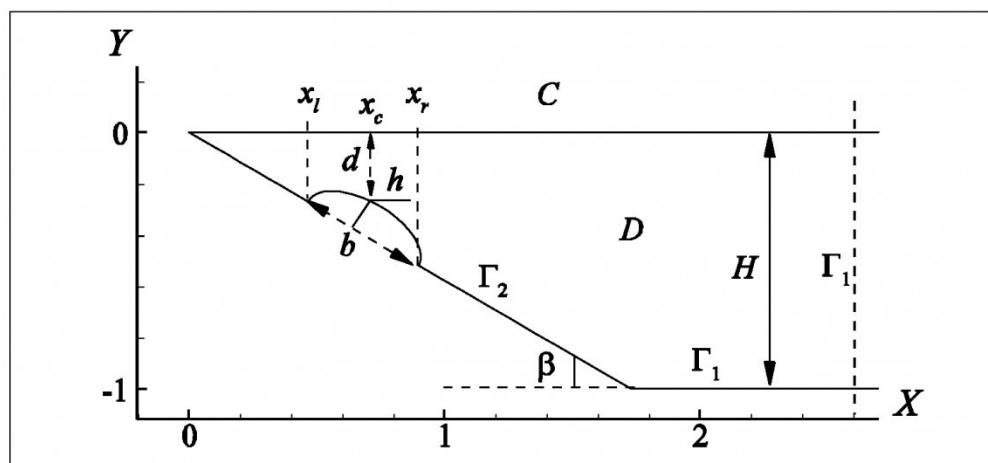


Рис. 1. Область течения

Fig. 1. Area of flow

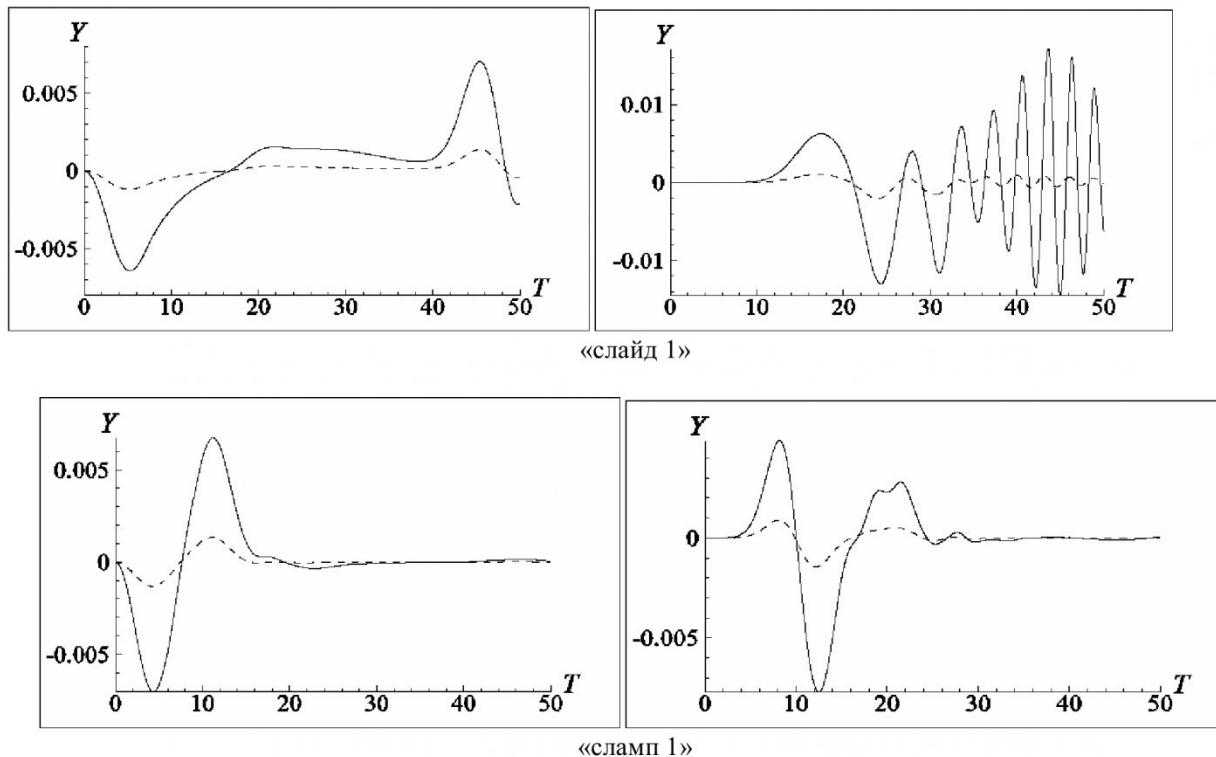


Рис. 2. Зависимость амплитуды мареограммы от толщины оползня при начальном положении $x_c = 2,38$,
 $\Delta h=0,01$ (пунктирная линия), $\Delta h=0,05$ (сплошная линия)

Fig.2. Dependence mareograms amplitude of the thickness of a landslide at an initial position $x_c = 2,38$,
 $\Delta h=0,01$ (dashed line), $\Delta h = 0,05$ (solid line)

$$D = 1 - \text{th} \left(-\frac{b \cos \beta}{2S} \right),$$

где $x_l = x_c(t) - b \frac{\cos \beta}{2}$, $x_r = x_c(t) + b \frac{\cos \beta}{2}$

Величина b равна расстоянию между точками перегиба кривой, описывающей границу оползня, $x_c(t)$ – координата точки максимальной толщины тела.

Поставленная задача решается в полной нелинейной постановке методом граничных элементов. Варьируемыми параметрами задачи являются: d – заглубление оползня, b – протяженность оползня, h – толщина оползня и β – угол наклона границы, где располагается оползень. Изменение положения свободной поверхности фиксируется с помощью смоделированных виртуальных мареографов с координатами $x_{M0} = x_{c0} - 1$, $x_{M1} = x_{c0} = 2,38$, $x_{Mi} = x_{M,i-1} + 2$, $i = 2 \dots 6$. Для проведения расчетов выбрана область с координатами $x_0 = 1$ и $x_n = 41$ до времени $t = 50$. Численные результаты для иерархии моделей волновой гидродинамики были предоставлены

сотрудниками Института вычислительных технологий СО РАН [6, 7, 8, 9, 10].

Рассмотрим два типа оползня, называемых слайдами и слампами. Для изучения волновых процессов в нашей работе рассматриваются различные этапы внутри видов движения оползня, обсуждаемые также в работах Шокина Ю.И. [8, 9, 10]. Моделирование движения оползня выполняется для пяти типов движения: слайд 1 – разгон, равномерное движение, остановка, покой, слайд 2 – разгон, равномерное движение, торможение, покой, слайд 3 – разгон, равномерное движение, сламп 1 – разгон, остановка, покой, сламп 2 – разгон, торможение, покой.

На рисунке 2 показано изменение расчетных мареограмм для различных типов движения оползня в точках размещения виртуального мареографа, фиксирующего волну распространяющуюся к берегу, и виртуального мареографа, фиксирующего волну распространяющуюся в открытую часть расчетной области D, при начальном положении $x_c = 2,38$ и изменяющейся максимальной высотой оползня $\Delta h=0,01$ и $\Delta h=0,05$.

Анализ мареограмм показывает, что при увеличении толщины оползня видно явное преобладание нелинейных эффектов, что приводит к различию поведения волнового течения на мареограммах.

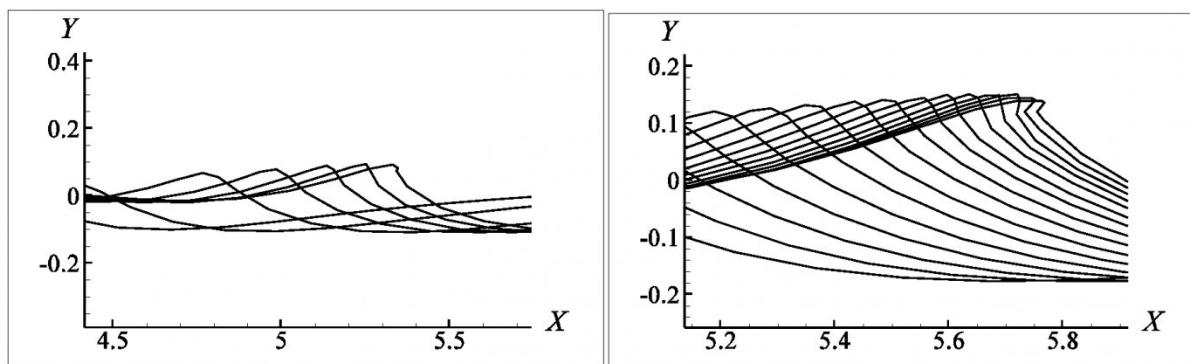


Рис. 3. Зависимость волновой картины для закона движения оползня типа слайд 1 от угла наклона границы Γ_2

Fig.3. The dependence of the wave pattern for the law of motion of landslide type slide 1 on the angle of the border Γ_2

При проведении численных расчетов для протяженностей оползня $b=1$ и $b=3$, с начальным положением оползня $x_c = 4,38$ и максимальной высотой оползня $\Delta h=0,05$ было установлено, что увеличение протяженности оползня приводит к усложнению волновой картины и росту амплитуды, при этом возможно проявление нелинейных эффектов, классифицируемых как обрушение волны. Анализ метеограмм для типа движения оползня «слайд 1» показывает различие в поведении полной модели при увеличении угла наклона границы Γ_2 . В случае угла наклона 6° волна остановки и волна отражения полностью разделены, для угла наклона 10° таких эффектов не наблюдается (рис. 3).

Изменение начального заглубления со значения до значения $x_c = 4,38$ приводит к уменьшению амплитуды волнового течения в прибрежной зоне и открытой зоне области D . Увеличение угла β при начальном заглублении центра масс оползня $x_c = 4,38$ влияет на волновую картину в прибрежной зоне таким образом, что в прибрежной зоне не наблюдается формирования пологой волны, соответствующей равномерному движению.

При моделировании генерации поверхностных волн в полной нелинейной постановке методом граничных элементов вычисленных при параметрах: $\Delta h = 0,1$, $x_c = 2,38$, $\beta = 6^\circ$,

$b=1$ и параметрах $\Delta h = 0,2$, $x_c = 3,38$,

$\beta = 10^\circ$, $b=3$ выявлены режимы деформации свободной границы. Такие режимы можно охарактеризовать как «опрокидывание волны». В случае значительной деформации свободной границы возможен переход узлов, что приводит к прерыванию численного расчета. Данный режим можно разделить на следующие этапы: первой формируется волна понижения, за ней образуется волна повышения, которая движется за тыльной стороной оползня. В вершине этой волны формируется волновой сгусток. Дальнейшее движение волны можно классифицировать как скользящий бурун. Отметим, что изменение схемы движения существенно влияет на возникновение режимов обрушения. Например, для типов движения «слайд 1» таких эффектов не наблюдается. Это можно объяснить кратковременным перемещением оползня, что характерно для данного типа движения.

Таким образом, при сравнении волновых картин для разных типов движения оползня, выявлено, что метод граничных элементов позволяет установить деформацию свободной границы обрушения волны. Исследования волновых режимов в зависимости от начального залегания d , толщины h , протяженности b и типов движения оползня показывают, что изменения геометрических параметров и схемы движения, может привести к разным картинам формирования ряда волн различной амплитуды, движущихся к берегу и от него.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев, К. Е. Анализ динамических характеристик при взаимодействии уединенной волны с препятствием / К. Е. Афанасьев, Е. Н. Березин // Вычислительные технологии. - 2004. - Т. 9, № 3 - С. 22-37.
2. Березин, Е.Н. Генерация поверхностных волн движением оползня / Е. Н. Березин, А. С. Березина // Инновационные недра Кузбасса. ИТ-технологии: материал научно-практической конференции. -

Кемерово ИНТ, 2007. - С. 265-269

3. Березин, Е.Н. Моделирование воздействия поверхностных волн на гидротехнические сооружения / Е. Н. Березин, А. С. Березина // Сборник статей международной научно-практической конференции «Роль науки в развитии общества» 17.04.2014. Часть 1., Уфа, Аэтерна, 2014, с. 283-286
4. Бребия, К. Методы граничных элементов / К. Бребия, Ж. Теллес, Л. Вроубел. – пер. с англ.- М.: Мир, 1987.- 524 с.
5. Воробьев, Ю.Л. Цунами: предупреждение и защита / Ю.Л. Воробьев, В.А. Акимов, Ю.И. Соколов; МЧС России. – М.: , 2006. – 264 с.
6. Елецкий, С. В. Моделирование генерации поверхностных волн перемещением фрагмента дна по береговому склону / С. В. Елецкий, Ю. Б. Майоров, В. В. Максимов [и др.] // Вест. КазНУ. Сер.: Математика, механика, информатика. –2004. –Т. 9, Ч. II. –С. 194–206.
7. Чубаров, Л. Б. Численное моделирование генерации волн движением оползня / Л. Б. Чубаров, З. И. Федотова, С. В. Елецкий // Тр. Междунар. конф. по вычисл. математике. – Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2004: ч. II. – С. 753–758.
8. Шокин, Ю. И. Численное моделирование плоских потенциальных течений жидкости с поверхностными волнами / Ю. И. Шокин, Р. А. Рузинев, Г. С. Хакимзянов; ВЦ СО АН СССР. – Красноярск, 1990. – 37 с.
9. Шокин, Ю. И. Моделирование генерации цунами движением оползня с учетом вертикальной структуры течения / Ю. И. Шокин [и др.] // Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф: тр. VIII Всерос. конф. (Кемерово, 26–28 октября 2005 г.). – Кемерово, 2005. –С. 20–40.
10. Шокин, Ю. И. О подходах к численному моделированию оползневого механизма генерации волн цунами / Ю. И. Шокин, Л. Б. Чубаров // Вычислительные технологии. -2006. –Т. 11, Ч. 2. – С. 100–111.
11. Grilli, S. T. Modeling of waves generated by moving submerged body. Applications to underwater landslide / S. T. Grilli, P. Watts // Eng. Analysis With Boundary Elements. - 1999. - Vol. 23. - P. 645-656.
12. Lynett, P. A Numerical Study of Submarine Landslide Generated Waves and Runup / P. Lynett, P. L-F. Liu // Proc. Royal Society of London A. - 2002. - Vol. 458. - P. 2885-2910.

REFERENCES

1. Afanas'ev K. E., Berezin E. N. Analiz dinamicheskikh kharakteristik pri vzaimodeystvii uedinennoy volny s prepyatstviem [Analysis of the dynamic characteristics of the interaction of a solitary wave with an obstacle]. Vychislitel'nye tekhnologii [Computational Technologies]. 2004. No 3, Vol.9. P. 22-37
2. Berezin E. N., Berezina A. S. Generatsiya poverkhnostnykh voln dvizheniem opolznya [Generation of surface waves motion landslide]. Innovatsionnye nedra Kuzbassa. IT-tehnologii: material nauchno-prakticheskoy konferentsii [Innovative subsoil of Kuzbass. IT technologies: material of scientific and practical conference]. Kemerovo INT, 2007. P. 265-269
3. Berezin E. N., Berezina A. S. Modelirovanie vozdeystviya poverkhnostnykh voln na gidrotehnicheskie sooruzheniya [Modeling of impact superficial waves on hydraulic engineering constructions]. Sbornik statey mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Rol' nauki v razvitiu obshchestva» (Ufa, 17.04.2014) [Collected papers of the international scientific-practical conference "The role of science in the development of society" (Ufa, 17.04.2014)]. Ufa, Aeterna, 2014. Vol.1. P. 283-286
4. Brebbia C., Telles J., Wrobel L. Metody granichnykh elementov [Boundary element techniques]. Translated from English. Moscow, World, 1897. 524 P.
5. Vorob'ev, Yu.L., Akimov V.A., Sokolov Yu.I. Tsunami: preduprezhdenie i zashchita [Tsunami: prevention and protection]. Moscow, The Ministry of emergency situations of Russia, 2006. 264 P.
6. Elets'kiy S. V., Mayorov Yu. B., Maksimov V. V. Modelirovaniye generatsii poverkhnostnykh voln peremeshcheniem fragmenta dna po beregovomu sklonu [Modeling of generation of surface waves by movement of the fragment at the bottom of the Bank slope]. Vestnik KazNU . Ser.: Matematika, mekhanika, informatika [KazNU Journal. Ser. Mathematics, informatics, mechanics]. 2004. Vol. 9, Part. II. P. 194–206.
7. Chubarov L. B., Fedotova Z. I., Elets'kiy S. V. Chislennoe modelirovaniye generatsii voln dvizheniem opolznya [Numerical modeling of generation of waves movement of a landslide]. Trudy mezhdunarodnoy konferentsii po vychislitel'noy matematike [Proceedings of the international conference on computational mathematics]. Novosibirsk: IVMiMG SO RAN, 2004: Vol. II. P. 753–758
8. Shokin, Yu. I., Ruziev R. A., Khakimzyanov G. S. Chislennoe modelirovaniye ploskikh potentsial'nykh techeniy zhidkosti s poverkhnostnymi volnami [Numerical simulation of flat potential fluid flows with surface waves] Krasnoyarsk, VTs SO AN SSSR. 1990. 37 P.
9. Shokin, Yu. I., [i dr.] Modelirovaniye generatsii tsunami dvizheniem opolznya s uchetom vertikal'noy struktury techeniya [Modeling of tsunami generation by the landslide motion taking into account the vertical structure of flow]. Sovremennye metody matematicheskogo modelirovaniya prirodnykh i antropogennykh

katastrof: trudy VIII Vserossiyskoy konferentsii (Kemerovo, 26–28 oktyabrya 2005) [Modern methods of mathematical modeling of natural and anthropogenic disasters: proceedings of the VIII all-Russian conference (Kemerovo, 26-28 October 2005)]. Kemerovo, 2005. P. 20–40.

10. Shokin, Yu. I., Chubarov L. B. O podkhodakh k chislennomu modelirovaniyu opolznevogo mekhanizma generatsii voln tsunami [On the approaches to a numerical modeling of landslide mechanism of generation of tsunami waves]. Vychislitel'nye tekhnologii [Computational Technologies]. 2006. Vol. 11, Part. 2. P. 100–111

11. Grilli S. T. Modeling of waves generated by moving submerged body. Applications to underwater landslide. Analysis With Boundary Elements. 1999. Vol. 23. P. 645–656.

12. Lynett P. A., Liu P. L-F Numerical Study of Submarine Landslide Generated Waves and Runup. Proc. Royal Society of London A. 2002. Vol. 458. P. 2885–2910.

Поступило в редакцию 26.05.2016
Received 26 May 2016