

УДК 551.46

О.Е. Хвостова<sup>2</sup>, Е.Л. Авербух<sup>1</sup>, А.А. Куркин<sup>2</sup>**ИССЛЕДОВАНИЕ СЦЕНАРИЕВ ЦУНАМИ НЕСЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ НА ФРАНЦУЗСКОМ ПОБЕРЕЖЬЕ СРЕДИЗЕМНОГО МОРЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Государственный университет – Высшая школа экономики (Нижегородский филиал)<sup>2</sup>

В работе представлены результаты моделирования различных сценариев вероятного обрушения части мыса Канальи (южное побережье Франции), и вызванного им локального цунами. Рассмотрены три возможных сценария обрушения скалы: обрушение одной глыбы, нескольких глыб, а также сход лавинообразного потока. Проведен анализ рассмотренных сценариев данного гипотетического события.

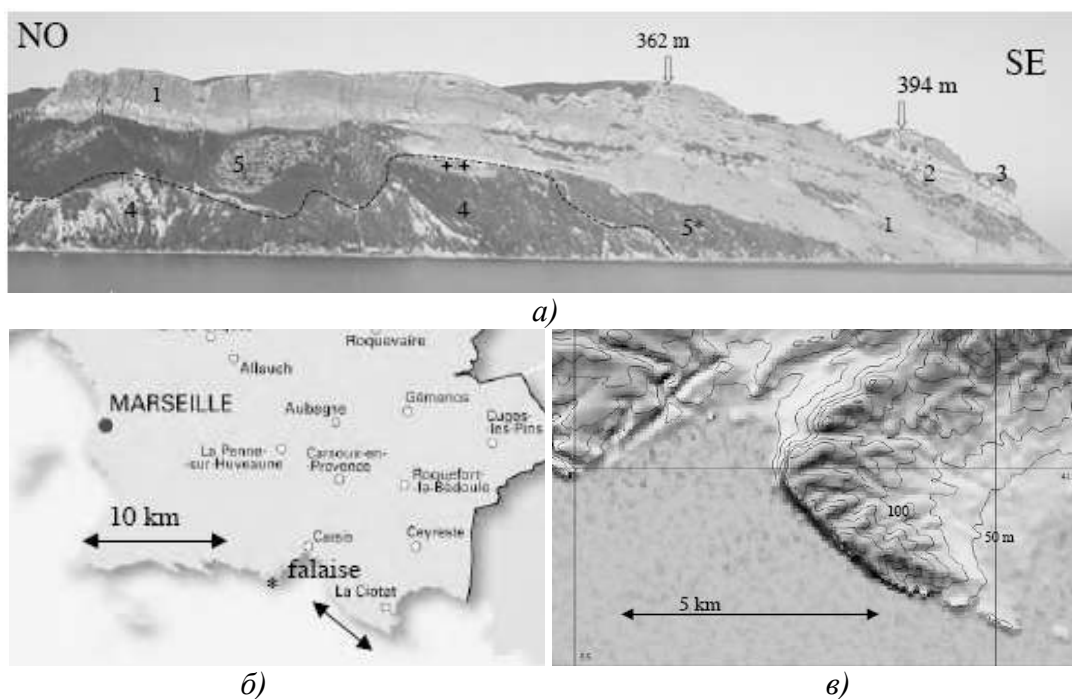
*Ключевые слова:* цунами, численное моделирование, уравнение Буссинеска, обвал, лавина.

**Введение**

Характерной особенностью цунами последних десятилетий является появление разрушительных волн, генерируемых оползнями с достаточно большим объемом сползшего грунта. Оползни и сопровождающие их цунами – обычные вторичные эффекты землетрясений, но во многих случаях разрушительные оползни произведены локальными процессами в отсутствие сейсмических событий. Такие цунами отмечались у берегов Канады и в Средиземном море. Подобные катастрофические волны наблюдаются не только на океанском шельфе, но и на берегах морей и различных водных резервуаров. Так, в 1963 году в Греции, в Коринфском заливе, береговая полоса в устье реки сползла и привела к цунами с высотой шесть метров, которая накатилась на противоположный берег. Также в 1997 году в США в бухте Скагвэй, Южная Аляска, секция железной дороги при реконструкции сползла в воду, что вызвало образование цунами, приведшее к экономическому ущербу около 21 миллиона долларов и человеческим жертвам. В 1997 году на Малых Антильских островах, оползень объемом 60 миллионов кубических метров сполз в Белую реку, на юге островов. Большие волны появились на расстоянии 10 километров от места схода оползня.

По результатам исследований, проводившихся во французском научно-исследовательском институте CEREGE, было выявлено, что вследствие глобального потепления уровень воды в Средиземном море будет подниматься, что в итоге приведет к сходу рыхлых осадочных пород мыса Канальи, расположенного близ поселка Кассис. Мыс Канальи является самой высокой точкой в округе (высота его 397 метров над уровнем моря), причем часть скалы нависает над водой. Подножие же состоит из мягких, рыхлых осадочных пород (см. рис. 1). Обрушение части скалы в воду может повлечь за собой обвал, оцениваемый объём которого - от трех до одиннадцати миллионов кубических метров, наиболее ожидаемым является объём, равный  $3\,900\,000 \pm 785\,000 \text{ м}^3$  [1]. По оценкам, такой обвал может стать причиной возникновения цунами.

При этом статистические данные о цунами в Средиземном море, и особенно вблизи Французского побережья, часто недостаточно полные, а то и совсем отсутствуют. Например, для Лигурийского моря записи колебания уровня моря известны только для двух случаев: цунами 23 февраля 1887 года – в Женеве и Ницце, а также цунами 16 октября 1979 года – в Ницце и Виллефранше. Такие скудные данные не могут использоваться для точной и полной оценки цунамиопасности Французского побережья.



**Рис. 1. Мыс Канальи:**

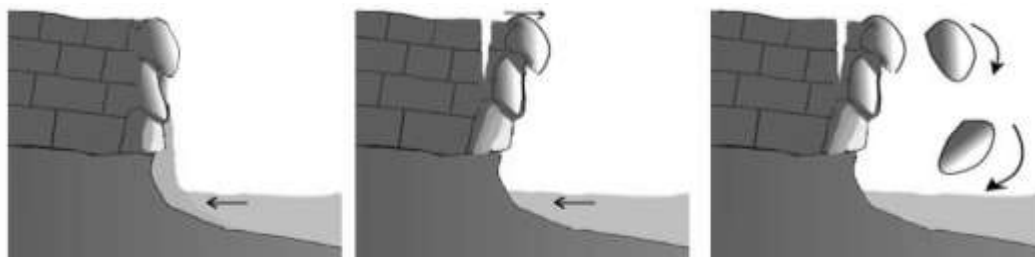
*a* – общий вид на прибрежные скалы. Составляющие породы:

1 – известковый песчаник; 2 – тяжелый известняк; 3 – конгломерат; 4 – известковая глина; рухляк (находится под воздействием эрозии); 5 – древняя стабильная формация обрушившихся скал. Пунктирная линия – граница современной эрозии рухляка, достигающая скалы в точке ++.

Расстояние NO->SE – около четырех километров

*б* – карта местности. \* - место захвата вида *a*);

*в* – топография прибрежных скал (кривые нарисованы через каждые 50 м)



**Рис. 2. Модель гипотетического разлома скалы, вызванного подъемом уровня моря**

По данным исследований, в настоящее время происходит медленная эрозия откоса 4 (см. рис. 1, *a*). В результате поднятия уровня моря эрозия будет происходить все быстрее, и со временем рухляк постепенно сойдет в воду, тем самым оголив выступ скалы 1 (рис. 1, *a*). И тогда может наступить момент, когда часть скалы обрушится в море (рис. 2). Это может быть один большой кусок известняка, либо несколько поменьше. Третьим вероятным сценарием развития событий может стать лавинообразный сход горных пород в море.

Поэтому для изучения последствий данного гипотетического события, которое может повлечь за собой возникновение локального цунами, будем использовать различные вероятные сценарии. Это позволит увеличить осведомленность о возможных последствиях обвала скалы, а также позволит получить исходные данные для разработки мер по смягчению урона.

### Область расчета

Батиметрия региона близ мыса Канальи была получена из данных GPS-навигатора, присланных Филиппом Дюссуйе, CEREGE (рис. 3). Данные XY (горизонтальных координат) приведены в координатах Lambert3 (конформная коническая проекция, [2]), в метрах.

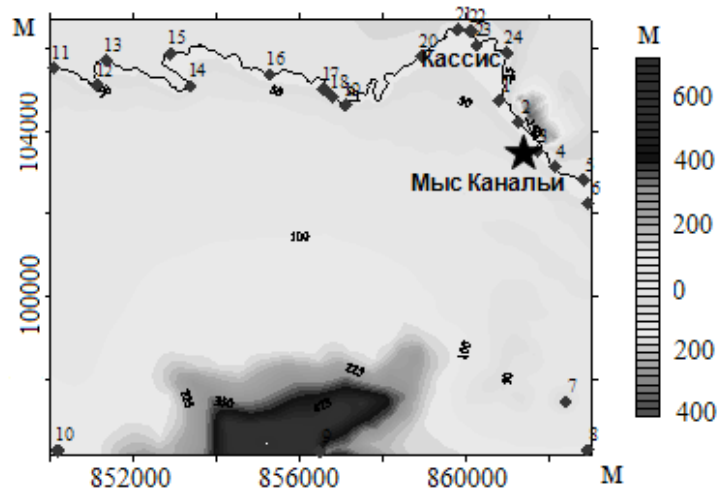


Рис. 3. Батиметрия региона

Размер сетки составляет 907\*849 точек, расстояние между узлами 14 и 12 м двух горизонтальных направлений. Цифрами на рисунке обозначены компьютерные мареографы, расставленные вдоль линии берега. Мареографы номер 1-4 расположены вдоль мыса Канальи, 21 и 22 – в районе поселка Кассис, 11-19 – в Каланках (узких заливах), а остальные по периметру расчетной области.

Было отмечено, что практически вся линия берега в расчетной области представляет собой вертикальную стенку. В том числе и порт городка Кассис, который защищен двумя высокими волнорезами. Есть только два уязвимых места – это два городских пляжа. Один расположен на западе от города (мареограф 20), второй – около порта (мареограф 22). Максимальная высота второго пляжа приблизительно два метра над уровнем моря – он очень пологий. Соответственно, через него волна может пройти и затопить портовую часть города и нанести урон зданиям, сооружениям и людям, которые там находятся. Для второго пляжа нет такой большой опасности, но за ним находится небольшая площадь и асфальтовая дорога с достаточно оживленным движением. Поэтому угроза нанесения урона все же существует.

### Математическая модель

В основу расчета распространения цунами и наката на берег положены расширенные уравнения Буссинеска, с добавлением членов, отвечающих за нелинейность и частотную дисперсию. В исходные уравнения Уеем [3] были добавлены члены, отвечающие за физические эффекты вязкого трения и разрушения волн. Также были включены дополнения, необходимые для выполнения точных численных расчетов, включающих генерацию волн, поглощение волн на границе и движение по береговой линии. Уравнения модели имеют вид:

$$\eta_t = E(\eta, u, v) + \gamma E_2(\eta, u, v) + f(x, y, t), \quad (1)$$

$$[U(u)]_t = F(\eta, u, v) + [F_1(v)]_t + \gamma [F_2(\eta, u, v) + F^t(\eta, u_t, v_t)] + F_b + F_{br} + F_{bs} + F_{sp}, \quad (2)$$

$$[V(v)]_t = G(\eta, u, v) + [G_1(u)]_t + \gamma [G_2(\eta, u, v) + G^t(\eta, u_t, v_t)] + G_b + G_{br} + G_{bs} + G_{sp}. \quad (3)$$

Здесь  $u$  и  $v$  - горизонтальные скорости, параллельные осям  $Ox$  и  $Oy$  на глубине  $z=z_a=-0.531h$ , т.е.  $(u, v) = \bar{u}_\alpha$ , и  $\gamma$  - управляющий параметр, позволяющий выбрать между полной ( $\gamma=1$ ) или частичной ( $\gamma=0$ ) нелинейностью [3]. Остальные члены добавлены в уравнения для выполнения специальных функций: член  $f(x, y, t)$  в (1) в исходной функции для генерации волн; вектор  $(F_b, G_b)$  в (2) и (3) – вектор донного трения;  $(F_{bs}, G_{bs})$  – вектор, отвечающий за расчет турбулентности в потоке; вектор  $(F_{br}, G_{br})$  – модель разрушения волн при

приближении к берегу;  $(F_{sp}, G_{sp})$  необходим для расчета поглощения волн за счет затухания на границах области.

В используемой модели funwave для численного моделирования используется составная схема Адамса-Башфорта-Молтона четвертого порядка точности (использующая шаг-предиктор третьего порядка и шаг-корректор Адамса-Молтона четвертого порядка). Члены, включенные в первые частные производные, имеют порядок точности  $O(\Delta x^4)$ . Для их получения используется пятиточечный шаблон. Все ошибки, включенные в эту схему решения нелинейных волновых уравнений, имеют четвертый порядок по сетке и временному шагу. Пространственное и временное дифференцирование членов высокого порядка в дисперсионных слагаемых имеет второй порядок точности, что делает ошибки еще меньшими.

### Начальные условия

Первоначально, чтобы посмотреть общие закономерности распространения возникающих при обвале волн, в качестве *первого сценария* было решено взять за основу модель шара, падающего в воду. В этом случае образуется возмущение поверхности воды следующей формы:

$$\begin{cases} \eta(\vec{r}, 0) = D_c \left( 1 - \frac{r^2}{R_c^2} \right), & r \leq R_D, \\ \eta(\vec{r}, 0) = 0, & r > R_D, \end{cases} \quad (4)$$

где  $D_c$  – эффективная глубина впадины;  $R_c$  – радиус впадины.

Эта формула много лет применяется для описания волн, возникающих в результате взрывов в воде и извержений подводных вулканов. Эта же идея применяется для вычисления воздействия астероидов при падении в океан [4-6]. Принято, что только часть кинетической энергии источника ( $\varepsilon$ ) идет на генерацию цунами. Таким образом, для вычисления глубины впадины имеем следующую формулу:

$$D_c = \sqrt{\frac{2\varepsilon \rho_i R_i^3 V_i^3}{\rho_w g R_c^2}}, \quad (5)$$

где  $\rho_i$  – плотность источника;  $R_i$  – радиус источника;  $V_i$  – скорость источника;  $\rho_w$  – плотность воды. В наших расчетах в качестве начальных параметров были выбраны следующие:  $\rho_i = 2\rho_w$ ,  $V_i$  рассчитывалась как скорость свободно падающего тела с высоты 260 м (средняя высота участка, который предположительно обвалится).

Другой вариант сценария предполагает падение в воду нескольких глыб общим объемом 4 000 000 м<sup>3</sup> (*второй сценарий*). Размеры глыб были выбраны эмпирически. Всего было взято семь глыб, объемом по 571 428 м<sup>3</sup>. Радиус шара с таким объемом равен 51,5 м. Согласно рис. 1, а, при размывании рухляка у подножия мыса оголится достаточно длинная часть скалы. Поэтому предполагалось, что все семь падающих глыб распределены равномерно вдоль линии берега под нависающей скалой.

Также был рассмотрен *третий сценарий* обрушения скалы, когда в воду сходит лавинообразный поток обломков скалы, перемешанный с материалом, из которого состоит ее подножие. Дифференциальное уравнение, описывающее движение центра масс лавины в направлении движения источника, может быть записано в следующей форме [7]:

$$WTL(\rho_b + C_m \rho_w) \frac{d^2 x}{dt^2} = -WTL(\rho_b - \rho_w) g C_n - WT \frac{1}{2} \rho_w \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 C_d, \quad (6)$$

где  $\rho_b$  – плотность пород;  $W, T, L$  – ширина, толщина и длина потока, движущегося в воду плотности  $\rho_w$  постоянной глубины. Скорость потока на береговой линии определяется начальной скоростью  $u$ ;  $C_m$  – дополнительный массовый коэффициент;  $C_n$  – коэффициент

трения Куломба;  $C_d$  – коэффициент силы тяги. Данное уравнение перепишем в более краткой форме:

$$\frac{du}{dt} = -\frac{(\gamma-1)gC_n}{(\gamma+C_n)} - \frac{C_d u^2}{2L(\gamma+C_m)} = -A - Bu^2, \quad (7)$$

где  $\gamma \equiv \frac{\rho_b}{\rho_w}$  – специальная плотность потока.

### Результаты расчетов

В институте SEREGE, где занимаются исследованием вероятного обвала, предполагают, что объем гипотетического оползня может колебаться от 3 до 11 млн м<sup>3</sup>[1]. Для оценки влияния объема оползневой массы на параметры генерируемой волны цунами первый сценарий был промоделирован для различных объемов обвала (3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 и 11 млн м<sup>3</sup>). Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры локального цунами для различных объемов обвала (первый сценарий)

Объём обвала (м <sup>3</sup> )	Радиус шара (м)	Высота первой волны (м)	Высота максимальной волны (м)	Время прихода 1-й волны (с)
3000000	89,47	1,1	1,1	190
4000000	98,47	1,5	1,5	195
5000000	106,08	1,5	1,5	195
6000000	112,73	1,5	1,5	195
7000000	118,67	1,6	1,6	195
8000000	124,07	1,4	1,4	190
9000000	129,04	1,5	1,5	195
10000000	133,65	1,8	1,8	200
11000000	137,96	1,55	1,55	195

Практически все параметры (амплитуда, период и время прихода волн) очень похожи и варьируются в пределах 5% от среднего результата. Это свидетельствует о том, что объем обвала не будет значительно влиять на ситуацию в бухте Кассис, и в любом случае будет представлять для поселка определенную опасность. Поэтому далее в расчетах был рассмотрен средний случай – наиболее вероятный объем в 4 млн м<sup>3</sup>. Приведенные далее данные для первого сценария соответствуют этому же объему обвала.

Начальное возмущение водной поверхности при различных сценариях генерации волны цунами представлено на рис. 4. Для первого сценария глубина впадины равна 5,35 м, а максимальный всплеск по краю впадины равен 10,65 м.

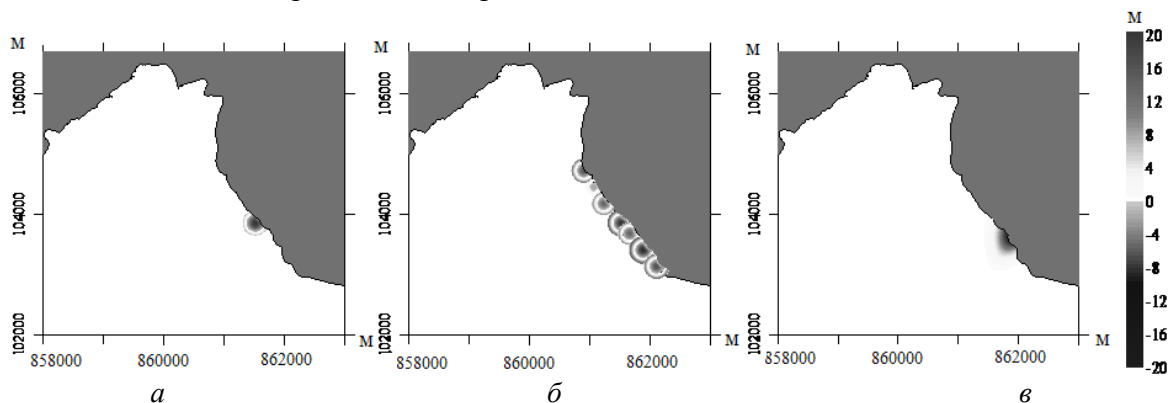
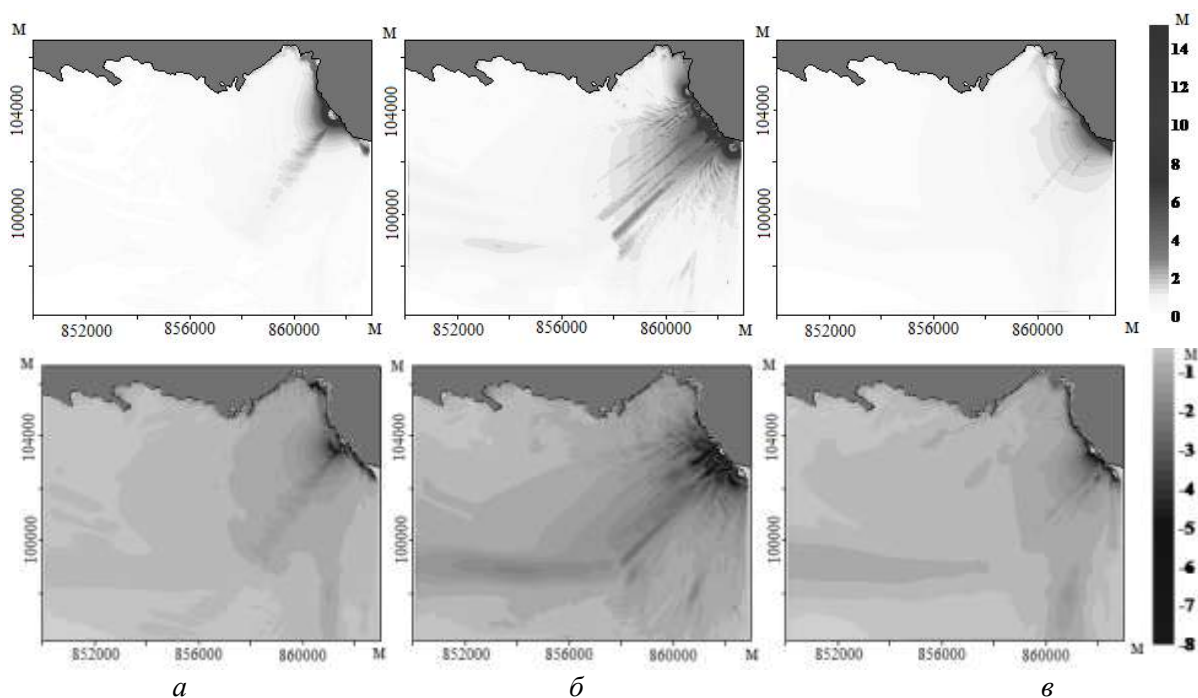


Рис. 4. Начальное возмущение:

*a* – для первого сценария; *b* – для второго сценария; *v* – для третьего сценария

В результате численного моделирования данного сценария была получена следующая картина событий. Волна распространяется достаточно быстро в направлении от линии берега. Приблизительно через 3–3,5 минуты волна достигает поселка Кассис, через пять минут доходит до южной границы расчета (это расстояние приблизительно равно 10 км) и выходит за область расчета по всему периметру области в течение восьми минут.



**Рис. 5. Распределение максимальных (вверху) и минимальных (внизу) высот волн за все время расчета:**

*a* – для первого сценария; *б* – для второго сценария; *в* – для третьего сценария

В районе схода части скалы (мареограф номер 3) сразу же после обрушения наблюдаются волны высотой до 10 м. Приблизительно через две минуты приходит вторая волна высотой около 2 м. После этого колебания моря в данном регионе незначительны.

На восточной границе области расчета (мареограф номер 7) через пять минут после обвала наблюдаются колебания уровня моря с амплитудой до 0,8 м. До западной границы расчета (мареограф номер 12) волна доходит за 8 минут и максимальная амплитуда ее составляет 80 см. Такая картина характерна для всех рассматриваемых сценариев.

Распределение максимальных и минимальных высот для разных сценариев представлено на рис. 5. Необходимо отметить направленность максимальной волны от берега. Максимальные волны наблюдаются в районе обрушения скалы, где берег представляет собой вертикальный срез – до 20 м, а также вдоль линии берега бухты Кассис – до 3 м высотой. В области обвала минимальные и максимальные высоты приходятся на первые минуты расчёта.

Рассмотрим более подробно ситуацию в бухте Кассис. На рис. 6 представлены записи некоторых компьютерных мареографов (расположение мареографов показано на рис. 3). Компьютерные записи показывают, что в случае наступления рассматриваемого события к поселку Кассис подойдет первая волна высотой более одного метра (в районе городского пляжа, мареограф номер 22). Период волны составляет в среднем две минуты. Максимальная волна для разных сценариев может достигать высоты 2,5 м. После прихода максимальной волны уровень моря будет колебаться с амплитудой чуть более одного метра и периодом чуть более 30 секунд.

По результатам моделирования различных сценариев обрушения скалы было проведено сравнение различных характеристик высот волн. Данные приведены в табл. 2. Напомним, что во всех рассматриваемых случаях объем обрушающегося материала составлял 4 млн м<sup>3</sup>.

По данным таблицы, максимальная высота волны в порту поселка Кассис будет

наблюдаться, если в воду упадет несколько средних глыб и самая маленькая – при сходе лавинообразного потока. Время добегания первой волны минимально для обвала нескольких глыб и равно трем минутам. Для двух других сценариев оно близко к четырем минутам.

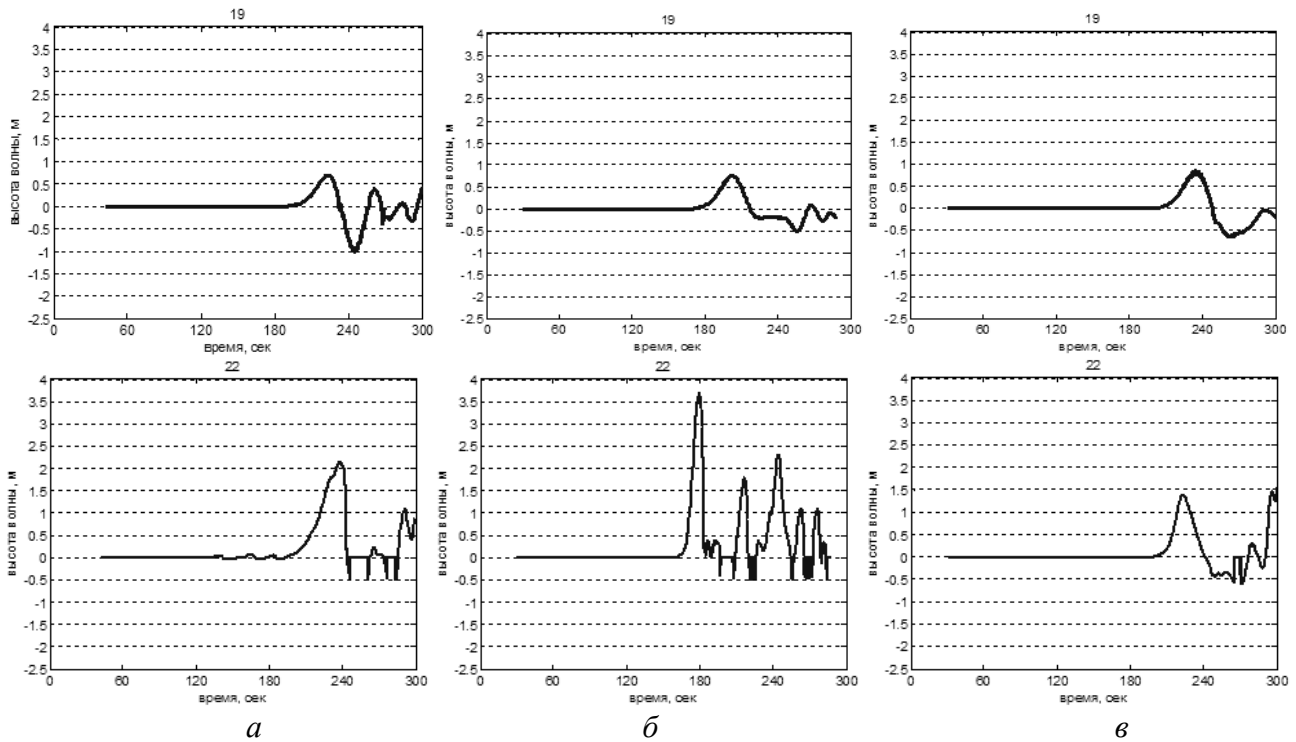


Рис. 6. Записи компьютерных мареографов №19 и №22:

а – для первого сценария; б – для второго сценария; в – для третьего сценария

Отметим, что для разных сценариев максимальная волна может быть как первой пришедшей волной (для случая обвала нескольких глыб), так и второй или третьей. Самый большой период волны по результатам расчетов соответствует лавинообразному сходу породы.

Таблица 2

Сравнительные характеристики волн цунами при различных сценариях обрушения мыса

Сценарий	Максимальная высота волны, м	Время прихода первой волны, с	Время прихода максимальной волны, с	Количество волн, не считая множества средних осцилляций	Максимальная волна по счету	Период волны, с
1. Обвал одной глыбы	2,7	200	300	2	3	30
2. Обвал нескольких небольших глыб	3	180	185	3	1	40
3. Лавинообразный сход породы	2,5	220	300	4	2	90

В целом, картина, наблюдаемая в бухте Кассис, очень близка для различных моделируемых сценариев. Очень важно то, что время добегания волны до поселка с момента обрушения скалы очень мало и составляет от 2,5 до трех минут, а высота волны при этом значительная – до трех метров в случае обрушения нескольких глыб сразу. Такая волна с ее огромной энергией вполне способна перебраться через пляж и затопить портовую площадь, порт, нанести ущерб зданиям, сооружениям и яхтам. Также маленькое время добегания

означает, что при возникновении в будущем обрушения скалы, если люди, находящиеся на пляже и в порту не будут знать, что необходимо очень быстро и организованно отойти вверх по улицам города, может возникнуть паника, при этом возможны давка и людские жертвы.

### Выводы

В настоящей работе представлены результаты моделирования различных сценариев возникновения локального цунами вследствие обрушения мыса Канальи на французском побережье Средиземного моря. Выбраны и адаптированы для описания данного события два различных подхода к моделированию обвала: откол части скалы либо сход в воду потока, состоящего из обломков породы. Показано, что время прихода волны цунами в порт города Кассис составляет 3–3,5 минуты после обвала, а максимальная высота волны более 2,5 м.

Проведенное численное исследование показывает, что данное гипотетическое событие может являться причиной нанесения ущерба жителям поселка Кассис, находящегося в непосредственной близости от источника обвала. По имеющейся информации недостаточно, чтобы точно определить характеристики обвала, поэтому приведенные расчеты носят во многом модельный характер. Однако моделирование сценариев развития событий, как важного инструмента подготовки к реальному событию, смягчение урона, приносимого волной, является важной задачей. В заключение хотелось бы отметить важность дальнейшего изучения явления волн цунами, а также доработки существующего сценария развития событий.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых - докторов наук (МД-99.2010.5) и гранта РФФИ 10-05-00199-а.

### Библиографический список

1. **Rochette, P.** Programme Catastrophes Telluriques 2005 / P. Rochette, D. Hants; Appel a projets detaille du recherche. ATEF. 2005.
2. Projection de Lambert. Un article de Wikipedia, l'encyclopédie libre. [www.wiki.fr](http://www.wiki.fr).
3. **Kirby, J.T.** Funwave. Fully Nonlinear Boussinesq Wave Model. Documentation and User's Manual / J.T. Kirby. Center for Applied Coastal Research. Research Report NO CACR-98-06. 1998.
4. **Kharif, C.** Asteroid Impact Tsunami / C. Kharif, E. Pelinovsky // C.R. Physique. 2005. P. 361-366.
5. **Ward, S.N.** Asteroid impact tsunami of 2880 March 16 / S.N. Ward, E. Asphaug // Geophysical Journal International. 2003. Vol. 153. P. 6-10.
6. **Ward, S.N.** Impact tsunami – Eltanin / S.N. Ward, E. Asphaug // Deep-sea Research II. 2002. №49. P. 1073-1079.
7. **Watts, P.** Theoretical analysis of tsunami generation by pyroclastic flows // P. Watts, C.F. Waythomas. USA journal of geophysical research. Vol. 108, no. B12, 2003. P. 25–63.

*Дата поступления  
в редакцию 02.04.2010*

**О.Е. Khvostova, Е.Л. Averbukh, А.А. Kurkin**

### ANALYSIS OF NONSEISMIC TSUNAMI SCENARIOS ON THE FRENCH COAST OF MEDITERRANEAN

In the present work the results of different scenario of the cliff of Cape Canaille hypothetical collapse (South of France) are presented. Three scenarios were considered: falling of one block, falling of several blocks in one time and debris flow avalanche. The analysis of the entire scenario was done.

*Key words:* tsunami, numerical simulation, Boussinesq equation, landslide, avalanche.