



Рис. 5. Заплески волн цунами на вертикальную стенку, расположенную на изобате 10 м у побережья Южного берега Крыма. Высота волны при подходе к материковому склону равна 1 м

На рис. 5 даны рассчитанные для шельфа Южного берега Крыма вертикальные заплески одиночных волн, имеющих высоту 1 м и различную длину при подходе к материковому склону. Вертикальные заплески убывают с ростом λ . Для относительно коротких волн принципиально важен учет нелинейности процесса. Установлено слабое влияние донного трения на трансформацию волн в шельфовой зоне. Существенным является тот факт, что во всех случаях вычислительный эксперимент выявил многократное усиление волн в шельфовой зоне. Поэтому подобные события представляют потенциальную опасность для жизнедеятельности в прибрежной зоне моря.

Литература

1. Соловьев С.Л., Го Ч.Н., Ким Х.С. Каталог цунами в Тихом океане. 1969–1982 гг. М., 1986.
2. Соловьев С.Л., Го Ч.Н., Ким Х.С. и др. Цунами в Средиземном море 2000 г. до н.э. — 1991 г. М., 1997.

3. Мурти Т.С. Сейсмические морские волны цунами. Л., 1981.
4. Осипов В.И. // Вестн. РАН. 1995. 65, № 6. С. 483.
5. Soloviev S.L. Tsunamis // Assessment and Mitigation of Earthquake Risk. Paris: UNESCO, 1978. P. 118.
6. Григораш З.К. // Тр. МГИ АН СССР. М., 1959. 17. С. 59.
7. Григораш З.К., Корнева Л.А. // Океанология. 1969. 9, № 6. С. 988.
8. Григораш З.К. // Тр. СахКНИИ ДВО АН СССР. Южно-Сахалинск, 1972. Вып. 29. С. 271.
9. Григораш З.К., Корнева Л.А. // Океанология. 1972. 12, № 3. С. 417.
10. Доценко С.Ф. // Изв. РАН, ФАО. 1994. 30, № 4. С. 513.
11. Никонов А.А. // Природа. 1994. № 3. С. 72.
12. Фомичева Л.А., Рабинович А.Б., Демидов А.Н. // Проект «Моря СССР». Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические исследования. Санкт-Петербург, 1991. С. 352.
13. Доценко С.Ф., Коновалов А.В. // Морской гидрофиз. журн. 1995. № 6. С. 3.
14. Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли. М., 1985.
15. Чекунов А.В. // Докл. АН УССР. 1990. Сер. Б, № 11. С. 27.
16. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е. // Геофиз. журн. 1991. № 3. С. 14.
17. Шокин Ю.И., Чубаров Л.Б., Марчук Ан.Г., Симонов К.В. Вычислительный эксперимент в проблеме цунами. Новосибирск, 1989.
18. Кононова Г.Е., Показеев К.В. Динамика морских волн. М., 1985.
19. Алешков Ю.З. Теория волн на поверхности тяжелой жидкости. Л., 1981.
20. Доценко С.Ф. // Морской гидрофиз. журн. 1993. № 2. С. 39.
21. Доценко С.Ф. // Там же. 1995. № 5. С. 3.
22. Доценко С.Ф., Коновалов А.В. // Там же. 1995. № 1. С. 67.
23. Доценко С.Ф. // Там же. 1997. № 4. С. 21.

УДК 551.466

ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОДВОДНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА СТРАТИФИЦИРОВАННЫЙ ОКЕАН

М. А. Носов

Обнаружено образование температурных аномалий на поверхности океана над эпицентрами сильных подводных землетрясений в районах Соломоновых островов и Филиппин. Обсуждаются физические механизмы, приводящие к генерации таких аномалий, анализируются возможные сопутствующие явления.

Подводные землетрясения могут вызывать сильные возмущения водного слоя в области эпицентра, проявляющиеся — по показаниям очевидцев — как мощное бурление воды, выбросы отдельных ее

столбов, формирование необычайно крутых стоячих волн амплитудой до 10 м, в некоторых случаях наблюдается помутнение воды на протяжении десятков миль. Указанные явления называют моретрясе-

нием. В дальнейшем под моретрясением мы будем понимать совокупность гидродинамических, как правило нелинейных, явлений, инициированных сейсмически активным дном и происходящих в плейстоценовой зоне (зоне максимальных сотрясений) подводного землетрясения. Такое определение не исключает из рассмотрения начальную стадию формирования волн цунами, хотя цунамигенное землетрясение необязательно должно сопровождаться моретрясением, и наоборот, землетрясение, вызвавшее моретрясение, необязательно будет цунамигенным. Моретрясение длится до 10 мин, площадь зоны, им охваченной, достигает нескольких тысяч квадратных километров.

Возможность выхолаживания поверхности океана при подводном землетрясении отмечалась еще в работе [1]. Сведения о появлении аномальных цветковых пятен на поверхности океана в зоне действия подводного землетрясения приводились в работе [2]. Как показали оценки, выполненные с позиций теории размерностей с использованием эмпирических зависимостей для параметров очагов цунамигенных землетрясений [3], энергии, выделяющейся при землетрясении, более чем достаточно для того, чтобы перемешать океан (и, следовательно, выхолодить поверхность) над плейстоценовой зоной вплоть до однородного состояния за время, исчисляемое минутами. Конечно, одного отсутствия энергетического запрета недостаточно для существования явления, необходимо наличие определенного физического механизма передачи энергии от движущегося дна к водному слою, что стимулирует турбулентное или поступательное вертикальное движение воды.

Один из таких механизмов, связанный с потерей устойчивости жидкостью на колеблющемся дне, исследовался на физической модели в работе [4]. Основным результатом этой работы заключается в том, что показана возможность существования такого динамического режима, при котором значительно (в условиях лабораторного эксперимента — более чем на три порядка) возрастает вертикальный турбулентный обмен.

Возможность возникновения нелинейных потоков (акустического ветра) в жидкости над колеблющимся дном обоснована в работе [5].

Механизм передачи энергии от колеблющегося дна к слою жидкости может быть и резонансного типа. При учете сжимаемости слой воды со свободной верхней границей толщиной H , лежащий на жестком дне, очевидно, представляет собой естественный резонатор с набором частот

$$\nu_k = \frac{c(1 + 2k)}{2H},$$

где c — скорость звука в воде, $k = 0, 1, 2, 3, \dots$. При средней глубине океана 4500 м и скорости звука в воде, равной 1500 м/с, получаем следующий набор частот: 0,083; 0,25; 0,42; 0,58; ... Гц. Видно, что такой набор резонансных частот лежит как раз в диапазоне

частот сейсмических процессов. Из этого следует, что возможна чрезвычайно эффективная передача энергии от движущегося дна водной толще с последующей ее диссипацией и преобладанием на начальном этапе — в силу значительных пространственных масштабов движения — турбулентного механизма, что в результате также ведет к интенсификации вертикального обмена.

Перечислим возможные последствия такого перемешивания. 1. Выход глубинных вод на поверхность приведет к образованию обширной зоны локального охлаждения на поверхности океана, следовательно, на это должна прореагировать и атмосфера. 2. Произойдет вынос биогенов в обычно обедненный этими веществами поверхностный слой и, как следствие, аналогично тому, как это происходит в зонах апвеллинга, возможно кратковременное, но заметное увеличение концентрации фитопланктона (некоторые виды фитопланктона способны размножаться со скоростью до 2–3 делений в сутки). Учитывая, что фитопланктон является первичным звеном в трофической цепи и определяет биопродуктивность вод, возможны явления типа миграции рыбы и морских животных и т. п. 3. Эволюция зоны с нарушенной и поэтому неустойчивой стратификацией должна создать мощную систему внутренних волн, амплитуда которых будет во много раз превышать амплитуду внутренних волн цунами, сравнимую с величиной остаточного смещения дна [6, 7].

Три указанных выше явления дают возможность поиска и идентификации подобных случаев в природе: 1) температура поверхности океана достаточно надежно определяется с ИСЗ по анализу ИК-снимков в диапазоне окна прозрачности атмосферы; 2) концентрация фитопланктона также определяется с ИСЗ по цветности океана, т. е. по концентрации хлорофилла «а» [8]; 3) данные буйковых станций о трансформации вертикального профиля температуры в совокупности с метеоданными дали бы наиболее полную и доказательную информацию о событии, если бы такая станция оказалась в зоне моретрясения, кроме того, такая станция может зафиксировать прохождение внутренней волны, о которой речь шла выше.

При проведении совместного анализа карт аномалий температуры поверхности Мирового океана и оперативных выпусков каталога землетрясений (NEIS) было обнаружено образование холодных аномалий в районах очагов сильных подводных землетрясений [9]. В районе о. Бугенвиль (Соломоновы острова) аномалия проявлялась дважды: 6 и 12 мая 1996 г. В районе о. Самар (Филиппины) появление холодной аномалии зарегистрировано 13 июня 1996 г. Этим событиям предшествовали сильные сейсмические толчки (табл. 1, 2).

На рис. 1 представлены фрагменты контурных карт, на которые нанесены изотермы (отражающие

Т а б л и ц а 1
Основные сейсмические события для района
Соломоновых островов

Дата (1996)	Время GMT	Широта, градусы ю. ш.	Долгота, градусы в. д.	Глубина очага, км	Магнитуда		
					Mw	Mb	Ms
29 апр.	14 ч 40 мин 41,0 с	6,65	155,07	44,0	7,2	6,3	7,5
30 апр.	5 ч 27 мин 41,8 с	6,93	154,94	33,0	5,6	5,3	5,4
1 мая	3 ч 30 мин 3,5 с	7,27	155,24	40,0	5,2	5,0	4,5
1 мая	9 ч 21 мин 24,2 с	6,88	154,90	33,0	6,0	5,5	5,9
1 мая	10 ч 5 мин 9,7 с	7,06	154,99	33,0	6,1	5,4	6,0
1 мая	13 ч 52 мин 34,4 с	6,73	155,05	33,0	5,6	5,1	0,0
2 мая	2 ч 32 мин 35,2 с	6,83	154,75	33,0	6,0	5,3	5,9
2 мая	6 ч 38 мин 24,3 с	6,51	154,65	33,0	5,5	5,3	5,3
2 мая	13 ч 34 мин 28,9 с	4,42	155,02	500,0	6,6	5,6	0,0
3 мая	3 ч 7 мин 13,4 с	7,30	155,01	33,0	5,6	4,9	0,0
3 мая	23 ч 24 мин 10,6 с	7,31	155,08	33,0	5,3	5,0	4,8
4 мая	9 ч 49 мин 51,9 с	6,71	154,58	33,0	5,3	4,9	0,0
11 мая	13 ч 43 мин 45,0 с	6,93	155,08	33,0	6,3	5,7	6,3
11 мая	16 ч 29 мин 25,3 с	7,10	154,80	33,0	5,6	5,1	5,3

Т а б л и ц а 2
Основные сейсмические события для района острова Самар

Дата (1996)	Время GMT	Широта, градусы ю. ш.	Долгота, градусы в. д.	Глубина очага, км	Магнитуда		
					Mw	Mb	Ms
11 июня	18 ч 23 мин 5,6 с	12,74	125,41	28,5	7,1	6,0	7,0
12 июня	0 ч 30 мин 18,5 с	13,24	125,51	33,0	5,5	4,9	0,0
14 июня	15 ч 4 мин 41,3 с	12,97	124,93	27,4	6,1	5,6	5,8

отклонение температуры от средноклиматического значения) для района островов Бугенвиль и Самар, определенные 6 мая и 13 июня 1996 г. соответственно. Размеры каждого из фрагментов составляют 1550 × 1550 км. Зачерненные кружки на картах показывают положение эпицентров землетрясений с наибольшей магнитудой.

Максимальное отклонение температуры в районе о. Бугенвиль достигало 3°С и в районе о. Самар — 1°С. Характерный горизонтальный размер аномалий порядка 500 км. Время существования достигало 3 сут. Более подробно динамика рассматриваемых аномалий описана в работе [10].

При построении изолиний на рис. 1 были использованы данные, представленные United States Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center (FNMOC). Анализ глобального распределения температуры поверхности океана FNMOC производит дважды в сутки. Пространственное разрешение составляет около 40 км. Отметим, что существование температурных аномалий в районе островов Бугенвиль и Самар в соответствующий промежуток времени подтверждается и данными иного, независимого источника (Bureau of Meteorology, Australia). Эти

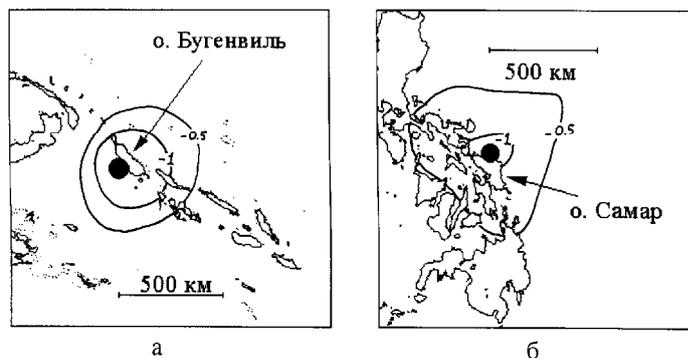


Рис. 1. Фрагменты контурных карт с изотермами, отражающими отклонение температуры поверхности океана от средноклиматического значения для районов островов Бугенвиль (а) и Самар (б). Зачерненные кружки — эпицентры землетрясений с наибольшей магнитудой

данные имеют худшее временное и пространственное разрешение: 7 сут и 100 км.

Анализ спутниковых снимков исследуемых районов в ИК-диапазоне (GMS-5, канал 10,5–11,5 мкм) в соответствующие периоды времени не обнаружил наличия тропических ураганов или иных атмосферных явлений, способных привести к образованию аномалий.

Согласно данным заякоренной буйковой станции «5S156E» (The Tropical Atmosphere Ocean (TAO) Array), расположенной приблизительно в 100 км северо-восточнее о. Бугенвиль (координаты станции 5° ю. ш., 156° в. д.), т. е. практически на границе зоны с аномальной температурой поверхности, максимальные среднесуточные значения скорости ветра на горизонте 4 м в рассматриваемый промежуток времени (с 20 апреля по 10 июня 1996 г.) составляли 4,7 и 9,6 м/с и достигались 3 и 11 мая соответственно.

Кроме метеорологической информации буйковые станции из TAO Array измеряют температуру воды на 11 горизонтах от 1 до 500 м. На рис. 2,а представлен усредненный за период с 20 апреля по 10 июня 1996 г. профиль температуры, построенный по данным указанной буйковой станции. На рис. 2,б показан временной ход температуры на 11 горизонтах. Данные представлены в виде разницы между фактической среднесуточной и средней за указанный выше период температурой. Станция располагалась практически на границе области с аномальной температурой поверхности, в связи с чем уменьшение температуры на горизонте 1 м в дни сейсмической активности слабо заметно. Но обращает на себя внимание длиннопериодная внутренняя волна, регистрируемая станцией с 17 по 27 мая 1996 г. Ее прохождение вызвало заметное понижение температуры на горизонтах 75 и 100 м, повышение температуры на горизонтах 150 и 200 м, в то время как на горизонте 125 м температура практически не менялась. Такая внутренняя волна может быть результатом эволюции области, в которой была нарушена стратификация

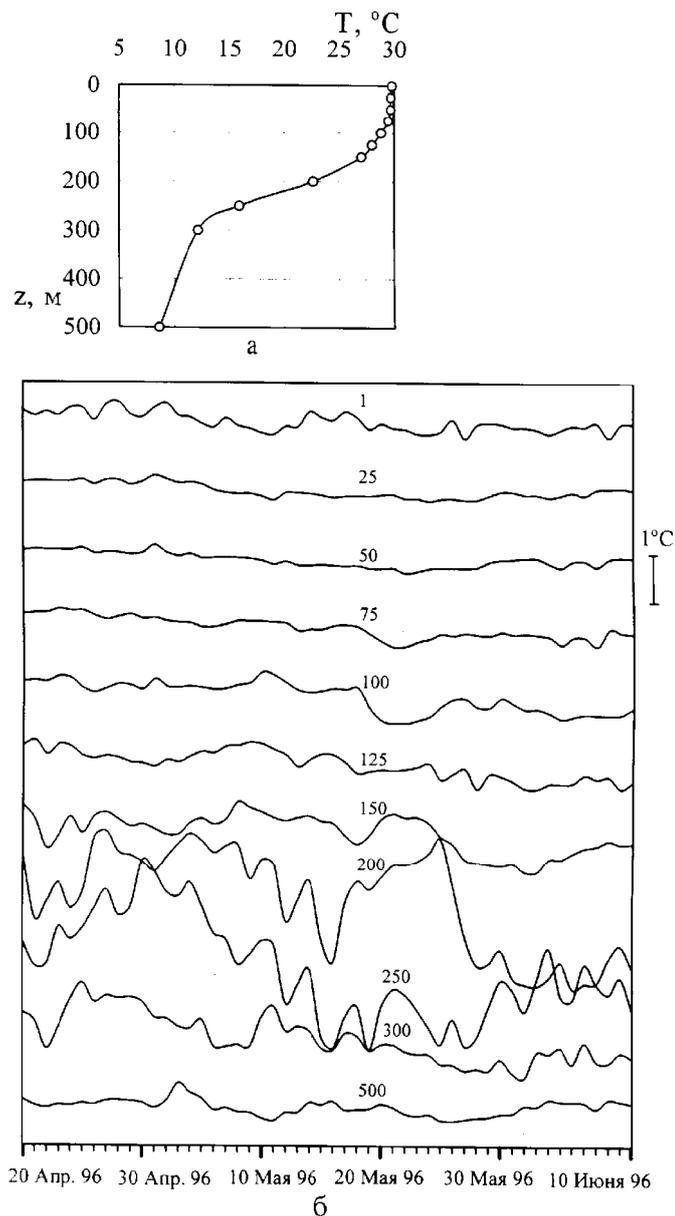


Рис. 2. Усредненный за период с 20 апреля по 10 июня 1996 г. вертикальный профиль температуры, построенный по данным буйковой станции с координатами 5° ю.ш., 156° в.д. (а) и временной ход температуры воды (б) для разных горизонтов (значения горизонтов в метрах даны рядом с кривыми)

после интенсивного вертикального перемешивания: в этой области должно произойти повышение температуры глубинных слоев и понижение температуры верхних. Зная примерный горизонтальный размер аномалии температуры поверхности ($d \approx 500$ км) и период внутренней волны ($T \approx 10$ сут), вызванной, вероятно, распадом области с аномальной стратификацией, можно оценить скорость внутренней волны:

$$v = d/T.$$

Получаемое при этом значение скорости (0,6 м/с) по порядку величины является вполне разумным

для внутренней волны. Здесь необходимо заметить, что поскольку аномальная зона окружала о. Бугенвиль, то на ее эволюцию значительное влияние должна была оказывать топография дна, и поэтому детальный анализ эволюции аномалии возможен только с применением численного моделирования. Кроме станции «5S156E» из ТАО Array ближайшими к о. Бугенвиль являются заякоренные буйковые станции «2S156E» и «0N156E». Анализ функций взаимной корреляции временного хода температуры на горизонтах, лежащих в области термоклина, для трех указанных станций из-за недостаточной статистической обеспеченности (все данные имеют суточное усреднение) не позволяет утверждать наверняка, что внутренняя волна, распространяясь от о. Бугенвиль, достигла станций «2S156E» и «0N156E».

Отметим, что зарегистрированная станцией «5S156E» внутренняя волна не может быть внутренней волной цунами, так как амплитуда первой, которую можно определить как

$$A = \frac{\Delta t_{\max}}{\partial t / \partial z},$$

составляет около 25 м (Δt_{\max} — максимальное отклонение температуры во внутренней волне на одном из горизонтов, $\partial t / \partial z$ — величина среднего за указанный период времени вертикального градиента температуры на том же горизонте). Внутренняя волна цунами такой амплитуды может быть вызвана только подвижкой дна сопоставимой амплитуды, а образование внутренней волны цунами при отсутствии обычной «поверхностной» представляется исключительно маловероятным. Отметим, что серия сейсмических толчков в районе о. Бугенвиль, о которой идет речь, не вызвала заметных волн цунами.

В заключение отметим, что в недавней публикации [11] было описано возникновение температурной аномалии, порожденной Мексиканским землетрясением и цунами 1995 г. На 15-часовых записях датчиков двух заякоренных буйковых станций, установленных вблизи эпицентра землетрясения ($18^\circ 51,5'$ с.ш., $104^\circ 8,4'$ з.д.), было обнаружено резкое понижение температуры воды (на 6°C) и повышение солёности (на $0,5\text{‰}$) на глубине 50 м. Появление аномалии было зарегистрировано через 175 мин после прихода к буйковым станциям волны цунами. Продолжительность существования этой аномалии составляла более 3 ч. По всей вероятности, в данном случае как раз и имела место внутренняя волна цунами. К сожалению, в работе [11] отсутствует информация о точном местоположении буйковых станций, профилях температуры и солёности, что затрудняет установление природы отмеченного явления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 95-05-14688).

Литература

1. *Levin B.W., Kaistrenko V., Kharlamov A. et al.* // Proc. IUGG/IOC Int. Tsunami Symp. Wakayama, Japan, 1993. P. 309.
2. *Соловьев С.Л., Го Ч.Н.* Каталог цунами на восточном побережье Тихого океана. М., 1974.
3. *Носов М.А.* // Вулканология и сейсмология. 1997. № 2. С. 95.
4. *Носов М.А., Иванов П.С.* // Вулканология и сейсмология. 1997. № 1. С. 102.
5. *Островский Л.А., Папилова И.А.* // Акуст. журн. 1974. **20**, № 1. С. 79.
6. *Доценко С.Ф.* // Исследования цунами. 1988. № 3. С. 7.
7. *Hammack J.L.* // J. Phys. Oceanogr. 1980. **10**, No. 9. P. 1455.
8. *Behrenfeld M.J., Falkowski P.G.* // Limnology and Oceanography. 1997. **42**, No. 1. P. 1.
9. *Носов М.А.* // Тез. докл. Всеросс. научн. конф. «Взаимодействие в системе литосфера–гидросфера–атмосфера». М., 1996. С. 70.
10. *Левин Б.В., Носов М.А., Павлов В.П., Рыкунов Л.Н.* // ДАН. 1998. **358**, № 3. С. 1.
11. *Filonov A.E.* // EOS. 1997. **78**, No. 3 P. 21.