

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гусев В. Д., Приходько Л. И.//Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1970. № 2. С. 180.
2. Гусев В. Д., Михайлова Е. Г., Приходько Л. И.//Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1996. № 2. С. 35 (Moscow University Phys. Bull. 1996. N 2).
3. Справочник по специальным функциям/Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. М., 1979.

Поступила в редакцию  
03.07.95

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА, АСТРОНОМИЯ. 1996. № 3

УДК 551.466

### К ВОПРОСУ О НАПРАВЛЕННОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ДИСПЕРГИРУЮЩИХ ВОЛН ЦУНАМИ АСИММЕТРИЧНЫМИ ОЧАГАМИ

М. А. Носов, Н. К. Шелковников

(кафедра физики моря и вод суши)

В рамках линейной потенциальной теории волн на основе численного расчета интегралов анализируется направленность излучения цунами, возбуждаемых вертикальной подвижкой дна в очаге прямоугольной формы. Установлено влияние продолжительности поршневой подвижки дна на направленность излучения волн. Показано, что направленность излучения энергии с удалением от источника сохраняется, в то время как распределение амплитуды волны по азимутальному углу стремится к изотропному.

Эффект направленного излучения волны цунами из области очага может вызываться различными причинами [1, 2], к которым в первую очередь следует отнести геометрическую форму области деформации дна, передачу водным массам горизонтального импульса, волноводные свойства рельефа дна.

Направленность излучения волны цунами, связанная с асимметричностью области деформации дна океана, исследовалась теоретически [3, 4] и экспериментально [5]. Считается [1], что эффект направленности, связанный с геометрическими особенностями источника, действует лишь до определенных предельных расстояний.

В работе [6] на основе численного расчета интегралов анализируются пространственная структура, амплитудные и энергетические характеристики диспергирующей волны цунами в случае деформации дна конечной продолжительности, происходящей в эллиптической области. Приведена пространственная структура волны, из которой видно, что головная волна имеет «серповидную» форму, и в направлении, перпендикулярном большей оси эллиптической области, распространяются волны наибольшей амплитуды.

Ярко выраженная направленность Чилийского цунами 22.05.1960 г., когда амплитуда волны, распространявшейся перпендикулярно южно-американскому побережью, в несколько раз превосходила амплитуды волн по другим направлениям, вызвала к жизни серию работ [7—10], в которых оценивается роль горизонтальной подвижки дна в формировании направленной волны цунами. Воздействие горизонтальной подвижки на океан в этих работах моделируется путем приложения эффективной массовой силы в районе очага, затем исследуются свойства волн на большом удалении от района генерации. В частности, установлено, что волна, вызванная вертикально направленной массовой си-

лой, на больших расстояниях от очага осесимметрична, несмотря на неосесимметричную возмущающую силу, в то время как передний фронт волны цунами, вызванной передачей горизонтального импульса, остается анизотропным.

Практически во всех упомянутых работах волны исследовались асимптотическими методами в дальней зоне. Внимание уделялось преимущественно амплитудным характеристикам волн. Влияние продолжительности подвижки дна на направленность излучения волны не рассматривалось. Принимая во внимание сказанное выше и тот факт, что большинство очагов цунами в Тихом океане имеет ярко выраженную вытянутую форму и расположено на сравнительно небольшом удалении от берегов, можно считать очевидной необходимость детального изучения поведения волн, возбуждаемых асимметричными очагами, в ближней зоне.

В настоящей работе на основе численного расчета интегралов исследуется направленность излучения диспергирующей волны цунами в ближней зоне в случае поршневой подвижки дна конечной продолжительности.

### Математическая модель

Будем рассматривать безграничный на плоскости  $OXY$  слой идеальной несжимаемой однородной жидкости постоянной глубины  $H$  в поле силы тяжести. Начало прямоугольной системы координат  $OXYZ$  расположим на невозмущенной свободной поверхности, ось  $OZ$  направим вертикально вверх. Для нахождения волнового возмущения  $\xi(x, y, t)$ , образующегося на поверхности жидкости при движениях дна, происходящих по закону

$$z = -H + \eta(x, y, t),$$

будем решать задачу относительно потенциала скорости течения  $F(x, y, z, t)$ :

$$\Delta F = 0, \tag{1}$$

$$F_{tt} = -gF_z, \quad z = 0, \tag{2}$$

$$F_z = \eta_t, \quad z = -H. \tag{3}$$

Выберем модельный закон движения дна  $\eta(x, y, t)$  следующего вида:

$$\eta(x, y, t) = (\eta_0 [\theta(x+a) - \theta(x-a)] [\theta(y+b) - \theta(y-b)]) \{t\tau^{-1} \theta(t) - (t-\tau)\tau^{-1} \theta(t-\tau)\},$$

где  $\theta(z)$  — ступенчатая функция Хевисайда. Активная область имеет форму прямоугольника шириной  $2a$  и длиной  $2b$ . Подвижка дна характеризуется амплитудой  $\eta_0$  и длительностью  $\tau$ .

Решение задачи (1)–(3) ищется в виде преобразования Лапласа и Фурье по временной и пространственной координатам соответственно:

$$F(x, y, z, t) = \int_{-\infty}^{\infty} dm \int_{-\infty}^{\infty} dn \int_{s-i\infty}^{s+i\infty} dp e^{pt-imx-iny} (A(p, m, n) \operatorname{ch}(kz) + B(p, m, n) \operatorname{sh}(kz)), \tag{4}$$

где

$$k^2 = m^2 + n^2.$$

Смещение свободной поверхности жидкости выражается через потенциал скорости течения следующим образом:

$$\xi(x, y, t) = -g^{-1} F_1(x, y, 0, t),$$

или с учетом (4)

$$\xi(x, y, t) = -g^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} dm dn \int_{s-i\infty}^{s+i\infty} dp p e^{pt - imx - iny} A(p, m, n). \quad (5)$$

Введем безразмерные переменные (знак «\*» в дальнейшем опустим):

$$m^* = Hm, \quad n^* = Hn, \quad a^* = a/H, \quad b^* = b/H, \quad t^* = t(g/H)^{1/2},$$

$$\tau^* = \tau(g/H)^{1/2}, \quad \xi^* = \xi/\eta_0, \quad x^* = x/H, \quad y^* = y/H.$$

Выполнив в (5) интегрирование по  $p$ , имеем следующее выражение для смещения свободной поверхности жидкости:

$$\xi(x, y, t) = \theta(t) \zeta(x, y, t) - \theta(t - \tau) \zeta(x, y, t - \tau), \quad (6)$$

где

$$\zeta(x, y, t) = \frac{4}{\pi^2 \tau} \iint_0^{\infty} \frac{\sin(ma) \sin(nb) \cos(mx) \cos(ny) \sin\{[k \operatorname{th}(k)]^{1/2} t\}}{\operatorname{ch}(k) mn [k \operatorname{th}(k)]^{1/2}} dm dn.$$

### Направленные свойства асимметричного очага цунами

Для исследования направленности излучения цунами рассчитыва-

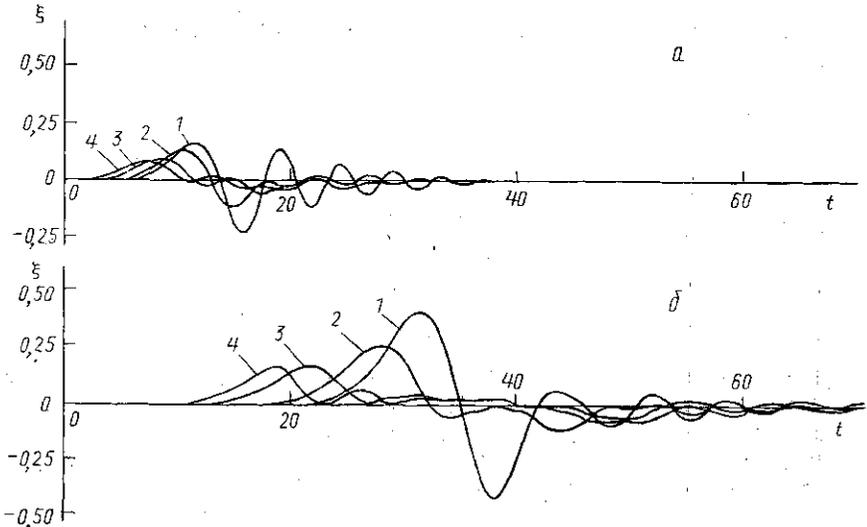


Рис. 1. Временные развертки волн в точках, лежащих на окружности радиуса  $r=10$  (а) и  $r=30$  (б) с центром в начале координат, для азимутальных углов  $\alpha=0, 30, 60, 90^\circ$  (кривые 1—4 соответственно). Волны образованы подвижками дна с параметрами  $a=1, b=5, \tau=1$  (а) и  $a=3, b=15, \tau=1$  (б)

лись (численно) временные развертки волн в точках, лежащих на окружности радиуса  $r$ , центр которой совпадает с началом выбранной нами системы координат. На рис. 1, *a, б* представлены примеры таких временных разверток. Азимутальный угол  $\alpha$  отсчитывается от положительного направления оси  $Ox$ .

По временным разверткам волн определялись максимальные амплитуды и оценивалась энергия по формуле

$$W = \int_0^T \int_{\gamma} \rho g (gH)^{1/2} \xi^2(t) dt d\gamma. \quad (7)$$

Формула (7) дает величину энергии волны цунами, прошедшей через контур  $\gamma$  за время  $T$ . В нашем случае в качестве контура  $\gamma$  выбирался сегмент окружности радиуса  $r$  при  $\Delta\alpha = 10^\circ$ . Значения энергии нормировались на величину  $W_0 = 2\rho g a b$ .

На рис. 2, *a* в виде диаграмм направленности представлены зависимости максимальной амплитуды волны от азимутального угла. Под максимальной амплитудой волны  $A^{\max}$  в данном случае понимается «максимальный размах» волны  $\xi_{\max} - \xi_{\min}$  для данной временной развертки.

Диаграммы направленности излучения энергии представлены на рис. 2, *б*. Отметим, что направленность излучения энергии является более острой по сравнению с соответствующими амплитудными зависимостями.

Для поршневой подвижки дна длительности  $\tau = 1$ , происходящей в области прямоугольной формы размерами  $2a \times 2b$ , в табл. 1 представлены: полные значения энергии волны  $W_{\Sigma}$ ; отношения долей энергии, излучаемых в направлениях  $\alpha_1 = 0^\circ$  и  $\alpha_2 = 90^\circ$ ; отношения «максимальных размахов»  $A_{\alpha}^{\max}$  и амплитуд первых гребней волн  $A_{\alpha}^1$  по указанным направлениям. Значения  $W_{\Sigma}$  рассчитывались по формуле (7), где в качестве контура  $\gamma$  использовалась окружность радиуса  $r = 10$ .

Из табл. 1 видно, что с увеличением площади очага значение полной энергии волны приближается к длинноволновому пределу, равному 1. Острота направленности зависит не только от отношения протяженностей очага в двух взаимно перпендикулярных направлениях, но

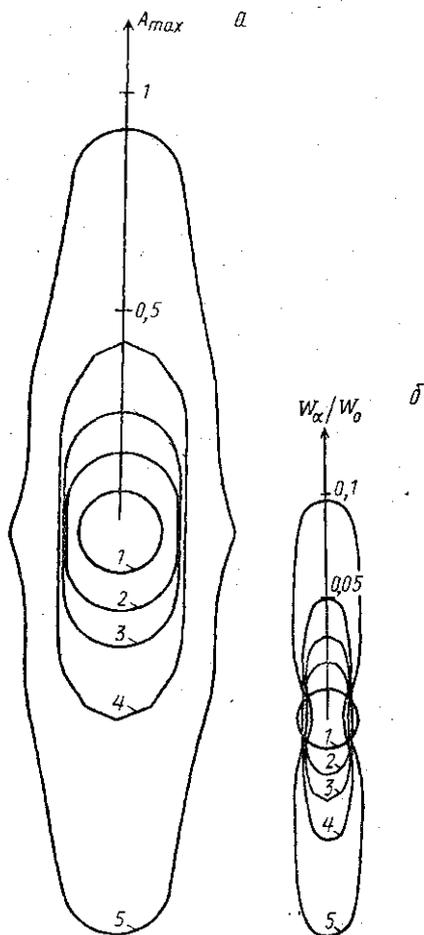


Рис. 2. Распределение максимальной амплитуды (*a*) и энергии (*б*) волны по азимутальному углу. Кривые 1—5 соответствуют параметрам  $a-b$ : 1—1, 1—2, 1—3, 1—5, 3—15. Кривые 1—4 получены при  $r = 10$ , кривая 5 — при  $r = 30$ . Во всех случаях  $\tau = 1$

и от соотношения линейных размеров очага и глубины. Амплитуда первого гребня волны заметно менее чувствительна к асимметричности очага, чем ее «максимальный размах» или энергия.

Таблица 1

$a-b$	$r$	$W_{\Sigma}$	$W_0/W_{90}$	$A_0^{\max}/A_{90}^{\max}$	$A_0^1/A_{90}^1$
1-1	10	0,37	1,00	1,00	1,00
1-2	10	0,47	2,31	1,38	1,16
1-3	10	0,51	4,15	2,18	1,46
1-5	10	0,55	7,84	3,00	1,94
2-2	10	0,62	1,00	1,00	1,00
2-3	10	0,67	1,81	1,62	1,21
2-5	10	0,72	3,67	2,18	1,68
3-3	10	0,73	1,00	1,00	1,00
3-5	10	0,77	2,06	1,43	1,35
5-5	10	0,81	1,00	1,00	1,00
3-15	30	0,85	9,94	3,66	2,60
5-10	50	0,87	3,11	1,59	1,76

Влияние продолжительности подвижки дна на направленность излучения волн демонстрируется на рис. 3. Зависимости амплитуды (рис. 3, а) и энергии (рис. 3, б) от азимутального угла во избежание загроможденности рисунка представлены в обычной прямоугольной системе координат. Помимо отражения хорошо известного факта — уменьшения амплитуды и энергии волн с увеличением продолжительности поршневой подвижки дна, — видно, что и направленность, связанная с асимметричностью очага, при увеличении продолжительности подвижки дна имеет тенденцию к исчезновению.

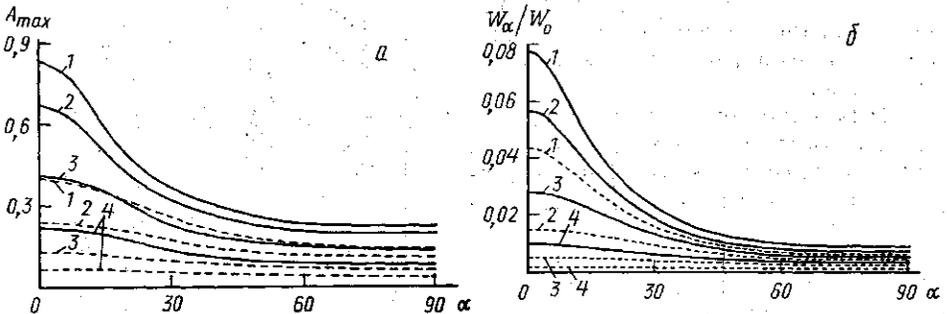


Рис. 3. Влияние продолжительности подвижки дна  $\tau$  на распределение максимальной амплитуды (а) и энергии (б) по азимутальному углу. Кривые 1-4 соответствуют  $\tau=1, 5, 10, 20$ . Сплошные кривые получены для  $a=3, b=15, r=30$ , пунктирные — для  $a=1, b=5, r=10$ .

Таблица 2

$r$	$W_0/W_{90}$	$A_0^{\max}/A_{90}^{\max}$	$A_0^1/A_{90}^1$
3	2,01	1,70	1,19
10	2,31	1,38	1,16
20	2,32	1,27	1,12
30	2,34	1,24	1,09

Изменение направленности волнового поля с удалением от источника исследовалось для подвижки дна со следующими параметрами:  $a=1, b=2, \tau=1$ . Результаты представлены в табл. 2. Вопреки существующему мнению об исчезновении направленности волнового поля, возбуждаемого вертикальной

(поршневой) подвижкой, уже при удалении от района генерации на расстояние, сравнимое с его размерами, направленность излучения энергии сохраняется. Небольшие ее изменения, имеющие тенденцию к обострению направленности, связаны с формированием волны вблизи очага. Что касается амплитудных характеристик, то здесь с удалением от источника как раз и наблюдается исчезновение направленности. Причем этот эффект наиболее заметен для амплитуды первой волны.

**Выводы.** При возбуждении цунами поршневой подвижкой дна конечной продолжительности, происходящей в асимметричной области, направленность более ярко выражена для распределения энергии волны по азимутальному углу, чем для соответствующего распределения ее амплитуды. Направленность излучения энергии определяется не только горизонтальными размерами источника, но и их соотношением с глубиной бассейна. Конечность продолжительности подвижки дна приводит к ослаблению направленности. С удалением от источника направленность излучения энергии сохраняется, в то время как распределение амплитудных характеристик волны по азимутальному углу становится изотропным.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 95-05-14688).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Войт С. С. // Исследования цунами. М., 1987. № 2. С. 8.
2. Доценко С. Ф., Соловьев С. Л. // Исследования цунами. М., 1990. № 4. С. 8.
3. Кажиуга К. // Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ. 1970. 48. P. 835.
4. Кажиуга К. // Ibid. 1963. 41. P. 535.
5. Такаһаси Р. // Intern. Union Geodesy and Geophys. Monograph. 1963. 24. P. 235.
6. Доценко С. Ф., Сергеевский Б. Ю. // Исследования цунами. М., 1993. № 5. С. 21.
7. Войт С. С., Лебедев А. Н., Себекин Б. И. // Теория и оперативный прогноз цунами. М., 1980. С. 5.
8. Войт С. С., Лебедев А. Н., Себекин Б. И. // Изв. АН СССР, ФАО. 1981. 17, № 3. С. 296.
9. Лебедев А. Н., Себекин Б. И. // Там же. 1982. 18, № 4. С. 399.
10. Себекин Б. И. // Там же. 1986. 22, № 9. С. 960.

Поступила в редакцию  
16.10.95