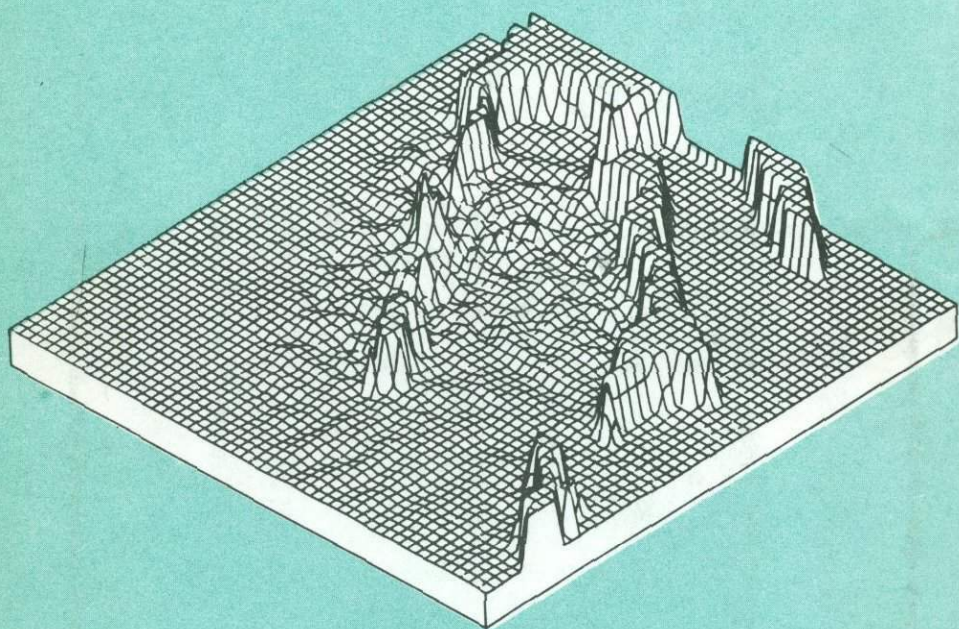


АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ИЗУЧЕНИЕ
ЦУНАМИ
В ОТКРЫТОМ
ОКЕАНЕ



ИЗДАТЕЛЬСТВО „НАУКА“

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
МЕЖДУВЕДОМСТВЕННЫЙ СОВЕТ ПО СЕЙСМОЛОГИИ
И СЕЙСМОСТОЙКОМУ СТРОИТЕЛЬСТВУ

550.345

ИЗУЧЕНИЕ
ЦУНАМИ
В ОТКРЫТОМ
ОКЕАНЕ

2367



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
МОСКВА 1978



Изучение цунами в открытом океане. М., "Наука", 1978, 148 с.

На основе современных вычислительных методов и с помощью ЭВМ рассчитываются цунами на юге Курильских островов и в Японском море от реальных схематизированных источников. Исследуется влияние ступеней дна и шельфа на распространение цунами. Рассматривается поведение цунами в бухте и разрушение волны на берегу. Приводятся фактические данные о цунами и цунамигенных землетрясениях на Дальнем Востоке СССР. Сборник представляет интерес для геофизиков, геологов, сейсмологов, океанологов.

Ответственные редакторы

член-корреспондент АН СССР Е.Ф. Саваренский
член-корреспондент АН СССР С.Л. Соловьев

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемый сборник содержит некоторые итоги работ по изучению распространения цунами от очага возникновения до побережья и материалы наблюдений над цунами на Тихоокеанском побережье страны. Исследования цунами ведутся в СССР во все возрастающем объеме и ввиду комплексности проблемы — специалистами различных отраслей науки.

Авторы статей — сотрудники Вычислительного центра СО АН СССР (А.С. Алексеев, В.К. Гусяков, Л.Б. Чубаров, Ю.И. Шокин), Института океанологии АН СССР (А.Н. Лебедев), Ленинградского гидрометеорологического института (В.Г. Бухтеев, Н.Л. Плинк), Морского гидрофизического института АН УССР (М.В. Бабий, Р.А. Ярошня), научно-исследовательского сектора Гидропроекта (В.М. Лятхер, А.Н. Милитеев, С.Я. Школьников), Сахалинского комплексного научно-исследовательского института ДВНЦ АН СССР (Р.Н. Бурымская, С.Л. Соловьев, Н.А. Щетников).

Сборник подготовлен Комиссией по цунами Межведомственного Совета по сейсмологии и сейсмостойкому строительству АН СССР (МСССС) при участии Сахалинского комплексного научно-исследовательского института ДВНЦ АН СССР (СахКНИИ) и является восьмым тематическим сборником по проблеме цунами, выпускаемым этими организациями за 20 с лишним лет.

В открывающей сборник статье А.С. Алексеева, В.К. Гусякова, Л.Б. Чубарова и Ю.И. Шокина приводятся результаты расчета на ЭВМ цунами от сейсмических источников, близких по своим свойствам к реальным землетрясениям на юге Курильских островов. В отличие от предшествующих теоретических исследований, рассматривавших лишь тот или иной этап жизни цунами, в этой работе прослеживается почти вся их эволюция: от сейсмических дислокаций в очаге землетрясения до подхода цунами к реальному берегу. Эта работа выполнена в рамках сотрудничества специалистов СССР и США по вопросам охраны окружающей среды.

Очень близка к обсуждавшейся работе и статья В.Г. Бухтеева и Н.Л. Плинка о численном моделировании Ниигатского цунами 1964 г. Основное отличие состоит в том, что исходными для расчета цунами служили данные об остаточном смещении морского дна, полученные из батиметрических измерений.

В статье А.Н. Лебедева рассматривается влияние ступеней подводного рельефа на распространение цунами. В.Г. Бухтеев и Н.Л. Плинка в другой своей статье продолжают начатое ими ранее изучение трансформации цунами на шельфе.

Слабо освещенным в отечественной литературе вопросам: поведению цунами в бухтах и разрушению цунами на берегу — посвящены статьи М.В. Бабия и Р.А. Ярошена и В.М. Лятхера с сотрудниками.

Заканчивают сборник три статьи (Р.Н. Бурымской, С.Л. Соловьева, Н.А. Щетникова), в которых приводятся фактические данные о цунами и цунамигенных землетрясениях Дальнего Востока.

Техническая работа по подготовке сборника выполнена под руководством сотрудников МСССС Я.Г. Бирфельда и Н.И. Фроловой; подготовкой материалов от СахКНИИ руководил А.А. Поплавский.

С.Л. Соловьев

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЦУНАМИ ПРИ РЕАЛЬНОЙ ТОПОГРАФИИ ДНА. ЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ

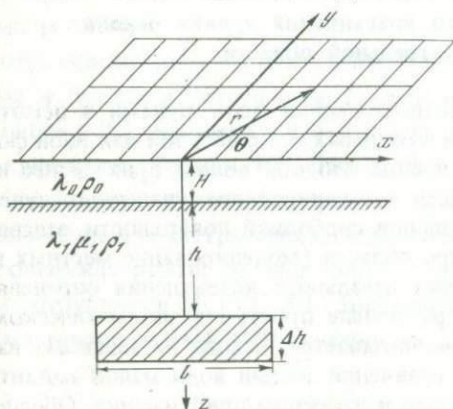
1. Расчет начального возвышения уровня океана в эпицентральной области

Численное исследование распространения волн цунами в некоторой области океана требует задания начальных условий в той или иной форме. Чаще всего они берутся либо в виде плоской волны, приходящей извне на границу исследуемой области (моделирование удаленных цунами), либо в виде начального возвышения свободной поверхности, задаваемого на каком-либо участке внутри области (моделирование местных цунами). В последнем случае форма начального возвышения определяется либо произвольно, используя различные простые в математическом отношении зависимости, либо рассчитывается, исходя из заданных на дне океана подвижек, с помощью уравнений теории волн малой амплитуды, записанных в большинстве случаев в линейном приближении. Обоснованность такого подхода не вызывает сомнений, однако его практическое применение существенно ограничивается тем обстоятельством, что для большинства подводных землетрясений даже форма остаточных смещений дна остается неизвестной, не говоря уже о фактических движениях во время землетрясения.

В данной работе для расчета возбуждения волн цунами использовался другой подход, не требующий априорных предположений о характере подвижек дна и позволяющий связать волну цунами непосредственно с очагом землетрясения и именно с теми его параметрами, которые используются в сейсмологии и определяются из наблюдений над сейсмическими волнами, т.е. глубиной, ориентацией и размерами разлома, направлением подвижки, скоростью распространения разрыва. Основной идеей такого подхода является применение упругой модели среды и использование в качестве уравнения движения уравнения Ляме с учетом гравитационных членов, что позволяет иметь в решении не только упругие, но и гравитационные волны. Волна цунами при этом выделяется из общего решения прямой динамической задачи о возбуждении волн в модели, состоящей из слоя жидкости, лежащего на упругом полупространстве, под действием источника, расположенного внутри полупространства и моделирующего очаг землетрясения.

Подробное описание этого метода и анализ полученных с его помощью результатов относительно сейсмических условий возникновения цунами приведены в работах [1, 2]. Здесь же дается только постановка задачи и кратко описывается способ выделения из общего решения колебаний, соответствующих волнам цунами.

Математическая постановка задачи может быть сформулирована следующим образом. Слой однородной сжимаемой жидкости с параметрами λ_0 и $\rho_0 = 1$ залегает на однородном упругом полупространстве с параметрами λ_1, μ_1, ρ_1 (здесь λ, μ — параметры Ляме, ρ — плотность) и находится в однородном поле силы тяжести. Ось z декартовой системы координат x, y, z направлена вертикально вниз, H — толщина слоя жидкости (глубина океана). На глубине h под дном находится модельный источник, имеющий некоторые свойства реального очага землетрясения (рис. 1). Начальные условия принимаются нулевыми. Рассматривается



Р и с. 1. Модель среды

поле динамического смещения $\vec{U}(x, y, z, t)$ частиц среды относительно некоторого начального состояния статического равновесия в гравитационном поле. Уравнение Ляме с учетом влияния поля силы тяжести записывается в виде

$$\lambda_0 \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{U} - \rho_0 g \operatorname{div} \vec{U} \cdot \vec{k} = \rho_0 \frac{\partial^2 \vec{U}}{\partial t^2}, \quad 0 < z < H, \quad (1.1)$$

$$(\lambda_1 + \mu_1) \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{U} + \mu_1 \Delta \vec{U} - \rho_1 g \operatorname{div} \vec{U} \cdot \vec{k} = \rho_1 \frac{\partial^2 \vec{U}}{\partial t^2}, \quad z > H. \quad (1.2)$$

Здесь g — ускорение силы тяжести, \vec{k} — орт по оси z . Граничные условия на дне и поверхности океана имеют вид:

$$\lambda_0 \operatorname{div} \vec{U} - \rho_0 g U_z \Big|_{z=H+0} = 0, \quad (1.3)$$

$$U_z \Big|_{z=H+0} = U_z \Big|_{z=H-0}, \quad (1.4)$$

$$\mu_1 \left(\frac{\partial U_x}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial x} \right) \Big|_{z=H+0} = 0, \quad \mu_1 \left(\frac{\partial U_y}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial y} \right) \Big|_{z=H+0} = 0, \quad (1.5)$$

$$\begin{aligned} \lambda_1 \operatorname{div} \vec{U} + 2\mu_1 \frac{\partial U_z}{\partial z} - \rho_1 g U_z \Big|_{z=H+0} = \\ = \lambda_0 \operatorname{div} \vec{U} - \rho_0 g U_z \Big|_{z=H-0} \end{aligned} \quad (1.6)$$

Построение точного математического решения задачи производится методом неполного разделения переменных с помощью интегральных преобразований Фурье—Бесселя и Лапласа—Меллина. В качестве источника на первом этапе решения используются точечные модели в виде диполей, составленных из единичных сосредоточенных сил. Путем интегрирования смещений от точечных дипольных источников по плоскости разлома делается переход к пространственным моделям с движущимся с произвольной конечной скоростью разрывом, характеризующимся горизонтальной протяженностью l , вертикальной протяженностью Δh , углом падения плоскости разрыва κ , направлением подвижки в этой плоскости γ и скоростью распространения разрыва v_p .

Полученное таким способом решение описывает суммарное поле смещений, разделяющееся в пространстве и во времени на некоторое число областей ненулевого и резко меняющегося поля, смещения в которых соответствуют тем или иным волнам. Поскольку скорости распространения гравитационных и упругих волн существенно отличаются друг от друга, такое разделение происходит достаточно быстро. Это позволяет применять для выделения отдельных волн соответствующие математические операции, в частности взятие вычетов в полюсах подынтегральных функций для выделения резонансных волн, к которым относятся поверхностные сейсмические и гравитационные волны. Наличие полюсов подынтегральных функций связано, как известно, с существованием корней характеристического (дисперсионного) уравнения, выражение для которого представляет собой знаменатель этих функций.

В [1] показано, что дисперсионное уравнение в нашем случае действительно имеет кроме обычной последовательности корней, соответствующей главной и высшим модам волны Релея, два дополнительных корня, существенно связанных с наличием гравитации. Максимуму дисперсионной кривой одного из них на периодах $T = 10 \div 30$ мин отвечает значение скорости $c = \sqrt{gH}$. Этот корень соответствует волне цунами, второй — гравитационной волне, возникающей на контакте слоя жидкости и подстилающего полупространства.

После взятия вычетов один из интегралов в формулах для смещений (а именно — Лапласа—Меллина по некоторой комплексной переменной, имеющей смысл фазовой скорости) исчезает, остается интеграл по волновому числу вдоль дисперсионной кривой соответствующей волны и интеграл по плоскости разлома для получения смещений от пространственных источников. Эти интегралы не могут быть взяты в явной форме, для вычисления необходимо применение численных методов интегрирования. В данной работе для вычисления интеграла по волновому числу использовалась квадратурная формула Гаусса с шестью узлами и подынтегральным весовым множителем, равным единице; пространственное интегрирование по разлому выполнялось с помощью формулы Симпсона.

Ряд рассчитанных таким образом теоретических мареограмм смещений в волнах цунами на различных расстояниях от очага можно найти в [2] для разных типов источников, глубин океана и параметров среды.

В данной работе программа расчета была модифицирована таким образом, чтобы можно было вычислять вертикальные смещения поверхности океана η_0 и горизонтальные компоненты скоростей смещений u_0 и v_0 в узлах прямоугольной сетки с заданным шагом Δx и Δy в определенные фиксированные моменты времени, т.е. получать пространственную форму волны, которая затем могла бы использоваться в качестве начального условия для программы расчета распространения цунами. Ориентация разлома относительно сетки при этом может быть произвольной и задается углом φ между проекцией плоскости разлома на поверхность и осью x .

При этом сразу же возникает задача перехода от некоторых относительных единиц измерения смещения, имеющих размерность длины, которыми можно пользоваться при расчетах мареограмм от модельных источников, составленных из диполей с единичными моментами, к абсолютным единицам длины, требующимся для расчета распространения цунами на каком-либо реальном участке акватории океана. Очевидно, правильное решение этого вопроса возможно путем сопоставления модельного источника с реальным очагом землетрясения по каким-либо характеристикам, определяемым экспериментально (сейсмический момент, энергия, магнитуда). Однако в настоящее время теория очагов тектонических землетрясений разработана еще недостаточно, особенно в количественном отношении, поэтому в данной работе использовался более простой способ приведения в соответствие относительных единиц измерения смещения к каким-либо абсолютным единицам длины.

Максимальное смещение поверхности океана от каждого модельного источника принималось равным 1 м, и на него нормировались значения смещения во всех остальных узлах сетки. В силу линейности задачи полученные результаты могут быть легко перенесены на случай начального смещения любой другой величины.

В качестве конкретной модели очага землетрясения в работе использовался вертикальный разлом, подвижки по которому вызывают наиболее сильные цунами [2], и два типа смещения крыльев — взбросовый и сдвиговый.

В обоих случаях вектор смещения противоположных крыльев разлома друг относительно друга лежит в плоскости разлома и ориентирован при взбросе вертикально, а при сдвиге горизонтально. Оба типа источника возбуждают симметричное относительно плоскости разлома поле смещений и имеют диаграммы направленности излучения с максимумами при углах θ (отсчитываемых от направления распространения разрыва), равных $90, 270^\circ$ — для взброса и $45, 135, 225, 315^\circ$ — для сдвига.

2. Численное моделирование распространения волн цунами

Для описания процесса распространения волн цунами в бассейне с произвольной топографией дна воспользуемся хорошо известной математической моделью — линеаризованными уравнениями мелкой воды.

Тогда

$$u_{ij}^n = u((j-1/2)\Delta x, i\Delta y, n\Delta t),$$

$$v_{ij}^n = v(j\Delta x, (i-1/2)\Delta y, n\Delta t),$$

$$\eta_{ij}^n = \eta(j\Delta x, i\Delta y, n\Delta t).$$

Тогда система (2.1) может быть аппроксимирована следующей явной конечно-разностной схемой:

$$\begin{aligned} \frac{u_{ij}^{n+1} - u_{ij}^n}{\Delta t} &= -g \frac{\eta_{ij}^n - \eta_{i-1j}^n}{\Delta x}, \\ \frac{v_{ij}^{n+1} - v_{ij}^n}{\Delta t} &= -g \frac{\eta_{ij}^n - \eta_{i-1j}^n}{\Delta y}, \\ \frac{\eta_{ij}^{n+1} - \eta_{ij}^n}{\Delta t} &= -\frac{H_{ij+1}u_{ij+1} - H_{ij}u_{ij}}{\Delta x} - \frac{H_{i+1j}v_{i+1j} - H_{ij}v_{ij}}{\Delta y}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Заметим, что в соответствии с выбранным шаблоном пространственные производные в схеме аппроксимируются центральными разностями. На внутренних точках области Ω_h схема (2.4) аппроксимирует систему (2.1) с первым порядком по Δt и со вторым по $\Delta x, \Delta y$. Что касается условия устойчивости, то оно выражается критерием Куранта

$$(\Delta t \sqrt{gH})^2 \leq \frac{1}{(1/\Delta x)^2 + (1/\Delta y)^2},$$

или при $\Delta x = \Delta y = \Delta$

$$\Delta t \leq \Delta / \sqrt{2gH}.$$

Алгоритм реализации схемы (2.4) таков, что по заданным $u^{-1/2}, v^{-1/2}, \eta^0$ вычисляются $u^{1/2}, v^{1/2}, \eta^1$ и т.д., по $u^{n-1/2}, v^{n-1/2}, \eta^n$ вычисляются $u^{n+1/2}, v^{n+1/2}, \eta^{n+1}$. Способ расчета начального возвышения был описан в предыдущем разделе, задание же краевых условий для схемы (2.4) нуждается в подробном описании.

Будем рассматривать два типа границ: а) жесткая граница, отражающая волну; б) свободная граница, пропускающая волну без изменения.

Жесткой границей моделируются береговые линии островов, расположенных в расчетной области. На этих границах предполагается выполнение условий $v_n = 0$ и $\partial\eta/\partial n = 0$, где $\partial/\partial n$ — производная по направлению внешней к границе острова нормали, а v_n — соответствующая компонента скорости. Для того чтобы учесть кривизну береговой линии,

аппроксимацию производной по нормали будем производить следующим образом; пусть a — угол между горизонтальной линией сетки и направлением внешней нормали (рис. 2). Представим высоту возмущенной поверхности η в виде ряда, отрезок которого с точностью до Δx^2 , Δy^2 имеет вид

$$\eta = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 xy + a_5 y^2. \quad (2.5)$$

Производная $d\eta/dn$ может быть выражена через неопределенные коэффициенты a_i :

$$\frac{d\eta}{dn} = (a_1 + 2a_3 x + a_4 y) \frac{dx}{dn} + (a_2 + a_4 x + 2a_5 y) \frac{dy}{dn}. \quad (2.6)$$

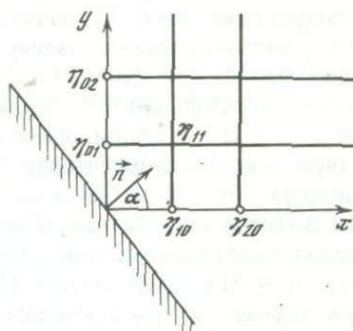
Принимая во внимание, что $dx/dn = \cos a$ и $dy/dn = \sin a$, имеем

$$(a_1 + 2a_3 x + a_4 y) \cos a + (a_2 + a_4 x + 2a_5 y) \sin a = 0. \quad (2.7)$$

Коэффициенты a_i определяются через значения η в соседних узлах сетки. Из (2.7) в точке с координатами $(0,0)$ получаем

$$\eta_{00} = \frac{\Delta y (4\eta_{10} - \eta_{20}) \cos a + \Delta x (4\eta_{01} - \eta_{02}) \sin a}{3(\Delta y \cos a + \Delta x \sin a)} \quad (2.8)$$

Необходимость в краевом условии, названном нами свободной границей, возникает при расчетах распространения волн цунами в областях, содержащих островные системы и не имеющих вообще или имею-



Р и с. 2. Схема расчета отражения цунами от жесткой границы

щих частично жесткие отражающие границы в качестве внешних границ. Основное предположение, делаемое при конструировании краевых условий такого типа, состоит в том, что подошедшая изнутри области к свободной границе волна должна покинуть область без изменения профиля [3, 4].

В описываемой расчетной методике это предположение реализуется следующим образом. Пусть в приграничных точках поведение волны описывается уравнением переноса

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} \pm \sqrt{gH} \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0. \quad (2.9)$$

Тогда значение η на границе в момент времени $(n+1)\Delta t$ определяется так:

$$\eta_{\text{гр}}^{n+1} = \eta_{\text{гр}}^n \mp \kappa \sqrt{gH'} \left(\eta_{\text{гр}}^n - \eta_{\text{гр}}^{n-1} \right), \quad \kappa = \Delta t / \Delta x. \quad (2.10)$$

Очевидно, что это выражение есть не что иное, как интерполяционная формула, устойчивость которой обеспечивается выполнением критерия Куранта

$$\Delta t \sqrt{gH'} / \Delta x < 1$$

или, что то же, требованием, чтобы волна за время Δt проходила расстояние меньшее чем Δx . Описанное краевое условие для свободной границы как бы предполагает, что расчетная область окружена со всех сторон полосами с постоянной глубиной, позволяющими волне пересекать границы с постоянной скоростью.

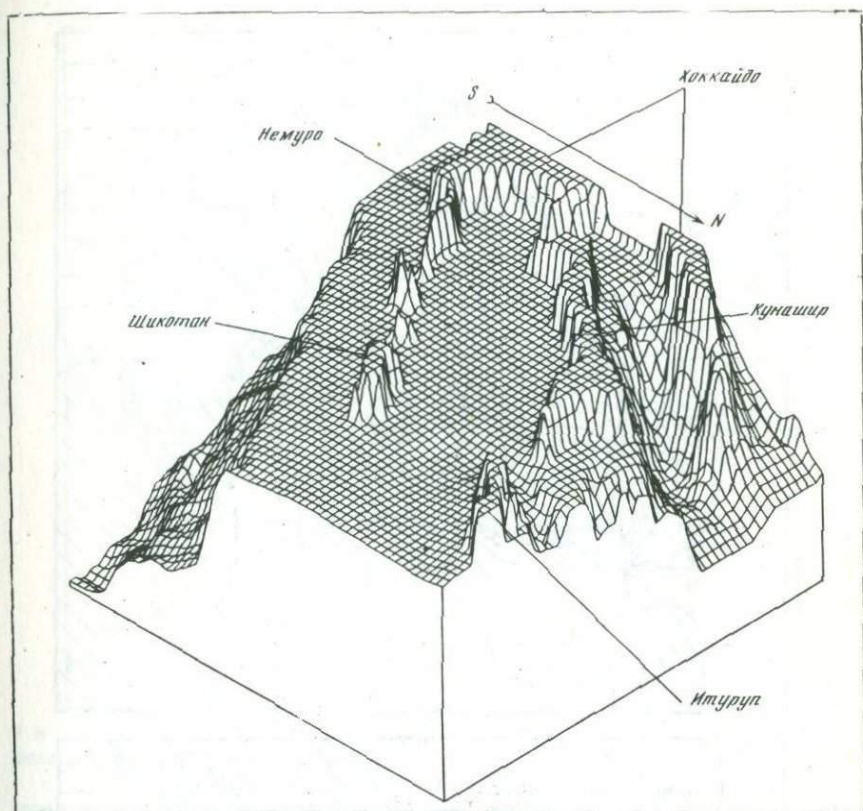
3. Результаты численного моделирования цунами на юге Курильских островов

Описанная выше методика была применена к расчету распространения цунами на юге Курильских островов. Наличие двух островных систем, нескольких проливов и весьма сложный подводный рельеф, включающий западный склон Курило-Камчатского глубоководного желоба, относительно мелководный участок с глубинами 50–90 м между Малой Курильской грядой и о. Кунашир и впадину с глубинами до 2500 м западнее последнего, усложняют задачу, и ее решение возможно только с применением ЭВМ.

Батиметрические данные брались в узлах прямоугольной сетки с шагом $\Delta x = \Delta y = 2,5$ км, ориентированной в меридиональном (ось x) и широтном (ось y) направлениях. Массив батиметрических данных имел размерность 66 x 68, включая таким образом 4488 чисел (рис. 3).

При расчетах использовалась модель очага землетрясения (см. рис. 1) в виде вертикального разлома длиной $l = 50$ км, вертикальной протяженностью $\Delta h = 20$ км, помещенного на глубине $h = 20$ км. Скорость распространения разрыва v_p принималась равной 3 км/с. Очаг располагался в юго-восточном углу исследуемого района, на склоне глубоководной впадины, вдоль которой располагаются очаги большинства курило-камчатских землетрясений. В программе расчета возбуждения цунами средняя глубина океана H в эпицентральной области была принята равной 3 км.

В случае возбуждения цунами смещением типа взбросовой подвижки по разлому, ориентированному в меридиональном направлении (рис. 4, а), время его распространения до Малой Курильской гряды составляет около 10 мин. Через 24 мин волна достигает северной части о. Кунашир и начинает огибать его. Ввиду малых глубин (10–15 м) между островами Кунашир и Хоккайдо продвижение цунами в этом проливе очень медлен-

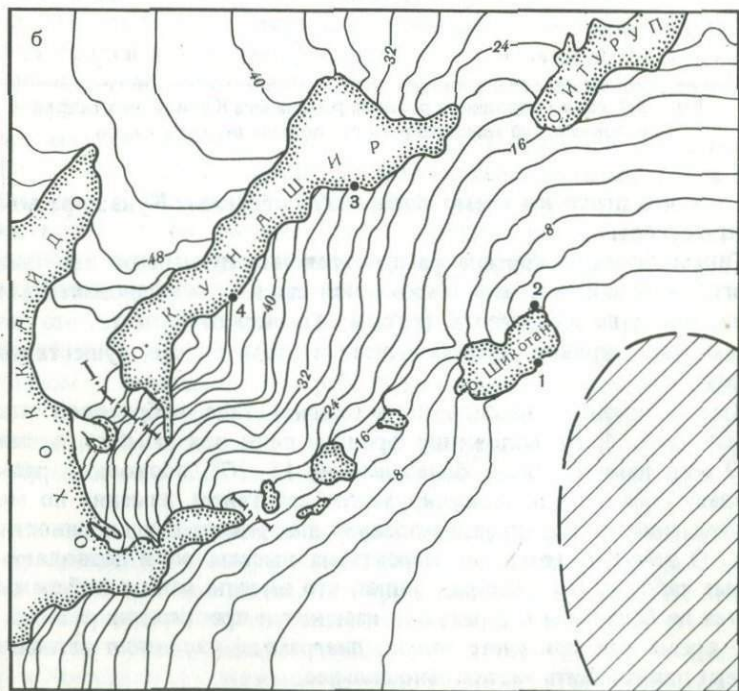
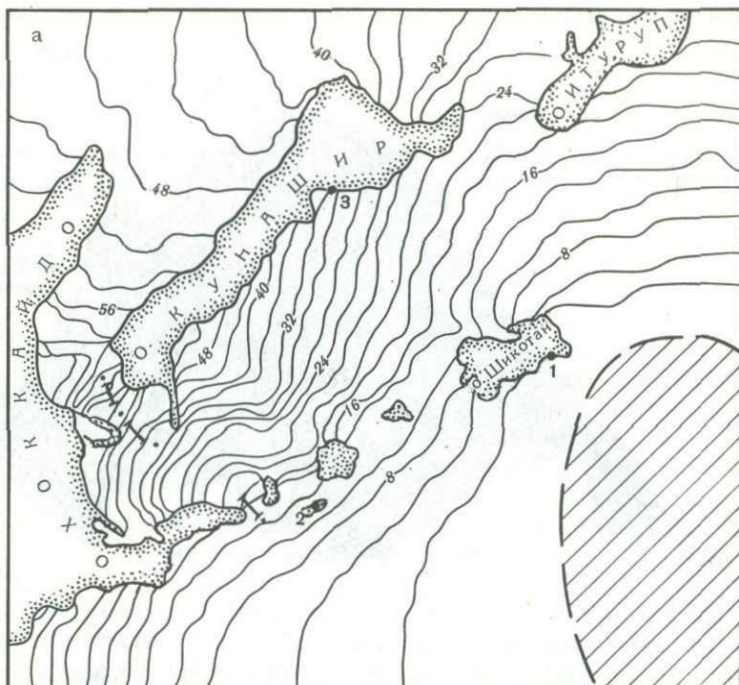


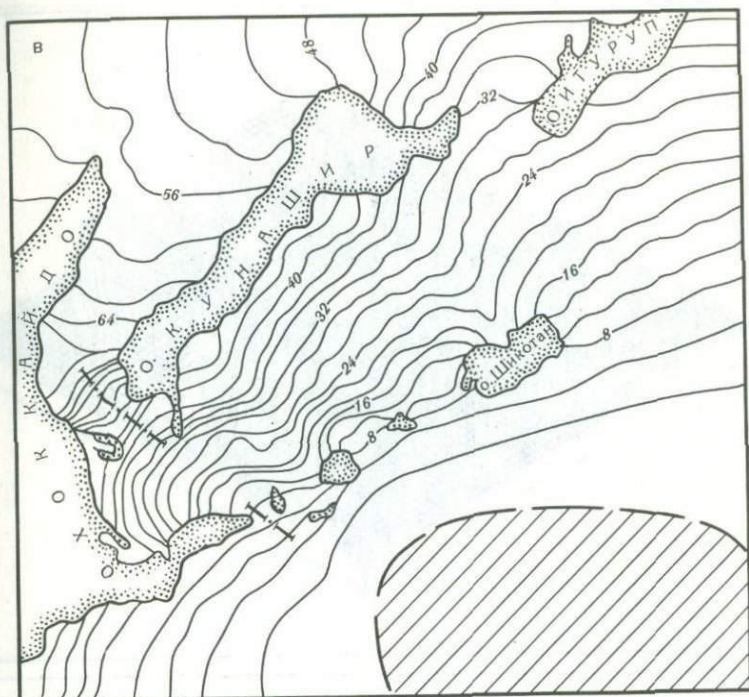
Р и с. 3. Схема подводного рельефа района юга Курильских островов
Горизонтальный масштаб в 50 раз больше вертикального

ное, так что почти ко всему западному побережью Кунашира волна под-
ходит с севера.

Кинематическая картина распространения цунами от источника типа
сдвиговой подвижки, ориентированной также в меридиональном направ-
лении, почти не изменяется (рис. 4, б), несмотря на то, что начальное
возвышение уровня океана имеет в этом случае существенно иную
форму.

При изменении ориентации источника типа взбросовой подвижки
на 90° (рис. 4, в) положение фронтов волн для момента времени $t >$
 > 20 мин изменяется не более чем на $15-20^{\circ}$, поскольку рельеф дна
обладает собственным фокусирующим действием, изменяя по мере рас-
пространения волны первоначальную диаграмму направленности источ-
ника. О влиянии этого же эффекта на высоты волн позволяют судить
данные таблицы, из которых видно, что высоты волн у побережья изме-
няются не более чем в 2 раза при изменении простираения разлома на 90° ,
в то время как при учете только диаграммы излучения источника этот
эффект должен быть значительно сильнее.





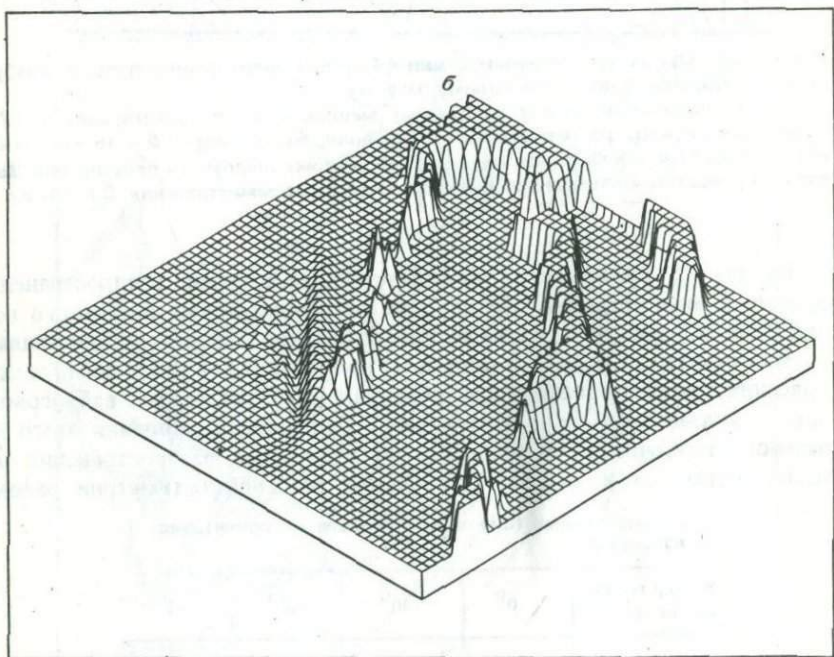
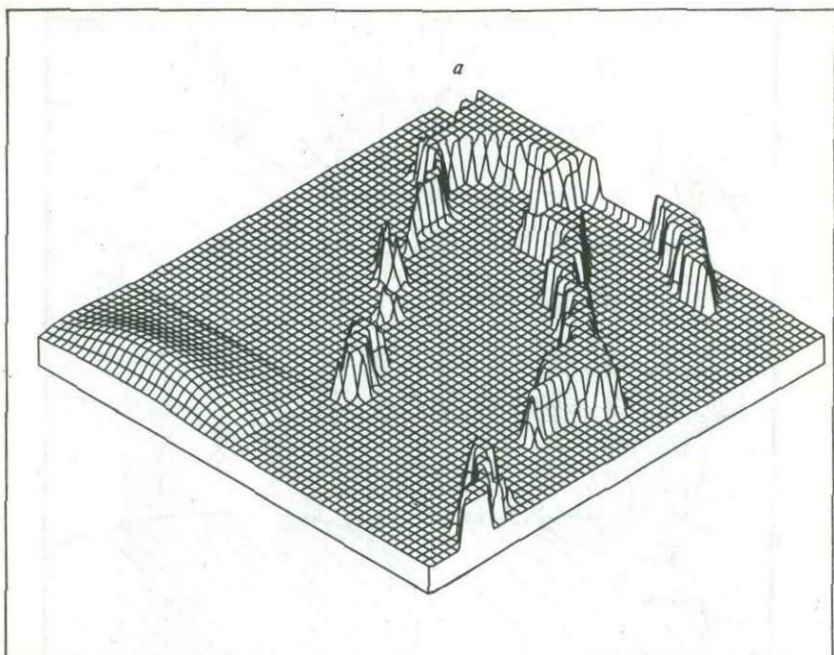
Р и с. 4. Карты изохрон (сечение 2 мин 40 с) переднего фронта цунами, возбужденных смещениями по вертикальному разлому

а – взбросовая подвижка по разлому меридионального простирания (1–3 – точки, для которых рассчитывалась высота воли, см. таблицу); *б* – то же, сдвиговая подвижка; *в* – взбросовая подвижка по разлому широтного простирания. Заштрихована область начального возвышения воды после землетрясения, $\Delta t = 100$ с

На рис. 5 представлена пространственная картина распространения цунами в южном районе Курильских островов. Форма начального возвышения поверхности океана в эпицентральной области рассчитывалась по программе, описанной в разделе 1, на время $\Delta t = 100$ с после землетрясения, моделировавшегося вертикальным разломом взбросового типа с указанными выше параметрами. Дальнейшая эволюция этого начального возвышения вычислялась по программе распространения цунами, описанной в разделе 2, с учетом реальной батиметрии района.

Высота цунами (см) в зависимости от ориентации
взброса φ

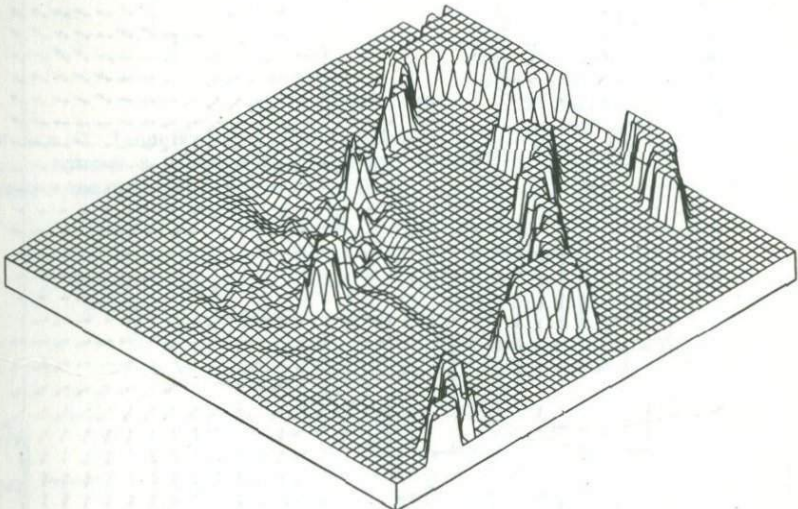
Номер точки на рис. 4, <i>а</i>	0°	30°	60°	90°
1	48	82	86	64
2	34	46	43	26
3	52	86	88	52



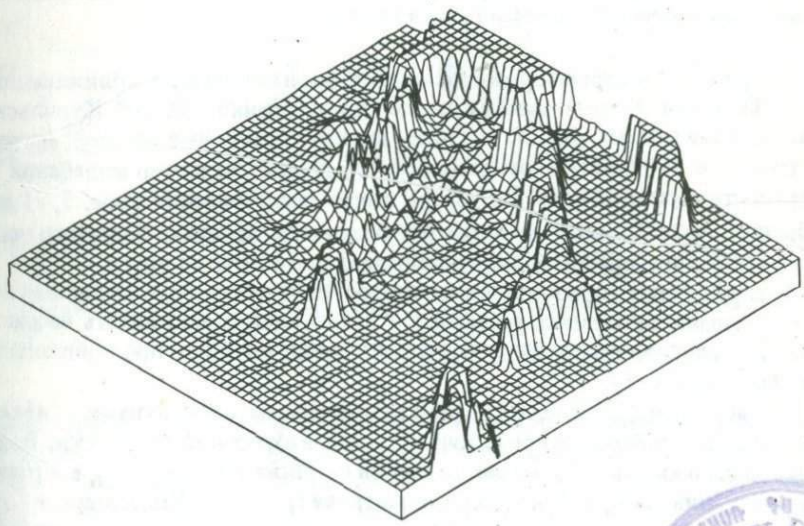
Р и с. 5. Форма начального возвышения поверхности океана в эпицентральной области через 100 с после землетрясения (*a*) и волновая картина через 16 мин (*б*), 42 мин (*в*) и 2 ч 20 мин (*г*) после землетрясения

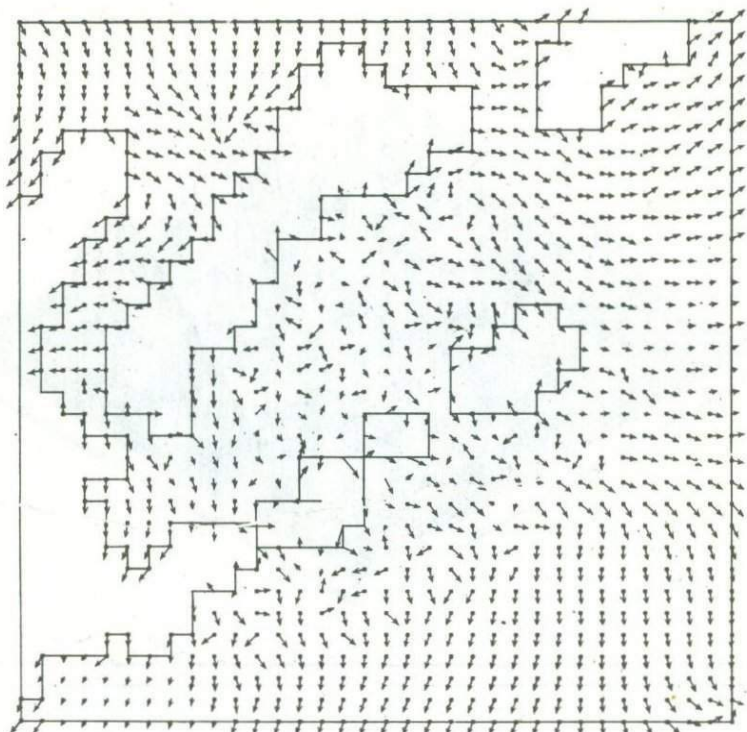
2367

6



2





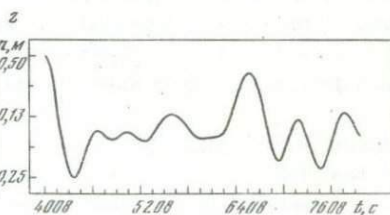
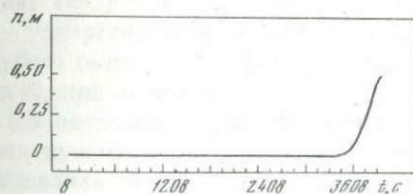
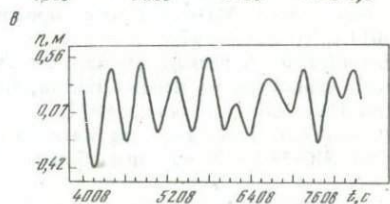
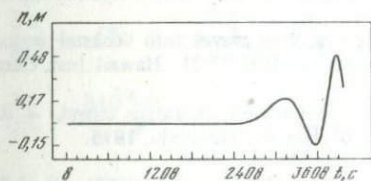
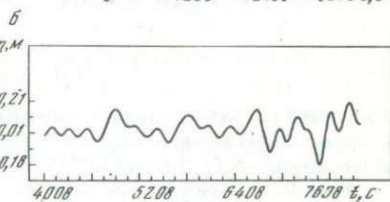
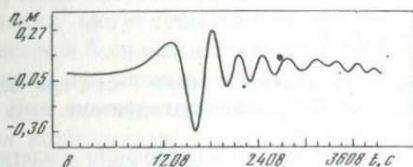
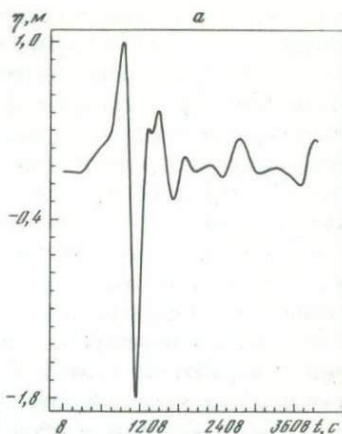
Р и с. 6. Распределение горизонтальных скоростей течения, обусловленных волнами цунами, на момент времени $t = 2 \text{ ч } 15 \text{ мин}$

На рис. 5, б виден сформировавшийся фронт цунами, приближающийся к о. Шикотан. Форма цунами после прохождения Малой Курильской гряды показана на рис. 5, в. Здесь видны отраженные от этой системы островов и уходящие в открытый океан волны. Характер колебаний поверхности океана спустя $2 \text{ ч } 20 \text{ мин}$ после землетрясения (рис. 5, г) приобретает весьма сложный характер благодаря наличию большого числа отраженных от берегов волн, накладывающихся друг на друга.

Распределение горизонтальных скоростей течений, обусловленных волнами цунами, на момент времени $t = 2 \text{ ч } 15 \text{ мин}$ можно видеть на рис. 6, где они изображены в виде векторов, длина которых пропорциональна величине скорости.

На рис. 7 представлены расчетные мареограммы волн цунами у некоторых пунктов побережья при источнике типа взбросовой подвижки. Волны наибольшей высоты (2,8 м) наблюдаются на ближайшем к очагу восточном берегу о. Шикотан в районе бухты Димитрова (рис. 7, а). Колебания в этой точке начинаются с повышения уровня океана до 1 м, затем следует спад до отметки $-1,8 \text{ м}$, все последующие волны имеют значительно меньшую амплитуду. Период первого колебания составляет около 12 мин, период последующих колебаний оценить трудно из-за их сложного характера, можно лишь отметить тенденцию к его уменьшению.

Р и с. 7. Теоретические мареограммы волн цунами в случае взбросовой подвижки для пунктов 1-4 (см. рис. 4,б)



Мареограмма для пункта 2, расположенного на противоположном берегу о. Шикотан вблизи бухты Малокурильская, приведена на рис. 7, б. Первая волна здесь тоже является положительной с тем же периодом, но имеет значительно меньшую высоту — в пределах 0,6 м. Экранирующее воздействие острова, даже такого небольшого по размерам, как Шикотан, приводит к уменьшению высоты волн в 4-5 раз.

В пункте, расположенном на восточном побережье о. Кунашир, колебания начинаются спустя 40 мин после землетрясения с небольшого (20 см) подъема уровня воды. Наибольшую высоту имеет вторая (0,9 м),

за ней следует серия волн примерно одинаковой амплитуды. Период первого колебания 15 мин, последующих — 8—10 мин (рис. 7, в).

Вблизи пос. Южно-Курильск максимальную высоту имеет первая волна, которая сопровождается серией мелких волн, образовавшихся, по-видимому, в результате взаимодействия падающей и отраженной от берега волн. Следующая волна с амплитудой 0,40 м появляется только через 50 мин после первого вступления (рис. 7, г).

Полученные в настоящей работе результаты фактически сводятся к реализации метода расчета теоретических мареограмм для различных точек побережья с учетом реальной батиметрии океана и наиболее вероятных параметров очага подводного землетрясения. Данные о распределении относительных высот цунами вдоль побережья, полученные на основе анализа мареограмм, могут служить хорошей теоретической основой для работ по цунамирайонированию побережья. Они могут быть также использованы для определения тех областей в океане, возникновение цунами в которых наиболее опасно для данного участка побережья.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гусяков В.К.* Возбуждение волн цунами и океанических волн Релея при подводном землетрясении. — В кн.: Математические проблемы геофизики, вып. 3, Новосибирск, ВЦ СО АН СССР, 1972.
2. *Гусяков В.К.* О связи волн цунами с параметрами очага подводного землетрясения. — В кн.: Математические проблемы геофизики, вып. 5, ч. 1. Новосибирск, ВЦ СО АН СССР, 1974.
3. *Loomis H.G.* A package program for time-stepping long waves into coastal regions with application to Haleiwa Harbor, Oahu. — Report HIG-72-21, Hawaii Inst. Geophys. Univ. Hawaii, Honolulu, 1972.
4. *Bernard E.N.* Linearized long wave numerical model of the Hawaiian Island. — Report HIG-75-13, Hawaii Inst. Geophys. Univ. of Hawaii, Honolulu, 1975.

**О НАПРАВЛЕННОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ВОЛН ЦУНАМИ,
СВЯЗАННОЙ С КРУПНОМАСШТАБНЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ
РЕЛЬЕФА ДНА**

При изучении распространения волн цунами от очага возбуждения чрезвычайно важным представляется вопрос о направленности излучения энергии этих волн в связи с реальной топографией дна океана.

Обычное в теоретических моделях предположение о постоянстве глубины бассейна приводит к изотропному излучению. В реальных условиях могут существовать избранные направления, по которым распространяется большая часть энергии. Концентрация излучаемой энергии в узких пучках приводит к многократному увеличению амплитуды волны.

При исследовании волновых движений с параметрами, характерными для волн цунами в открытом море, обычно используются уравнения линейной теории длинных волн:

$$\frac{\partial u}{\partial t^*} - f^*v = -g \frac{\partial \xi}{\partial x^*}, \quad \frac{\partial v}{\partial t^*} + f^*u = -g \frac{\partial \xi}{\partial y^*}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t^*} + \frac{\partial (\bar{h}^*u)}{\partial x^*} + \frac{\partial (\bar{h}^*v)}{\partial y^*} = F^*(x^*, y^*, t^*),$$

где u, v — проекции вектора скорости на оси декартовой системы координат (x^*, y^*) , ξ — отклонение уровня от невозмущенного положения, g — ускорение силы тяжести, f^* — параметр Кориолиса, t^* — время, h^* — глубина океана, F^* — функция, характеризующая воздействие подвижки дна на слой жидкости.

До последнего времени очень слабо изучен механизм возбуждения волн цунами в эпицентральной области. Имеющиеся теоретические исследования ограничиваются поршневой моделью землетрясения, учитывающей лишь малые вертикальные смещения дна. Связь между параметрами реального подводного землетрясения, включающего в себя наличие разломов, оползней, конечных вертикальных и горизонтальных подвижек дна, и характеристической функцией F^* до сих пор не известна. Поэтому F^* задается обычно из полуэмпирических соображений.

Попытки интегрирования системы (1) наталкиваются на непреодолимые математические и вычислительные трудности. Это связано, во-первых, с существенно неустановившимся характером движения и, во-вторых, с наличием в уравнениях переменных коэффициентов.

Теоретические исследования неустановившихся процессов исчерпываются моделями бассейна постоянной глубины, ограниченного прямо-

линейным берегом, и бассейна со скачкообразным изменением глубины [1, 2].

Математическая проблема существенно упростилась бы, если рассматривать периодические по времени движения. Однако применимость результатов, полученных для периодических движений, к неустановившимся волнам весьма проблематична. Имеются свидетельства, что такая подмена может приводить не только к количественным, но и качественным расхождениям. В работах [1, 2] обнаружен эффект захвата волн перепадами глубины, отсутствующий в периодических процессах. Однако по оценкам этих авторов энергия захваченных волн невелика, и эти эффекты, по-видимому, не вносят существенного вклада в энергетику распространяющихся волн цунами.

Существующие практические расчеты по цунамирайонированию основаны на использовании гипотезы локальности, согласно которой скорость волны в данной точке акватории определяется лишь местной глубиной океана, и закона Грина для увеличения амплитуды волны при уменьшении глубины бассейна. Оба эти предположения строго обоснованы только для периодических по времени волн в бассейне с медленно меняющейся глубиной [3].

В настоящей работе используются эти же предположения, но последовательно проводимые идеи геометрикооптического приближения позволяют дать простую методику определения наиболее цунамиопасных зон.

Рассматриваются волновые движения, для которых зависимость всех функций от времени содержит множитель $\exp(i\sigma^*t^*)$, где σ^* — круговая частота. Вводя характерную глубину океана H , определим длину исследуемых волн

$$a = \sqrt{gH/(\sigma^{*2} - f^{*2})}.$$

Представим дно океана как совокупность участков, глубина каждого из которых мало меняется на расстояниях порядка длины волны. При переходе с одного участка на другой глубина меняется скачком. Таким образом, области с большими градиентами глубины стягиваются в линии разрыва глубин.

На участках непрерывности глубину океана можно записать в виде

$$h^*(x^*, y^*) = Hh(x^*L^{-1}, y^*L^{-1}), \quad L \gg a,$$

где L — характерный горизонтальный масштаб рельефа дна.

Введем безразмерные переменные $(x, y) = L^{-1}(x^*, y^*)$, $t = (\sigma^*a/L)t^*$ и новую неизвестную функцию $Z = \sqrt{h} \xi$.

Система (1) легко приводится к одному уравнению относительно функции Z :

$$K(Z) = \Delta Z + 2if \frac{c_y}{c} Z_x - 2if \frac{c_x}{c} Z_y + \left(\frac{\lambda^2}{c^2} - \frac{\Delta c}{c} \right) Z = F, \quad (2)$$

где $c = \sqrt{h}$ — безразмерная скорость распространения волн, $f = f^*/\sigma^*$ — безразмерный параметр Кориолиса, $\lambda = L/a$, $F = \lambda^2 H/i\sigma^* c F^*$, Δ — оператор Лапласа.

Решение полученной задачи (2) при естественных условиях излучения можно записать, используя функцию Грина:

$$Z(M) = -\int_S G(M, M_0) F(M_0) dM_0, \quad M = (x, y), \quad M_0 = (x_0, y_0), \quad (3)$$

где S — область, в которой задана возмущающая сила F , $G(M, M_0)$ — решение уравнения

$$K(G) = -\delta(M, M_0), \quad (4)$$

δ — дельта-функция Дирака.

Безразмерная величина λ в рассматриваемой задаче является большим параметром, что дает возможность построить приближенное решение, опираясь на хорошо разработанные методы геометрикооптического приближения. Следует отметить, что получаемая асимптотика функции Грина должна быть равномерно пригодна как в окрестности точки M_0 , так и на достаточно больших расстояниях от нее.

Следуя работе [4], представим функцию $G(M, M_0)$ в виде формального разложения

$$G(M, M_0) = \sum_{n=0}^{\infty} U_n(M, M_0) \Psi_n(\lambda, \tau), \quad (5)$$

где U_n и $\tau = \tau(M, M_0)$ — неизвестные медленно меняющиеся функции,

$$\Psi_n(\lambda, \tau) = e^{n\pi i} (2\tau/\lambda)^n H_n^{(2)}(\lambda\tau).$$

Из свойств функций Ганкеля легко следует справедливость соотношений

$$\partial \Psi_n(\lambda, \tau) / \partial \tau = -2\tau \Psi_{n-1}(\lambda, \tau), \quad \lambda^2 \Psi_n = 4(1-n)\Psi_{n-1} - 4\tau^2 \Psi_{n-2}.$$

Полученные формулы дадут возможность представить выражение для $K(G)$ в виде ряда по функциям $\Psi_n(\lambda, \tau)$ с коэффициентами, не зависящими от λ . Учитывая, что при $\lambda \rightarrow \infty$

$$\Psi_{n+1} / \Psi_n = O(\lambda^{-1}),$$

получим, что коэффициент при каждой функции $\Psi_n(\lambda, \tau)$ должен равняться нулю. Подставляя разложение (5) в уравнение (4), получаем уравнение эйконала

$$(\nabla\tau)^2 = c^{-2}$$

и рекуррентную систему равенств

$$4\tau \nabla\tau \nabla U_n + U_n \left[\Delta\tau^2 + \frac{4(n-1)}{c^2} + \bar{P} \nabla\tau^2 \right] = \Delta U_{n-1} +$$

$$+ P \nabla U_{n-1} - \frac{\Delta c}{c} U_{n-1}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad U_{-1} = 0,$$

$$U_0(M, M_0) |_{M=M_0} = -\frac{i}{4}, \quad \bar{P} = 2if \left(\frac{c_x}{c}, -\frac{c_y}{c} \right). \quad (6)$$

Как известно, решение уравнения эйконала имеет наглядный физический смысл. Рассмотрим функционал Ферма $\int_{M_0}^M \frac{dS}{c(M)}$, который представляет собой время, необходимое для перемещения из точки M_0 в точку M и рассчитанное для всевозможных путей, соединяющих эти точки. Экстремальными функционала Ферма или лучами называются линии, на которых функционал принимает наименьшее значение. Можно показать, что функция $\tau(M, M_0) = \int_{M_0}^M \frac{dS}{c(M)}$, где интегрирование проводится по лучу, удовлетворяет уравнению эйконала. Таким образом, $\tau(M, M_0)$ — это минимальное время, необходимое для перемещения из точки M_0 в точку M .

Для решения уравнений (6) удобно перейти к лучевым координатам. Рассмотрим семейство лучей, выходящих из точки M_0 , т.е. центральное поле лучей. Естественным параметром, определяющим положение точки на луче, является эйконал. Для того чтобы однозначно определить луч, выходящий из точки M_0 , достаточно задать, например, угол α между лучом и осью x в точке M_0 .

Таким образом, существует окрестность точки M_0 , в которой декартовы координаты однозначно связаны с лучевыми координатами α, τ . В лучевых координатах уравнения (6) принимают вид

$$4\tau \frac{\partial U_n}{\partial \tau} + U_n \left[\Delta \tau^2 + \frac{4(n-1)}{c^2} + \bar{P} \nabla \tau^2 \right] = \Delta U_{n-1} + \bar{P} \nabla U_{n-1} - \frac{\Delta c}{c} U_{n-1}.$$

В полученном уравнении переменные разделяются, и оно может быть проинтегрировано.

Возникающие при интеграции произвольные постоянные определяются из условия аналитичности функций $u_n(M, M_0)$ в точке M_0 . Как показано в [4], аналитичность коэффициентов разложений обеспечивает равномерно малую невязку в окрестности точки M_0 . Построенная асимптотическая схема позволяет последовательно с помощью квадратур определить наперед заданное число членов разложения (5).

Если ограничиться старшим членом, асимптотика функции Грина рассматриваемой задачи имеет вид

$$G(M, M_0) \approx -\frac{i}{4} \exp \left\{ -\int_0^\tau \frac{\Delta \tau^2 - \frac{4}{c^2} + \bar{P} \nabla \tau^2}{4\tau} d\tau \right\} H_0^{(2)}(\lambda \tau) \exp(i\lambda t). \quad (7)$$

Легко показать, что для бассейна постоянной глубины формула (7) дает точное выражение фундаментального решения уравнения Гельмгольца.

Несмотря на целый ряд существенных упрощений, полученное решение еще далеко от простой расчетной схемы. Это связано с необходимостью интегрирования сложного нелинейного уравнения эйконала. Значительно проще разрешается эта проблема, если скорость c зависит только от одной пространственной координаты или от линейной комбинации пространственных координат.

В этом случае ход лучей определяется простым дифференциальным уравнением и нахождение эйконала сводится к квадратурам. Пусть в области D скорость $c = c(lx + my)$. С помощью поворота системы координат $x_1 = x \cos \gamma + y \sin \gamma$, $y_1 = -x \sin \gamma + y \cos \gamma$ всегда можно представить скорость как $c = c(y_1)$. Можно показать, что луч, проходящий через точку (x_1^0, y_1^0) и наклоненный под углом a к оси x_1 , определяется соотношением

$$x_1 - x_1^0 = \int_{y_1^0}^{y_1} \frac{\cos a dy}{\sqrt{c_0^2/c^2(y_1) - \cos^2 a}}, \quad c_0 = c(y_1^0).$$

Необходимо сформулировать условия продолжения решения через линию скачка глубины. Эйконал, очевидно, сохраняет непрерывность. При прохождении луча через линию скачка глубины появляются лучи, соответствующие преломленной и отраженной волнам. Преломление и отражение лучей происходят по обычным законам геометрической оптики: если обозначить углы между нормалью к линии скачка и падающим и преломленным лучами как a_1 и a_2 , то $\sin a_1 / \sin a_2 = c_1 / c_2$. Более тонкие условия склейки решений на линии скачка глубины, которые могут быть получены из условий непрерывности отклонения уровня и потока массы, здесь не приводятся ввиду их громоздкости.

Для практических целей достаточно построить ход лучей в изучаемой акватории. Наличие областей сгущения лучей, а также существование каустик, т.е. огибающих семейства лучей, будут указывать на повышенную цунамиопасность таких районов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Войт С.С., Себекин Б.И.* О влиянии силы Кориолиса на отражение неустановившихся длинных волн. — "Докл. АН СССР", 1970, 191, № 5.
2. *Войт С.С., Себекин Б.И.* Некоторые вопросы теории распространения волн цунами. — "Труды СахКНИИ", вып. 29, 1972.
3. *Себекин Б.И.* Об усилении крупномасштабных волн. — Труды 6-го Всесоюзного симпозиума по распространению и дифракции волн, Ереван, 1973.
4. *Бабич В.М.* О коротковолновой асимптотике решения задачи о точечном источнике в неоднородной среде. — ЖВММФ, 1965, 5, № 5.

ТРАНСФОРМАЦИЯ ВОЛН ЦУНАМИ НА ШЕЛЬФЕ И ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ

В настоящее время в связи с ограниченностью наблюдений основным средством изучения трансформации волн цунами является теоретический расчет, позволяющий получить необходимые для цунамирайонирования побережья сведения об изменении высот волн, энергии, видимых периодов [1]. С этой целью на основе общей теории длинных волн [2] была разработана математическая модель распространения волн цунами, которая применена к шельфу Курильских островов и южной Камчатки.

Численным методом решалась система уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{U^2}{H} \right) + gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} &= -b\tau, \\ b \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где U — расход в направлении оси волновой трубки, ζ — отклонение уровня, b — ширина волновой трубки, $H = (F + b\zeta)$, F — сечение волновой трубки, $\tau = -\lambda U$ — придонное трение.

Параметры волновых трубок определялись по предварительно построенным рефракционным диаграммам.

Система (1) решалась при следующих граничных условиях: у берега на 10-метровой изобате — полное отражение (непротекание):

$$U|_0 = 0,$$

на мористом конце волновой трубки — свободный уход волны:

$$U|_x = \zeta b \sqrt{gh}.$$

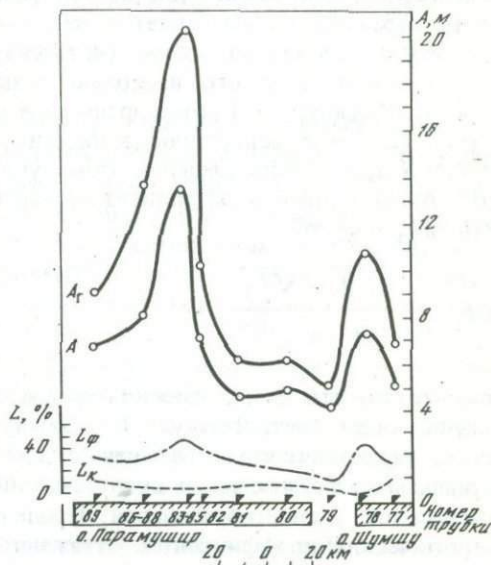
В качестве начального условия задавалось исходное возмущение уровня в пределах трубки $\zeta(x, t = 0) = \zeta(x)$ высотой 2 м, что соответствует наиболее сильным цунами.

Такими одномерными расчетами охвачен шельф Курильских островов и Камчатки от Авачинского залива до о. Кунашир. Для каждой волновой трубки были получены амплитуды A волн на 10-метровой изобате, видимые периоды, энергия, вид колебаний вблизи берега, время подхода волны и т.п. Результаты позволили составить предварительную схему цунамирайонирования указанной зоны по высотам и периодам волн цунами на 10-метровой изобате. Кроме того, был получен довольно боль-

шой материал для анализа основных закономерностей трансформации цунами на шельфе.

Основными проявлениями трансформации волны на шельфе являются изменение высоты волны, связанное с изменением глубины (эффект Грина) и рефракционным изменением ширины волновой трубки, а также формирование из начального одиночного возмущения цуга волн. Оба эти процесса связаны между собой и имеют существенное значение для определения степени опасности, вызванной подходом волны цунами. Выполненные расчеты показали значительную изменчивость характера колебаний уровня в различных точках Курило-Камчатского побережья даже в случае однородных условий в зоне очага.

Р и с. 1. Распределение амплитуд A и потерь энергии вдоль побережья (L_{Φ} — суммарные потери; L_{κ} — за счет сосредоточенного отражения)



Главными факторами распределения вдоль берега энергии и высот одиночных волн цунами являются эффект Грина и рефракция. Оценить их влияние можно с помощью формулы

$$A_T = A_h \sqrt[4]{h_1/h_2} \sqrt{b_1/b_2}, \quad (2)$$

где h — глубина, b — ширина волновой трубки, A_h — амплитуда волны в точке 1, A_T — амплитуда волны в точке 2 согласно формуле Грина.

Существует также более сложная формула Бровикова [3], в которой вводятся члены, учитывающие влияние трения и деформации волны. Однако, как показали расчеты, результаты, полученные по этой формуле для изобаты 10 м, практически совпадают с результатами, полученными по формуле (2). Величины A_T были найдены для тех же трубок, для которых численно решались уравнения (1). Весьма характерной чертой распределения величин A_T и A оказалось подобие их хода вдоль

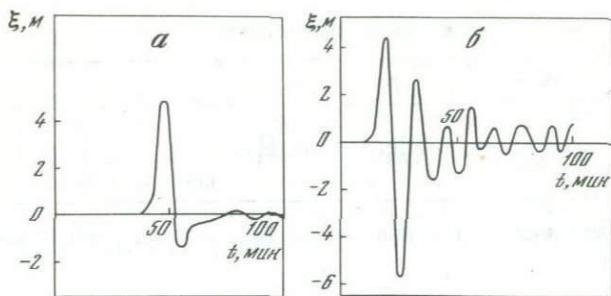
берега, причем резкие пики в обоих случаях приурочены к местам рефракционной концентрации энергии. Из рис. 1 видно, что величины подъемов по Грину повсеместно превышают подъемы уровня, которые дает гидродинамический расчет в среднем на 30–50%. В некоторых случаях эта разница еще больше. Различие величин A и A_T вызвано прежде всего потерей волновой энергии, всегда происходящей в реальных условиях. Расчеты показали, что суммарные потери составляют 45–75% от первоначальной энергии волны.

Основной причиной потерь волновой энергии является отражение. Можно выделить отражение двух типов. Первый — сосредоточенное отражение, которое происходит за счет резких перепадов глубин. В этом случае отраженная волна имеет те же периоды и форму, что и падающая. Амплитуда отраженной волны (интенсивность отражения) в реальных условиях зависит от того, насколько резко выражен уступ дна. Как показал К. Каджиура [4], сосредоточенное отражение происходит и в том случае, если отношение протяженности участка с заданным перепадом глубин к длине подходящей к этому участку волны меньше или равно 0,05. Амплитудный коэффициент отражения в этом случае выражается простой формулой

$$r_{1,2} = \frac{\sqrt{h_2} - \sqrt{h_1}}{\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}} \quad (3)$$

Если же это отношение имеет большую величину, то интенсивность отражения ослабевает. Формула К. Каджиуры для этого случая соответствует параболическому изменению дна на участке перепада глубин. В реальных условиях такая аппроксимация изменения рельефа не всегда оказывается удовлетворительной. Прделанная таким образом оценка энергетических коэффициентов отражения для расчетных профилей дала величины r_{Σ} , не превышающие 0,20. Сравнение этих значений с полученными величинами общих энергетических потерь позволяет предположить, что фактическое отражение было более интенсивным. Кроме того, занижение коэффициента отражения, по-видимому, есть результат не только ограниченности применения методики К. Каджиуры к реальному рельефу дна, но и некоторого субъективизма при выделении на профиле наиболее резких уступов дна.

Наряду с сосредоточенным отражением при движении волны на наклонном дне происходит непрерывное так называемое размазанное отражение [5]. Оно имеет меньшую интенсивность и зависит от уклона дна и глубины на данном участке профиля. Чем больше уклон и меньше глубина, тем больше энергии уходит на отражение. Эффект размазанного отражения приводит к образованию долгопериодных денивеляций уровня, так как период отраженной волны в этом случае будет определяться временем прохождения волной шельфовой зоны. Асимметрия формы волнового образования, вызванная тем, что у берега отражение более интенсивное, чем в глубокой части профиля, зависит от направления



Р и с. 2. Колебание уровня у берега при различной интенсивности отражения

а — о. Парамушир; б — о. Расшуа

распространения подходящей волны (в сторону увеличения или уменьшения глубин). Сочетание сосредоточенного и размазанного отражений приводит к формированию различного, иногда достаточно сложного вида колебаний уровня у берега, к перестройке одиночной волны в цуг волн.

Как показал ряд дополнительных численных экспериментов, нелинейные эффекты и трение на рассматриваемых глубинах (расчет ограничивался изобатой 10 м) и при небольшой ширине шельфа несущественны.

Учитывая большое значение рефракции в перераспределении энергии цунами вдоль побережья и опыт выполненных расчетов, следует отметить необходимость возможно точнее определять положение очага относительно береговой черты. Пробные построения показали высокую чувствительность рефракционных диаграмм к положению исходного фронта, прежде всего к его ориентации.

Графики колебаний уровня у берега получены для районов с различным рельефом дна (рис. 2). В районе о. Парамушир отсутствует хорошо выраженный шельфовый уступ, и, следовательно, преобладающее значение для этого профиля должно иметь размазанное отражение. Другой график колебаний уровня относится к району, где шельфовая зона хорошо выражена (о. Расшуа), и здесь четко выражено сосредоточенное отражение. При сравнении этих расчетных мареограмм необходимо отметить разницу в характере колебаний уровня у берега, возникающую несмотря на задание одинаковых начальных условий. Колебания уровня в районе о. Парамушир определяются подъемом уровня, вызванным подходом основной волны. Вслед за повышением уровня наступает небольшое его понижение, которое можно объяснить эффектом размазанного отражения, проявляющегося при движении волны от берега в сторону открытого моря. Колебания уровня быстро затухают. Слабое улавливание энергии шельфом определяется небольшой интенсивностью сосредоточенного отражения на его морской границе. Потери энергии при движении волны от источника до изобаты 10 м, по которым можно судить об отражательных свойствах данного профиля, как показывает таблица, малы. Суммарные потери энергии L_{ϕ} составляют 21%, потери

Результаты расчетов по двум волновым трубкам

Трубка	A_s , м	A_r , м	L_f , %	L_k , %	A_r/A
80	4,82	6,10	21	6	1,27
118	4,52	9,08	73	14	2,01

на сосредоточенное отражение, по К. Каджиура, L_k оцениваются в 6%, $A_r/A = 1,27$.

В районе о. Расшуа (трубка 118) наличие хорошо выраженного уступа приводит к увеличению интенсивности отражения, причем возрастает роль сосредоточенного отражения. Суммарные потери волновой энергии возрастают до 73%, потери на сосредоточенное отражение — до 14% (см. таблицу). Появление на бровке шельфа интенсивного отражения приводит к формированию выраженного вторичного цуга волн, идущего вслед за первой основной волной. Волна, отразившись от берега, претерпевает вторичное отражение (в противофазе) на границе шельфа. Образовавшаяся волна вновь распространяется в сторону берега и отражается на прибрежных колебаниях уровня. Процесс повторяется до полного затухания отраженной волны. Таким образом, возникновение из одиночной волны цуга волн является результатом улавливания шельфом некоторой доли энергии, которой обладала пришедшая волна. Чем интенсивнее отражение на бровке шельфа, тем большая доля энергии будет захвачена шельфом и тем дольше будет происходить здесь колебательный процесс.

Вместе с тем надо учитывать, что из-за отражения на внешней границе шельфа в шельфовую зону будет приходить волна, обладающая значительно меньшим по сравнению с исходным энергосодержанием. В нашем примере (трубка 118) высота подъема уровня без учета потерь равняется 9,08 м (величина A_r), между тем гидродинамический расчет дает величину подъема лишь 4,52 м. (В первом случае, для трубки 80, соответствующие величины равны 6,1 и 4,82 м.) Таким образом, в случае одиночных волн цунами более опасными являются профили дна первого типа. Рассмотрим случай подхода к берегу не одной, а нескольких волн с одинаковой амплитудой — исходного цуга волн.

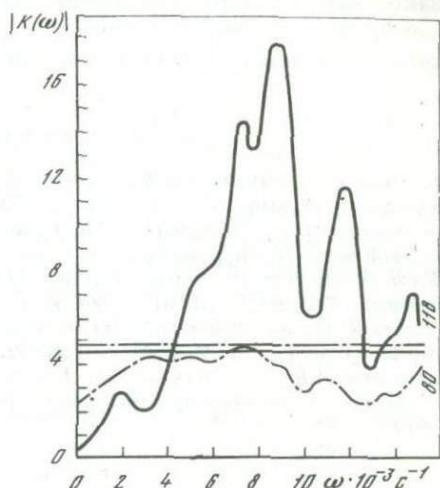
Если отражательные свойства профиля выражены слабо, то в момент подхода к берегу некоторого последующего гребня остаточное влияние предыдущей волны будет незначительно. Высота каждого гребня будет возрастать так, как если бы гребень представлял собой одиночную волну. Следовательно, высоты последовательно подходящих к берегу волн исходного цуга будут примерно одинаковыми. Если же отражение интенсивно, колебания уровня за счет образовавшегося вторичного цуга волн будут складываться с действием подходящего исходного цуга. В случае совпадения частот вторичного и исходного цугов за счет их наложения будет происходить рост амплитуды. Иными словами, на шельфе будут наблюдаться условия резонанса, если частота исходной волны, определяемая размерами очага, будет совпадать с частотой вторичного цуга,

зависящей от морфометрии и являющейся собственной частотой шельфа. Для количественной оценки возрастания высоты волны с учетом резонансных явлений для тех же профилей был произведен расчет амплитудно-частотных характеристик шельфа $|K(\omega)|$, показывающих изменение амплитуды бесконечной синусоидальной волны данной частоты ω после прохождения шельфовой зоны.

На рис. 3 показаны графики $|K(\omega)|$, полученные для трубок 80 и 118. Расчет производился для диапазона частот $0 \div 15 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Как и

Р и с. 3. Амплитудно-частотные характеристики для волновых трубок 80 и 118

Возрастание амплитуды одиночного импульса принято одинаковым для всех частот (прямые линии)



следовало ожидать, для трубки 80 величины возрастания волн различной частоты сравнительно мало отличаются друг от друга. Поскольку при отсутствии сосредоточенного отражения долгопериодная денивелиция (возникающая за счет размазанного отражения), направленная в сторону берега, всегда отрицательна, величина возрастания одиночного импульса (первой волны в цуге) для всех частот превышает установившиеся величины возрастания цуга волн. Резонансные пики усиления отсутствуют в отличие от графика $|K(\omega)|$, полученного для трубки 118.

Анализ амплитудно-частотных характеристик позволяет определить величины возрастания амплитуды волн данной частоты, выявить резонансные частоты, определить максимально возможное возрастание высоты волны.

Результаты одномерных расчетов приводят к заключению, что на шельфе южной части Камчатки и островов Шумшу и Парамушир резонансные явления выражены слабо. Напротив, в центральной части Курильской гряды частотные свойства шельфа необходимо учитывать при цунамирайонировании. Определение линейных размеров источника, соответствующих резонансным условиям в ряде соседних трубок, позволяет найти форму "максимально опасного очага", которая характеризует возможность появления максимальных подъемов уровня одновременно на всем протяжении исследуемого участка.

Выполненные двумерные расчеты подтверждают основные выводы о трансформации волн цунами на шельфе. В частности, хорошо иллюстрируется влияние рефракции, выражающееся в концентрации энергии на мысах и некоторых других эффектах. Сравнение одномерных и двумерных расчетов показало, что наиболее эффективной одномерная постановка оказывается в случае нормального подхода к берегу. При косом подходе отражение на бровке шельфа представляет собой более сложный процесс и приводит к образованию вдольбереговых потоков энергии. Однако при расчете распространения волн цунами от сравнительно удаленных от берега источников одномерные расчеты, в связи с ограниченностью памяти ЭВМ, остаются пока весьма полезным средством исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бухтеев В.Г., Некрасов А.В., Макаров В.А. Опыт математического моделирования волн цунами. — "Океанология", 1973, № 6.
2. Вольцингер Н.Е., Пясковский Р.В. Основные океанологические задачи теории мелкой воды. Л., Гидрометеиздат, 1968.
3. Иконникова Л.Н. Предельно большие цунами у советского побережья Тихого океана. — "Труды ДВНИГМИ", 1964, вып. 17.
4. Kajiura K. On the partial reflection of water waves passing over a bottom of variable depth. — Proc. Tsunami Meet. Assoc. Tenth Pacific Sci. Congr., Paris, 1963.
5. Некрасов А.В., Пясковский Р.В., Бухтеев В.Г. Исследование распространения и трансформации волн цунами методом расчета. — "Труды СахКНИИ", вып. 29, 1972.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАЛЬНОГО СЛУЧАЯ ЦУНАМИ

Сильное землетрясение 16 июня 1964 г. с эпицентром вблизи побережья Японии в Японском море вызвало цунами, известное под названием Ниигатского [1–4]. Многие характеристики этого цунами достаточно хорошо известны, поэтому его удобно использовать для проверки различных методов исследования цунами, в том числе математического моделирования [5]. Математическое моделирование может дополнить информацию об этом цунами в тех вопросах, по которым имеются недостаточные или разноречивые данные. Это относится, например, к виду исходного возмущения в очаге, трансформации этого возмущения и закономерностям формирования цуга волн.

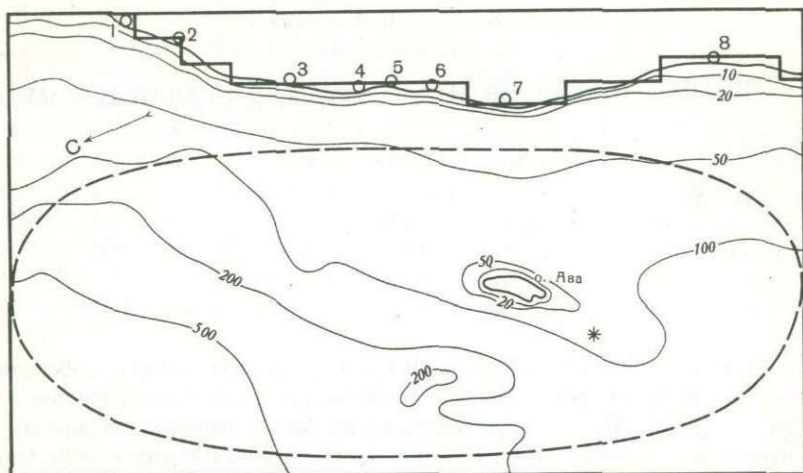
Примеры теоретических расчетов реальных цунами в реальных морских бассейнах единичны, один из них относится к Ниигатскому цунами [3].

И. Аида [3] решал двумерную линейную задачу без учета трения и силы Кориолиса. В целом этот численный эксперимент можно считать удачным, однако рассчитанные мареограммы иногда существенно отличаются от наблюдаемых. Кроме того, Аида не приводит в своей статье расчетных полей уровня и потоков и не анализирует закономерностей распространения и трансформации волны. Поэтому главной целью наших расчетов, выполненных с использованием двумерной нелинейной модели, было получение характеристик начального возмущения Ниигатского цунами вблизи берега и закономерностей его распространения и трансформации. Предполагалось также проверить возможность принятой для расчета методики.

Задача решалась в приближениях теории мелкой воды [5]. Использовалась следующая система уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{U^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{UV}{H} \right) &= fV - gH \frac{\partial \xi}{\partial x} - kU \sqrt{\frac{U^2 + V^2}{H^4}}, \\ \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{V^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{UV}{H} \right) &= -fU - gH \frac{\partial \xi}{\partial y} - \\ &- kV \sqrt{\frac{U^2 + V^2}{H^4}} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0,$$



Р и с. 1. Расчетная область. Плановое положение очага (штриховая линия) и мареографных точек (1-8)

где ξ — возмущение уровня, U, V — слагающие потока, $H = h + \xi$, h — глубина, $k = 2,6 \cdot 10^{-3}$ — коэффициент трения, f — параметр Кориолиса, g — ускорение силы тяжести.

Уравнения (1) аппроксимировались в конечных разностях и численно решались на ЭВМ М-222. Расчеты охватывали область очага Ниигатского цунами и прилегающую часть побережья Японии (рис. 1). Граничные условия были следующими. На берегу принималось условие полного отражения волны ($V_n = 0$). На жидких границах расчетной области ставилось условие свободного ухода волны ($V_n = \pm \xi \sqrt{gH}$). Начальные условия при $t = 0$ имели вид $U(x, y, 0) = 0$, $V(x, y, 0) = 0$, $\xi(x, y, 0) = \xi_0(x, y)$.

Очаг Ниигатского цунами, как известно, имел в плане форму эллипса размером 90 x 35 км, вытянутого вдоль побережья Японии. Начальные положительные и отрицательные возмущения уровня, вероятно, распределялись в пределах эллипса достаточно сложным образом, но значительно преобладали поднятия. В выполненных расчетах использовались два варианта $\xi_0(x, y)$.

I вариант — простая форма очага; симметричный купол с максимальной высотой 2 м. Этот вариант позволяет лучше проследить в пределах расчетной области образование, перемещение и трансформацию различных волновых образований. Кроме того, форма очага в виде простого купола аналогична исследованной в работе [6], что позволяет сопоставить результаты.

II вариант — начальное возмущение сложной двугорбой формы высотой 3 м, что ближе к реальной форме возмущения [7].

Результаты расчетов получены в виде полей уровня и потоков для последовательных моментов времени, а также в виде рассчитанных мареограмм для восьми прибрежных пунктов (см. рис. 1). Начальное возмущение уровня распадается на две противоположно расходящиеся волны.

Одна из них распространяется от берега и таким образом постепенно уходит за пределы расчетной области. Другая подходит к берегу, испытывает полное отражение, после чего также уходит в открытое море. В пределах расчетной области сохраняются лишь волновые образования, захваченные за счет отражения от неоднородностей дна.

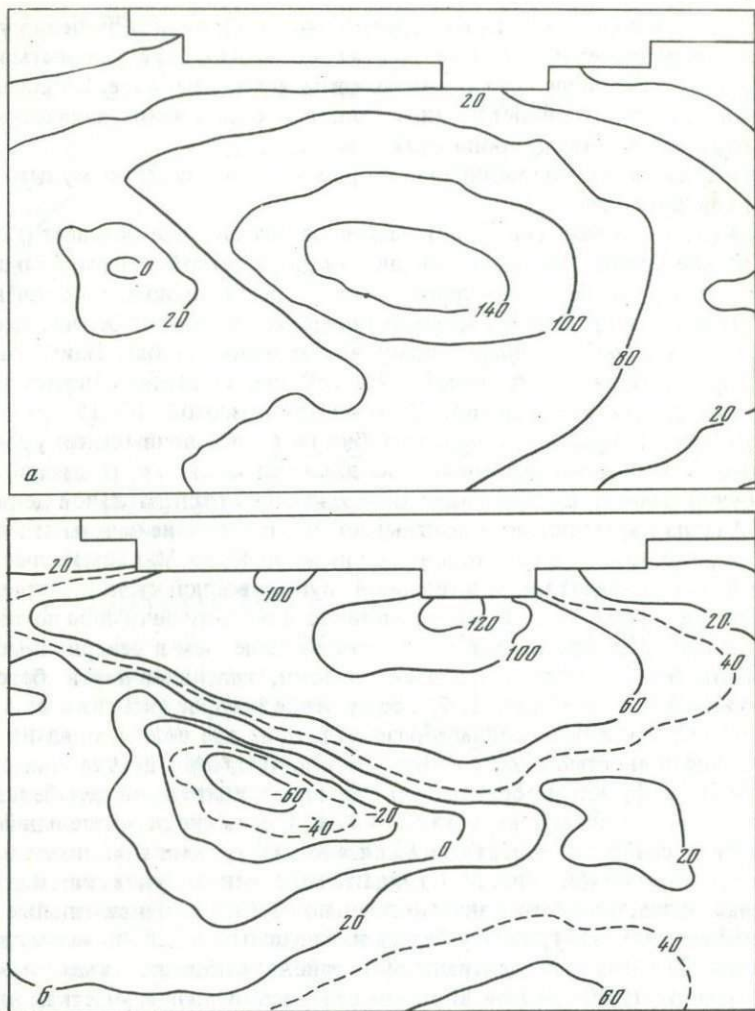
Рассмотрим более подробно трансформацию исходного возмущения в случае I варианта очага.

В момент $t = 4$ мин (рис. 2, а) начальное возмущение начинает распадаться на две волны. Наличие в северной части расчетной области больших глубин приводит к более быстрому растеканию начального возвышения в этой части области. Волна, распространяющаяся в сторону берега, разворачивается параллельно генеральному направлению изобат. Наибольшее возвышение уровня, достигающее 140–150 см, смещено относительно центра исходного возмущения. Возмущение высотой 10–15 см уже достигло берега. В районе больших глубин начальное возвышение уровня практически полностью разделилось на две волны, и на месте начального возвышения наметилась тенденция к образованию отрицательной денивеляции. Анализ карты потоков показывает, что растекание начального возмущения происходит во все стороны, но неравномерно. Максимальные величины потоков имеют место в северной глубоководной части и направлены на север и северо-запад. В центральной части области величины потоков близки к нулю. На юге потоки в 3–4 раза меньше, чем в северной части. Потоки от берега везде превышают потоки, направленные к берегу.

В момент $t = 8$ мин (рис. 2, б) возмущение распространилось по всей расчетной области и окончательно разделилось на две волны, одна из которых почти полностью ушла в сторону открытого моря, другая движется к берегу. За ее фронтом образовалась область отрицательной денивеляции с понижением уровня в центре до 60–75 см. Смещение отрицательной денивеляции к северу от центра очага связано с большими глубинами в северной части расчетной области. Отрицательная денивеляция, как и положительная волна, ориентирована параллельно изобатам. Максимальные положительные отметки уровня у берега наблюдаются в районе мареографной точки 7. По всему центральному району побережья имеет место подъем уровня до 80–130 см. В самом северном и южном участках побережья колебаний уровня еще не наблюдается.

В момент $t = 12$ мин (рис. 2, в) в пределах расчетной области осталась лишь волна, идущая в сторону берега. На месте исходного положительного возмущения наблюдается широкая отрицательная денивеляция. Она углубилась до –110 см. Фронт подходящей к берегу волны ориентирован вдоль побережья. Наибольшие положительные отметки уровня наблюдаются в центральной части побережья и достигают 198 см. Возмущение достигло самых крайних точек расчетной области. Повсюду первым является подъем уровня.

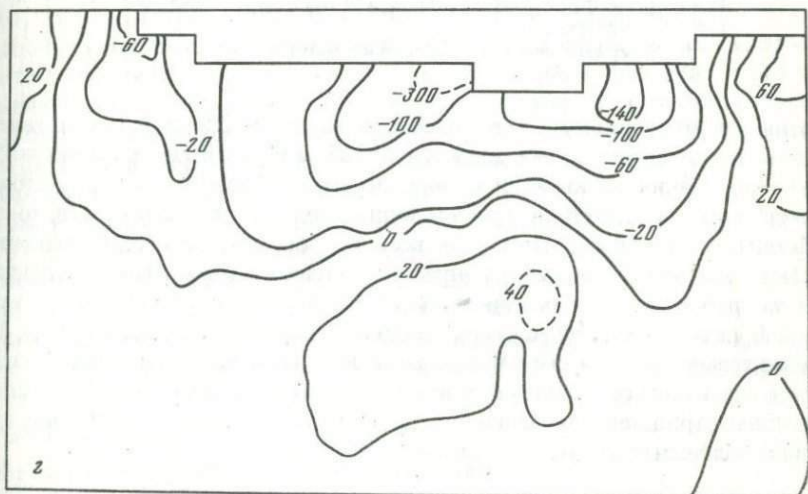
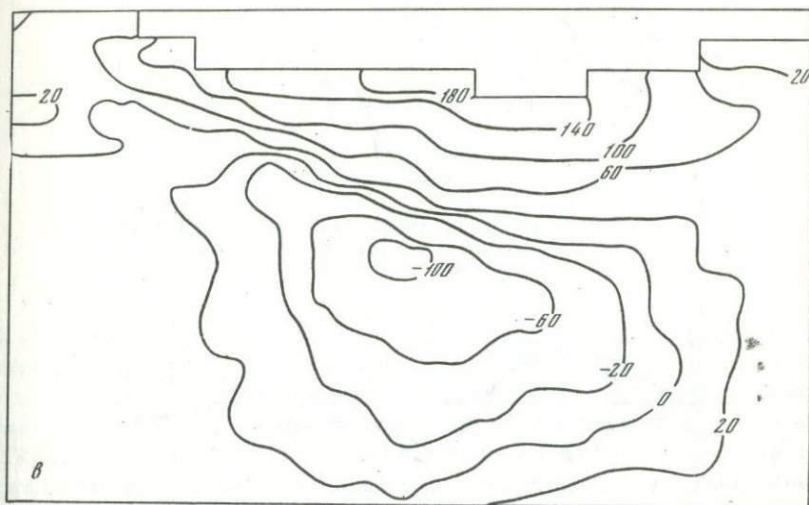
В момент $t = 28$ мин (рис. 2, г) отрицательная денивеляция охватывает значительную часть побережья. Гребень, отразившись от берега, перемещается в сторону открытого моря и достигает области начального возмущения. Однако его высота теперь более чем в 2 раза ниже исходной. Одной из причин уменьшения высоты гребня является частичный захват волновой



Р и с. 2. Поле уровня (см) в различные моменты времени
 $a-t=4$ мин; $b-t=8$ мин; $c-t=12$ мин; $d-t=28$ мин

энергии шельфом и образование вдоль береговых потоков. Захвату энергии мелководьем способствует косой подход волны к берегу, что, в свою очередь, обусловлено упоминавшимся разворотом волны вследствие неравномерности глубин. Таким образом, после подхода к берегу гребень делится на три части: одна уходит от берега в сторону больших глубин, а две другие распространяются вдоль побережья на север и юг. Такое разделение наблюдается уже при $t=20$ мин, а в момент $t=28$ мин распространяющиеся вдоль берега гребни переместились к границам расчетной области.

В дальнейшем рельеф водной поверхности становится довольно "пестрым". Отдельные волновые образования в виде положительных и отрица-

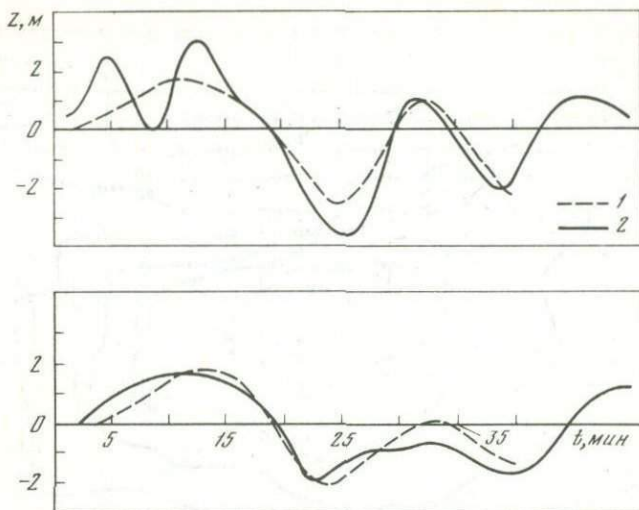


тельных денивеляций уровня перемещаются вдоль побережья и постепенно выходят из расчетной области. В центре очаговой области подъем уровня сменяется обширной зоной его понижения, образовавшейся в результате прихода отразившейся от берега отрицательной денивеляции.

Таковы главные закономерности распространения и трансформации исходного возмущения в случае Ниигатского цунами. Они мало зависят от вида исходного возмущения и являются общими для обоих рассчитанных вариантов $\xi_0(x, y)$.

Обратимся теперь к анализу расчетных мареограмм, полученных для восьми точек, расположенных вдоль побережья (табл. 1, рис. 3).

На побережье в пределах всей расчетной области наибольшую высоту имеет первая волна. Максимального значения она достигает примерно



Р и с. 3. Расчетные мареограммы для пунктов 7 (Имакава, а)
и 4 (Недзугасеки, б)
1 — I вариант очага; 2 — II вариант очага

против центра исходного возмущения, в точке 6 (220 см). С удалением от этой точки ее высота уменьшается до 105–110 см. Во всех точках побережья колебания начинаются с положительной фазы, с подхода гребня. Время подхода фронта и гребня волны зависит от удаленности точек наблюдения от очага цунами. Для всех мареограмм характерна сглаженность и близость по форме к синусоиде. Однако первая впадина, следующая за гребнем, в разных точках имеет различную протяженность во времени. В точках 1 и 4 она равна по продолжительности гребню, в точках 3 и 7 значительно меньше его. Абсолютные величины впадины также оказались в различном соотношении к высоте гребня (см. табл. 1). Наибольшей величины отрицательная денivelляция достигла в точке 6 (–370 см), где была максимальной и высота гребня.

Т а б л и ц а 1

Характеристики колебаний уровня в мареографных точках (I вариант очага)

Мареографная точка	Пункт	Время прихода, мин		Период первой волны, мин	Высота, см	
		фронт	гребень		гребень	впадина
1	Камо	12	21	32	+105	–90
2	Юра	9	17	23	+135	–90
3	Ацуми	2,5	12	23,5	+165	–110
4	Недзугасеки	2,5	13	30	+185	–210
5	Фуя	3	13,2	33,5	+197	–260
6	Нея	2,5	14,5	34,5	+220	–370
7	Имакава	1,5	11,2	28,5	+170	–250
8	Ивафуне	12	22	38	+110	–

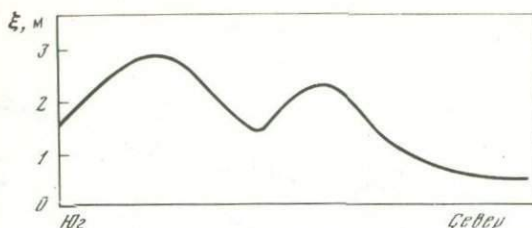


Рис. 4. Вид исходного возмущения (II вариант) вдоль продольной оси очага Ниигатского цунами [5]

Во II варианте расчета была использована более близкая к реальности сложная двугорбая форма очага (рис. 4). Сравнение данных табл. 1 и 2 показывает, что время прихода фронта первой волны и ее гребня, а также периоды практически не изменялись, однако характер колебаний уровня стал более сложным (см. рис. 3). Особенно это относится к пунктам, расположенным в южной части побережья. Здесь колебания значительно отличаются от плавной синусоиды. В точку 7, например, подходят сначала два горба, после которых подходит впадина. Это может быть объяснено только сложной формой исходного возмущения. Поскольку максимальные отметки уровня в зоне возмущения во втором варианте расчета стали значительно выше, то и высоты первой волны на берегу существенно возросли. Второй гребень почти во всех мареографных точках увеличился, но остался меньше первого. Ложбины углубились по сравнению с первым вариантом во всех точках, за исключением 4 и 5.

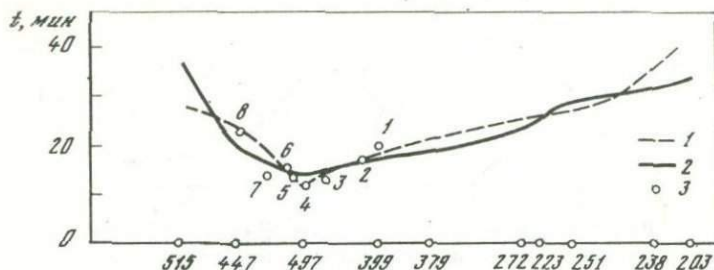
Таким образом, усложнение характера колебаний в случае II варианта очага приводит к значительному росту высоты первой и второй волн. Временные характеристики (время прихода фронта, время прихода гребня, периоды колебаний) изменяются незначительно.

Интересно сравнить результаты выполненных расчетов при I варианте очага с результатами электромоделирования Ниигатского цунами, прове-

Таблица 2

Характеристики колебаний уровня в мареографных точках (II вариант очага)

Мареографная точка	Пункт	Время прихода, мин		Период первой волны, мин	Высота, см	
		фронт	гребень		гребень	впадина
1	Камо	12	21	28	+100	-100
2	Юра	8	16,5	24	+140	-120
3	Ацуми	2	10	21	+175	-150
4	Недзугасеки	2	10	34	+170	-190
5	Фуя	2	12,5	35,5	+210	-240
6	Нея	2	13	36	+320	-410
7	Имакава	1	13	30	+300	-360
8	Ивафуне	10	19	39	+230	-180



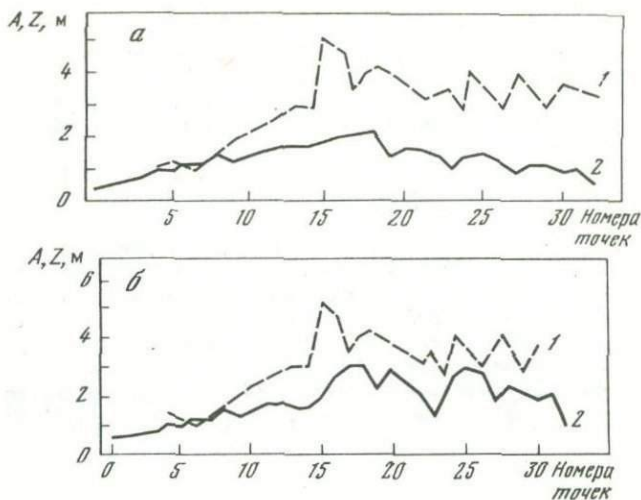
Р и с. 5. Момент прихода первого гребня
 1 — наблюдения; 2 — электромоделирование; 3 — расчет

денного ранее [4]. Величина области при электромоделировании была значительно больше, чем при численном расчете. Поэтому сравнение результатов проводилось лишь для прибрежного участка между точками 399—447 (рис. 5).

Как при численном, так и при электрическом моделировании волна достигла максимальных высот в прибрежной зоне на траверзе очага. И в том и другом случае максимальной была первая волна. Периоды волн, полученные при численном моделировании, оказались существенно меньшими (23—38 мин), чем при электромоделировании (46—60 мин). В обоих случаях воспроизводится характерный рефракционный разворот фронта волны. В случае численного расчета время прихода первого гребня лучше совпадает с наблюдениями, чем в случае электромоделирования (см. рис. 5).

Провести непосредственное сравнение результатов расчета с наблюдаемыми колебаниями уровня не удалось из-за отсутствия мареографных данных для района, прилегающего к очагу цунами. Из общего описания Ниигатского цунами известно, что в районе между Фуей (точка 5) и Ивафуне (точка 8) максимальной была первая волна, пришедшая через 10—20 мин после толчка. Эти цифры соответствуют времени добегания первого гребня, полученному из расчета. Кроме того, по данным наблюдений [7] колебания уровня вдоль побережья характеризуются двумя основными периодами: 20 и 40—50 мин. Расчетные величины периодов также можно объединить в две основные группы: 20—24 и 30—38 мин (см. табл. 2). Дальнейшее сравнение результатов расчетов и наблюдений приходилось проводить по некоторым косвенным параметрам. Например, использовались максимальные высоты затопления берега, при этом предполагалось, что высота затопления должна быть пропорциональна высоте подходящей волны.

Результаты расчета для первого варианта очага плохо совпадают с наблюдениями. Особенно это касается южной части побережья. Неудовлетворительное соответствие определяется прежде всего заданием формы начального возмущения, мало соответствующей действительной. Кроме того, необходимо отметить несовершенство самих натурных наблюдений, в результате чего данные, приводящиеся в различных литературных источниках, несколько не совпадают. Нами использовались материалы, взятые из работы [1] и представляющиеся наиболее полными. Кривые, построен-



Р и с. 6. Распределение высот заливания Z и высот волн A вдоль побережья для I (а) и II (б) вариантов очага
1 — наблюдения; 2 — расчет

ные по результатам расчетов и наблюдений, показаны на рис. 6, а. Коэффициент корреляции между этими кривыми в первом случае оказался равным всего лишь 0,35, хотя временные характеристики, зависящие в большей мере от положения и размеров очага, чем от его формы, совпали с наблюдениями достаточно хорошо. При задании в очаге цунами II варианта формы возмущения, более близкого к фактическому (при том же плановом положении границ очага), совпадение результатов расчетов и наблюдений существенно улучшилось. Особенно значительное возрастание высот волн произошло в южной части участка побережья (рис. 6, б). Величины высот волн на 10-метровой изобате по-прежнему оказались меньше максимальных высот затопления, однако коэффициент корреляции между этими величинами увеличился до 0,66. Учитывая приближенность расчетов, использование величин заплеска для сопоставления с высотой волны и вероятные ошибки наблюдений, можно полагать, что этот коэффициент для совокупности прибрежных мареографных точек достаточно высок.

Отметим, что специальные численные эксперименты показали, что вследствие близости очага Ниигатского цунами к берегу и особенностей рельефа дна учет сил Кориолиса и придонного трения не вносит существенных изменений.

Таким образом, осуществленный численный расчет Ниигатского цунами позволил проследить основные фазы развития процесса и объяснить их. Кроме того, выявлены сходство и различие при разной форме исходного возмущения. Проведено сравнение результата с данными электро моделирования. Значительное улучшение соответствия с наблюдениями связано с тем, что II вариант очага, очевидно, ближе к естественному. Результаты говорят о широких возможностях численного моделирования в рамках теории мелкой воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Соловьев С.Л., Го Ч.Н.* Каталог цунами на западном побережье Тихого океана. М., "Наука", 1974.
2. *Соловьев С.Л., Милитеев А.Н.* Проявление Ниигатского цунами 1964 г. на побережье СССР и некоторые данные об источнике волн. — В кн.: Проблема цунами. М., "Наука", 1968.
3. *Aida J.* Numerical experiments for the tsunami propagation the Nigata tsunami 1964 and Tokakchi-oki tsunami 1968. — "Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ.", 1969, 47, N 4.
4. *Aida J., Kadjiura K., Hatori T., Mamoi T.* A tsunami accompanied the Niigata earthquake of June 1964. — "Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ.", 1964, 42, N 4.
5. *Макаров В.А., Бухтеев В.Г., Усанкина Г.Е.* Цунами при различной форме исходного возмущения. — "Труды СахКНИИ", вып. 29, 1972.
6. *Вольцингер Н.Е., Пясковский Р.В.* Основные океанические задачи теории мелкой воды. Л., Гидрометеиздат, 1968.
7. *Некрасов А.В., Пясковский Р.В., Бухтеев В.Г.* Исследование распространения и трансформации волн цунами методом расчета. — "Труды СахКНИИ", вып. 29, 1972.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ПЕРИОДОВ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ
УРОВНЯ БУХТ НА ПРИМЕРЕ ЗАЛИВА КАСАТКА

Изучение волновых процессов в бухтах и на шельфе, вызываемых набегающей из глубоководной области одиночной или периодической волной, проводится обычно в рамках линейной теории длинных волн. При этом в качестве граничных условий задается уровень как функция времени в устье или в вершине бухты и равенство нулю нормальной производной от потенциала скорости на вертикальном берегу.

Такие задачи для бухт и заливов простой геометрической формы при линейном изменении глубины и ширины исследуемого эстуария решались аналитически Х. Ватанабе [1] и Р. Такахаси [2]. Для специального закона изменения глубины задача решалась М. Лонге-Хиггинсом [3]. При этом предполагалось, что волна в глубоководной области движется под углом к береговой линии.

Для бухт сложной геометрической формы и произвольного поперечного сечения аналитического решения найти не удастся, и задача, как правило, сводится к численному решению интегрального уравнения для потенциала скорости. К таким исследованиям относятся расчеты для круговой и прямоугольной гаваней [4], для шести бухт Гавайских островов [5], для связанных бассейнов [6, 7], для гаваней и заливов прямоугольной и сложной формы с постоянной и переменной глубиной [8, 9], для гавани постоянной глубины, соединенной с морем узким каналом [10]. В результате были рассчитаны коэффициенты усиления, представляющие собой отношение амплитуды волны в фиксированной точке гавани к амплитуде набегающей из бесконечности волны. Исследуется зависимость коэффициентов усиления от геометрической формы эстуария и элементов набегающей волны.

Показано, что волны с более коротким периодом имеют больший коэффициент усиления и, кроме того, большие коэффициенты усиления имеют место при определенных длинах падающих волн, не обязательно соответствующих частотам собственных колебаний акваторий.

Рассмотрим аналитико-численный метод, позволяющий исследовать коэффициенты усиления и частоты свободных колебаний симметричных эстуариев. Линеаризованные уравнения движения жидкости в симметричном эстуарии переменного поперечного сечения $s(x)$ имеют вид:

$$u_t = -g \zeta_x, \quad \zeta_t = -\frac{1}{b} (us)_x, \quad (1)$$

где u — горизонтальная компонента скорости частиц жидкости, ζ — отклонение уровня от невозмущенного состояния, b — ширина канала на свободной поверхности. Будем искать периодические по времени решения уравнений (1):

$$u(x, t) = \bar{u}(x) \exp(-i\omega t), \quad \zeta(x, t) = \bar{\zeta}(x) \exp(-i\omega t). \quad (2)$$

Введем новую функцию $P(x) = \bar{u}\bar{\zeta}$. Тогда, подставляя (2) в (1), получим обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка относительно функции P :

$$aP'' + a'P' + \bar{b}P = 0, \quad (3)$$

где $a = b^{-1}$, $\bar{b} = \sigma^2 (gs)^{-1}$.

Общее решение для функции P запишем так:

$$P = A\varphi(x) + B\psi(x),$$

где A и B — произвольные постоянные, определяющиеся из граничных условий. В общем случае для переменных a и \bar{b} функции φ и ψ не могут быть найдены аналитически и находятся численно, например, методом Рунге—Кутты. Для того чтобы φ и ψ составляли фундаментальную систему решений уравнения (3), они должны удовлетворять условиям

$$\varphi(0) = \psi'(0) = 1, \quad \varphi'(0) = \psi(0) = 0.$$

Рассмотрим канал, состоящий из двух областей. Одна из них моделирует открытое море (обозначим ее индексом 1), другая — шельфовую зону (индекс 2). Для области, площадь сечения которой равна $s_1 = b_1 H_1$, где $b_1 = \text{const}$ и $H_1 = \text{const}$, уравнение (3) принимает вид

$$P_1'' + \gamma P_1 = 0, \quad \gamma = \sigma / \sqrt{gH_1}. \quad (4)$$

где H_1 — глубина канала.

Решая (4), находим

$$P_1 = A_1 e^{i\gamma x} + B_1 e^{-i\gamma x}. \quad (5)$$

Первое слагаемое в (5) представляет собой набегающую волну из открытого моря, а второе — отраженную волну. Считаем, что A_1 известна и пропорциональна амплитуде набегающей волны, а B_1 необходимо определить.

В области длиной l , моделирующей шельф, функция P_2 имеет вид

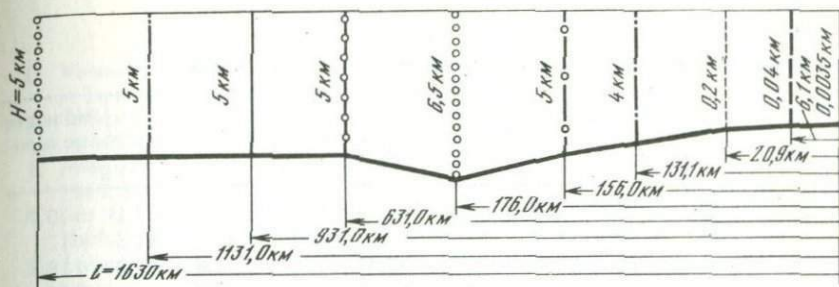
$$P_2 = A_2 \varphi(x) + B_2 \psi(x).$$

Здесь A_2 и B_2 надо определить, а φ и ψ — найти численно. Для численного решения функции $a(x)$ и $\bar{b}(x)$ представляются аналитически или в табличном виде для ряда значений x , а их изменение между выбранными точками принимается линейным.

Для нахождения B_1, A_2, B_2 имеем три условия:

$$u_1 = u_2, \quad \zeta_1 = \zeta_2 \quad \text{при } x = 0, \quad u_2 = 0 \quad \text{при } x = l. \quad (7)$$

Эти условия означают непрерывность профиля свободной поверхности и горизонтальных скоростей на входе в бухту и наличие вертикальной



Модели продольного сечения канала, заканчивающегося заливом Касатка

стенки в вершине бухты. Условия (7) для функции P принимают вид $P_1(0) = P_2(0)$, $P_{1x} = P_{2x}$ при $x = 0$, $P_2(l) = 0$. (8)

Удовлетворяя условиям (8), получим систему алгебраических уравнений, откуда находим B_1 , A_2 и B_2 как функции A_1 . Подставляя решение системы (8) в (6) и возвращаясь к величине c , получим коэффициент усиления в вершине бухты

$$K = 2 \frac{b(0)}{b(l)} [\varphi(l)\psi'(l) - \psi(l)\varphi'(l)] [\varphi^2(l) + \sigma^2\psi^2(l)/gH_1]^{-1/2}. \quad (9)$$

Для залива Касатка изложенным методом были рассчитаны коэффициенты K в диапазоне частот $10^2 - 10^4 \text{ с}^{-1}$ по девяти моделям. Модели представлялись каналом постоянной ширины (180 км), который заканчивался заливом Касатка (см. рисунок). Первая модель соответствует заливу Касатка до глубины $H_1 = 40 \text{ м}$ (табл. 1). Вторая модель состоит из залива до глубины $H_1 = 40 \text{ м}$ и канала с границей на глубине $H_1 = 200 \text{ м}$. В каждой последующей модели длина канала возрастает.

Расчеты зависимости $K(\sigma)$ показали, что для некоторых частот исследуемого диапазона функция $K(\sigma)$ принимает максимальные значения. Назовем эти частоты собственными для системы залив + канал. Вычисленные по ним периоды собственных колебаний для девяти моделей представлены в табл. 2. В 10-м столбце приведены периоды колебаний уровня залива Касатка при прохождении волн цунами, полученные спектральным анализом из наблюдений. Совпадение выявленных из наблюдений и рассчитанных периодов позволяет сделать вывод, что на колебания уровня, регистрируемые мареографом в пос. Буревестник, влияют колебания уровня не только в заливе Касатка, но и в шельфовой зоне, а также в акватории Тихого океана, прилегающей к о. Итуруп.

Т а б л и ц а 1

Параметры модели 1 залива Касатка

l , км	b , км	H , км
0	9	0,04
0,75	8,6	0,035
1,375	12,9	0,03
3,0	11,4	0,02
5,1	7,9	0,009
6,0	0,3	0,003
6,1	0,005	0,0003

Т а б л и ц а 2

Периоды (мин) собственных колебаний моделей залива Касатка

Модель									Наблюденные периоды
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
22	10,5	10,5	12,1	10,7	10,5	10,6	10,6	12,1	10
	15,0	11,3	16,2	11,2	11,3	11,3	11,2	12,5	12
	24,4	13,8	23,0	13,3	12,4	12,2	11,8	13,0	18
	25,0	18,0	26,4	16,2	13,9	13,2	12,5	13,5	24
		25,0	56,6	17,3	15,5	14,2	13,5	14,1	28
		32,7		24,1	17,9	15,5	14,4	14,6	29
		44,0		31,3	20,7	17,3	15,5	15,5	33
				34,3	23,5	19,2	17,0	17,3	38
				43,0	25,9	21,6	18,5	18,5	42
				63,5	32,2	23,5	20,3	20,0	44
					44,6	24,4	22,5	21,2	46
					67,6	25,2	24,1	22,5	47
						19,2	29,5	25,9	50
							35,5	29,5	52
							44,6	35,5	55
							59,9	42,8	82
							100,0	53,7	84
							305,4	72,3	101
								123,6	32,2
							436,3	35,5	
								36,8	
								41,0	
								46,6	
								56,6	
								59,9	
								72,3	
								100,0	
								162,1	
								436,3	

Расчет коэффициентов усиления модели залива Касатка с отражающей стенкой на глубине 5 м показал, что наибольшая величина $K = 28,4$ достигается при прохождении волны с периодом $T = 12,3$ мин. Коэффициенты усиления 9,2 и 10,7 соответствуют периодам волн 26,9 и 65,4 мин. Цунами, возникающие в Курило-Камчатской впадине, часто имеют периоды около 20 мин, для цунами, приходящих от далеких очагов, типичны периоды порядка 60 мин, в этих случаях высота цунами у берега может быть примерно в 10 раз больше, чем в глубоководной области. Однако самыми опасными являются волны с периодами, близкими к 12 мин, так как для них высота волны у берега может быть в 30 раз больше высоты волны в открытом море¹.

¹ Цунами такого периода также могут возбуждаться близкими курило-камчатскими землетрясениями. — Прим. ред.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Watanabe H.* Studies of the tsunamis on the Sanriku coast of the Northeastern Honshu in Japan. — "Geophys. Mag.", 1964, 32, N 1.
2. *Такахасу Р.* Влияние берегов на цунами и штормовые нагоны. — "Токё дайгаку дзисин кэнкюсё ихо", 1964, 42, № 1. На яп. яз.
3. *Longuet-Higgins M.* On the trapping of wave energy round islands. — "J. Fluid Mech.", 1969, 37, N 4.
4. *Lee J.* Wave-induced oscillations in harbours of arbitrary geometry. — "J. Fluid Mech." 1971, 45.
5. *Loomis H.* A method of setting up the eigenvalue problem for the linear, shallow water wave equation for irregular bodies of water with variable water depth and application to bays and harbours for Hawaii. — Report HIG-70-32, Hawaii Inst. Geophys. Univ. Hawaii, Honolulu, 1970.
6. *Lee J., Raichlen F.* Oscillations in harbours with connected basins. — "J. Waterways, Harbours and Coast. Engrg Div. Proc. Amer. Soc. Civil Engrs", 1972, N 98.
7. *Su Ch.L.* Asymptotic solutions of resonances in harbours with connected basins. — "J. Waterways, Harbours and Coast. Engrg Div. Proc. Amer. Soc. Civil Engrs", 1973, N 91.
8. *Hwang L.S., Tuck E.* On the oscillations of harbours of arbitrary shape. — "J. Fluid Mech.", 1970, 42.
9. *Olsen L., Hwang L.S.* Oscillations in a bay of arbitrary shape and variable depth. — "J. Geophys. Res.", 1971, 76.
10. *Кэрвер Д., Шоу Р., Мията М.* Реакция гавани с узким входным каналом от прямой береговой линии на периодические падающие волны (перевод). — "Прикладная механика", 1971, № 2.

РАСЧЕТ НАКАТА ВОЛН ЦУНАМИ НА БЕРЕГА

При набегании волн на берега со сложным очертанием и сложным рельефом в подводной и надводной частях возникает сложная картина волнового течения. Для определения гидравлических параметров волн в прибрежной зоне недостаточно ограничиться исследованиями фронтального подхода волн. В этом случае необходимо учитывать неравномерность распределения скоростей и уровней воды в плане.

Настоящая работа посвящена описанию численного метода решения таких задач.

Как было показано [1], при фронтальном набегании длинных волн на берега (плоская задача) хорошее приближение к действительности дают одномерные уравнения мелкой воды (уравнения Сен-Венана). Можно надеяться, что при расчете течений в плане эффективным будет использование двумерных уравнений мелкой воды. В случае волн цунами уравнения мелкой воды должны хорошо описывать их распространение как в открытом море, так и в прибрежной части. В прибрежной зоне волны могут разрываться, что в приближении теории мелкой воды аппроксимируется разрывами первого рода. Для расчета течений с разрывами уравнения мелкой воды должны быть записаны в интегральной форме законов сохранения импульса и массы. Дадим вывод этих законов исходя из общих уравнений сохранения импульса и массы, записанных в интегральном виде [2]:

$$\begin{aligned} & \int_R \rho v_i dR \Big|_{t_1}^{t_2} + \int_{t_1}^{t_2} dt \int_{\sigma} \rho v_i \left(v_n + \frac{\partial f / \partial t}{|\text{grad} f|} \right) d\sigma = \\ & = \int_{t_1}^{t_2} dt \left\{ \int_{\sigma} (-p n_i + \tau_{n_i}) d\sigma - \int_R \rho X_i dR \right\}, \quad (1) \\ & \int_R \rho dR \Big|_{t_1}^{t_2} + \int_{t_1}^{t_2} dt \left\{ \int_{\sigma} \rho \left(v_n + \frac{\partial f / \partial t}{|\text{grad} f|} \right) d\sigma \right\} = 0, \end{aligned}$$

где v_i — составляющая скорости жидкости по оси x_i , v_n — составляющая скорости жидкости по нормали к поверхности σ , σ — замкнутая поверхность, ограничивающая объем R , ρ — плотность жидкости, p — шаровая часть тензора напряжений в жидкости, τ_{ik} — девиатор напряжения в жидкости, ρX_i — проекция массовой силы, приходящейся на единицу объема

на x_i -ю ось, t — время, n_i — проекция единичного вектора нормали на x_i -ю ось, вектор нормали, как обычно, считается направленным изнутри объема, ограниченного поверхностью, X_i — проекция массовой силы на ось x_i .

Уравнения (1) отличаются от обычной записи законов сохранения импульса и массы, так как в данном случае рассматривается поверхность σ , движущаяся произвольным образом, а не связанная с частицами жидкости или неподвижная, как рассматривается обычно.

Предполагается, что эту поверхность можно выразить уравнением

$$f(x_1, x_2, x_3) = 0.$$

Выберем теперь такую систему координат, чтобы ось $x_3 = z$ была направлена вертикально вверх, обозначим далее

$$x_1 = x, \quad x_2 = y, \quad v_1 = u, \quad v_2 = v, \quad v_3 = w. \quad (2)$$

В дальнейшем изложении x_1 , x_2 и x_3 будут означать не разные координаты, а различные значения координаты x . Для получения уравнений мелкой воды поверхность σ выберем состоящей из граней параллелепипеда:

$$x_1 \leq x \leq x_2, \quad y_1 \leq y \leq y_2, \quad z_{\Pi} \leq z \leq z_{\text{Д}}, \quad (3)$$

где y_1 , y_2 — некоторые координаты по оси y , z_{Π} — отметка (или координата по оси z) свободной поверхности потока, $z_{\text{Д}}$ — отметка поверхности дна.

Записывая (1) при $i=1,2$ (для осей x и y) для объема, ограниченного этой поверхностью, получим

$$\begin{aligned} & \int_{y_1}^{y_2} dy \int_{x_1}^{x_2} U h dx \Big|_{t_1}^{t_2} + \int_{t_1}^{t_2} dt \left[\int_{y_1}^{y_2} a_u U^2 h dy \Big|_{x_1}^{x_2} + \int_{x_1}^{x_2} a_{uv} UV h dx \Big|_{y_1}^{y_2} \right] = \\ & = - \int_{t_1}^{t_2} dt \int_{y_1}^{y_2} dy \int_{z_{\text{Д}}}^{z_{\Pi}} p dz \Big|_{x_1}^{x_2} - \int_{t_1}^{t_2} dt \int_{y_1}^{y_2} dy \int_{x_1}^{x_2} p_{\Pi} n_{\Pi x} dx + \int_{t_1}^{t_2} dt \int_{\sigma} \tau_{nx} d\sigma, \\ & \int_{y_1}^{y_2} dy \int_{x_1}^{x_2} V h dx \Big|_{t_1}^{t_2} + \int_{t_1}^{t_2} dt \left[\int_{x_1}^{x_2} a_{uv} UV h dx \Big|_{y_1}^{y_2} + \int_{y_1}^{y_2} a_v V^2 h dy \Big|_{x_1}^{x_2} \right] = \\ & = - \int_{t_1}^{t_2} dt \int_{x_1}^{x_2} dx \int_{z_{\text{Д}}}^{z_{\Pi}} p dz \Big|_{y_1}^{y_2} - \int_{t_1}^{t_2} dt \int_{y_1}^{y_2} dy \int_{x_1}^{x_2} p_{\Pi} n_{\Pi y} dy + \int_{t_1}^{t_2} dt \int_{\sigma} \tau_{ny} d\sigma, \quad (4) \end{aligned}$$

$$\int_{y_1}^{y_2} dy \int_{x_1}^{x_2} h dx \Big|_{t_1}^{t_2} + \int_{t_1}^{t_2} dt \left[\int_{y_1}^{y_2} U h dy \Big|_{x_1}^{x_2} + \int_{x_1}^{x_2} V h dx \Big|_{y_1}^{y_2} \right] = 0,$$

где

$$U = \frac{1}{n} \int_{z_{\text{д}}}^{z_{\text{п}}} u dz, \quad V = \frac{1}{h} \int_{z_{\text{д}}}^{z_{\text{п}}} v dz, \quad h = z_{\text{п}} - z_{\text{д}}$$

$$a_u = \frac{z_{\text{п}}}{z_{\text{д}}} \int_{z_{\text{д}}}^{z_{\text{п}}} u^2 dz / h U^2, \quad a_v = \frac{z_{\text{п}}}{z_{\text{д}}} \int_{z_{\text{д}}}^{z_{\text{п}}} v^2 dz / h V^2,$$

$$a_{uv} = \frac{z_{\text{п}}}{z_{\text{д}}} \int_{z_{\text{д}}}^{z_{\text{п}}} uv dz / h_{uv}$$

Индекс д означает, что данная величина берется для поверхности дна.

Сделаем теперь следующие допущения, которые составляют сущность теории мелкой воды. Пренебрежем вертикальной составляющей ускорения по сравнению с g . Тогда из (1) при $i = 3$ следует, что

$$p = \rho g (z_{\text{п}} - z). \quad (5)$$

Допустим, что поверхность дна может быть выражена в виде

$$z = z_{\text{д}}(x, y). \quad (6)$$

Тогда

$$n_{\text{дх}} = \partial z_{\text{д}} / \partial x, \quad n_{\text{дy}} = \partial z_{\text{д}} / \partial y. \quad (7)$$

Допустим далее, что

$$a_u \approx a_v \approx a_{uv} \approx 1. \quad (8)$$

Кроме того, допустим, что $\partial \tau_{xy} / \partial x$, $\partial \tau_{yy} / \partial y$ и $\partial \tau_{xx} / \partial x$ настолько малы по сравнению с соответствующими членами для давления, что ими можно пренебречь. При этих допущениях систему (4) на произвольной поверхности в пространстве (x, y, t) можно записать в виде

$$\frac{\partial}{\partial R_t} \oint \Phi^* dx dy + \Pi dy dt + \Phi dx dt + \int_{R_t} \Psi dx dy dt = 0, \quad (9)$$

где

$$\Phi^* = \begin{vmatrix} h \\ U h \\ V h \end{vmatrix}, \quad \Pi = \begin{vmatrix} U h \\ V^2 h + 0,5 g h^2 \\ U V h \end{vmatrix}, \quad \Phi = \begin{vmatrix} V h \\ U V h \\ V^2 h + 0,5 g h^2 \end{vmatrix},$$

$$\Psi = \begin{vmatrix} 0 \\ g h \partial z_{\text{п}} / \partial x \\ g h \partial z_{\text{п}} / \partial y \end{vmatrix} + \lambda |\bar{V}| \begin{vmatrix} 0 \\ U \\ V \end{vmatrix}, \quad |\bar{V}| = \sqrt{U^2 + V^2}$$

$\lambda = \mu (h_s/h)^{1/3}$, h_s — величина выступа шероховатости, $h = z_{\text{п}} - z_{\text{д}}$ — глубина; μ — константа, ∂R_t — произвольная поверхность в пространстве (x, y, t) , ограничивающая некоторый объем R_t .

Применяя к (9) формулу Гаусса—Остроградского, после некоторых преобразований получим систему уравнений мелкой воды в так называемой дивергентной форме:

$$\partial \Phi^* / \partial t + \partial \Pi / \partial x + \partial \Phi / \partial y + \Psi = 0, \quad (10)$$

Эта форма записи в классе обобщенных функций эквивалентна системе уравнений (9). В классе непрерывных дифференцируемых функций система уравнений (10) эквивалентна обычно встречающейся системе уравнений мелкой воды [3, 4 и др.]. Эта система и будет в дальнейшем использоваться для расчета волн наката на берег произвольной формы.

При накате и откате волн береговая линия постоянно меняется. При этом меняется расчетная область. Для того чтобы область стала постоянной, произведем преобразование координат:

$$\tau = t, \quad \xi = y/L(t, x), \quad \eta = x, \quad (11)$$

где L — координата линии уреза воды, которая предполагается однозначной и непрерывной функцией x и t .

Тогда система (10) принимает следующий вид:

$$\partial \tilde{\Phi}^* / \partial \tau + \partial \tilde{\Pi} / \partial \eta + \partial \tilde{\Phi} / \partial \xi + \tilde{\Psi} = 0, \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{\Phi}^* &= L \Phi^*, & \tilde{\Pi} &= L \Pi, \\ \tilde{\Phi} &= \Phi - \xi (\Phi^* \partial L / \partial \tau + \Pi \partial L / \partial \eta), & \tilde{\Psi} &= L \Psi, & H &= h. \end{aligned} \quad (13)$$

Вычисление $\tilde{\Psi}$ производится с учетом изменения структуры Ψ при изменении координат по (11):

$$\tilde{\Psi} = gH \begin{vmatrix} 0 & & \\ L \partial z_{\Pi} / \partial \eta - (\xi \partial L / \partial \eta) \partial z_{\Pi} / \partial \xi & & \\ \partial z_{\Pi} / \partial \xi & & \end{vmatrix} + L \sqrt{U^2 + V^2} \begin{vmatrix} 0 \\ U \\ V \end{vmatrix}.$$

Таким образом, внутри полосы $0 < \xi < 1$ движение описывается уравнением (12). Краевыми условиями являются:

$$\text{при } \xi = 0 \quad \begin{cases} \text{если } V(\eta, 0, t) \geq 0, \text{ то} \\ \quad \begin{cases} H(\eta, 0, t) = F_1(\eta, t), \\ U(\eta, 0, t) = F_2(\eta, t) \end{cases} \\ \text{если } V(\eta, 0, t) < 0, \text{ то} \\ \quad H(\eta, 0, t) = F_1(\eta, t) \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{при } \xi = 1 \quad H(\eta, 1, t) = 0.$$

Заметим, что постановка краевых условий на отдельном участке моря с физической точки зрения не является точной, так как эти условия фактически зависят от результатов решения задачи в рассматриваемой области и условий движения за ее пределами. Обычно при экспериментальных исследованиях, когда исследуется небольшая часть моря, на этих границах устраиваются сооружения, вызывающие затухание на них отраженных волн. Это означает, что предполагается отсутствие влияния остальной части моря на волновой процесс на исследуемом участке. В настоящей работе не рассматриваются ошибки, возникающие при таком предположении

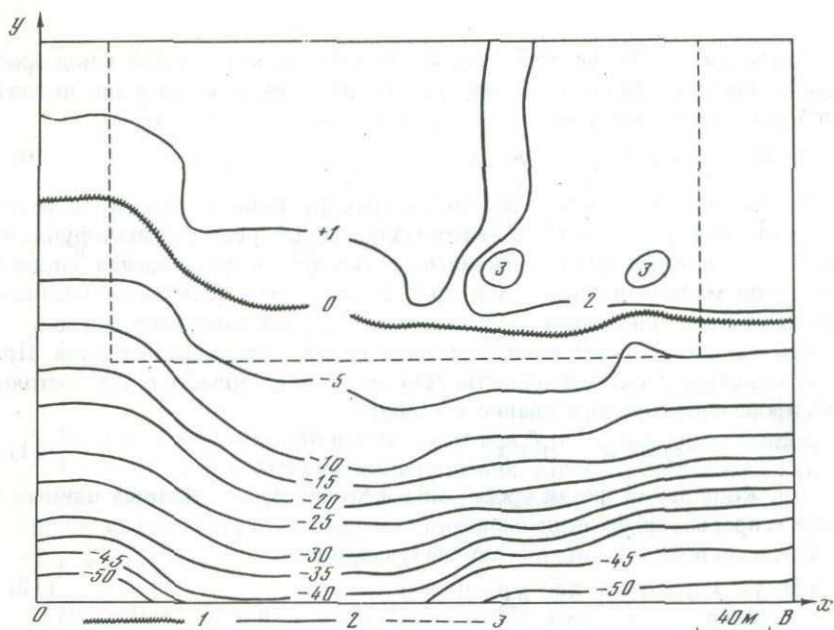


Рис. 1. Рельеф дна и прибрежной зоны расчетной области; п-ов Пицунда
 1 — береговая линия; 2 — изолиния дна (м); 3 — граница участка, изображенного на рис. 2

(этот вопрос требует кропотливого анализа), отметим только, что при расчетах было поставлено некоторое краевое условие при $x = 0$ и $x = B$ (рис. 1), т.е. фактически задача решалась для прямоугольника, а не для полосы.

К задаче следует добавить начальные условия:

$$H = H(\eta, \xi, 0), \quad U = U(\eta, \xi, 0), \quad V = V(\eta, \xi, 0). \quad (15)$$

Для замыкания задачи необходимо привлечь уравнение для L :

$$\partial L / \partial t = V - U \partial L / \partial x. \quad (16)$$

Решение задачи (12)–(16) аналитическими методами в общем случае невозможно; для решения следует привлечь численный метод.

Алгоритм расчета. Для получения численного решения задачи (12)–(16) применена разностная схема, являющаяся обобщением схемы Рунсана [5]:

$$\frac{\tilde{\Phi}_{m,k}^{*n+1} - \Phi_{m,k}^{*n}}{\Delta \tau} + \frac{\tilde{\Pi}_{m+1,k}^n - \tilde{\Pi}_{m-1,k}^n}{2\Delta \eta} + \frac{\tilde{\Phi}_{m,k+1}^n - \tilde{\Phi}_{m,k-1}^n}{2\Delta \xi} + \quad (17)$$

$$+ \tilde{\Psi}_{m,k}^n - \Gamma_{m,k}^n = 0$$

где $\Delta \tau$ — шаг по времени, $\Delta \eta, \Delta \xi$ — шаги по пространственным направлениям.

Уравнение (16) аппроксимируется шаблоном

$$l_m^{n+1} = l_m^n + d_m^n \Delta \tau - 0,5 \left| U_{m,K}^n \right| (l_{m+1}^n - 2l_m^n + l_{m-1}^n) / \Delta \eta, \quad (18)$$

где $d_m^n = V_{m,K}^n - z_m^n U_{m,K}^n$, $z_m^n = 0,5(l_{m+1}^n - l_{m-1}^n) / \Delta \eta$

K — число точек вдоль оси ξ .

Свободный член $\tilde{\Psi}_{m,k}^n$ в (17) имеют следующий смысл:

$$\tilde{\Psi}_{m,z} = \left[\begin{aligned} & g \left[L_{m+1} \frac{H_{m+1,k} + H_{m,k}}{2} \frac{(z_{\text{д}}')_{m+1,k} - (z_{\text{д}}')_{m,k}}{2\Delta \eta} + \right. \\ & + L_{m-1} \frac{H_{m,k} + H_{m-1,k}}{2} \frac{(z_{\text{д}}')_{m,k} - (z_{\text{д}}')_{m-1,k}}{2\Delta \eta} - \\ & - \frac{L_{m+1} - L_{m-1}}{2\Delta \xi} \left((k+1) \frac{H_{m,k+1} + H_{m,k}}{2} \frac{(z_{\text{д}}')_{m,k+1} - (z_{\text{д}}')_{m,k}}{2} + \right. \\ & + (k-1) \frac{H_{m,k} + H_{m,k+1}}{2} \frac{(z_{\text{д}}')_{m,k} - (z_{\text{д}}')_{m-1,k}}{2} + \\ & \left. \left. + L_m U_{m,k} \sqrt{U_{m,k}^2 + V_{m,k}^2} \right) \right] \\ & g \frac{H_{m,k+1} + H_{m,k-1}}{2} \frac{(z_{\text{д}}')_{m,k+1} - (z_{\text{д}}')_{m,k-1}}{2\Delta \xi} + \\ & + L_m V_{m,k} \sqrt{U_{m,k}^2 + V_{m,k}^2} \end{aligned} \right]$$

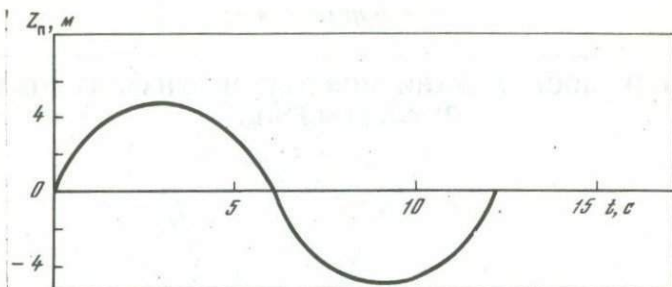
Такая аппроксимация свободного члена вводится для того, чтобы разностные уравнения сохраняли в зоне, удаленной от границ, решения вида

$$U = \text{const}, V = 0, Z_{\text{д}} + H = \text{const}, \partial z_{\text{д}} / \partial x = 0$$

или

$$U = 0, V = \text{const}, z_{\text{д}} + H = \text{const}, \partial z_{\text{д}} / \partial y = 0$$

при перемещении границ до тех пор, пока эти решения не нарушатся приходом внешних возмущений. Соответствующее свойство для дифференциальных уравнений (12) очевидно, но при произвольной аппроксимации их конечно-разностными уравнениями оно может не выполняться.



Р и с. 3. График изменения уровня воды во времени в граничном сечении

Проведя дисперсионный анализ схемы (17)–(19), можно показать, что при $\Omega_r \leq 1/2$ ($r=1,2$) достаточным условием устойчивости станет условие Куранта:

$$L_m^n \Delta \xi \Delta \eta / \Delta t \sqrt{L_m^{n^2} \Delta \xi^2 + \Delta \eta^2} \geq (\sqrt{gH} + \sqrt{U^2 + V^2})_{m,k}^n.$$

По разностной схеме была составлена программа для ЭЦВМ и проведены расчеты трансформации длинных волн около реального п-ва Пицунда.

На рис. 2 показано положение уреза воды в характерные моменты времени t (с) при накате на берег одиночной волны высотой 5 м и длиной 150 м. Время отсчитывается от начала подъема воды в граничном сечении. Краевое условие в данном случае задавалось в виде графика изменения уровня воды во времени (рис. 3) во всех точках граничного сечения: $y=0, 0 < x < B$ (см. рис. 1). Изменение уровня воды во времени принималось одинаковым по всей границе.

Причудливое изменение положения фронта накатывающейся и откатывающейся волн (см. рис. 2) связано с влиянием топографии берега и гидродинамических эффектов взаимодействия волны с берегом. Помимо картины уровней, так же как и при решении задачи о фронтальном накате [1], в результате расчетов получены мгновенные значения осредненных по глубине компонент скоростей во всех узлах сетки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ляхтер В.М., Милитеев А.Н. Расчет наката длинных гравитационных волн на откос. – "Океанология", 1974, № 1.
2. Динамика сплошных сред в расчетах гидротехнических сооружений. Под ред. В.М. Ляхтера и Ю.С. Яковлева. М., "Энергия", 1976.
3. Ляхтер В.М., Прудовский А.М. Исследования открытых потоков на напорных моделях. М., "Энергия", 1974.
4. Стокер Дж. Дж. Волны на воде. М., ИЛ, 1959.
5. Русанов В.В. Расчет взаимодействия нестационарных ударных волн с препятствиями. – ЖВММФ, 1961, 1, № 2.

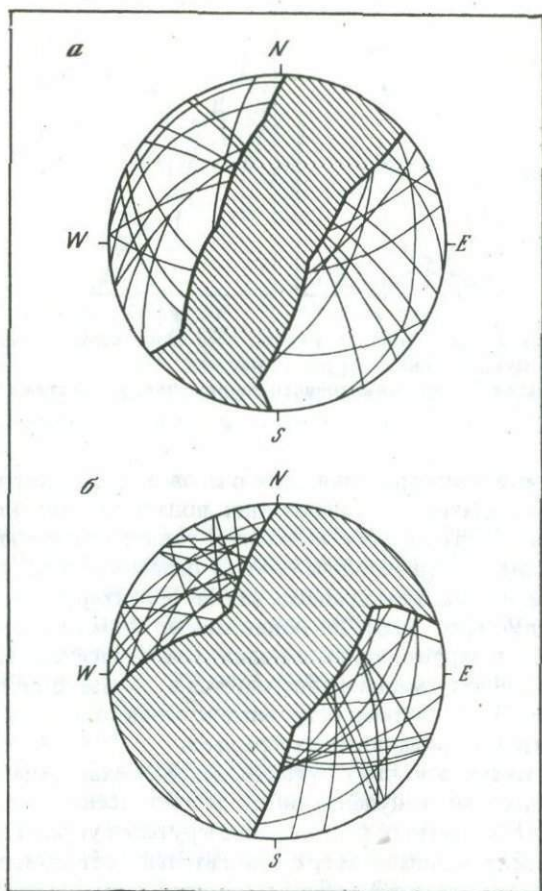
ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ ЦУНАМИГЕННЫХ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Задачей данной работы является исследование различий в механизмах очагов наиболее сильных нецунамигенных ($M \geq 6,0$) и цунамигенных землетрясений. На основании данных о землетрясениях Курило-Камчатского и Японского регионов за период с 1964 по 1973 г., имеющихся в отечественных и зарубежных бюллетенях, в сборниках "Землетрясения в СССР" и каталоге С.Л. Соловьева и У.Н. Го, а также сейсмограмм из архивов ЦСО "Обнинск" и Дальневосточной сети сейсмических станций изучались параметры механизма очага землетрясений. Определения проводились по знакам первых смещений в P - и S -волнах на основе модели, предложенной А.В. Введенской [1].

За указанный период в исследуемых регионах произошло 170 сильных землетрясений, 24 из них вызвали волны цунами различной интенсивности. Удалось обработать данные о 109 землетрясениях. С учетом того, что цунамигенные землетрясения возникают, как правило, на малых глубинах, анализу подвергались лишь данные о землетрясениях с очагами на глубинах $0 < h \leq 60$ км (исключение составляет землетрясение 24.XI 1971 г. с $h \approx 100$ км).

Цунамигенные землетрясения. Из 23 обработанных цунамигенных землетрясений 19 толчков произошли на окраине Тихого океана, четыре — в Японском море. Сопоставим полученные решения для этих двух групп.

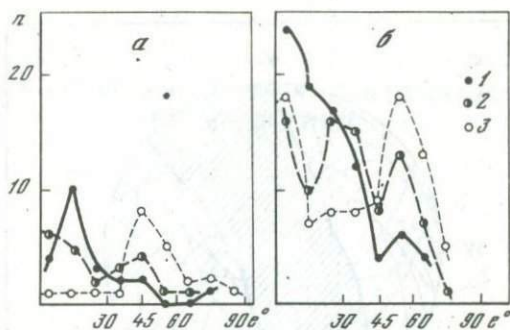
В очагах первой группы одна из нодальных плоскостей характеризуется крутым углом падения. В 18 случаях из 19 углы падения $\geq 60^\circ$. Азимуты простирания этих плоскостей изменяются от 10 до 60° (рис. 1, а), т.е. приблизительно совпадают с северо-восточным простиранием тектонических структур в исследуемых зонах. Ориентация крутых плоскостей является устойчивой. Можно предположить, что они совпадают с плоскостями разрывов в очагах исследуемых землетрясений. В пользу такого предположения говорят и другие факты [2, 3]: а) эпицентральные области афтершоков землетрясений вытянуты в направлении юго-запад — северо-восток; б) изосейсты максимальных интенсивностей вытянуты в том же направлении; в) ближайшие к очагам участки побережья, как показывают уровенные наблюдения и повторные нивелирования, в результате землетрясения опускаются. Подвижки по крутым плоскостям имеют большую составляющую по падению. Океанические крылья разрывов смещены вверх относительно островных крыльев.



Р и с. 1. Сводные диаграммы, иллюстрирующие ориентацию возможных плоскостей разрывов в очагах цунамигенных (а) и нецунамигенных (б) землетрясений. Заштрихованы области скопления большинства нодальных линий

Вторые возможные плоскости разрывов в очагах исследованных землетрясений более пологие, устойчивой ориентации для них не обнаруживается (см. рис. 1, а).

Для четырех очагов в Японском море получается несколько иная картина. Одно из этих землетрясений имеет сравнительно небольшую магнитуду (6,3) и тем не менее относится к цунамигенным. Для него также получена одна крутопадающая плоскость (угол падения $e = 70^{\circ}$) почти меридионального простирания, вторая возможная плоскость имеет угол падения $e = 50^{\circ}$. Для трех остальных землетрясений получены нодальные плоскости, ориентированные примерно вдоль о. Хонсю, но с меньшими углами падения, чем это было выявлено для первой группы цунамигенных землетрясений. Вторые возможные плоскости разрыва имеют различные углы падения и ориентированы либо вдоль, либо поперек острова.



Р и с. 2. Гистограммы углов погружения осей напряжений в очагах цунами-генных (а) и нецунамигенных (б) землетрясений

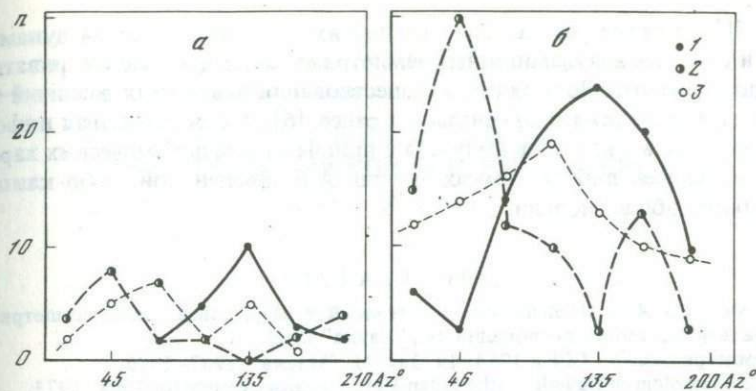
Оси: 1 — сжатия, 2 — промежуточного напряжения, 3 — растяжения

Нецунамигенные землетрясения. Для очагов этих землетрясений также характерно преобладание крутопадающих нодальных плоскостей. Из 86 землетрясений в 72 случаях обе нодальные плоскости имеют углы падения, превышающие 40° (в 35 случаях углы падения $e \geq 60^\circ$). Следует отметить, что одна из них, как правило, также ориентирована по простиранию островных дуг (рис. 1, б), но подвижки по этим плоскостям отличаются от таковых в случае цунамигенных землетрясений. Преобладание сдвиговой компоненты смещения встречается в 2,6 раза чаще, чем составляющей по падению. В 65% случаев островные крылья разрывов были смещены вверх относительно океанических крыльев.

Вместе с тем оказалось, что у 18 толчков из 86 механизмы очагов сходны с механизмами очагов цунамигенных землетрясений, т.е. для них характерно: наличие нодальных плоскостей с крутыми углами падения, смещение океанических крыльев вверх относительно островных, подвижки преимущественно по падению, а не по простиранию плоскости разлома. Однако нужно заметить, что магнитуды этих землетрясений не превышают 6, 5.

Ориентация напряжений в очагах землетрясений. Из рис. 2 и 3 видно, что наиболее устойчивой ориентацией в исследуемых регионах обладают оси главного напряжения сжатия. В очагах 81% цунамигенных и 72% нецунамигенных землетрясений они ориентированы близгоризонтально (углы, образованные осями с горизонтальной плоскостью, не превышают 30°) и примерно перпендикулярно простиранию поверхностных структур.

Оси растягивающих напряжений горизонтальны лишь в очагах нецунамигенных землетрясений, но эта закономерность менее определена, чем для осей сжимающих напряжений. В целом же в 50% случаев преобладает их вертикальная направленность (углы падения осей не менее 45°). В очагах цунамигенных землетрясений ось растягивающего растяжения расположена под углами от 30 до 90° к горизонту (рис. 2, а). В очагах практически всех землетрясений напряжение растяжения действует в субширотном направлении (рис. 3).



Р и с. 3. Гистограммы азимутов осей сжатия (1), промежуточного напряжения (2) и растяжения (3) в очагах цунамигенных (а) и нецунамигенных (б) землетрясений

Для осей промежуточного напряжения в очагах цунамигенных землетрясений в 11 случаях наблюдается горизонтальная направленность, а в 9 случаях углы выхода осей составляют примерно 45° . Для нецунамигенных землетрясений закономерность в ориентации осей промежуточного напряжения проявляется еще менее отчетливо. Для большей части всех землетрясений направление этих осей почти совпадает с простиранием тектонических структур (азимут $\approx 45^{\circ}$); в некоторых случаях ось направлена вкрест их простирания.

Таким образом, хотя в целом и наблюдается некоторая преимущественная ориентация осей всех трех главных напряжений, отчетливо выявляются только два факта: горизонтальная направленность осей напряжений сжатия для всех землетрясений вкрест простирания островных дуг и близвертикальная направленность осей растягивающих напряжений для цунамигенных землетрясений, причем в последнем случае оси ориентированы субширотно.

Основные выводы:

1. Для Курило-Камчатского и Японского регионов в целом характерно преобладание крутопадающих плоскостей разрыва в очагах сильных мелкофокусных землетрясений. Наиболее хорошо эта особенность выражена для цунамигенных землетрясений. Для них характерно также преобладание подвижек по падению плоскости разрыва и относительное воздымание океанических крыльев разрывов. В 75% случаев в очагах нецунамигенных землетрясений относительное смещение крыльев разрывов, ориентированных вдоль простирания островных дуг, имеет обратный знак.

2. Направления осей главных напряжений в очагах всех сильных землетрясений указанных регионов достаточно устойчивы. Поле напряжений характеризуется близгоризонтальным сжатием (в очагах 17 цунамигенных и 66 нецунамигенных землетрясений), ориентированным вкрест простирания основных тектонических структур. Аналогичные особенности поля напряжений на северо-западе Тихого океана отмечались ранее [4, 5].

3. Изложенные результаты о различиях механизмов очагов цунамигенных и сильных нецунамигенных землетрясений следует рассматривать как предварительные. Возможность существования некоторых различий такого рода в механизмах отмечалась и ранее [6]. Более детальная информация об очаге может быть получена с привлечением динамических характеристик записей либо в рамках модели А.В. Введенской, либо какой-нибудь более общей модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Введенская А.В.* Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. М., "Наука" 1969.
2. Землетрясения в СССР в 1964–1973 гг. М., "Наука", 1967–1976.
3. The Seismological Bulletin of the Japan Meteorological Agency for 1964–1973.
4. Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. М., "Наука", 1972. Авт.: *Балакина Л.М., Введенская А.В., Голубева Н.В.* и др.
5. *Аверьянова В.Н.* Детальная характеристика сейсмических очагов Дальнего Востока. М., "Наука", 1968.
6. *Балакина Л.М.* Цунами и механизм очага землетрясений северо-западной части Тихого океана. – "Труды СахКНИИ", вып. 29, 1972.

**ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ О ЦУНАМИ
НА ТИХООКЕАНСКОМ ПОБЕРЕЖЬЕ СССР,
1737—1976 гг.**

Катастрофическое цунами, опустошившее в ночь с 4 на 5 ноября 1952 г. восточные побережья южной части Камчатки и северной группы Курильских островов (Саваренский и др., 1958), побудило серьезно заняться изучением таких явлений, создать на Тихоокеанском побережье СССР службу предупреждения и приступить к цунамирайонированию (Соловьев, 1968, 1972б).

Аналогичные потребности возникли почти одновременно в Японии, США и других странах Тихоокеанского бассейна, побережья которых подвержены воздействию цунами. Для решения перечисленных задач необходимы сбор и систематизация фактических данных о цунами и о процессе возникновения цунами во всем Тихом океане. В связи с этим появились ряд национальных каталогов цунами, а также предварительные каталоги цунами для Тихого океана в целом (Iida et al., 1967; Соловьев, Го, 1969).

Достигнута договоренность об издании окончательного каталога основных данных о тихоокеанских цунами с участием авторов предварительных каталогов: К. Иида (Япония), Д. Кокса (США), Г. Парараса-Караянниса (США), С.Л. Соловьева (СССР). Значительным вкладом в подготовку этой международной сводки явилась публикация двухтомного каталога цунами в Тихом океане за пределами СССР (Соловьев, Го, 1974, 1975).

Что касается цунами на побережье нашей страны, то их первая детальная сводка была составлена и опубликована с участием автора более 15 лет назад (Соловьев, Ферчев, 1961).

Для упомянутого международного каталога эту сводку нужно было продлить до настоящего времени и по возможности дополнить за старые годы. Результатом проделанной работы явилась предлагаемая таблица, составленная в основном по форме готовящегося окончательного каталога тихоокеанских цунами.

Основные принципы составления таблицы изложены на с. 128.

Т а б л и ц а

Дата, положение гипоцентра и магнитуда землетрясения (или извержения)	Интенсивность цунами I	Место наблюдения	Возвышение воды η, м	Время пробега от очага до места наблюдения Δt, ч
1	2	3	4	5
*1737, октябрь, 17 (6) 3 ч 51 1/2° с.ш., 160° в.д. M = 8 1/2°	4	Командорские о-ва <i>Камчатка</i> Нижне-Камчатск вход в Авачинскую бухту от Авачинской бухты до Вилючинской бухты м. Лопатка <i>Курильские о-ва</i> о. Шумшу	30 26	 0,25
*1742, ноябрь север Курильских о-вов	1-2	<i>Курильские о-ва</i> о-ва Шумшу и Парамушир		
*1780, июнь, 29 (18) на рассвете 45 1/2° с.ш., 151 1/2° в.д. M = 8 1/4	3	<i>Курильские о-ва</i> о-ва Кетой, Симушир и Чирпой о. Уруп, бух. Алеутка	3-10 10-12	 <0,25
		о. Итуруп		

Период T, мин	Проявление цунами; комментарии	Литература
6	7	8
	Стеллер обнаружил в 1746 г. плавник, кости китов и т.п., занесенные на высоту 60 (?) м, и приписал это действию цунами 1737 г. Наводнение не было отмечено. Волна пришла после мощного землетрясения. Балаганы, людей и домашнюю утварь смыло. На берег выброшены камни в 40 кг и тяжелее. Прибрежный рельеф изменился На месте заболоченной низины возник заливчик. Трое жителей погибли То же, что и у Авачинской бухты	<i>Крашенинников, 1755, 1949; Мушкетов, Орлов, 1893; Святловский, 1957; Саваренский и др., 1958; Соловьев, Ферчев, 1961, 1962; Попявин, 1965; Соловьев, Тараканов и др., 1967; Соловьев, 1968; Соловьев, Го, 1969; Gmelin, 1752; Steller, 1781; Mallet, 1855; Perrey, 1864; Milne, 1908; Sapper, 1927; Heck, 1947; Iida et al., 1967</i>
15	Третья волна сильнейшая. Смыты балаганы и юрты. Приливы и отливы в течение двух суток	
	Наблюдалось цунами	Соловьев, Ферчев, 1961, 1962; Попявин, 1965; Соловьев, 1968; Соловьев, Го, 1969; <i>Steller, 1781; Iida et al., 1967</i>
	Наблюдалось цунами	Татаринов, 1790; Берх, 1823; Сгибнев, 1869а; Полонский, 1871; Позднеев, 1909; Имамюра, 1942, 1949; Берг, 1946; Саваренский и др., 1958; <i>Соловьев, Ферчев, 1961, 1962; Попявин, 1965; Соловьев, Тараканов и др., 1967; Соловьев, 1968; Соловьев, Го, 1969; Pallas, 1783; Perrey, 1864; Gondo, 1932; Musya, 1943; Iida, 1956; Watanabe, 1956; 1964; Iida et al., 1967</i>
	Наблюдалось цунами	

Т а б л и ц а (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8
? 1791, апрель, 15 (4) 18 ч вблизи Нижне-Камчатска		<i>Камчатка</i> Усть-Камчатск				Лед на р. Камчатка взломан на протяжении 7 км от устья	Сарычев, 1811; Сгибнев, 18696; <i>Соловьев, Ферчев, 1961, 1962</i> ; Понявин, 1965; Соловьев, 1968; Соловьев, Го, 1969; Pallas, 1793; Sauer, 1802; Iida et al., 1967
? 1792, август, 54° с.ш., 162° в.д. M = 8 1/4	2?	<i>Камчатка</i> Нижне-Камчатск Авачинская бухта				Высохла р. Радуга. Вода волновалась, как в паровом котле	Мушкетов, Орлов, 1893; Святловский, 1957; Саваренский и др., 1958; <i>Соловьев, Ферчев, 1961</i> ; Понявин, 1965; Соловьев, 1968; Соловьев, Го, 1969; Sauer, 1802; Iida et al., 1967
1827, август, 9 (июль, 28), 15 ч или август, 10 (июль, 29) после 7 ч вблизи Петропавловска-Камчатского	1-2	<i>Камчатка</i> Авачинская бухта				"Рыбаки утверждали, что море в основании бухты далеко отступило"	Литке, 1835; Уланов, 1931; <i>Соловьев, Ферчев, 1961, 1962</i> ; Понявин, 1965; Соловьев, 1968; Mertens, 1829; Iida et al., 1967
*1841, май, 18 (6) 8 ч 52 1/2° с.ш., 160° в.д. M = 8	3 1/2	<i>Камчатка</i> Островное (южное побережье м. Шипунского) Халактырка Петропавловск <i>Гавайские о-ва</i> о. Оаху, Гонолулу о. Мауи, Лахаина о. Гавайи, Хило	15 1 ± 1,0 1,0 4,6			Смыты балаганы и юрты Утонули женщина и много бывших на привязи собак. У судна оборвало швартовы и якорь. Приливы и отливы в течение 6 ч 40 4 25	<i>Аноним, 1841а, б; Булаков, 1844</i> ; Мушкетов, Орлов, 1893; Святловский, 1957; Саваренский и др., 1958; <i>Соловьев, Ферчев, 1961, 1962</i> ; Понявин, 1965; Соловьев, 1968; Соловьев, Го, 1969; Jarves, 1843; Brigham, 1866; Bennett, 1869; Gordon-Cumming, 1883; Aleksander, 1891; Jaggard, 1931; Macdonald et al., 1947; Shepard et al., 1950; Iida et al., 1967; Pararas-Carayannis, 1969; Loomis, 1976
*1843, апрель, 25 (13) 6 ч 41,8° с.ш., 144,8° в.д. M = 8,4	2 1/2	<i>Курильские о-ва</i> о. Уруп, бух. Алеутка		0,05?		"Вода ушла со страшной скоростью, осушив дно бухты; затем затопила берега на значительную высоту. Была в движении сутки и каждая перемена сопровождалась сильными сулоями"	<i>Дорошин, 1870</i> ; Мушкетов, Орлов, 1893; <i>Омори, 1913</i> ; Имамюра, 1942, 1949; Саваренский и др., 1958; <i>Соловьев, Ферчев, 1961, 1962</i> ; Понявин, 1965; Соловьев, Тараканов и др., 1967; Соловьев, 1968; Соловьев, Го, 1969; Perrey, 1864; Honda et al., 1908a,b; Milne, 1912; Imamura, 1934; Musya, 1943; Iida, 1956; Kawasumi, 1963; Watanabe, 1964; Iida et al., 1967

Т а б л и ц а (продолжение)

1	2	3	4	5
*1843, апрель, 25 (13) 6 ч 41,8° с.ш., 144,8° в.д. M = 8,4		Япония Аккеси Куширо о. Хонсю	4,5 до 4	
? 1848, июнь ? близ Петропавловска (вероятно, 17 мая 1841 г. ?)		Камчатка бух. Авачин- ская		
*1849, сентябрь (или октябрь), 28 (16) 20 ч Командорские острова	2:	Командорские о-ва		
*1853, ноябрь о. Симушир	2	Курильские о-ва о. Симушир		
* 1854, июль, 9 (июнь, 27) о. Шумшу	2	Курильские о-ва о. Шумшу		
? 1878, октябрь, 11 (сентябрь, 29) землетрясения не было		о. Сахалин западное побережье, Дузэ		
*1893, июнь, 4 2 ч 27 мин 43,4° с.ш., 145,5° в.д. M = 6,6	1 ^{1/2}	Курильские о-ва о. Итуруп, Славное	1,5	0,3
*1904, июнь, 26 (13) 7 ч 00 мин (VI.25; 21 ^h 00 ^m) 52° с.ш., 159° в.д. M = 8,1	1	Камчатка бух. Авачинская		

6	7	8
	В дер. Синрю у изгиба бухты смы- ты все дома; погибло 45 чел.	
	"Море то поднималось на берега, то осушало дно бухты"	Дорошин, 1870; Соловьев, Ферчев, 1961, 1962; Соловьев, 1968; Соло- вьев, Го, 1969; Iida et al., 1967
	"Вода беспрестанно то прибывала, то убывала"	Дорошин, 1870; Мушкетов, Орлов, 1893; Соловьев, Ферчев, 1961, 1962; Понявин, 1965; Соловьев, 1968; Соловьев, Го, 1969; Perrey, 1865; Iida et al., 1967
	"Волны проникли далеко в глубь острова"	Дитмар, 1901; Соловьев, Ферчев, 1961, 1962; Понявин, 1965; Соло- вьев, Тараканов и др., 1967; Соло- вьев, 1968; Соловьев, Го, 1969; Iida et al., 1967
	"Волны затопили почти половину острова"	Дитмар, 1901; Соловьев, Ферчев, 1961, 1962; Понявин, 1965; Соло- вьев и др., 1967а; Соловьев, 1968; Соловьев, Го, 1969; Iida et al., 1967
	"Внезапной волной и шквалом па- роход выброшен на берег и раз- бит"	Мушкетов, Орлов, 1893; Соловьев, Ферчев, 1961, 1962; Понявин, 1965; Iida et al., 1967
20-30	Пять волн	Соловьев, Ферчев, 1961, 1962; Поня- вин, 1965; Соловьев, Тараканов и др., 1967; Соловьев, 1968; Соловьев, Го, 1969; Honda et al., 1908a, b; Heck, 1947; Iida, 1956; Kawasumi, 1963; Wa- tanabe, 1964; Iida et al., 1967; Hatori, 1971, 1976
	"Огромный вал отбросил лодки и шлюпки на 60 м"	Сильницкий, 1905; Левицкий, 1906; Саваренский и др., 1958; Соловьев, Ферчев, 1961, 1962; Понявин, 1965; Соловьев, 1968; Соловьев, Го, 1969; Sieberg, 1932; Heck, 1947; Iida et al., 1967

Таблица (продолжение)

1	2	3	4	5
*1918, сентябрь, 8 2 ч 16 мин (IX.7;17 ^h 16 ^m) 45 ¹ / ₂ ^o с.ш., 151 ¹ / ₂ в.д. M = 8 ¹ / ₄	3	Курильские о-ва о-ва Черные Братья о. Уруп бух. Опасная	1,5 12	0,5
		западное по- бережье	2	
		южное побе- режье	9,5	
		о. Итуруп		
		Медвежье	6	0,5
		Сентябрьский и южнее	1,8-2,5	
		Славное	2,5	0,75
		Курильск	1,5	1,75
		<i>Япония</i>		
		о. Хоккайдо		
		Китами-Эсаси		2,1
		Немуро	1	
		Ханасаки	0,3	1,3
		Кусиро		1,1
		о. Хонсю		
		Хатинохе	0,45	1,4
		Аюкава	0,25	
		Абурацубо		3,1
		Кусимото		3,1
		о. Сикоку		
		Хосодзима	0,03	3,7
		о-ва Бонин		
		о. Хатидзе		
		о. Титидзима	1,4	2 ±
		<i>Гавайские о-ва</i>		
		о. Оаху, Гонолулу	0,3	7,1
		о. Гавайи, Хило	1,5	
		<i>О-ва Самоа</i>		
		Апия	0,2	9,7
		<i>Калифорния</i>		
		Сан-Франциско	0,1	9,4
		<i>Канада</i>		
		Тофино	0,14	8,5

6	7	8
		Аноним, 1918, 1919; Накамура, 1918; Сигетоми, 1918; Кобаяси, 1919; Имамура, 1942, 1949; Святловский, 1957; Саваренский и др., 1958; Соловьев, Ферчев, 1961, 1962; Понявин, 1965; Соловьев, Тараканов и др., 1967; Соловьев, 1968; Соловьев, Го, 1969; Хатори, 1973, <i>Angenheister</i> , 1920; 1921 а, б, 1923; <i>Nakamura</i> , 1918; <i>Finch</i> , 1924; <i>Wilson</i> , 1928; <i>Imamura</i> , <i>Moriya</i> , 1939; <i>Heck</i> , 1947; <i>Zetler</i> , 1947; <i>Shepard et al.</i> , 1950; <i>Iida</i> , 1963а, б; <i>Watanabe</i> , 1964; <i>Hatori</i> , 1967, 1971, 1976; <i>Iida et al.</i> , 1967; <i>Pararas-Carayannis</i> , 1969; <i>Loomis</i> , 1976; <i>Wigen</i> , 1977
	Смыло все постройки. Катера смыты и разбиты. Пароход сорвало с якоря и прибило к берегу. Погибло 23 человека, семь ранено	
20	В течение дня необычное состояние моря	
30		
15-20	Колебания уровня океана продолжались двое суток	
20		
	Заметное цунами Семь волн. Затоплено 19 домов, смыто два моста	
29	Небольшой ущерб	
	Началось с прилива	

Т а б л и ц а (продолжение)

1	2	3	4	5
*1923, апрель, 14 2 ч (IV. 13;15 ^h 31 ^m) 55,4 ^o с.ш., 162,8 ^o в.д. M = 7,2	3 ^{1/2}	Камчатка Усть-Камчатск	1-11	0,3
		южнее Усть-Камчатка (завод Ничиро)	20-30	
		Командорские о-ва о. Беринга	4	
		Япония о. Хоккайдо, Ханасаки	0,1	3,6
		о. Хонсю, Аюкава	0,2	4,2
		Гавайские о-ва о. Оаху, Гонолулу	0,2	6,6
		о. Гавайи, Хио	0,3	7,6
		Калифорния Сан-Франциско	0,2	11,5
		Сан-Диего	0,1	14,3
		Канада Тофино	0,15	8,9
?1924, март, 15 19 ч 31 мин (III. 15;10 ^h 31 ^m) 49,3 ^o с.ш., 141,9 ^o в.д. M = 6 3/4		о. Сахалин Углегорск		
*1927, декабрь, 29 (XII. 28;18 ^h 20 ^m) 53,8 ^o с.ш., 161,4 ^o в.д. M = 7,3	0	Гавайские о-ва о. Оаху, Гонолулу	0,03	7,7
		о. Гавайи, Хио	0,06	7,8
*1933, январь, 8 4 ч взрыв вулк. Севергина на о. Харимкотан 49,2 ^o с.ш., 154,5 ^o в.д.	2?	Курильские о-ва о. Харимкотан о. Онекотан о. Парамушир	9	

6	7	8
15	Два рыбоконсервных завода и склады разрушены и частично смыты; один завод поврежден. Шесть катеров разбито. Разрушено шесть домов и полуразрушено девять. Лед на р. Камчатка взломан на протяжении 7 км; образовалось новое устье реки. 35 жертв. Завод полностью разрушен; катер переброшен через террасу шириной 1 км. Лес в долине вырван с корнем на протяжении 7-8 км. Погиб один человек	Воронов К.И., 1923; Новограбленов, 1924в; Трошин, Дягилев, 1926; Уланов, 1931; Маняйлов, 1946; Святловский, 1957, 1959; Саваренский и др., 1958; Соловьев, Ферчев, 1961, 1962; Понявин, 1965; Кривошей, 1968; Соловьев, 1968; Соловьев, Го, 1969; SN, v. 13, N 2, 1923; Finch, 1924; Jaggar, 1926, 1930; Imamura, Moriya, 1939; Powers, 1946; Heck, 1947; Shepard et al., 1950; Iida, 1963a, б; Kawasumi, 1963; Watanabe, 1964; Iida et al., 1967; Pararas-Carayannis, 1969; Wigen, 1977
38		
20 43		
	Началось с прилива	
	Сильное волнение воды в реке	Уланов, 1932; Соловьев, Ферчев, 1961, 1962; Понявин, 1965; Sieberg, 1932; Iida et al., 1967
20 17		Святловский, 1957; Саваренский и др., 1958; Соловьев, Ферчев, 1961, 1962; Понявин, 1965; Соловьев, 1968; Соловьев, Го, 1969; Wilson, 1928; Jaggar, 1930, 1946; Powers, 1946; Shepard et al., 1950; Iida et al., 1967; Pararas-Carayannis, 1969
	Глыбы льда вынесены на берег. Наблюдалось три волны. Наблюдалось три волны	Горшков, 1954; Соловьев, Ферчев, 1961, 1962; Понявин, 1965; Соловьев, Тараканов, и др., 1967; Соловьев, 1968; Соловьев, Го, 1969; Tanakadate, 1934; Iida et al., 1967

Т а б л и ц а (продолжение)

1	2	3	4	5
? 1936, ноябрь, 14 0 ч 31 мин (XI. 13; 12 ^h 31 ^m) 56° с.ш., 163° в.д. M = 7,2	2?	Камчатка Усть-Камчатск	13	
1937, сентябрь, 22 8 ч 02 мин (IX. 21; 21 ^h 03 ^m) 56° с.ш., 162 1/2° в.д. M = 5 3/4	1?	Камчатка Усть-Камчатск		
? 1946, ноябрь, 13 6 ч извержение вулк. Са- рычева на о. Матуа (48,1° с.ш., 153,1° в.д.)	0?	Курильские о-ва о. Матуа		
*1952, ноябрь, 5 4 ч (сах. время) или 5 ч (камч. время) (XI. 4; 16 ^h 58 ^m) 52,3° с.ш., 161,0° в.д. 30 км M = 8 1/4	3 1/2-4	Командорские о-ва о. Беринга Камчатка от Камчатского п-ова до Кроноц- кого п-ова Усть-Камчатск Шубертово от Кроноцкого п-ова до м. Ши- пунского Кроноки Жупаново бух. Моржовая от м. Шипунского до м. Поворотного м. Шипунский Налычево Халактырка	2 0-5 0,1 0,5-1 4-13 10-13 4-5 7-8 1-12 7-12 6-7 5 ±	 0,7 0,25 0,3

6	7	8
	Тяжелая зыбь; продолжалась 1 1/2 суток	Меняйлов, 1938; Святловский, 1957; Саваренский и др., 1958; Соловьев, Ферчев, 1961, 1962; Попявин, 1965; Соловьев, 1968; Соловьев, Го, 1969; Iida et al., 1967
	"Валы больше, чем при 10-балль- ном шторме; переливались через кошку"	Вялов, 1944; Соловьев, Ферчев, 1961, 1962; Попявин, 1965; Соло- вьев, 1968; Соловьев, Го, 1969; Iida et al., 1967
	С парохода наблюдали, как ги- гантские волны обрушились на крутой северо-западный берег острова	Соловьев А., 1947; Главацкий, Еф- ремов, 1948; Ефремов, 1962; Соло- вьев, Тараканов и др., 1967; Соло- вьев, 1968; Соловьев, Го, 1969
	Катастрофическое Камчатское цунами; нанесло большой ущерб и вызвало жертвы. Колебания Ти- хоого океана продолжались 4 1/2 суток	Аноним, 1952, 1953; Ямагути, 1953; Святловский, 1957, 1959, 1973; Саваренский и др., 1958; Со- ловьев, 1961, 1968; Соловьев, Фер- чев, 1961, 1962; Григораш, Заклин- ский, 1962; Ефремов, 1962; Федо- тов, 1962; Попявин, 1965; Соловь- ев, Тараканов, и др., 1967; Соловь- ев, Го, 1969; Хатори, 1973; Anonym, 1952; Macdonald, 1952; Murphy, 1952; Yamaguti, 1953; Zerbe, 1953; Macdo- nald, Wentworth, 1954; Murphy, Cloud, 1954; Rothé, 1954; Shihizu, 1954; Miyoshi, 1955; Watanabe, 1956; Iida, 1958, 1963 а, б; Berninghausen, 1962; Cox, Mink, 1963; Hatori, 1963а, б; 1965, 1967; Iida et al., 1967; Adams, 1968, 1969; Adams, Jordaan, 1968; Cox, Pa- raras-Carayannis, 1969; Pararas-Caray- annis, 1969; Loomis, 1976; Wigen, 1977
30	Третья волна наибольшая. При- брежный рельеф изменился. Мно- гие здания разрушены или повреж- дены. Несколько жертв Третья волна наибольшая, смыло причал. Жертв не было Вторая волна наибольшая. Дом разрушен. Катер и лодка вы- брошены на берег	
	Коса частично размывта; возникла новая протока Вторая волна наивысшая. Из 15 до- мов уцелел только один. Погибло четыре человека Пять зданий разрушено или повреж- дено. Крышу вынесло в глубь суши на 1 км. Русло реки сместилось на 100 м к югу. Погибло три человека.	

Таблица (продолжение)

1	2	3	4	5
*1952, ноябрь, 5		м. Изменный	5	
4 ч (сах. время) или		бух. Раковая	3	
5 ч (камч. время)		Петропавловск	1,2	0,4
(XI. 4; 16 ^h 58 ^m)		бух. Тарья	1,8-3	
52,3° с.ш., 161,0° в.д.		м. Маячный	5,7	
30 км		Виллой	6-8	
M= 81/4		бух. Саранная	7 ±	
		бух. Жирова	7-8	0,3
		бух. Ахотен (Русская)	7	
		м. Поворотный	10	
		от м. Поворотного	7-15	
		до м. Лопатка		
		бух. Асача	7	
		бух. Ходутка		0,3
		о. Уташуд (бух. Вестник)	8,6	
		м. Лопатка	9,5	0,3
		западное побережье Камчатки	0-5	
		м. Лопатка	5	
		Озерное	3-5	
		Колпаково	0,5	
		Курильские о-ва	1-20	
		о. Шумшу	5-9	
		Козыревск	6-7	
		Байково	9	0,5
		о. Алаид	1,5	
		о. Парамушир	4-20	
		Северо-Курильск	9-15	0,6
		бух. Океанская	8,3	
		бух. Китовая	14-20	0,3

6	7	8
	Смыто два дома; есть жертвы	
40	Началось с отлива	
15	Коса частично смыта вместе со строениями Вторая волна наивысшая. Почти все здания смыты. Берег и коса изменились. Имеются жертвы	
	Уничтожена растительность Катер брошен на 0,5 км в глубь суши. Вторая волна наивысшая. Бар размыт; русло реки изменилось. Растительность уничтожена. Смыт дом	
	Вторая волна наивысшая	
10-15	Вторая волна наивысшая. Разрушено много зданий. Несколько человек погибло Началось с отлива. Вторая волна наивысшая. Разрушено много зданий. Несколько человек погибло	
15-20	Вторая волна наивысшая. Почти весь поселок разрушен. Плашкоут занесло на 2 км в глубь суши. Значительные человеческие жертвы	
10-15	Вторая волна наивысшая Вторая наивысшая волна прошла в глубь суши на 2 км. Все здания смыты. Есть жертвы	

Таблица (продолжение)

1	2	3	4	5
*1952, ноябрь, 5 4 ч (сах. время) или 5 ч (камч. время) (XI. 4; 16 ^h 58 ^m) 52,3 ^o с.ш., 161,0 ^o в.д. 30 км M = 81 /4		м. Васильева, восточное побережье	6,2	0,5
		м. Васильева, западное побережье	4-5	0,5
		Шелехово	3-6	
		о. Онекотан	7-10	
		о. Шиашкотан	8	
		о. Матуа	3-5	
		о. Итуруп	2,5	
		<i>Охотское море</i>		
		Магадан	2	2,0
		Корсаков	1	
		<i>Япония</i>		
		о. Хоккайдо		
		Киритаппу	0,6	
		Синкава	1,0	
		Бивасе	1,1	
		Кусиро	0,5	1,8
		Хакодате	0,5-1,0	2,8
		Осёро	0,16	
		о. Хонсю		
		преф. Аомори		
		зал. Муцу	0,3-0,6	
		Вакиносава	0,6	
		Каваути	1,5	
		Оминато	0,2	
		Танабе	1,0 ±	
		Аомори	0,4	
		Канита	0,6 ±	
		Томари	0,6	
		Саме	1,8	
		Сирахама	2,0	
		Танесаси	1,55	
		Кадонохама	2,0-4,0	
		Кофунато	1,3	
		преф. Ивате		
		Таясити	1,2	
		Яги	1,5	
		Накано	1,2	
		Нацуа	2,0	
		Кудзи	1,0-1,85	1,7
		Санай	1,5	
		Убе	1,5	
		Таро	2,2	
		Мьяко	0,4-1,8	
		Такахама	1,5	
		Канахама	3,0	
		Цугаруиси	1,0	

6	7	8
10-15	Первая волна наивысшая	
	Разрушено несколько домов	
50,120		
30, 65		
55		
5-7		
10,20,70		
24,35,64		

Таблица (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8
*1952, ноябрь, 5		Хориути	0,6				
4 ч (сах. время) или		Осава	1,55				
5 ч (камч. время)		Ямада	0,9-1,1				
(Х1. 4;16 ^h 58 ^m)		Оригасо	0,7-0,9				
52,3 ^o с.ш., 161,0 ^o в.д.		Тонохама	2,0				
30 км		Одзути	1,5				
M = 8 1/4		Оносумаи	2,3				
		Хонго	2,0		5-6,15		
		Кодзирахама	3,0		15-20		
		Конпаку	1,0		20		
		Иосихама	2,5				
		Санихама	1,5		10-20; 60		
		Оккирай	3,0				
		Акадзаки	2,0		60		
		Офунато	2,0				
		Томари	1,5				
		Омото	2,0				
		Вакиносава	1,0				
		Мацудзаки	1,5		40,80		
		Осабе	1,8		40,80		
		Фукубиси					
		преф. Мияги					
		Оосава	1,5		15		
		Иваисава	1,5-2,0				
		Тодагоси	1,5		60		
		Кесеннума	1,4		30		
		Ооя	2,0		30		
		Хикадо	2,0		30-40		
		Койдзуми	3,0		30-40		
		Исатомае	3,0				
		Сидзукава	1,8		23		
		Дзюсанхама	0,5		30		
		Окати	1,5-3,0		25-30		
		Саменоура	2,7-3,0		30		
		Ооякава	2,3-2,5		30		
		Якава	2,4				
		Кобути	2,2		30		
		Коамикура	2,8		30		
		Кодзуми	0,9				
		Момоноура	0,2		9		
		Исиномаки	0,9	2,3			
		Ватаноха	2,2		5-10		
		Хамада			92		
		Сиогама	0,4-2,1				
		Ханабути	2,0				
		преф. Фукусима					
		Харагама	0,5				
		Охама	1,0				
					6	930	

Т а б л и ц а (продолжение)

1	2	3	4	5
*1952, ноябрь, 5		бух. Кавела	3,0	
4 ч (сах. время) или		м. Кахуку	1,2	
5 ч (камч. время)		м. Макаоа	1,8-2,7	
(XI. 4; 16 ^h 58 ^m)		бух. Лаие	2,7	
52,3° с.ш., 161,0° в.д.		Каипапау	3,3	
30 км		Хауула	1,8	
$M = 8^{1/4}$		бух. Кахана	1,8-2,4	
		Кааава	1,5	
		м. Каоюо	1,5	
		м. Куалоа	1,5	
		Ванахоле	0,3	
		п-ов Мокapu	1,8-2,7	
		бух. Каилуа	1,8	
		Вайманало	2,4	
		п-ов Макапуу	3,0	
		бух. Ханаума	1,5	
		Куапа-Понд	0,6	
		Ваилупе-Понд	0,9	
		Кахала	1,5	
		Вайкики	1,5	
		Гонолулу	0,6	6,3
		Перл-Харбор	0,2	6,4
		Эва-Бич	1,5	
		м. Кахе	1,8	
		Нанакули	0,9-3,0	
		Маили	1,8	
		бух. Покаи	3,9	
		Мауна-Лихилахи	2,1	
		м. Кепухи	2,4	
		Баркинг-Сэндс	3,3	
		Макуа	2,4	
		о. Мауи		
		Кахулуи		6,4
		о. Гавайи		
		Хило	2,7-3,7	6,6
		Кеаукаха	1,5-3,9	
		Каиму	0,9	
		Калапана	0,9	
		Хоокена	1,2	
		бух. Кеалакекуа	1,2	
		Напоопоо	1,2	
		Кеаухоу	0,9	
		Каилуа	0,6	
		Кавайхэ	0,6	
		Марианские о-ва		
		о. Гуам, Апра	0,1	5,4

6	7	8
38	Пришвартованную баржу оторвало от причала и бросило на торговое судно	
20		
21	Ущерб на северном побережье	
27		
21		

Таблица (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8
*1952, ноябрь, 5 4 ч (сах. время) или 5 ч (камч. время) (XI. 4; 16 ^h 58 ^m) 52,3° с.ш., 161,0° в.д. 30 км M = 8 1/4	<i>о-ва Палау</i>						
	о. Яп		0,1	6,1	14		
	<i>Каролинские о-ва</i>						
	о. Грук		0,1	5,8	14		
	о. Уэйк		0,3	4,2	7		
	<i>Маршалловы о-ва</i>						
	о. Кваджелейн		0,3	6,0	14		
	о. Эниветок		0,2	5,4	9		
	<i>О-ва Феникс</i>						
	о. Кантон		0,1	8,0	5		
	<i>О-ва Самоа</i>						
	бух. Фагалоа		1,5				Несколько строений потеряны полностью
	Апиа		0,3-1,3	9,6	15		Гавань осушалась и обнажались внутренние рифы
	Паго-Паго		1,0	9,7	18		
	<i>Новая Зеландия</i>						
	Уангара		0,3-0,9				
	Веллингтон		0,2				
	<i>Алеутские о-ва</i>						
	о. Атту, бух. Мас-сакр		1,5		17		Небольшой ущерб от подтопления
	о. Адак, Свиперков		1,1	2,5	48		
	о. Уналашка, Датч-Харбор		0,6	3,5	58		
	<i>Аляска</i>						
	Кадьяк		0,4	5,8	8		
	Сьюард		0,2	6,3	37		
	Якутат		0,3	6,4	15		
	Джуно		0,2		75		
	Ситка		0,3		12		
	<i>Канада</i>						
	Китимат						Записано марсграфом в вершине залива, в 90 км от открытого океана
	Алерт-Бей		0,15	8,4	38		
	Тофино		0,3	7,7	20		Началось с прилива
	Виктория		0,2	8,7	30		
	<i>США</i>						
	шт. Вашингтон						
	Фрайдей-Харбор		0,06		23		
	Ниа-Бей		0,2	8,0	21		

Т а б л и ц а (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8
*1952, ноябрь, 5 4 ч (сах. время) или 5 ч (камч. время) (XI. 4; 16 ^h 58 ^m) 52,3° с.ш., 161,0° в.д. 30 км M = 8 1/4	шт. Орегон						
	Астория		0,1		25		
	шт. Калифорния						
	Кресент-Сити		1,1	0,0	18		Хаос в гавани. Повреждены по меньшей мере три рыбацких шхуны. Тяжелые якоря разбросаны по гавани
	Сан-Франциско, по побережье океана		1,2	8,7	18		
	бух. Сан-Франциско		0,2-0,5		40		
	Авила		0,1	9,0	18		
	Порт-Уайнми		0,7	9,0	12		
	Санта-Моника		0,5	9,1	45		
	Лос-Анджелес		0,2-0,5	9,6	35		
	Ла-Холья		0,1	9,2	20		
	Сан-Диего		0,4	9,6	20		
	<i>Мексика</i>						
	Ла-Пас		0,25	12,0	40		
	Гуаймас		0,03				
	Акапулько		0,5	12,6	30		
	Салина-Крус		0,6	13,7	22		
	<i>Гватемала</i>						
	Сан-Хосе		0,3				
	<i>Сальвадор</i>						
	Ла-Либертад		0,2				
	Ла-Уньон		0,03		35		
	<i>Никарагуа</i>						
	Сан-Хуан-дель-Сур		0,2		17		
	<i>Коста-Рика</i>						
	Пунтаренас		0,4	16,2	22		
	<i>Панама</i>						
	Пуэрто-Армуэльес		0,2	16,1			
	о. Нюас		0,1		20		
	Бальбоа		0,1		40		
	<i>Эквадор</i>						
	Ла-Либертад		0,2	17,8	14		Ущерб
	<i>Перу</i>						
	Сорритос						
	Кальяо		1,0	18,8	25		Разрушено 120 м причала Повреждено более 20 яхт и лодок. Несколько домов затоплены. На берег выброшено много рыбы
	<i>Чили</i>						
	Арика		1,2	19,8	18		Ущерб

Таблица (продолжение)

1	2	3	4	5
*1952, ноябрь, 5 4 ч (сах. время) или 5 ч (камч. время) (XI. 4; 16 ^h 58 ^m) 52,3° с.ш., 161,0° в.д. 30 км M = 8 ^{1/4}		Икике Антофагаста Кальдера Кокимбо Лос-Вилос Конкон Вальпараисо Дичато Пенко Талькауано Сан-Висенте	1,4 0,7 1,4 2-3 0,9 1,8-3	20,0 20,4 21,4 20,7
*1953, март, 18 0 ч 04 мин (III. 17; 13 ^h 04 ^m) 50° с.ш., 156 ^{1/2} в.д. 70 км M = 6 ^{1/4}	1	Курильские о-ва о. Парамушир	3	
*1956, март, 30 18 ч 11 мин (III. 30; 6 ^h 11 ^m) взрыв вулк. Безымянного 56,1° с.ш., 160,7° в.д.	0?	о. Уэйк Каролинские о-ва о. Трук Алеутские о-ва о. Атту, бух. Массакр о. Адак, Свипер-Ков о. Аналaska, Датч-Харбор Гавайские о-ва о. Мидуэй о. Кауаи, Навили-вили о. Оаху, Гонолулу о. Мауи, Кахулуи о. Гавайи, Хило О. Джонстон Калифорния Авила	0,1 0,1 0,3 0,1 0,1 0,1 0,1 0,1 0,3 0,1 0,1 0,1	4,3 1,8 2,1 2,5 6,1 6,3 7,2 2,2
? 1958, сентябрь, 17 (IX. 17; 12 ^h 24 ^m) 48,6° с.ш., 156,1° в.д. 40 км M = '5	-1?	Курильские о-ва Южно-Курильск	0,23	2,2

6	7	8
13 30	Небольшие суда сели на дно	
30	Причал, таможня, часть базарной площади и 150 м железной дороги затоплены. Паника	
30	Паника среди населения прибрежных районов	
22	Большие приливы Большие приливы	
30	Всеобщее беспокойство Большие приливы	
		Святловский, 1957; Соловьев, Ферчев, 1961, 1962; Понявин, 1965; Соловьев, Тараканов и др., 1967; Соловьев, 1968; Соловьев, Го, 1969; Iida et al., 1967
14		Горшков, Богоявленская, 1965; Соловьев, 1968; Соловьев, Го, 1969; Brazee, Cloud, 1958; Iida et al., 1967; Cox, Pararas-Carayannis, 1969; Pararas-Carayannis, 1969
14		
20		
18		
27		
15		
11		
30		
25		
16		
11		
23		
25		Сообщение Н.А. Щетникова

Т а б л и ц а (продолжение)

1	2	3	4	5
*1958, ноябрь, 7 9 ч 58 мин (XI. 6; 22 ^h 58 ^m) 44,5° с.ш., 148,9° в.д. 80 км M = 8 ¹ / ₄	2 ¹ / ₂	Курильские о-ва о-ва Матуа и Симушир о. Уруп о. Итуруп Сентябрьский Буревестник	<3 3,5 3	0,45
		от Буревестника до Иодного	3-5	
		Иодный	2,6	0,72
		о. Кунашир Круглово Южно-Курильск Сернозаводск	3 2,5 2,5	1,3
		о. Шикотан Малокурильск	3,5	0,55
		Крабозаводск бух. Айвазовского	4-5 5	
		о. Зеленый О. Сахалин Корсаков	4,5 0,1	
		Япония		
		о. Хоккайдо Момбецу Абасири Немуру Ханасаки Киритаппу Бивасе Кусиро Хироо Уракава Томакомай Муроран Хакодате	1 0,2 0,8 0,9 0,7-2,0 1,0 0,2 0,5 0,65 0,07 0,15 0,25	1,7 0,6 0,6 0,7 1,0
		о. Хонсю Хатинохе (Минато) Хатинохе (Саме) Мияко	0,5-1 0,3-0,7 0,2	0,4

6	7	8
	Слабые колебания уровня океана	Аноним, 1959; Аверьянова и др., 1961; Соловьев, Ферчев, 1961, 1962; Федотов, 1962; Понявин, 1965; Соловьев, Тараканов и др., 1967; Соловьев, 1968; Соловьев, Го, 1969; Хатори, 1973; Ярошняя, 1977; SN, vol. 49, N 2, 1959; Brazee, Cloud, 1960; Hatori, 1963 b, 1965, 1967, 1971, 1976; Iida et al., 1967; Cox, Pararas-Carayannis, 1969; Pararas-Carayannis, 1969; Jaroshenya, 1976; Wigen, 1977
	Вторая волна наибольшая. Несколько домов затоплены. Небольшие суда вынесены на берег. Вода поднялась вверх по рекам на сотни метров. Дорога, идущая вдоль берега, захламлена водорослями, плавником и т.п.	
13	Началось с подъема воды	
10	Разрушены причалы, затоплены дома, унесены мосты и стройматериалы. Суда садились на дно	
25	Колебания уровня продолжались сутки	
20		
22		
34		
40		
15-20		
42		
23		
19		
54		
50		
30-40		
42		
40		
24	Разрушены плоты на плантациях устриц	

Т а б л и ц а (продолжение)

1	2	3	4	5
*1958, ноябрь, 7 9 ч 58 мин (X1.6; 22h 58m) 44,5° с.ш. 148,9° в.д. 80 км M = 8 1/4		Кесеннума (Хасиками)	0,6	
		Кесеннума (Кадзигаура)	0,55	
		Онагава	0,3-0,7	
		о. Эносима	0,1	
		Аюкава	0,4	
		Сиогама (порт)	0,4	
		Онахама	0,25	
		Тёси	0,2	1,5
		Мера	0,09	
		м. Омаэ	0,2	
		Тоба	0,03	
		Кусимото	0,15	1,7
		о. Сикоку		
		Кацурахама	0,1	
		Симидзу	0,09	
		о. Кюсю		
		Абурацу	0,05-0,2	2,4
		Макурадзаки	0,02	
		<i>Гавайские о-ва</i>		
		о. Мидуэй	0,2	4,2
		о. Кауаи, Навиливили	1,1	6,4
		о. Оаху		
		Халеива	0,1	6,4
		Гонолулу	0,1	6,7
		о. Коконат	0,1	7,0
		о. Мауи, Кахулуи	0,3	7,2
		о. Гавайи, Хило	0,2	7,3
		О. Уэйк	0,2	4,1
		<i>Маршалловы о-ва</i>		
		о. Кваджелейн	0,1	6,0
		<i>О-ва Самоа</i>		
		Паго-Паго	0,1	9,9
		<i>Алеутские о-ва</i>		
		о. Атту, бух Массакр	0,2	3,0
		о. Адак, бух Свипер-Кав	<0,1	2,0
		<i>Калифорния</i>		
		Порт-Уайниме	<0,1	10,5
		<i>Перу</i>		
		Талара	0,1	19,4
		<i>Канада</i>		
		Тофино	0,1	9,1

6	7	8
69		
58		
37		
35		
27		
40		
25		
20		
20		
50		
17		
25		
22		
25		
15		
12		
14		
8		
23		
25		
19		
20		
15		
16		
22		
40		
15		
12		
17		
Началось с прилива		

Таблица (продолжение)

1	2	3	4	5
? 1958, ноябрь, 13 (XI.12;20 ^h 23 ^m) 44,3° с.ш., 148,9° в.д. 40–60 км M = 7 ¹ / ₂	-1?	<i>Курильские о-ва</i> Южно-Курильск <i>Алеутские о-ва</i> о. Атту, бух. Массакр о. Адак, бух. Свипер-Кав <i>Гавайские о-ва</i> Гонолулу Кахулуи Хило	0,08 0,2 0,2 0,1 0,1 0,1	1,5 2,6 3,2 2,6 3,2
? 1959, апрель, 9 (IV. 9;12 ^h 24 ^m) 44,3° с.ш., 149,0° в.д. 40 км M = 5,0	-2?	<i>Курильские о-ва</i> Южно-Курильск	0,1	1,6
*1959, май 4 (V. 4;07 ^h 16 ^m) 53,1° с.ш., 160,3° в.д. 20 км M = 7 ¹ / ₂	1	<i>Камчатка</i> бух. Моржовая Петропавловск <i>Алеутские о-ва</i> о. Атту, бух. Массакр <i>Курильские о-ва</i> Южно-Курильск <i>Гавайские о-ва</i> о. Мидуэй о. Кауаи, Навиливили о. Оаху Гонолулу Кахуку о. Коконат о. Мауи, Кахулуи Гавайи, Хило	1,5–2 0,08 0,2 0,06 0,1 0,1 0,1 0,4 0,1 0,2 0,1	0,7 1,7 3,1 5,9 6,2 6,3 6,7
*1960, январь, 13 (I. 13;15 ^h 41 ^m) 15 ³ / ₄ ° ю.ш., 72 ³ / ₄ ° з.д. (Перу) 130–200 км M = 7,8	3?	<i>Курильские о-ва</i> Южно-Курильск	0,25	21,3
*1960, май, 21 (V. 21;10 ^h 03 ^m) 37 ¹ / ₂ ° ю.ш., 73 ¹ / ₂ ° з.д. (Чили) M = 7 ¹ / ₂	0?	<i>Курильские о-ва</i> Южно-Курильск	0,1	24,9

6	7	8
15	Запись сомнительна	Соловьев, 1968; Соловьев, Го, 1969; сообщение Н.А. Щетникова; <i>Brazee, Cloud, 1960; Iida et al., 1967; Cox, Pararas-Carayannis, 1969; Pararas-Carayannis, 1969; Hatori, 1976</i>
40	Записи сомнительны	
15		
30		
20		
23		
20		Сообщение Н.А. Щетникова
20–45	Колебания уровня продолжались 12 ч	<i>Чермных, 1960; Соловьев, 1968; Соловьев, Го, 1969; сообщение Н.А. Щетникова; Eppley, Cloud, 1961; Iida et al., 1967; Cox, Pararas-Carayannis, 1969; Pararas-Carayannis, 1969</i>
31		
55		
20		
27		
23		
34		
30		
25		
30		
45	Сомнительная запись	Сообщение Н.А. Щетникова

Таблица (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8
*1960, май, 22 (V. 22; 19h11m) 38° ю.ш., 73 1/2° з.д. (Чили) M = 8 1/2		Байково	4,5		40		
		о. Парамушир					
		Северо-Курильск	4,7	20,8	15-30	Дома на побережье затоплены. Причалы и склады разрушены. 55 000 шт. бочкотары, запасы соли, угля и пр. смыты. Колебания уровня океана продолжались два дня	
		Подгорное	4				
		м. Васильева	1-3				
		о. Матуа	1,3-2,5		10-15		
		о. Симушир	3				
		о. Итуруп					
		Буревестник	2,5		20-30		
		Ясный	1				
		Курильск	1		10-15		
		о. Кунашир, Южно-Курильск	2,2	22,0	30	Смыты мост и некоторые строения	
		о. Шикотан, Мало-Курильск	4		10-20	Причалы и некоторые здания затоплены. Суда сорваны с якорей. Мост унесен в глубь суши	
		о. Зеленый	3				
		о. Сахалин					
	Катангли	0,6	22,7	110			
	Поронайск	0,8		90			
	Корсаков	1,2	24,0	70			
	Мыс Крильон	0,4	23,7	60			
	Невельск	0,04		30			
	Холмск	0,1	24,8	80			
	Охотское море						
	Магадан	2,2	26,0	85	Пароход стукнуло о дно. Повреждены лодки		
*1961, февраль, 13 (II. 12; 21h54m) 43,8° с.ш., 147,7° в.д. 50 км M = 7 1/4	-1/2	Курильские о-ва					
		о-ва Итуруп и Шикотан	0,5-1				На записях всех приборов цунами начинается с подъема воды
		о. Кунашир					
		Южно-Курильск	0,1	0,9	20		Соловьев, Тараканов и др., 1967; Соловьев, 1968; Соловьев, Го, 1969; Ярошениа, 1977; сообщение Н.А. Щеткикова; Hatori, 1971; 1976; Jarosheniya, 1976
		о. Хоккайдо					
		Ханасаки	0,06	0,8	13		
	Кусиро	0,05	0,8?	30			
	Хироо	0,04	1,0?	12			
*1962, май, 12 (V. 11; 14h12m) 17,2° с.ш., 99,7° з.д. (Мексика) 40 км M = 7,2	0	Курильские о-ва					
		Южно-Курильск	0,1	21,5	90		Сообщение Н.А. Щеткикова

Таблица (продолжение)

1	2	3	4	5
? 1962, май, 21 (V. 21; 12 ^h 21 ^m) 41,8° с.ш., 142,4° в.д. 60 км M = 5 ³ / ₄	-2?	Курильские о-ва Южно-Курильск	0,1	1,0
*1963, октябрь, 12 (X. 12; 11 ^h 27 ^m) 44,7° с.ш., 149,1° в.д. 50 км M = 7 ¹ / ₄	-2	Курильские о-ва Курильск	0,03	0,9
*1963, октябрь, 13 (X. 13; 05 ^h 18 ^m) 44,8° с.ш., 149,5° в.д. 60 км M = 8 ¹ / ₄	2 ¹ / ₂	Камчатка Петропавловск	0,02	1,8
		Курильские о-ва о. Шумшу, Бабуш- кино	0,75	1,4
		о. Парамушир Подгорное м. Васильева	1-2,5 1-2	
		о. Матуа	0,95	0,3
		о. Симушир бух. Мильна Скалистый	0,75 1±	0,3 0,3
		о. Уруп м. Кастрикум	5	
		гидрометеостан- ция "Уруп" бух. Алеутка	4	0,3
		Подгорный м. Ван-дер-Линда	0,8 4	0,6 0,5
		о. Итуруп Сентябрьский Буревестник	4 1,5	0,2?
		Курильск	0,7	0,6±
		о. Кунашир м. Ловцова Тятино Южно-Курильск Серноводск м. Весло Головнино	0,7 1,5 1,0 1 0,5 0,3	1,6

6	7	8
20		Сообщение Н.А. Щетникова
10		Соловьев, 1965, 1968; Соловьев и др., 1966; Соловьев, Го, 1969; Hatori, 1976
45		Соловьев, 1965, 1968; Соловьев и др., 1966; Соловьев, Тараканов и др., 1967; Воронов В.Г., 1967; Соловьев, Го, 1969; Хатори, 1973; Ярошениа, 1977; Hatori, Takahasi, 1964; SN, vol. 54, N 2, 1964; Hatori, 1965, 1966, 1967, 1971, 1976; Rothe, 1965; Soloviev, 1965; Von Hake, Cloud, 1965; Iida et al., 1967; Pararas-Carayannis, 1969; Talandier, Raoux, 1969; Jarosheniya, 1976; Wigen, 1977
45		
	Затошен причал	
30	Моретрясением повредило находившееся поблизости судно ВМФ США	
	Несколько раз затапливало причал	
	Песчаное побережье размыто и захламлено водорослями. Погибли морские ежи и каланы	
20-30		
	Смыло запасы угля и горючего	
10-15		
10-12	На берег выбросило много рыбы	
	Волна прошла 100 м вверх по реке Затопило пирс и на него посадило баржу, но следующей волной ее смыло в море	
17	Катер сел на дно	
40	Прилив прошел вверх по реке 100 м	

Таблица (продолжение)

1	2	3	4	5
*1963, октябрь, 13 (X. 13; 05 ^h 18 ^m) 44,8° с.ш., 149,5° в.д. 60 км M=8 ¹ / ₄	о. Шикотан			
	Малокурильск	0,5-1,5	0,9	
	бух. Отрадная	1,5	1,0	
	Крабозаводск	1,0-2,5		
	м. Край Света	1,2		
	бух. Церковная	1-1,5		
	бух. Дельфин	0,6		
	о. Зеленый	1-1,5		
	о. Юрий	1,5		
	о. Анучина	1,5		
	о. Танфильева	1		
	о. Сахалин			
	Катангли	0,4	2,8	
	Поронайск	0,3	3,3	
	Корсаков	0,4	2,3	
	Мыс Крильон	0,4	2,3	
	Невельск	0,15		
	Холмск	0,1		
	Охотское море			
	Магадан	0,1		
	Аян	0,2		
	Япония			
	о. Хоккайдо			
Вакканай	0,15	3,0		
Момбецу	0,3	1,9		
Абасири	0,4	1,5		
Ханасаки	0,6	1,0		
Кусиро	0,6	1,0		
Хакодате	0,4	1,9		
о. Хойсю				
Хатинохе	0,6	1,7		
Мияко	0,1	1,4		
Камаиси	0,4	1,2		
Офунато	0,6	1,7		
о. Эносима	0,1	1,5		
Онагава	0,35	1,7		
Аюкава	0,1	1,9		
Онахама	0,4	1,8		
Тёси	0,2	1,9		
Мера	0,2	1,9		
Каная	0,1	2,0		
Абурацубо	0,2	2,0		

6	7	8
30±	Смыты пиломатериалы и т.п. Осушались причалы. Скорость течений у входа в бухту 8-10 узлов	
20±	Суда раскидало по бухте. Скорость течений 8-10 узлов Несколько малых судов, включая давно затопленные, выбросило на берег	
23		
30		
25		
8		
	На записях в всех приборах в Японии цунами началось с прилива	
40		
20		
52		
9		
36		
40		
33		
57		
24		
40		
34		
40		
10		
13		
10		
5		
35		
14		

Таблица (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8
*1963, октябрь, 13 (X. 13; 05 ^h 18 ^m) 44,8 ^o с.ш., 149,5 ^o в.д. 60 км M = 8 ¹ / ₄		о. Осима	0,03	1,9			
		м. Омаэ	0,4	2,3		7	
		Тоба	0,2	3,1		18	
		Урагами	0,3	3,0		12	
		Кусимото	0,5	2,9		13	
		о. Сикоку					
		Коти	0,1	3,2		20	
		Тосасимидзу	0,2	3,5		21	
		о. Кюсю					
		Хосодзима	0,1	3,6		16	
		Аосима	0,1	3,5		11	
		Абурацу	0,1	3,5		22	
		о-ва Рюкю					
		Насе	0,2	4,2		18	
		о-ва Бонин					
		о. Хатидзэ	0,04	2,2			
		<i>Марианские о-ва</i>					
		о. Гуам	0,1	5,8		14	
		<i>Каролинские и Маршалловы о-ва</i>					
		о. Трук	0,1	5,2		15	
		о. Кваджелейн	0,2	5,8		14	
		о. Уэйк	0,2	3,8		13	
		<i>Гавайские о-ва</i>					
		о. Мидуэй	0,3	4,2		15	
		о. Кауаи					
		Навиливили	0,2			15	
		Порт-Аллен	0,3			15	
		о. Оаху					
		Гонолулу	0,2	6,9		23	
		порт Алавай	0,1				
		о. Коконат	0,1				
		Холеива	0,3	6,6		14	
		о. Мауи					
		Кахулуи	0,4	6,3		15	
		Каанапали	0,1				
		о. Гавайи, Хило	0,4	7,1		15	
		<i>О. Джонстон</i>	0,1	6,4		12	
		<i>О. Рождества</i>	0,1	8,9			
		<i>О-ва Самоа</i>					
		Паго-Паго	0,1	9,6		14	
		<i>О. Таити</i>					
		Фареуте	0,2				
		<i>Алеутские о-ва</i>					
		о. Атту, бух. Массакр	0,4				
							Некоторый ущерб на Таити и соседних островах

Таблица (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8
*1963, октябрь, 20 (X. 20; 00 ^h 53 ^m) 44,5° с.ш., 150,2° в.д. 20 км M = 7 ¹ / ₄		о. Оаху			14 32 22 10 18 18 11		
		Гонолулу	0,1	7,1			
		о. Коконат	0,1				
		Халеива	0,1				
		о. Мауи, Кахулуи	0,4				
		о. Гавайи, Хило	0,1				
		<i>О-ва Самоа</i>					
		Паго-Паго	0,1	9,8			
		<i>О. Таити</i>	0,1	12,0			
		<i>Калифорния</i> Ла-Холья		0,15			
* 1964, март, 27 (III. 28; 03 ^h 36 ^m) 61,1° с.ш., 147,7° з.д. (Аляска) 33 км M = 8,4	4	<i>Командорские о-ва</i> о. Беринга			40 120 70 70 18 60 70 120 160? 140?	Падение уровня океана 10–12 см в 21 ч 30 мин	Соловьев, Тараканов и др., 1967; Соловьев, 1968; Щетников, Полетаев, 1969; Ярошена, 1977; Jago-henya, 1976
		<i>Камчатка</i> Петропавловск	0,06	5,7			
		<i>Курильские о-ва</i> о. Шумшу, Бабушкино	0,7				
		о. Парамушир					
		Северо-Курильск	0,8	6,0			
		Подгорное	1 ±				
		о. Матуа	0,4?				
		о. Итуруп					
		Буревестник	0,7	6,4			
		Курильск	0,15				
		о. Кунашир, Южно-Курильск	0,75	6,4			
		<i>О. Сахалин</i> Катангли	0,15	8,1			
		Поронайск	0,35	8,1			
Корсаков	0,4	7,6					
Мыс Крильон	0,1	7,9					
*1964, июль, 24 (VII. 24; 08 ^h 13 ^m) 46,9° с.ш., 154,4° в.д. 40 км M = 7	-2	<i>Курильские о-ва</i> о. Матуа	0,15	0,3	5 25 10	Началось с прилива	Соловьев, Соловьева и др., 1967; Соловьев, Тараканов и др., 1967; Соловьев, Го, 1969; Hatori, 1971, 1976
		<i>О. Хоккайдо</i> Ханасаки	0,03				
		Куширо	0,03	1,3			
		Хироо	0,04	1,5			
*1965, февраль, 4 (II. 4; 05 ^h 01 ^m) 51,2° с.ш., 178,6° в.д. (Алеутские острова) 40 км M = 8,7	2 ¹ / ₂	<i>Камчатка</i> Петропавловск	0,08				Соловьев, Тараканов и др., 1967; Соловьев, 1968; сообщение Н.А. Щетникова
		<i>Курильские о-ва</i> о. Шумшу, Бабушкино	0,2				
		о. Парамушир, Северо-Курильск	0,1				

Таблица (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8
		о. Матуа	0,15				
		о. Итуруп, Буревестник	0,15	3,1	40	Началось с прилива	
		о. Кунашир, Южно-Курильск	0,15	4,2	43	То же	
* 1965, июнь, 11 (VI. 11; 03 ^h 33 ^m) 44,5° с.ш., 149,1° в.д. 30 км M = 7 ^{1/4}	-3	Курильские о-ва					Соловьев и др., 1968; Соловьев, Го, 1969; Hatori, 1971, 1976
		о. Матуа	0,01		8	Началось с прилива	
		о. Итуруп, Буревестник	0,05	0,5			
		О. Хоккайдо					
		Ханасаки	0,04		12		
		Кусиро	0,04	1,0?	18		
		Хироо	0,05	1,3?			
* 1966, октябрь, 18 (X. 17; 21 ^h 42 ^m) 10,7° ю.ш., 78,8° з.д. (Перу) 40 км M = 8,1	1 ^{1/2}	Курильские о-ва					Сообщение Н.А. Щетникова; Ярошениа, 1977; Jaroshenya, 1976
		Южно-Курильск	0,1	22,3	35	Началось с отлива	
? 1967, март, 19 (III. 19; 04 ^h 02 ^m) 45,6° с.ш., 151,3° в.д. 40 км M = 7	0?	Курильские о-ва					Поплавская и др., 1970; Hatori, 1971
		о. Итуруп, Сентябрьский				Глыбы льда заброшены на берег дальше обычной линии прилива	
		О. Хоккайдо				Никаких следов цунами на записях мареографов в Ханасаки, Кусиро, Хироо	
* 1968, январь, 29 (I. 29; 10 ^h 19 ^m) 43,5° с.ш., 146,7° в.д. 46 км M = 7	-1	Курильские о-ва					Соловьев, Го, 1969; Лапшин, 1972; Леонов и др., 1972; Поплавская и др., 1972; Ярошениа, 1977; Lapshin, 1969; Hatori, 1971, 1976; Jaroshenya, 1976
		о. Парамушир, Северо-Курильск	0,04		50	На записях всех приборов цунами началось с прилива	
		о. Итуруп			20	Вода отошла от берега на 40 м	
		Буревестник	0,1	0,9		Колебания уровня продолжались 4 ч	
		Курильск	0,02	1,1	18		
		о. Кунашир, Южно-Курильск	0,1	0,8?	25	Колебания уровня продолжались 12 ч	
		о. Шикотан, Малокурильск				Уровень воды в бухте понизился	
		о. Полонского		0,5		Вода отошла на 25 м	
		о. Сахалин			15?		
		Мыс Крильон	0,01	2,3			
		Япония					
		о. Хоккайдо					
		Ханасаки	0,1	0,6	14		
		Кусиро	0,05	0,7?	18		
		Хироо	0,1	0,9	10		
		о. Хонсю	0,02				
		Симанокоси	0,1	1,0	12		

Таблица (продолжение)

1	2	3	4	5
*1968, май, 16 (V. 16; 00 ^h 49 ^m) 40,9 ^o с.ш., 143,5 ^o в.д. (Япония) 0 км M = 8,2	2	Курильские о-ва о. Шикотан, Малокурильск, Крабозаводск и др. о. Кунашир, Южно-Ку- рильск о. Итуруп, Буревестник Курильск	0,5 0,5 0,2	1,6 1,2
*1969, август, 12 (VIII. 11; 21 ^h 28 ^m) 43,4 ^o с.ш., 147,7 ^o в.д. 30 км M = 8,2	2	Курильские о-ва о. Парамушир, Северо- Курильск о. Матуа о. Итуруп Сентябрьский Буревестник Курильск другие поселки на западном побережье о. Кунашир Тятино Отрадное Южно-Курильск юго-восточное побе- режье о. Шикотан Малокурильск Крабозаводск бух. Церковная бух. Димитрова о. Полонского о. Юрий о. Зеленый о. Танфильева о. Анучина О. Сахалин Поронайск Корсаков Мыс Крильон Япония о. Хоккайдо Вакканай Момбецу Абасири Немуро Ханасаки	0,2 0,1 1,5 1-2 0,6 до 1 1,2 1,1 1 1 5 4 1,5 1 2 1 2 0,1 0,25 0,3 0,1 0,2 0,3 2,6 1,5	1,9 1,8 0,5 0,6 1,7 1,0 1,3 0,6 0,5 0,5 0,5 0,5 4? 2,3 2,3 2,9 1,9 1,5 0,5 0,5

6	7	8
	Нерегулярные приливы и отливы в пределах 1 м	Лапшин, 1972; Ярошеня, 1977; Lapshin, 1969; Jaroshenya, 1976
20		
25		
20		
40	Началось с прилива	Леонов и др., 1972, 1973; Хатори, 1973; Ярошеня, 1977; NL, v. 2, N 4, 1969; SI, 716-719, 721, 725; SN, v. 60, N 1, 1970; Hatori, 1970, 1971, 1976; Hatori, Koyama, 1971; Von Hake, Cloud, 1971; Jaroshenya, 1976; Wigen, 1977
15	То же	
20		
25	Началось с прилива. Уровень океана опускался на 2,5-3 м	
10	Началось с прилива	
	Вода отошла на 150 м Вода прошла в глубь суши 250 м	
25	Началось с отлива Небольшие изменения уровня моря	
20	Вода отошла на 150 м	
30	Высота цунами определена судовым эхолотом	
30	Вода отошла на 200 м	
10-20	То же	
20		
30		
20		
15	На записях всех приборов, кроме трех, началось с прилива Небольшой ущерб на востоке острова	
30		
12		
24		
12	Началось с отлива	

Таблица (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8
*1969, август, 12		Куширо	0,8	0,6	40	Началось с отлива	
(VIII. 11; 21 ^h 28 ^m)		Хироо	0,8	0,6?	30	То же	
43,4° с.ш., 147,7° в.д.		Соя	0,7		20		
30 км		Уракава	0,6	1,0	65		
M = 8,2		Томакомая	0,2	1,4	62		
		Муроран	0,1	1,5	30		
		Хакодате	0,2	1,7			
		о. Хонсю			48		
		Хатинохе (Саме)	0,4	1,2	52		
		Хатинохе (Минато)	0,7	1,3	10		
		Симанокоси	0,4	1,0	26		
		Мияко	0,3	1,1	30		
		Камайси	0,2	1,1			
		Офунато (Нагасаки)	0,1	1,1	36		
		Офунато	0,3	1,2	42		
		Кесеннума	0,4	1,3	60		
		о. Эносима	0,1	1,2	32		
		Онагава	0,3	1,4	28		
		Аюкава	0,4	1,4			
		Мацукаваура	0,1		22		
		Онахама	0,3	1,6	42		
		Хитати	0,25	1,6	32		
		Тёси	0,2	1,6	18		
		Мера	0,3	1,9			
		Татеяма	0,1				
		о. Кодзу	0,1	1,9			
		о. Мияке	0,1		20		
		Минами-Идзу	0,1	1,9	22		
		м. Омаэ	0,1	2,1	14		
		Овасе	0,2	2,7	23		
		Урагами	0,15	2,7	28		
		Кусямото	0,3	2,6			
		о. Сикоку			36		
		Мурото	0,2	3,0			
		Коти	0,1		36		
		Тосасимидзу	0,2	3,2			
		о. Кюсю			20		
		Кабазэ	0,1	3,8	34		
		Абурацу	0,1	3,3			
		О-ва Рюкю					
		Нисиноомоте	0,02		22		
		Насе	0,1	3,6			
		<i>Гавайские о-ва</i>					
		о. Мидуэй	0,25				
		о. Кауаи, Навиливили	0,2				
		о. Мауи, Кахулуи	0,2				
		О. Уэйк	0,1				

Т а б л и ц а (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8
*1971, сентябрь, 6 (IX. 5; 18 ^h 35 ^m) 46,5° с.ш., 141,1° в.д. 15 км M = 7,5		Чехов	0,5		10		
		Холмск	0,4	0,3	14		
		Невельск	0,4	0,2	20-30		
		Горнозаводск	2	0,5 ±	20-30		
		Шебунино	2	0,5 ±	8		
		Мыс Крильон	0,2	0,7	8		
		Корсаков	0,2	2,4			
		Курильские о-ва			10		
		Курильск	0,1	3,3			
		Приморье			5		
		Адими	0,04	0,75	10		
		Сов. Гавань	0,04	1,2			
		Япония, о. Хоккайдо			15		
		о. Ребун	0,04	0,7	25		
		о. Рисири	0,15		17		
		Вакканай	0,3	0,9	15		
		Тесио	0,15	1,3	23		
		Хаборо	0,2	1,4	15		
		Румой	0,06	1,7	7		
		Отару	0,2	1,5			
		Осёро	0,25	1,4	20		
		Фурухира	0,2		10		
		Иванай	0,3	1,3	12		
	Эсаси	0,04					
	Момбецу	0,06	2,7?				
	Абасири	0,1	2,8				
<hr/>							
*1971, сентябрь, 7 (IX. 6; 13 ^h 37 ^m) 46,6° с.ш., 141,5° в.д. M = 6,2	-3	о. Сахалин			10		Щетников, наст. сб.
		Холмск	0,07	0,4			
<hr/>							
*1971, сентябрь, 8 (IX. 8; 11 ^h 48 ^m) 46,4° с.ш., 141,0° в.д. 15 км M = 6,9	-3	О. Сахалин			13		Соловьев и др., 1973; Оскорбин и др., 1975
		Невельск	0,04	0,4	7		
		Холмск	0,09	0,6			
<hr/>							
*1971, сентябрь, 9 (IX. 8; 17 ^h 00 ^m) 46,2° с.ш., 141,0° в.д. M = 6,3	-3	О. Сахалин			5		Щетников, наст. сб.
		Холмск	0,07	0,7			

Т а б л и ц а (продолжение)

1	2	3	4	5
? 1971, сентябрь, 28 (IX. 27; 19 ^h 02 ^m) 46,4° с.ш., 141,1° в.д. M = 6,2	-4	<i>О. Сахалин</i> Невельск	0,03	0,5
*1971, декабрь, 15 (XII. 15; 08 ^h 30 ^m) 55,9° с.ш., 163,4° в.д. 25 км M = 7,8	0	<i>Камчатка</i> Усть-Камчатск <i>Курильские о-ва</i> Северо-Курильск <i>Алеутские о-ва</i> о. Атту о. Шемья <i>Гавайские о-ва</i> Кахулун Хило <i>О. Уэйк</i>	0,45 0,1 0,1 0,05 0,18 0,15 0,09	0,3
*1973, февраль, 28 (II. 28; 06 ^h 38 ^m) 50,4° с.ш., 156,7° в.д. 70 км M = 7,5	1/2	<i>Курильские о-ва</i> о. Шумшу Бабушкино Козыревск о. Парамушир Северо-Курильск м. Васильева о. Матуа	0,6 1,5 0,8 0,8 0,07	0,1 0,4
*1973, июнь, 17 (VI. 17; 03 ^h 55 ^m) 43,1° с.ш., 145,9° в.д. 50 км M = 7,9	1	<i>Курильские о-ва</i> Северо-Курильск Буревестник Курильск Южно-Курильск Головинно Малокурильск о. Полонского о. Зеленый о. Танфильева <i>Япония</i>	0,1 0,4 0,2 0,2 до 1 0,9 до 1,5 до 0,5 до 1,5	0,9 1,6 1,1 0,5

6	7	8
8		<i>Щетников, наст. сб.</i>
20-30		<i>Лазо, Меньшиков, 1973; Гусев, Зобин, 1975; Гусев и др., 1975; SI, N 1328; SN, v. 62, N 4, 1972; Coffman, Von Hake, 1973</i>
	На записях всех приборов началось с прилива	Оскорбин, Зобин и др., 1977; <i>Щетников, 1977a</i>
32	Колебания уровня продолжались 30 ч	
40	Колебания уровня продолжались 30 ч	
7?		
10		
	На записях всех приборов начинается с прилива	Оскорбин, Поплавская и др., 1977; <i>Щетников, 1977б; Hatori, 1974, 1975; NL, v. 7, N 2, 1974; SI, N 1657, 1670; SN, v. 64, N 1, 1974</i>
20		
20		
23		
25		
20		
	Ущерб более чем на 8 млн. дол. США в районах Немуро и Кусиро. Много рыбацких шхун смыто, 26 разбито или потоплено. 200 домов затоплено. Со складов смыто 300 т лососевых. По тревоге цунами 30 тыс. жителей поднялись на сопки	

Таблица (продолжение)

1	2	3	4	5
* 1973, июнь, 17 (VI. 17; 03 ^h 55 ^m) 43,1° с.ш., 145,9° в.д. 50 км M = 7,9		о. Хоккайдо		
		Абасири	0,15	1,6
		Немуро	1,5	0,4
		Ханасаки	1,5	0,5
		Кусиро	0,5	0,5
		Токатико	0,6	0,6
		Хироо	1,1	0,7
		Уракава	0,5	0,9
		Муроран	0,1	2,1
		Ямаседомари	0,2	1,1
		Хакодате	0,4	
		о. Хонсю		
		Хатинохе (Саме)	0,2	1,1
		Мияко	0,4	0,9
		Офунато	0,2	1,0
		о. Эносима	0,1	1,1
		Онахама	0,2	1,5
		Тёси	0,1	1,5
* 1973, июнь, 24 (VI. 24; 02 ^h 43 ^m) 43,1° с.ш., 146,5° в.д. 50 км M = 7,6	0	Курильские о-ва		
		Северо-Курильск	0,05	
		Буревестник	0,15	0,8
		Курильск	0,08	1,4
		Южно-Курильск	0,06	1,1
		Малокурильск	0,3	0,3
		Япония		
		о. Хоккайдо		
		Абасири	0,08	1,7
		Ханасаки	0,7	0,3
		Кусиро	0,2	0,6
		Хироо	0,3	0,8
		Уракава	0,2	0,8
		Ямаседомари	0,06	1,2
		о. Хонсю		
		Хатинохе (Саме)	0,06	1,3
		Мияко	0,1	1,0
		о. Эносима	0,05	1,2
* 1974, сентябрь, 27 (IX. 27; 05 ^h 47 ^m) 43,2° с.ш., 146,7° в.д. 43 км M = 6,7	-2	Курильские о-ва		
		Япония		
		Ханасаки	0,2	0,6
		Кусиро	0,05	0,6
		Хироо	0,1	0,9

6	7	8
25		
16		
20		
10		
15		
15		
17		
34		
18		
10		
40		
46	На записях всех приборов началось с прилива, кроме, может быть, Малокурильска	Оскорбин, Поплавская и др., 1977; Щетников, 1977б; Hatori, 1974, 1975, 1976; SI, N 1665
28		
20		
21		
20		
12	Небольшой ущерб	
14		
21		
12		
16		
14		
35		
23		
10		
	Не зарегистрировано	Hatori, 1975
15		
25		
24		

Таблица (продолжение)

1	2	3	4	5
*1975, июнь, 10 (VI. 10; 13 ^h 47 ^m) 43,5° с.ш., 148, 5° в.д. 40 км M = 7	2	Курильские о-ва		
		о. Парамушир, Северо-Курильск	0,05	
		о. Матуа	0,2	1,0
		о. Итуруп		
		Буревестник	0,4	0,8
		Курильск	0,02	1,0
		о. Кунашир		
		Южно-Курильск	0,6	1,2
		р. Серебрянка	2-3	
		Отрадное	2	
		р. Винай	2,5-3	
		Чайка	2	
		Горячий пляж	2-3	
		о. Шикотан		
		Малокурильск	0,6	0,6
		бух. Отрадная	1,5-2	
		Крабоводск	1,5	
		бух. Маячная	3,5	
		бух. Сенная	3,5-4	
		м. Непокорный	5,5	
		о. Полонского	2-3	
		о. Зеленый	1	
		о. Юрий	0,7-1	
		<i>Япония</i>		
		о. Хоккайдо		
		Вакканай	0,06	2,9
		Абасири	0,1	1,5
		Ханасаки	0,9	0,7
		Кусиро	0,1	0,8
		Хироо	0,25	1,0
		Уракава	0,3	1,0
		Томакомай	0,1	1,5
		Хакодате	0,06	1,2
		о. Хонсю		
		Саме	0,04	1,2
		Хатинохе	0,15	1,3
		Мияко	0,1	1,0
		Камаиси	0,1	1,1
		Офунато	0,2	1,2
		Аюкава	0,1	1,4
		Мацукаваура	0,1	1,7?
		Онахама	0,1	1,6
		Хитати	0,1	1,8?
		Оарай	0,1	1,7
		Кусимото	0,1	2,4
		о-ва Бонин		
		о. Хатидзэ	0,1	2,0
		о. Титидзима	0,1	1,9

6	7	8
40		Сообщение Л.Н. Поплавской;
10		Hatori, 1975
20	Началось с прилива	
22	Началось с отлива	
	Вода прошла в глубь суши 250 м	
	Вода прошла в глубь суши 150 м	
	Вода пришла в глубь суши 60 м	
17	Началось с отлива	
	На записях всех приборов в Японии начи-	
	нается с прилива	
23		
12		
13		
24		
12		
15		
20		
25		
18		
8		
10		
15		
13		
8		
12		
8		
8		
10		
12		
8		
15		

Таблица (окончание)

1	2	3	4	5
*1976, январь, 21 (1. 21; 10 ^h 05 ^m) 44,6° с.ш., 149,2° в.д. M = 7,3	-2 ¹ / ₂	Курильские о-ва о. Итуруп, Буревестник	0,13	0,6
		о. Кунашир, Южно-Ку- рильск	0,04	0,8
		о. Шикотан, Малоку- рильск	0,12	0,8
		Япония		

В таблице сначала приводятся основные сведения о землетрясении (или вулканическом извержении), возбуждавшем цунами: время возникновения по местному времени (ч, мин) и гринвичскому (*h*, *m*), если землетрясение было записано приборами; координаты эпицентра, рассчитанные на основании приборных наблюдений для землетрясений XX в. и приближенно оцененные по макросейсмическим данным для более ранних землетрясений; глубина гипоцентра; магнитуда *M*. Звездочкой отмечены цунами, достоверность которых не вызывает сомнений; вопросительными знаками — сомнительные случаи цунами. Для цунами XVIII — начала XX вв. наряду с датой по григорианскому календарю в скобках приводится дата по юлианскому календарю ("старому стилю").

Во втором столбце указывается обобщенная интенсивность цунами *I* по шкале Имамура—Иида—Соловьева (Соловьев, 1972а); сомнительные оценки сопровождаются вопросительным знаком.

Затем для отдельных пунктов наблюдения приводятся следующие данные: высота подъема воды η , время пробега цунами от очага до пункта наблюдения Δt , период волн *T*. В графе "Период волн", вообще говоря, следовало бы приводить период головной волны, так как именно эта величина индивидуальна для каждого цунами. Однако соответствующих данных удалось собрать очень мало, поэтому указываются периоды максимальных колебаний уровня воды. Эти значения индивидуальны для точек наблюдения и в основном совпадают с периодами локальных сейсмических колебаний.

В конце дается список литературных источников. Выделены те из них, которые содержат оригинальный фактический материал.

Всего в таблице описано более 60 цунами или сходных с ними явлений. Почти половина из них произошли в 1737—1958 гг. (в среднем одно событие в 7,4 года), остальные отмечены в 1959—1976 гг. (одно событие в 0,6 года).

Скачок в объеме информации за последние годы в первую очередь отражает заметное улучшение системы наблюдений. Анализ условий возникновения цунами не входит в задачи данной публикации.

Автор признателен сотрудникам Сахалинского КНИИ Ч.Н. Го, Х.С. Киму и Н.А. Щетникову за помощь в составлении таблицы.

6	7	8
		Soloviev, 1976
10	Колебания уровня продолжались 5–6 ч	
15	Колебания уровня продолжались 4 ч	
	Не записано мареографами	

ЛИТЕРАТУРА

- Аверьянова В.Н., Федотов С.А., Ферчев М.Д. Предварительные данные о землетрясении и цунами 6 ноября 1958 г. — "Бюл. Совета по сейсмологии АН СССР", 1961, № 9.
- Аноним. Землетрясения в Камчатке, Нахичевани и в губерниях Рязанской и Пермской. — "Журнал Министерства внутренних дел", ч. XI, № 8, 1841а.
- Аноним. Землетрясения. — "Журнал Министерства внутренних дел", ч. XII, № 12, 1841 б.
- Аноним. О землетрясении у о. Уруп в 1918 г. "Тоё гакугей дзасси (Журнал восточной культуры)", 1918, 35, с. 676–677. На яп. яз.
- Аноним. Моретрясение в районе острова Уруп в 1918 г. — "Хоккайдо кисё (Метеорологические явления Хоккайдо)", 1919, № 281. Приложение. На яп. яз.
- Аноним. Землетрясение к юго-востоку от Камчатского полуострова. — "Дзисин (Землетрясения). Сер. 2", 1952, 5, № 4. На яп. яз.
- Аноним. Отчет об исследованиях Камчатского землетрясения. — "Кэнсин дзихо (Кварт. журнал сейсмологии)", 1953, 18, № 1. На яп. яз.
- Аноним. Землетрясения вблизи побережья о. Итуруп 7 ноября 1958 г. — "Кэнсин дзихо (Кварт. журнал сейсмологии)", 1959, 24, № 3. На яп. яз.
- Берг Л.С. Открытие Камчатки и экспедиции Беринга, 1725–1742. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1946.
- Берх В. Хронологическая история открытия Алеутских островов или подвиги Российского купечества. СПб., 1823.
- Бутаков А. Записки русского морского офицера во время путешествия вокруг света в 1840, 1841 и 1842 годах. (Отплытие из Камчатки). — "Отечественные записки", 1844, 35, отд. II.
- Воронов В.Г. Каланы и цунами — "Природа", 1967, № 8.
- Воронов К.И. Рыбоконсервная промышленность на Дальнем Востоке. — В кн.: Рыбные и пушные богатства Дальнего Востока. Владивосток, Изд: Научпромбюро Дальрыбохоты, 1923.
- Вялов О.С. Сведения о некоторых землетрясениях на Камчатке. — "Изв. ВГО", 1944, 24, вып. 2–3; "Природа", 1944, № 1.
- Главацкий С.Н., Ефремов Г.К. Извержение вулкана Пик Сарычева в ноябре 1946 г. — "Бюл. Камчатской вулкан. станции АН СССР", 1948, № 15.
- Горшков Г.С. Хронология извержений вулканов Курильской гряды. — "Труды Лабор. вулкан. АН СССР", 1954, вып. 8.
- Горшков Г.С., Богоявленская Г.Е. Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения, 1955–1963 гг. М., "Наука", 1965.
- Григораш З.К., Заклинский А.Б. Моделирование цунами во Втором Курильском проливе. — "Изв. АН СССР. Сер. геофиз.", 1962, № 5.
- Гусев А.А., Зобин В.М. Макросейсмическое описание Усть-Камчатского землетрясения. — В кн.: Сильные камчатские землетрясения 1971 г. Владивосток, 1975.

- Гусев А.А., Зобин В.М., Кондратенко А.М., Шумилина Л.С. Усть-Камчатское землетрясение 15. XII — В кн.: Землетрясения в СССР в 1971 г. М., "Наука" 1975.
- Дитмар К. Поездки и пребывание в Камчатке в 1851—1855 гг., ч. 1. СПб., 1901.
- Дорошин П.Н. О некоторых вулканах, их извержениях и землетрясениях в бывших американских владениях России. — "Зап. СПб. минер. о-ва". Сер. II, ч. 5, 1870.
- Ефремов Ю.К. Курильское ожерелье. М., Географиздат, 1962.
- Землетрясение и цунами 6 сентября 1971 года, возникшие у юго-западного побережья Сахалина. — "Кэнсин дзихо (Кварт. журнал сейсмологии)", 1972, 37, № 1. На яп. яз.
- Имамура А. История японских цунами. — "Кайено кагаку (Океанография)", 1942, 2, № 2. На яп. яз.
- Имамура А. Каталог японских цунами. — "Дзисин (Землетрясения). Сер. 2", 1949, 1, № 1. На яп. яз.
- Кобаяси. Цунами, вызванное землетрясением вблизи о. Уруп 8 сентября 1918 года. — "Тоё гакугей дзасси (Журнал восточной культуры)", 1919, 36. На яп. яз.
- Крашенинников С.П. Описание земли Камчатки. СПб., 1975. Изд. 4-е, с приложением рапортов, донесений и других неопубликованных материалов. М.—Л., 1949.
- Кривошей М.И. Лабораторное определение границ и уровня затопления берега в районе г. Усть-Камчатска при накатывании волн цунами. — В кн.: Проблема цунами. М., "Наука", 1968.
- Лазо А.В., Меньшиков В.И. Цунами в Усть-Камчатке. — "Метеорология и гидрология", 1973, № 3.
- Лапшин С.С. Цунами на Тихоокеанском побережье Курильских островов в 1968 г. — "Труды СахКНИИ", вып. 29, 1972.
- Левцкий Г.В. Бюллетень Постоянной Центральной Сейсмической комиссии за 1904 г. Птб., 1906.
- Леонов Н.Н., Оскорбин Л.С., Поплавская Л.Н. и др. Шикотанское землетрясение и цунами 11 августа 1969 г. — В кн.: Землетрясения в СССР в 1969 г. М., "Наука", 1973.
- Леонов Н.Н., Оскорбин Л.С., Щетников Н.А. и др. Сильные землетрясения и цунами в районе Малой Курильской гряды, 1961—1969 гг. — "Труды СахКНИИ", вып. 29, 1972.
- Литке Ф.П. Путешествие вокруг света, совершенное на военном шлюпе Сенявине в 1826, 1827, 1828 и 1829 годах. Отделение мореходное. СПб., 1835.
- Меняйлов А.А. Ноябрьские землетрясения 1936 г. на Камчатке. — "Бюл. вулкан. ст. АН СССР на Камчатке", 1938, № 3.
- Меняйлов А.А. Цунами в Усть-Камчатском районе. — "Бюл. вулкан. ст. АН СССР на Камчатке", 1946, № 12.
- Морозов С. Там, где бушевали цунами. — "Огонек", 1960, № 32.
- Мушкетов И.В., Орлов А.В. Каталог землетрясений Российской империи. — "Зап. РГО по общей географии", 1893, 26.
- Накамура С.Т. Цунами, сопровождавшее Урупское землетрясение 8 сентября 1918 г. — "Кисе запусан" (Различные сообщения по метеорологии)". Токио, Центральная метеорологическая обсерватория. 1918, 1, № 5. На яп. яз.
- Новограбленов П. Февральское землетрясение 1923 г. — Газ. "Полярная звезда", 1923а, № 46, 1. V.
- Новограбленов П. О землетрясении в бухте Кольгирь. — Газ. "Полярная звезда", 1923б, № 79, 22. VII.
- Новограбленов П. Землетрясение в Усть-Камчатке 14 апреля 1923 г. — Газ. "Полярная звезда", № 94, 26. VIII; газ. "Долина" (орган Усть-Камчатского райревкома), 1923в, № 3, 6. V.
- Омори Ф. Каталог описаний сильных землетрясений в Японии. — "Синсай но бо тесакай хококу" (Публикации Комиссии по изучению землетрясений)", 1913, 68 (В). На яп. яз.
- Оскорбин Л.С., Зобин В.М., Поплавская Л.Н. и др. Землетрясение и цунами 28 февраля 1973 года. — В кн.: Землетрясения в СССР в 1973 г. М., "Наука", 1977.

- Оскорбин Л.С., Леонов Н.Н., Волкова Л.Ф., Воробьева Е.А.* Монеронское землетрясение 5 (6). IX. — В кн.: Землетрясения в СССР в 1971 г. М., "Наука", 1975.
- Оскорбин Л.С., Поплавская Л.Н., Рудик М.И.* и др. Июньские землетрясения и цунами в районе Малой Курильской гряды в 1973 г. — В кн.: Землетрясения в СССР в 1973 г. М., "Наука", 1977.
- Позднеев Д.М.* Материалы по истории северной Японии и ее отношения к матерiku Азии и России, т. 2. Иокогама, 1909.
- Полонский А.* Курилы. — "Зап. РГО по отд. этнографии". 1871, 4.
- Понявин И.Д.* Волны цунами. Л., Гидрометеиздат, 1965.
- Поплавская Л.Н., Бойчук А.Н., Оскорбин Л.С.* и др. Шикотанское землетрясение 29 января 1968 г. — В кн.: Землетрясения в СССР в 1968 г. М., "Наука", 1972.
- Поплавская Л.Н., Оскорбин Л.С., Волкова Л.Ф., Бойчук А.Н.* Землетрясения Дальнего Востока. — В кн.: Землетрясения в СССР в 1967 г. М., "Наука", 1970.
- Попов Г.И.* Цунами в Тихом океане в мае 1960 г. — "Океанология", 1963, 3, вып. 5.
- Саваренский Е.Ф., Тищенко В.Г., Святловский А.Е.* и др. Цунами 4–5 ноября 1952 г. — "Бюл. Совета по сейсмол. АН СССР", 1958, № 4.
- Сарычев Г.* Путешествие капитана Биллингса через Чукотскую землю от Берингова пролива до Нижнеколымского острога и плавание капитана Галпа на судне "Черный Орел" по Северо-Восточному океану в 1791 г. СПб., 1811.
- Святловский А.Е.* Цунами. М., Изд-во АН СССР, 1957.
- Святловский А.Е.* Цунами Тихоокеанского побережья СССР. — "Природа", 1959, № 4.
- Святловский А.Е.* Служба цунами. — "Наука и жизнь", 1973, № 8.
- Сгибнев А.* Попытки русских к заведению торговых сношений с Японией в XVIII и начале XIX столетий. — "Морской сборник", 1869 а, С, № 1.
- Сгибнев А.* Исторический очерк главнейших событий в Камчатке. — "Морской сборник", 1869б, т. СШ, № 7.
- Сигетоми Г.* Цунами в бухте Футама на о. Титидзима 8 ноября 1918 г. — "Нихон кисс гаккай (Журнал Метеорол. о-ва Японии). Сер. 1", 1918, 37, № 12. На яп. яз.
- Сильницкий А.* Камчатские вулканы и их деятельность. — Газ. "Приамурские ведомости", 1905, № 779, 780, 19 и 22 апреля.
- Соловьев А.И.* Курильские острова. 2-е изд. Изд-во Главсевморпути, 1947.
- Соловьев С.Л.* Общий обзор сейсмичности СССР. — В кн.: Землетрясения в СССР. М., Изд-во АН СССР, 1961.
- Соловьев С.Л.* Землетрясения и цунами 13 и 20 октября 1963 года на Курильских островах. Южно-Сахалинск, 1965.
- Соловьев С.Л.* Проблема цунами и ее значение для Камчатки и Курильских островов. — В кн.: Проблема цунами. М., "Наука", 1968.
- Соловьев С.Л.* Повторяемость землетрясений и цунами в Тихом океане. — "Труды СахКНИИ", вып. 29, 1972а.
- Соловьев С.Л.* Методы предсказания цунами. — "Вестник АН СССР", 1972б, № 5.
- Соловьев С.Л., Го Ч.Н.* Каталог цунами в Тихом океане (основные данные). М., ИФЗ, 1969.
- Соловьев С.Л., Го Ч.Н.* Каталог цунами на западном побережье Тихого океана. М., "Наука", 1974.
- Соловьев С.Л., Го Ч.Н.* Каталог цунами на восточном побережье Тихого океана. М., "Наука", 1975.
- Соловьев С.Л., Леонов Н.Н., Оскорбин Л.С.* и др. Монеронское землетрясение 5/6 сентября 1971 г. — "Докл. АН СССР", 1973, 212, № 1.
- Соловьев С.Л., Поплавская Л.Н., Соловьева О.Н.* и др. Землетрясения Дальнего Востока. — В кн.: Землетрясения в СССР в 1965 г. М., "Наука", 1968.
- Соловьев С.Л., Соловьева О.Н., Оскорбин Л.С.* и др. Землетрясения Дальнего Востока. — В кн.: Землетрясения в СССР в 1964 г. М., "Наука", 1967.
- Соловьев С.Л., Соловьева О.Н., Тараканов Р.З.* и др. Землетрясения Дальнего Востока. — В кн.: Землетрясения в СССР в 1963 г. М., "Наука", 1966.
- Соловьев С.Л., Тараканов Р.З., Соловьева О.Н.* и др. Землетрясения и цунами. Атлас Сахалинской области. М., ГУГК, 1967.
- Соловьев С.Л., Ферчев М.Д.* Сводка данных о цунами в СССР. — "Бюл. Совета по сейсмол. АН СССР", 1961, № 9.

- Соловьев С.Л., Ферчев М.Д.* Цунами Дальнего Востока, 1737–1958 гг. – В кн.: Атлас землетрясений в СССР. М., Изд-во АН СССР, 1962.
- Татаринов М.* Описание Курильских островов. Собрание сочинений, выбранных из месяцесловов на разные годы, ч. 6. СПб., 1790.
- Трошин А.Н., Дягилев Г.А.* Усть-Камчатское землетрясение 13 апреля 1923 г. (Материал обследования берегов Камчатского залива, опроса жителей, пострадавших от землетрясения, и газетные заметки). Рукопись. Библиотека Института физики Земли АН СССР, 1926.
- Уланов А.В.* К материалам по сейсмологии Дальнего Востока. – "Изв. Дальневост. геофиз. ин-та", вып. I (VIII), 1931.
- Уланов А.В.* К материалам по сейсмологии Дальнего Востока. – "Изв. Дальневосточного геофиз. ин-та", вып. II (IX), 1932.
- Федотов С.А.* Определение областей возникновения воли цунами при Камчатском землетрясении 4 ноября 1952 г. и Итурупском землетрясении 6 ноября 1958 г. – "Изв. АН СССР. Сер. геофиз.", 1962, № 10.
- Федотов С.А., Гусев А.А., Зобин В.М.* и др. Озерновское землетрясение и цунами 22 (23) ноября 1969 г. – В кн.: Землетрясения в СССР в 1969 г. М., "Наука", 1973.
- Хатори Т.* Метод определения магнитуды цунами. – "Труды СахКНИИ, вып. 32", 1973.
- Чермных Г.П.* Землетрясение у берегов Камчатки 4 мая 1959 г. – "Бюл. Совета по сейсмол. АН СССР", 1960, № 11.
- Щетников Н.А., Поletaев Е.И.* Аляскинское цунами 28 марта 1964 г. у берегов СССР. Южно-Сахалинск, 1969.
- Щетников Н.А.* Северо-Курильское цунами 28 февраля 1973 г. – В кн.: Теоретические и экспериментальные исследования по проблеме цунами. М., "Наука", 1977а.
- Щетников Н.А.* Шикотанские цунами 17 и 24 июня 1973 г. – В кн.: Теоретические и экспериментальные исследования по проблеме цунами. М., "Наука", 1977б.
- Ямагути С.* О цунами 5 ноября 1952 года, сопровождавшем катастрофическое Камчатское землетрясение. – "Гидрографический бюллетень" (Японская гидрографическая служба), 39, с. 286–288, 1953. На яп. яз.
- Ярошена Р.А.* Исследование собственных колебаний уровня бухт Курило-Камчатского побережья. – В кн.: Теоретические и экспериментальные исследования цунами. М., "Наука", 1977.
- Adams W.M.* Potential tsunami inundation zones for the islands of Molokai and Lanai, Hawaiian Islands. – Report HIG-68-15, Hawaii Inst. Geophys. Univ. of Hawaii, Honolulu, 1968.
- Adams W.M.* Prediction of tsunami inundation from current realtime seismic data. – Hawaii Institute of Geophysics, HIG-69-9, 1969.
- Adams W.M., Jordaаn J.M.* Model study of tsunami amplification around the Island of Oahu, Hawaii. Center for Engineering Research, University of Hawaii, Honolulu, 1968.
- Aleksander W.D.* A brief history of the Hawaiian people. N.Y., Amer. Book Co, 1891.
- Angenheister G.* Vier Erdbeben und Flutwellen im Pazifischen Ozean beobachtet am Samoa-Observatorium, 1917–1919. – "Nachrichten der K. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, mathematisch – physikalische Klasse", 1920, S. 7–10.
- Angenheister G.* Beobachtungen an Pazifischen Beben. Ein Beitrag zum Studium der obersten Erdkruste. – Nachrichten der K. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, mathematisch – physikalische Klasse", 1921 a, S. 2–25.
- Angenheister G.* A study of Pacific earthquakes. – "New Zealand J. of Science and Technology", 1921b, 4, N 5.
- Angenheister G.* Five earthquakes and tidal waves in the Pacific Ocean. – In: Apia Observ. Annual Rept for 1921. Wellington, Govt. Print., 1923.
- Anonym.* Earthquake wave in Hawaii. – "Monthly Bull. Hawaiian Volcano Observ.", Honolulu, 1923, 11, N 2.
- Anonym.* The magnitude catalog of major earthquakes which occurred in the vicinity Japan (1885–1950) (Japanese). – "Seismol. Bull. Central Meteorol. Observ", Tokyo, 1951, N 12.

- Anonym.* Earthquake near Kamchatka. – "Nature", 1952, 170, N 4335.
- Bennett C.C.* Honolulu directory and historical sketch of the Hawaiian or Sandwich Islands, Honolulu Press, Honolulu, 1869.
- Berninghausen W.H.* Tsunami reported from the west coast of South America, 1952–1960. – "Bull. Seismol. Soc. America", 1962, 52, N 4.
- Brazee R.J., Cloud W.K.* Tidal disturbances of seismic origin. – In: United States Earthquakes, 1956. Washington, 1958.
- Brazee R.J., Cloud W.K.* Tidal disturbances of seismic origin. – In: United States Earthquakes, 1958. Washington, 1960.
- Brigham W.T.* Notes on the volcanoes of the Hawaiian Islands with a history of their various eruptions. – "Boston Soc. Natur. History", 1866, 1, pt 3.
- Coffman J.L., Von Hake C.A.* United States Earthquakes, 1971. Boulder, 1973.
- Cox D.C., Mink J.F.* The tsunami of 23 May 1960 in the Hawaiian Islands. – "Bull. Seismol. Soc. America", 1963, 53, N 6.
- Cox D.C. Pararas-Carayannis G.* Catalog of tsunamis in Alaska. World Data Center A, 1969.
- Eppley R.A., Cloud W.K.* Tidal disturbances of seismic origin. – In: United States Earthquakes, 1959. Washington, US Coast and Geodetic Survey, 1961.
- Fedotov S.D. Soloviev S.L.* On the earthquake and tsunami in the Bering Sea on November 23 1969. – "New Letter", 1970, 3, N 2.
- Finch R.H.* On the prediction of tidal waves. – "Monthly Weather Rev., US Weather Bureau, Washington", 1924, 52, N 3.
- Gmelin J.G.* Reise durch Sibirien. Von dem Jahr 1733 bis 1743. T. 3. Von dem Jahr 1738 bis zum Ende 1740. Göttingen, 1752.
- Gondo S.* Japan quake disasters and famine considerations (Japanese). Tokyo, Bungeishinshusha, 1932.
- Gordong-Cumming C.* Fire fountains: the kingdom of Hawaii, its volcanoes, and the history of its missions, v. 1. Edinburgh and London, Blackwood and Sons, 1883.
- Gutenberg B., Richter Ch.* Seismicity of the Earth and associated phenomena. New Jersey, Princeton Univ. Press, 1954.
- Hatori T.* On the tsunamis along the Island of Hawaii. – "Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo", 1963 a, 41, pt 1.
- Hatori T.* Directivity of tsunamis. – "Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo", 1963b, 41, pt 1.
- Hatori T.* Study on distant tsunamis along the coast of Japan. Part 1. Distribution of tsunami energy and travel time. – "Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo", 1965, 43, pt 3.
- Hatori T.* Vertical displacement in a tsunami source and the topography of the sea bottom. – "Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo", 1966, 44, pt 4.
- Hatori T.* The wave form of tsunami on the continental shelf. – "Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo", 1967, 45, pt 1.
- Hatori T.* An investigation of the tsunami generated by the east Hokkaido earthquake of August 1969. – "Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo", 1970, 48, pt 3.
- Hatori T.* Tsunami sources in Hokkaido and Southern Kuril regions. "Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo", 1971, 49, pt 1–3.
- Hatori T.* An investigation of the tsunami of September 6 1971 generated of Southwestern Sakhalin (Japanese). – "Zisin", 1972, 25, N 3.
- Hatori T.* Source of the tsunami off the Nemuro peninsula in 1973 and its comparison with the tsunami in 1894 (Japanese). Report Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ, N 13, 1974.
- Hatori T.* Tsunami activity in Eastern Hokkaido after the off Nemuro peninsula earthquake in 1973 (Japanese) – "Zisin", 1975, 28, N 4.
- Hatori T.* Tsunami off the Nemuro Peninsula in June 1973 and tsunami generation in East Hokkaido. – Tsunami Research Symposium 1974, Royal Society of New Zealand, Bull. 15. Paris – Wellington, 1976.
- Hatori T., Koyama M.* Travel times of tsunamis and refraction diagrams at the Pacific coast of Japan (Japanese). – "Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo", 1971, 49, pt 1–3.
- Hatori T., Takahasi R.* On the Iturup tsunami of Oct. 13 1963, as observed along the coast of Japan. – "Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo", 1964, 42, N 3.

- Heck N.H.* List of seismic sea waves. - "Bull. Seismol. Soc. America", 1947, 31, N 4.
- Honda K., Terada T., Yoshida Y., Isitani D.* Secondary undulations of oceanic tides. - "J. College Sci.", Tokyo, 1908a, 24.
- Honda K., Terada T., Yoshida Y., Isitani D.* Secondary undulations of oceanic tides. - Publ. Earthquake Invest. Committee, in foreign languages, N 26, Tokyo, 1908b.
- Iida K.* Earthquakes accompanied by tsunamis occurring under the sea off the Islands of Japan. - "J. Earth Sci. Nagoya Univ.", 1965, 4, N 1.
- Iida K.* Magnitude and energy of earthquakes accompanied by tsunamis, and tsunami energy. - "J. Earth Sci., Nagoya Univ.", 1958, 6, N 2.
- Iida K.* Magnitude of tsunamigenic earthquake, aftershock area, and area of tsunami origin. Geophys. Papers Dedicated to Prof. K. Sassa, Kyoto, 1963a.
- Iida K.* Magnitude, energy, and generation mechanisms of tsunamis and a catalogue of earthquakes associated with tsunamis. - Proc. Tsunami Meetings Assoc. Tenth Pacific Sci. Congr., Paris, 1963b.
- Iida K., Cox D.C., Pararas-Carayannis G.* Preliminary catalog of tsunamis occurring in the Pacific Ocean. Hawaii Inst. Geophys. Univ. Hawaii, Data Report N 5, 1967.
- Imamura A.* Past tsunamis of the Sanriku coast (Japanese). - Japan. J. Astron. and Geophys., 1934, 11, N 3.
- Imamura A., Moriya M.* Mareographic observations of tsunami in Japan during the period from 1894 to 1924. - "Japan. J. Astron. and Geophys.", 1939, 17, N 1.
- Jaggard T.A.* Earthquake wave in Hawaii. - "Monthly Bull. Hawaiian Volcano Observ.", Honolulu, 1923, 11, N 2.
- Jaggard T.A.* Forewarning of tidal waves in Hawaii. - "Volcano Letter", 1926, N 57.
- Jaggard T.A.* Seismic sea wave on March 6, 1929. - "Volcano Letter", 1929, N 220.
- Jaggard T.A.* Ocean waves from submarine earthquakes. - "Volcano Letter", 1930, N 274.
- Jaggard T.A.* Hawaiian damage from tidal waves. - "Volcano Letter", 1931, N 321, p. 1-3.
- Jaggard T.A.* The great tidal wave of 1946. - "National History", 1946, 55, N 6.
- Jarvis J.S.* History of the Hawaiian or Sandwich islands. Boston, Tappan and Dennet, 1843.
- Kawasumi H.* (Ed.) List of great earthquakes in and near Japan; list of great earthquakes in China; and list of great earthquakes of the world (Japanese). - In: Chigaku (Earth Sciences) in Rika-Nemryo (Nat. Sci. Almanac), Tokyo, Maruzen, 1963.
- Lapshin S.* Tsunamis in the Kuril Islands in 1968. - "News Letter", 1969, 2, N 4.
- Loomis H.G.* Tsunami wave run-up heights in Hawaii. - Report HIG-76-5, Hawaii Inst. Geophys. Univ. of Hawaii, Honolulu 1976.
- Macdonald G.A.* The tsunami of November 4 1952. - "Volcano Letter", 1952, N 518.
- Macdonald G.A., Shepard F.P., Cox D.C.* The tsunami of April 1, 1946 in the Hawaiian Islands. - "Pacific Sci.", 1947, 1.
- Macdonald G.A., Wentworth C.K.* The tsunami of November 4 1952 on the island of Hawaii. - "Bull. Seismol. Soc. America", 1954, 44, N 3.
- Mallet R.* Third report on the facts of earthquakes phenomena. Catalogue of recorded earthquakes from 1606 B.C. to A.D. 1850 (1606 B.C. - 1755). - Rept 24 Meeting Brit. Assoc. Advancement Sci., London, 1855.
- Marvin C.* Earthquake wave in Hawaii. - "Monthly Bull. Hawaiian Volcano Observ.", 1923, 11, N 2.
- Mertens H.* Der neuste Ausbruch des Awatscha auf Kamchatka. Taschenbuch für die gesammte Mineralogie. - "Z. Mineral.", 2, 1829.
- Milne J.* Seismology. 2 ed. London, 1908.
- Milne J.* A catalogue of destructive earthquakes, A.D. 7 to A.D. 1899. - 16-th Report of the Committee on Seismological Investigations. Report 81-st Meeting Brit. Assoc. Advancement Sci., Portsmouth, 1911. London, 1912.
- Miyoshi H.* Directivity of the recent tsunamis. - "J. Oceanogr. Soc. Japan", 1955, 11, N 4.
- Murphy L.* Earthquakes for 1952 in retrospect. - "Earthquake Notes", 1952, 23, N 3-4.
- Murphy L.M., Cloud W.K.* Tidal disturbances of seismic origin. - In: United States Earthquakes, 1952. Serial N 773, p. 50, Washington, 1954.

- Musya K. (Ed.)* Historical data concerning great earthquakes of Japan (Japanese). Earthquake Disaster Prevention Commiss. Ministry of Education, v. 2, 1694 to 1784 A.D., 1943.
- Nakamura S.T.* Note on tsunamis. "Proc. Phys-Math. Soc. Japan", II, v. 9, 1918.
- NL - News Letter, International Tsunami Information Center, Honolulu.
- Omori F.* Successive occurrences of destructive earthquakes. - "Bull. Earthquake Invest. Commiss.", 1923, 11, N 1.
- Pallas P.S.* Neue Beschreibung der Kurilischen Inseln. - In: Neue Nordische Beyträge zur physikalischen und geographischen Erd- und Völkerbeschreibung, Naturgeschichte und Oekonomie, Bd. IV, SPb., 1783.
- Pallas P.S.* Auszug eines Briefes aus Kamchatka vom 8 Mai 1791. - Neue Nordische Beyträge zur physikalischen und geographischen Erd- und Völkerbeschreibung, Naturgeschichte und Oekonomie, 5, SPb., 1793.
- Pararas-Carayannis G.* Catalog of tsunamis in the Hawaiian Islands. World Data Center A, 1969.
- Perrey A.* Documents sur les tremblements de terre et les phénomènes volcaniques dans l'archipel des Kuriles et au Kamchatka. - "Ann. Soc. agric., histoire natur. et arts utiles", Lyon, 1864, 8.
- Perrey A.* Documents sur les tremblements de terre et les phénomènes volcaniques des îles Aleoutiennes, de la péninsule d'Alaska et de la côte nord-ouest d'Amérique. - "Mem. Acad. sci., arts et belles-lettres Dijon", 1865, 13.
- Powers H.A.* The Aleutian tsunami at Hilo, Hawaii, April 1 1946. - "Bull. Seismol. Soc. America", 1946, 36, N 4.
- Rothé J.-P.* Tableau de la sismicité du globe pendant les années 1951 et 1952. - "Rev. Etude des Calamités", 1954, N 32.
- Rothé J.-P.* Tableau de la sismicité du globe pendant les années 1963 et 1964. - "Rev. Union internat. Secours", 1965, N 4.
- Sapper K.* Vulkankunde. Stuttgart, 1927.
- Sauer M.* An account of a geographical and astronomical expedition to the Northern part of Russia by commodore Joseph Billings in the years 1785-1704. London, 1802.
- Shepard F.P., Macdonald G.A., Cox D.C.* The tsunami of April 1, 1946. - "Bull. Scripps Inst. Oceanogr.", 1950, 5, N 6.
- Shimizu T.* Interesting phenomena on the tidal records. - "Bull. Geogr. Survey Inst. Tokyo", 1954, v. 4, N 1.
- SI - Smithsonian Institution, Center for short-lived phenomena. Event notification reports.
- Sieberg A.* Erdbebengeographie. - "Handbuch der Geophysik", 4, Lief. 3, Berlin, 1932.
- SN - Seismological notes; Bulletin of the Seismological Society of America.
- Soloviev S.L.* The Urupe earthquake and associated tsunami of 1963. - "Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo", 1965, 43, pt 1.
- Soloviev S.L.* Kuril trench earthquake and tsunami, January 21, 1976. - "News Letters", 1976, 9, N 3.
- Steller G.W.* Topographische und physikalische Beschreibung der Beringsinsel, welche im östlichen Weltmeer an der Küste vom Kamchatka liegt. - Neue Nordische Beyträge zur physikalischen und geographischen Erd- und Völkerbeschreibung, Naturgeschichte und Oekonomie, Bd. 2, SPb., 1781.
- Talandier J., Raoux D.* Forecasting tsunamis by the T-waves of the tsunamigenic earthquakes. - NL, 1969, 2, N 4.
- Tanakadate H.* Volcanic activity in Japan during the period between June 1931 and June 1934. - "Japan. J. Astron. and Geophys.", 1934, 12, N 1.
- Von Hake C.A., Cloud W.K.* United States Earthquakes, 1963, Washington, 1965.
- Von Hake C.A., Cloud W.K.* United States earthquakes 1969. Rockville, 1971.
- Watanabe H.* Studies on tsunamis on the Pacific coast of Northern Japan. - "Geophys. Mag.", 1956, 27, N 1.
- Watanabe H.* Studies on the tsunamis on the Sanriku coast of the Northeastern Honshu in Japan. - "Geophys. Mag.", 1964, 32, N 1.
- Wigen S.O.* Tsunami threat to Port Alberni. Report at the Ensenada international symposium on tsunamis, 1977.

- Wilson R.M.* On the tsunami of Febr. 3, 1923. — "Monthly Bull. , Hawaiian Volcano Observ.", 1927, 15, N 6.
- Wilson R.M.* A year of the tide gauge operation. — "Monthly Bull., Hawaiian Volcano Observ.", 1928, 16, N 3.
- Yamaguti S.* On the sea waves or tsunami on November 5 1952, following the great Kamchatka earthquake (Japanese). — "Science Report of the Gumma University, pt. 2, Physics", 1953, 3, N 4.
- Yaroshenya R.A.* A study on natural oscillations in the sea level of Kuril and Kamchatka inlets. — Tsunami Research Symposium 1974, Royal Society of New Zealand, Bull. 15. Paris — Wellington, 1976.
- Zerbe W.B.* The tsunami of Nov. 4 1952, as recorded at tide stations. — "U.S. Dept of Commerce, Coast and Geodetic Survey, Spec. Publ.", 1953, N 300.
- Zetler B.D.* Travel times of seismic sea waves to Honolulu. — "Pacific Sci.", 1947, 1, N 3.

ЦУНАМИ, ВЫЗВАННОЕ МОНЕРОНСКИМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ 1971 г.

Визуальные наблюдения

Землетрясение 6 сентября (по сахалинскому времени) 1971 г. в районе о. Монерон с магнитудой $M = 7,2$ было сильнейшим на Сахалине за всю историю наблюдений [1]. Оно произошло на мелководье Татарского пролива и возбудило слабое цунами, которое было зарегистрировано мареографами на Сахалине (в пунктах Холмск, Невельск, Мыс Крильон и Корсаков), в Приморье (Советская Гавань и Адими), на Курильских островах (Курильск) и в тринадцати пунктах Японии (на о-вах Ребун и Хоккайдо). Визуально цунами наблюдали на Монероне и на юго-западном побережье Сахалина.

Экспедиционная группа научных сотрудников и инженеров института Союзморниипроект прибыла на Монерон на катере вечером 5 сентября. В ночь с 5 на 6 сентября часть людей устроилась на ночлег на катере, а часть в палатке непосредственно на железобетонной волноотбойной стенке. Около 5 ч 30 мин 6 сентября ощутили сильные толчки и наблюдали сразу же возникшие камнепады те участники экспедиции, которые спали на волноотбойной стенке. Через несколько секунд толчки почувствовали и те члены экспедиции, которые находились на борту катера. Они также ощутили сильную тряску и услышали грохот. У большинства из них возникло впечатление, что либо был запущен двигатель катера, либо к борту катера швартуется другое судно. С катера все перешли на волноотбойную стенку.

Через 5–6 мин после первого, самого сильного подземного толчка началось быстрое падение уровня воды в ковше, отмеченное, в частности, по струям воды, вытекавшим на акваторию ковша из пустот за южной внутренней стенкой через щели в ней. Падение уровня продолжалось около 3 мин и составило приблизительно 80 см, после чего начался такой же быстрый подъем воды. Возникла реальная опасность затопления верхнего уровня волноотбойной стенки. Пришлось срочно снять палатку и перенести ее на судно. Однако тревога была напрасной, поскольку уровень воды не достиг верхней грани стенки. По приблизительной визуальной оценке максимальный подъем (считая от уровня воды, имевшего место до начала землетрясений) составил примерно 60 см, т.е. перепад от самого низшего до наивысшего уровня составил около 1,5 м. По впечатлениям членов команды и экспедиции, максимальным было не первое, а последовавшие за ним третье и пятое колебания уровня, после чего волны начали затухать и после 3–10 циклов перестали быть заметными. Полный период одного

колебания по приблизительной оценке составил около 6 мин. Подъем и падение уровня сопровождалось сильными приливными и отливными течениями во входной части ковша, хотя значительное количество воды все время приливов поступало также через разрушенные участки огражденных сооружений.

Приведенные сведения, особенно в отношении количественных оценок, следует считать приблизительными, поскольку внимание членов команды и экспедиции было в основном занято катером. Его привальный брус во время подъема уровня оказывался выше отметки кордона причала, а при последующих спадах катер дважды зависал на привальном брус, ложившемся на стенку.

Данные визуальных наблюдений волн цунами на Сахалине довольно бедны. В дополнение к немногочисленным рассказам очевидцев некоторые данные были получены через сутки по остаточным следам цунами на прибрежной полосе экспедицией специалистов Сахалинского управления Гидрометеослужбы в составе начальника морского отдела Гидрометеорологической обсерватории Н.Е. Юркевич, старшего техника М.К. Важениной и техника Ю.А. Квятковского. В результате более или менее полные сведения по юго-западной части Сахалина получены в пунктах Шербунино и Горнозаводск. По сообщениям очевидцев, цунами началось с прилива.

Первая волна подошла около 6 ч утра и оценивалась как самая большая. Дальность ее заплеска в глубь побережья доходила до 20 м, период — от 20 мин до получаса. После нее отмечено еще две значительно меньшие по величине волны. Предельная высота гребня цунами определялась экспедицией визуально и инструментально, с помощью нивелирования. Нивелирование проводилось от уреза воды по меткам высоких вод. В Горнозаводске это определение выполнено в одной точке — в устье р. Горная, а в Шербунино — в двух точках побережья: в устье р. Шербунинка и в 500 м южнее на открытом побережье, где граница заплеска была видна особенно четко в виде узкой полосы щепок, бревен и различного мусора, отнесенного волной цунами от уреза воды. В обоих случаях максимальная высота волны цунами составляла около 2 м.

Имеются сведения о проявлении цунами и в более удаленных от очага населенных пунктах. Так, по словам капитана буксира БМ 00-85 М.П. Кулагина (рыбколхоз им. Калинина, г. Чехов), утром при работе в ковше рыбаки обратили внимание на аномальное изменение уровня моря, выразившееся в несвоевременном подъеме воды приблизительно на 0,5 м. Это было замечено по плашкоуту, который рыбаки пытались снять с мели. Неожиданно плашкоут всплыл, но пока готовились к его отбуксировке, уровень воды вновь спал и плашкоут оказался на мели. По сообщению диспетчера рыбколхоза В.П. Ильященко, утром 6 сентября вода несколько раз доходила до здания диспетчерской: уровень изменялся довольно быстро.

Жительница с. Пензенского Томаринского района Т.А. Чичина, полоскавшая утром белье в речке, впадающей непосредственно в море, обратила внимание на резкое поднятие уровня воды (примерно на 0,5 м) и обратное течение реки.

По сведениям из Красногорска, утром 6 сентября поднимался уровень воды в р. Тихая. Об этом заявил сотрудник экспедиционной сейсмической партии А.А. Туманов. По его словам, уровень воды в речке поднялся не меньше чем на 1 м; всплыл небольшой мостик. Аналогичные сведения дали моряки малого рыболовного сейнера, которые собирались выйти в море и работали на палубе. Они также наблюдали быстрое поднятие уровня реки приблизительно на 1 м, большая вода сохранялась некоторое время, и судно успело выйти в море.

Жители пос. Орлово (южнее Углегорска) В.И. Фадеева, М.В. Баранова, Д.П. Павлова и другие утром 6 сентября наблюдали подъем уровня воды в р. Покосная приблизительно на 0,5 м, что повторилось несколько раз.

Севернее перечисленных пунктов, начиная с Углегорска и окрестностей, аномальных изменений уровня воды не наблюдалось.

Приборные данные

Мареографные записи Монеронского цунами были получены на Сахалине, в Приморье, на Курилах и в Японии [2] (рис. 1). Высота волн, время их прихода, период и продолжительность колебаний в разных пунктах различны (табл. 1).

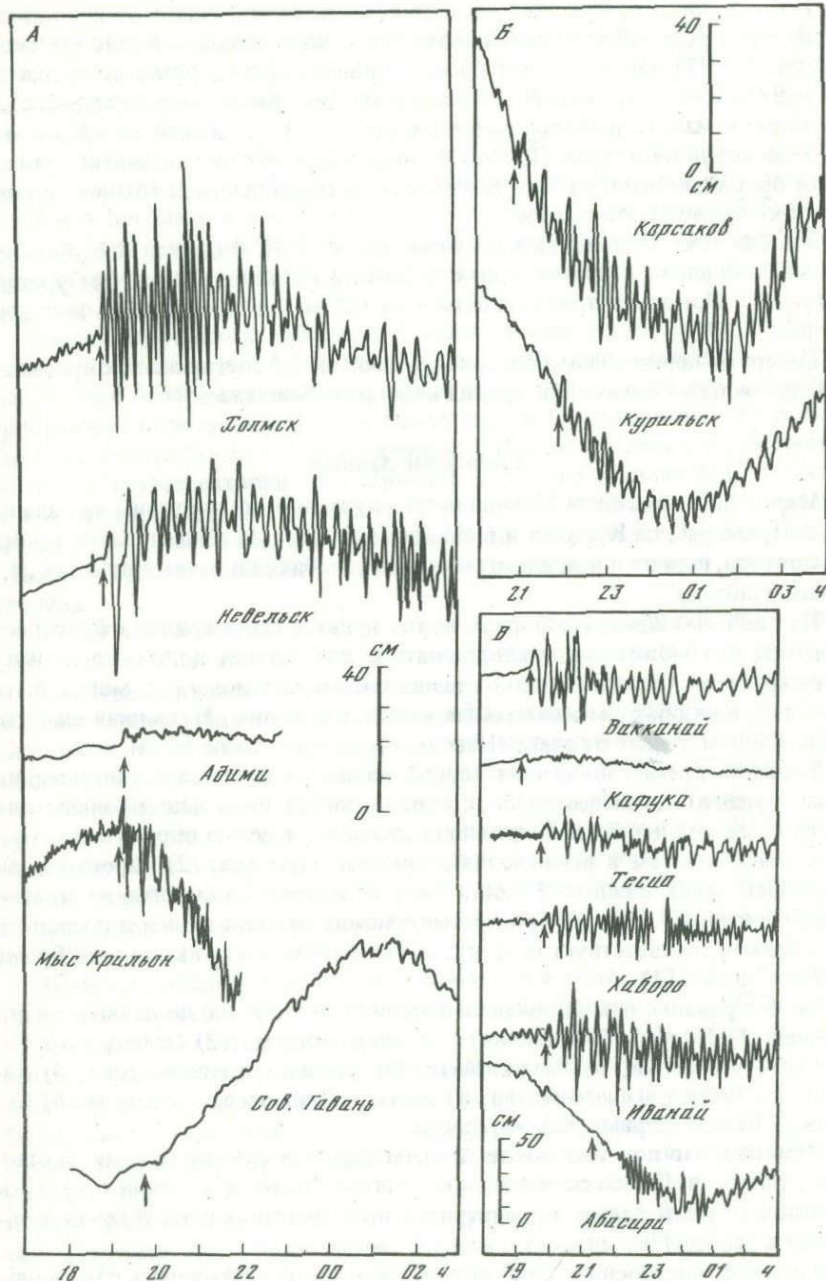
Из табл. 1 видно, что первая волна цунами была приливной во всех пунктах, что может свидетельствовать о взбросовой подвижке в очаге землетрясения. Величина этой подвижки, по-видимому, не могла быть большой, поскольку максимальная амплитуда волны, вызванная ею даже в ближайшем пункте от очага (Невельск), не превышала 50 см.

Значения времен добегания первой волны от места ее возникновения (очаг цунами) до мареографных станций могут быть использованы для построения волновой картины (поля изохрон) с целью определения контура очага, а затем и вычисления энергии цунами (рис. 2). Фронты волн строились через каждые 5 мин; там, где время добегания не кратно "пятиминуткам", разность во времени между предпоследней и последней изохронами соответствует остатку, меньшему пяти (см. колонку "Время пробега" в табл. 1).

Оконтуривание очага произведено довольно уверенно по данным шести станций: 1) Холмск (о. Сахалин) — с северо-востока; 2) Невельск (о. Сахалин) — с востока; 3) Вакканай (о. Хоккайдо) — с юго-востока; 4) Кафуки (о. Ребун) — с юго-запада; 5) Адими (Приморье) — с запада; 6) Советская Гавань (Приморье) — с севера.

Отметим, что по уточненным данным время добегания цунами до станций Холмск и Невельск равно соответственно 18 и 15 мин, а не 17 и 13 мин, как указывалось в предварительных сведениях и что было использовано в работе [3].

Изохрона, построенная от пункта Корсаков, не учитывалась из-за недостаточной точности батиметрии, дальности пробега волны от очага цунами и сложности построения поля изохрон из-за огибания волной п-ва Крильон. По этим же причинам не строились изохроны от Мыса Крильон и Курильска.



Р и с. 1. Мареографные записи Монеронского цунами в различных пунктах Сахалина, Приморья, Курильских островов и Японии

Таблица 1

Мареографные данные об основном Монеронском цунами 05.IX 1971 г.
(время гринвичское)

Пункт	Первая волна					Время пробега, мин
	Время вступления,		Подъем +, спад -	Амплитуда, см	Период, мин	
	ч	мин				
Невельск	18	50	+	8*	17	15
Холмск	18	53	+	19	10	18
Мыс Крильон	19	15	+	10	7	40
Адими	19	20	+	4	5	45
Советская	19	45	+	1	7	70
Гавань						
Корсаков	20	55	+	7	7	140
Курильск	21	53	+	9	12	198
Кафука	19	15	+	4	15	40
Вакканай	19	32	+	10	25	57

* Частичное засорение трубы мареографа

Таблица 1 (окончание)

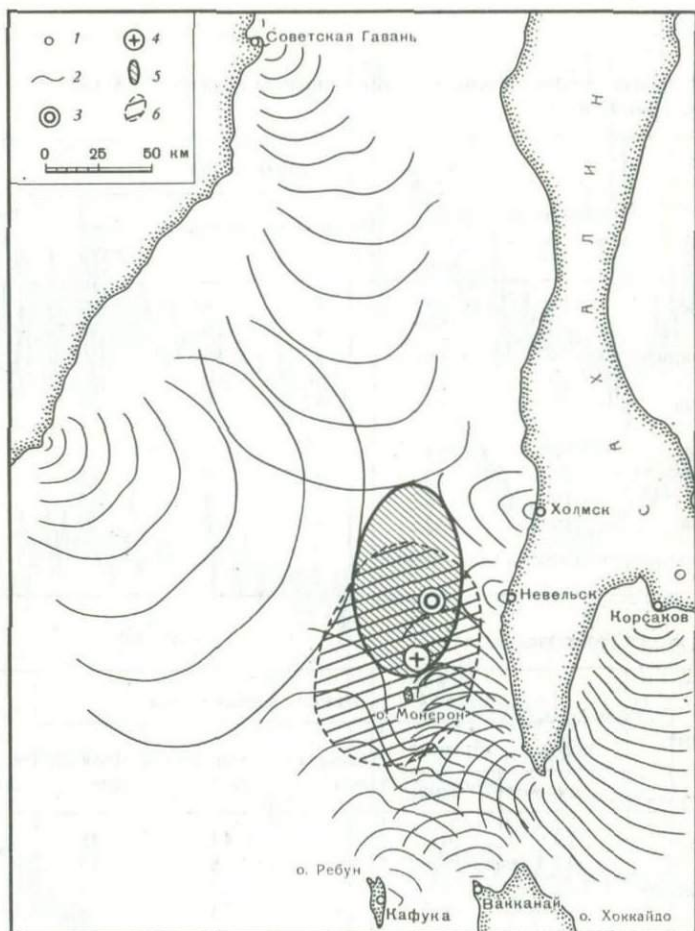
Пункт	Максимальная волна				Продолжительность колебаний, ч	
	Время наступления		Подъем +, спад -	Амплитуда, см		Период, мин
	ч	мин				
Невельск	19	07	-	41	25	26
Холмск	20	52	+	38	10	22
Мыс Крильон	19	40	-	22	8	19
Адими	19	18	+	4	5	11
Советская	23	12	-	4	10	13
Гавань						
Корсаков	22	45	+	22	9	25
Курильск	22	54	-	10	10	18
Кафука	19	48		4		
Вакканай	19	40		29		

Контур очага цунами получен в виде эллипса субмеридионального направления с осями длиной: $a = 71,6$ км, $b = 51,3$ км. Площадь очага $S = 2,9 \cdot 10^3$ км² (см. рис. 2).

По отношению к области афтершоков очаг цунами несколько смещен на север. Эпицентр основного толчка находится в южной оконечности эллипса.

Оценивая высоту цунами h_0 в очаге по максимальному значению волны h на побережье (Невельск, $h = 41$ см), получим величину $h_0 = 6,2$ см [3].

Используя полученные значения S и h_0 , можем оценить энергию E цунами по формуле $E = Spgh_0^2$, где ρ — плотность воды, g — ускорение силы



Р и с. 2. Поле изохрон (сечение 5 мин) и очаг Моеронского цунами
 1 – пункты мареографных установок; 2 – изохроны; 3 – эпицентр землетрясения по данным Японии; 4 – то же, по данным СССР; 5 – очаг цунами; 6 – область афтершоков

тяжести и h_0 – возвышение волны в очаге на уровне моря в момент возникновения цунами. Вычисления дают величину $E = 1,1 \cdot 10^{18}$ эрг. Энергия этого цунами, определенная другим способом, оценивается как $E = 3,0 \cdot 10^{18}$ эрг [3].

Слабые цунами от последующих толчков

После главного толчка с $M = 7,2$ в сентябре зарегистрировано еще четыре землетрясения с магнитудой $M > 6,0$ (табл. 2).

Как показывают мареографные записи в Холмске и Невельске, все они возбудили, хотя и очень слабые, волны цунами (табл. 3). Правда, по трем

Таблица 2

Сильнейшие последующие толчки Монеронского землетрясения
(время сахалинское, в скобках — гринвичское)

№ пп	Дата	Время возникновения			Координаты эпицентра, град.		Магнитуда <i>M</i>
		ч	мин	ИТ	с.ш.	в.д.	
1	7 (6)	13	37	(00 37)	46,62	141,51	6,2
2	8 (8)	11	48	(22 48)	46,36	141,05	6,7
3	9 (8)	17	00	(04 00)	46,20	141,01	6,3
4	28 (27)	19	02	(06 02)	46,36	141,11	6,2

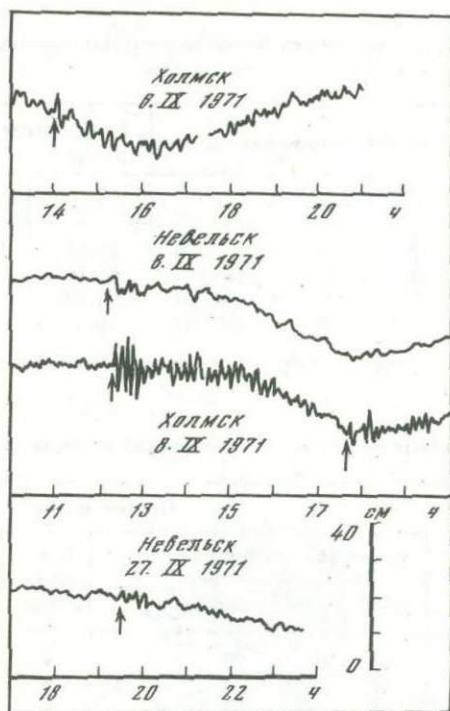
Таблица 3

Мареографные данные о цунами от последующих толчков (время сахалинское)

Пункт регистрации	Номер землетрясения по табл. 2	Первая волна						Период, мин
		Время вступления,			Время пробега, мин	Прилив+, отлив-	Амплитуда, см	
		число	ч	мин				
Холмск	1	07	01	00	23	+	7	10
	2	08	23	22	34	+	6	7
	3	09	04	42	42	+	3	5
	4	Вступление определить невозможно из-за сейш						
Невельск	1	Фон от главного цунами						
	2	08	23	12	24	+	2	13
	3	Слабый фон от предыдущего цунами						
	4	28	06	30	28	+	2	8

Таблица 3 (окончание)

Пункт регистрации	Номер землетрясения по табл. 2	Максимальная волна				Продолжительность колебаний
		Время наступления,			Амплитуда, см	
		число	ч	мин		
Холмск	1	07	01	00	7	
	2	08	23	39	9	11
	3	09	05	06	7	7
	4	Вступление определить невозможно из-за сейш				
Невельск	1	Фон от главного цунами				
	2	08	23	22	4	6
	3	Слабый фон от предыдущего цунами				
	4	28	06	50	3	3



Р и с. 3. Мареографные записи слабых цунами от сильных афтершоков Монеронского землетрясения в пунктах Холмск и Невельск

из этих землетрясений факт наличия цунами подтверждается только какой-либо одной записью (табл. 3, рис. 3), и это вызывает определенные сомнения (на мареограммах других станций из-за их отдаленности от очага слабая волна цунами, естественно, не зафиксирована). Что же касается землетрясения 8 сентября (№ 2 в табл. 2) с $M = 6,7$, то возбужденное им слабое цунами зарегистрировано как в Холмске, так и в Невельске.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соловьев С.Л., Леонов Н.И., Оскорбин Л.С. и др. Монеронское землетрясение 5/6 сентября 1971 г. — "Докл. АН СССР", 1973, 212, № 1.
2. Хатори Т. Цунами на юго-западном побережье Сахалина 6 сентября 1971 г. — "Дзисин. Сер. 2", 1972, 25, № 3. На яп. яз.
3. Щетников Н.А. К вопросу об определении денивелляции водной поверхности в очаге цунами. — В кн.: Теоретические и экспериментальные исследования цунами. М., "Наука", 1977.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
<i>Алексеев А.С., Гусяков В.К., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И.</i> Численное исследование генерации и распространения цунами при реальной топографии дна. Линейная модель	5
<i>Лебедев А.Н.</i> О направленности излучения волн цунами, связанной с крупномасштабными неоднородностями рельефа дна	21
<i>Бухтеев В.Г., Плиник Н.Л.</i> Трансформация волн цунами на шельфе и перераспределение энергии	26
<i>Бухтеев В.Г., Плиник Н.Л.</i> Численное моделирование реального случая цунами	33
<i>Бабий М.В., Ярошеня Р.А.</i> Результаты расчета периодов собственных колебаний уровня бухт на примере залива Касатка	43
<i>Лятхер В.М., Милитеев А.Н., Школьников С.Я.</i> Расчет наката волн цунами на берега	48
<i>Бурьимская Р.Н.</i> Особенности механизмов очагов цунамигенных землетрясений	56
<i>Соловьев С.Л.</i> Основные данные о цунами на Тихоокеанском побережье СССР, 1737–1976 гг.	61
<i>Щетников Н.А.</i> Цунами, вызванное Монеронским землетрясением 1971 г.	137

УДК 550.345

Численное исследование генерации и распространения цунами при реальной топографии дна. Линейная модель. *Алексеев А.С., Гусяков В.К., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И.* Сб. "Изучение цунами в открытом океане". М., "Наука", 1978, с. 5-20.

Излагаются результаты численного моделирования цунами на реальном участке акватории океана на юге Курильских островов. Рассматривается способ расчета начального возвышения уровня океана в эпицентральной зоне, основанный на применении упругой модели среды и уравнения Ляме в качестве уравнения движения. Процесс распространения цунами описывается линеаризованными уравнениями мелкой воды, для численного решения которых применяются явные конечно-разностные схемы. Для нескольких типичных сейсмических очагов рассчитаны карты изохрон цунами и мареограммы в ряде пунктов побережья.

Табл. 1, ил. 7, библи. 4 назв.

УДК 550.345

О направленности излучения волн цунами, связанной с крупномасштабными неоднородностями рельефа дна. *Лебедев А.Н.* Сб. "Изучение цунами в открытом океане". М., "Наука", 1978, с. 21-25.

На основе системы уравнений теории длинных волн в бассейне переменной глубины выведено уравнение эйконала, определяющее лучи волн цунами. Предполагается, что участки океана с медленно меняющейся глубиной разделены линиями, вдоль которых имеется скачок глубины. В качестве примера рассмотрен случай, когда глубина бассейна зависит только от одной пространственной координаты.

Библи. 4 назв.

УДК 550.344.42

Трансформация волн цунами на шельфе и перераспределение энергии. *Бухтеев В.Г., Плиник Н.Л.* Сб. "Изучение цунами в открытом океане". М., "Наука", 1978, с. 26-32.

В работе описаны одномерный и двумерный расчеты подхода цунами к берегу и произведены оценки распределения их энергии вдоль Курило-Камчатского побережья.

На основании одномерных расчетов распространения волны по лучевым трубкам в условиях резонанса определена форма максимально опасного очага цунами.

Табл. 1, ил. 3, библи. 5 назв.

УДК 550.345

Численное моделирование реального случая цунами. *Бухтеев В.Г., Плиник Н.Л.* Сб. "Изучение цунами в открытом океане". М., "Наука", 1978, с. 33-42.

Двумерная численная модель применена для расчета реального случая цунами, известного под названием Ниигатского цунами 1964 г. Исследуется процесс трансформации начального возмущения при подходе его к берегу. Проводится сравнение результатов расчета с результатами электромоделирования и натурными наблюдениями.

Табл. 2, ил. 6, библи. 7 назв.

УДК 550.345

Результаты расчета периодов собственных колебаний уровня бухт на примере залива Касатка. *Бабий М.В., Ярошеня Р.А.* Сб. "Изучение цунами в открытом океане". М., "Наука", 1978, с. 43-47.

Рассчитаны периоды собственных колебаний уровня для девяти моделей залива Касатка и прилегающей к нему части акватории океана. Получены коэффициенты усиления для этих моделей и найдена его зависимость от частоты набегающей волны. Проведено сравнение рассчитанных величин периодов с наблюдаемыми.

Табл. 2, ил. 1, библиограф. 10 назв.

УДК 550.345

Расчет наката волн цунами на берега. *Лятхер В.М., Милитеев А.Н., Школьников С.Я.* Сб. "Изучение цунами в открытом океане". М., "Наука", 1978, с. 48-55.

Приведены результаты численного счета наката волны на берег в условиях, соответствующих топографии мыса Пицунда. Используемая конечно-разностная схема аппроксимирует уравнения теории мелкой воды.

Ил. 3, библиограф. 5 назв.

УДК 550.348.436

Особенности механизмов очагов цунамигенных землетрясений. *Бурымская Р.Н.* Сб. "Изучение цунами в открытом океане". М., "Наука", 1978, с. 56-60.

В статье проведено сопоставление механизмов очагов 24 цунамигенных и 85 нецунамигенных (с $M > 6,0$) землетрясений. Выявлено, что в очагах цунамигенных землетрясений преобладают крутые плоскости разрывов с подвижками по падению.

Ил. 3, библиограф. 6 назв.

УДК 550.345

Основные данные о цунами на Тихоокеанском побережье СССР, 1737-1976 гг. *Соловьев С.Л.* Сб. "Изучение цунами в открытом океане". М., "Наука", 1978, с. 61-136.

Собраны материалы о 60 цунами, наблюдавшихся на Тихоокеанском побережье СССР за период 1737-1976 гг. Данные приведены в виде таблицы.

Табл. 1, библиограф. 187 назв.

УДК 550.344.42

Цунами, вызванное Монеронским землетрясением 1971 г. *Шетников Н.А.* Сб. "Изучение цунами в открытом океане". М., "Наука", 1978, с. 137-144.

Дается описание цунами, возбужденного Монеронским землетрясением 6 сентября 1971 г., включая его проявления на о. Монерон и юго-западном побережье Сахалина. Оценивается величина энергии этого цунами. Рассматриваются слабые цунами от сильных афтершоков указанного землетрясения.

Табл. 3, ил. 3, библиограф. 3 назв.

**ИЗУЧЕНИЕ ЦУНАМИ
В ОТКРЫТОМ ОКЕАНЕ**

*Утверждено к печати
Межведомственным Советом
по сейсмологии
и сейсмостойкому строительству
при Президиуме АН СССР*

Редактор *Т.С. Барина*
Художник *В.С. Артемьев*
Художественный редактор *Т.П. Поленова*
Технический редактор *Н.А. Посканная*

ИБ № 7160

Подписано к печати 16.2.78. Т — 03846
Усл. печ. л. 9,3. Уч.-изд. л. 9,0
Формат 60 x 90 1/16. Бумага офсетная № 1
Тираж 800 экз. Тип. зак. 930.
Цена 1 р. 40 к.

Книга издана офсетным способом
Издательство "Наука", 117485,
Москва, В-485, Профсоюзная ул., 94^а
1-я типография издательства "Наука",
199034, Ленинград, В-34, 9-я линия, 12

1 р. 40 к.

2367