

УДК 551.466.62 + 550.344.42

РАСЧЕТ ЦУНАМИ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ УРОВНЯ МОРЯ В УДАЛЕННЫХ ТОЧКАХ ПРИ ОПЕРАТИВНОМ ПРОГНОЗЕ

© 2004 г. Ю. П. Королев

*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск**Yuri@imgg.ru*

Поступила в редакцию 08.09.2003 г.

Изложен способ расчета формы волны цунами по данным уровенных измерений, основанный на применении принципа взаимности. Предполагается, что известны только координаты эпицентра очага цунами. Предложен быстродействующий способ обращения преобразования Лапласа. Способ расчета цунами проверен на численной модели с реальной батиметрией. Результаты показывают хорошее совпадение ожидаемого и расчетного цунами. При внедрении в практику службы предупреждения о цунами способ позволит давать дифференцированный по участкам побережья прогноз с указанием наиболее важных характеристик цунами.

1. Оперативный прогноз цунами в настоящее время основан на первичных сейсмологических данных, т. е. на известных эмпирических соотношениях между магнитудой землетрясения и высотой цунами на побережье. При таком способе невозможно дать точный прогноз, тем более дифференцированный по участкам побережья. Вследствие этого службой предупреждения о цунами допускаются как пропуски цунами, так и ложные тревоги. Кроме того, действующий способ предупреждения не позволяет оценить длительность тревоги цунами.

Дополнительная информация о сформировавшемся цунами, полученная в открытом море, дает возможность более точного прогноза. Предложения использования данных об уровне моря в удаленных точках высказаны достаточно давно [7]. Эта возможность исследовалась позднее при разработке Единой системы предупреждения о цунами на Дальнем Востоке [5]. Предлагалось оценивать цунами, исходя из некоторой пороговой высоты волны. Такой подход не дает полной картины цунами, никак не учитываются направленность волны, обусловленная ориентацией очага, особенности трассы распространения. В самом деле, если для некоторого цунами уровенная станция находится в зоне “тени” некоторого острова, то по ее информации невозможно оценить степень опасности цунами в заданном пункте.

В США за объявление тревоги цунами в штатах Тихоокеанского побережья отвечает Северо-западная служба предупреждения о цунами. Тревога цунами объявляется на основе магнитудного критерия. Данные существующей сети уровенных станций используются для подтверждения тревоги. Применяется метод аналогий, сравнивающий данные измерений с результатами предварительных численных расчетов и фактическими

данными предыдущих лет. Для расчета текущего цунами данные уровенных станций не используются [13].

Японию можно отнести к регионам, для которых времена пробега цунами от источника до берега, как правило, достаточно малы. Поэтому Японское метеорологическое агентство (ЯМА) опирается на сейсмологическую информацию. В настоящее время ввиду недостаточной эффективности сейсмологического метода в ЯМА развивается новый метод оперативного предупреждения о цунами, использующий расчетные данные. Для этого проведено большое количество численных расчетов цунами от возможных землетрясений различных магнитуд и механизмов. Эпицентры возможных землетрясений располагались в узлах сетки с размерами 1x1 градус в цунамигенных зонах окрестности Японии. В случае возникновения землетрясения с эпицентром, координаты которого, магнитуда, глубина гипоцентра и глубина воды в эпицентре совпадают с имеющимися в базе данных, результат соответствующего расчета принимается за ожидаемое цунами. При несовпадении каких-либо параметров с имеющимися цунами рассчитывается как некоторое взвешенное среднее расчетных случаев с близкими параметрами [10].

В России тревога цунами подается сейсмологической подсистемой на основе магнитудного критерия с подтверждением гидрофизической подсистемой. В некоторых случаях, когда сейсмологическая подсистема не в состоянии выработать предупреждение, тревогу цунами объявляет гидрофизическая подсистема. Однако эта подсистема опирается в основном на визуальные наблюдения персонала прибрежных метеостанций и портов. Несмотря на наличие у гидрофизической подсистемы трех уровенных гидрофизических станций, дан-

ные этих станций в должной степени не используются. Качество работы службы цунами определяется количеством пропущенных цунами и количеством ложных тревог составило 58%, пропусков – 32% от общего числа тревог цунами. За последнее десятилетие этого периода, с 1986 по 1995 гг., эти показатели составили 78 и 29%, соответственно [6].

В настоящее время в качестве основного способа прогноза цунами предлагается метод моделирования процесса распространения цунами от очага землетрясения, причем должны быть заданы эпицентр землетрясения, азимут его простирания, наклон разлома к горизонту и направление, а также средняя величина подвижки по разлому. Этот способ предполагает использование данных уровня для сравнения с расчетными и требует коррекции источника цунами в случае расхождений. Процедура коррекции требует от оператора определенных знаний, опыта и интуиции. При отсутствии этих качеств коррекция сопряжена с ошибками при оценке цунами. Ввиду того, что весь объем исходной информации не может быть получен в оперативных условиях, описанный способ в оперативной работе службы предупреждения о цунами не используется, а применяется вслед за событием при моделировании конкретного цунами [6].

Одним из способов оперативного прогноза цунами может быть расчет цунами от источника, найденного из решения обратной задачи по данным уровенных станций. Такая задача решалась, например, в [11, 12]. Для качественного определения источника цунами необходима достаточно широкая сеть уровенных станций.

Другим способом использования уровенных измерений для расчета цунами в заданном пункте может быть способ, описанный в [9]. Для расчета цунами от некоторого землетрясения необходимо, чтобы имелись мареограммы ранее произошедшего цунами, зарегистрированного в заданном пункте и уровенной станцией, от источника с тем же эпицентром. Метод признаков позволяет выявить и разделить некоторые особенности (признаки) мареограмм, обусловленные источником и трассой распространения цунами, и по ним вычислить форму ожидаемого цунами.

В настоящей статье предлагается иной способ использования данных измерений уровня в некоторых точках для количественной оценки цунами в заданных точках вблизи побережья. С позиций службы предупреждения о цунами задача ставится следующим образом. Требуется рассчитать (оценить) форму волны цунами (количество волн, высоты и интервалы времени между ними, полную длительность цунами) в заданном пункте побережья по данным об изменении уровня в уда-

ленной точке, если об источнике цунами известны лишь координаты эпицентра.

Для решения поставленной задачи необходима некоторая дополнительная информация. При наличии этой информации формулировка задачи изменится: рассчитать форму волны цунами вблизи заданного пункта побережья по данным измерений уровня в удаленной точке, известным координатам эпицентра очага цунами с использованием результатов расчета волн от модельного источника с эпицентром в той же точке.

2. Предлагаемый способ оценки цунами базируется на методе функций Грина решения дифференциальных уравнений. В акустике, сейсмике этот метод известен как принцип взаимности. Идея возможного применения принципа взаимности для определения цунами в заданной точке принадлежит А.А. Поплавскому.

Пусть область S_T с эпицентром в т. T является очагом цунами. Пусть A – точка с координатами x_A, y_A , для которой оценивается цунами. Точка A расположена вблизи оповещаемого пункта.

Эволюция цунами описывается системой уравнений мелкой воды:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \vec{V}(D(x, y)) \vec{u} = -\frac{\partial f(t, x, y)}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -g \vec{\nabla} \zeta$$

Здесь $\zeta(t, x, y)$ – отклонение уровня от равновесного; \vec{u} – массовая скорость; $D(x, y)$ – глубина воды; g – ускорение свободного падения; t – время. Функция $f(t, x, y)$ задана в области S_T .

Начальные условия задачи заданы в области S_T при $t = 0$:

$$\zeta(0, x, y) = \zeta_0(x, y)$$

$$\vec{u}(0, x, y) = \vec{u}_0(x, y) \quad (2)$$

Граничные условия:

$$\zeta(t, x, y) = 0 \text{ на границе } \Gamma_1$$

(условие поглощения),

$$\zeta(t, x, y) = 0$$

на бесконечно удаленной границе Γ_∞ ,

$$u_n(t, x, y) = 0 \quad (3)$$

на границе Γ_2 (условие отражения),

$$\alpha(x, y)u_n + \beta(x, y)\frac{\partial \zeta}{\partial n} = 0$$

на границе Γ_3 (смешанное условие).

В качестве источника цунами можно выбрать функцию $f(t, x, y)$ (аналог подвижки дна) либо $\zeta_0(x, y)$ (начальное возвышение свободной поверхности),

либо $u_0(x, y)$ (начальное распределение массовой скорости) или их произвольную комбинацию. Для общности в качестве возмущения использованы все три возможных механизма возбуждения цунами.

Для нахождения функции $\zeta(t, x, y)$ в т. A строится функция Грина $G_A(t, x, y)$. Эта функция подчиняется задаче (1) – (3) с тем отличием, что $f(t, x, y) \equiv 0$ и $u_0(x, y) \equiv 0$. В качестве начального условия задается начальное возвышение свободной поверхности в т. A в виде произведения δ -функций: $G_{A0}(x, y) = V_{A0}\delta(x - x_A)\delta(y - y_A)$, где V_{A0} – размерный множитель, характеризующий объем вытесненной воды в очаге.

После применения преобразования Лапласа к системе (1) – (3) и аналогичной системе для функции Грина и исключения из этих систем скорости обычная процедура применения метода функций Грина с учетом нулевых граничных условий (3) дает

$$\begin{aligned} & -s^2 \int_{S_T} G_A(s, x, y) f(s, x, y) dS + s \int_{S_T} G_A(s, x, y) \zeta_0(x, y) dS - \\ & - \int_{S_T} G_A(s, x, y) \vec{\nabla}(D(x, y) \dot{u}_0(x, y)) dS = \\ & = \int_{S_A} s \zeta(s, x, y) G_{A0}(x, y) dS = V_{A0} s \zeta(s, x_A, y_A) = \\ & = V_{A0} s \zeta(s, A) \end{aligned}$$

Образы Лапласа функций обозначены наличием параметра s в качестве аргумента.

Пусть область S_T и точка A разнесены достаточно далеко друг от друга так, что расстояние между точками A и T много больше характерных горизонтальных размеров области возмущений. Тогда функцию $G_A(s, x, y)$ можно вынести за знак интеграла, заменив ее некоторым средним значением в т. T , $G_A(s, x, y)|_T = G_A(s, x_T, y_T) = G_A(s, T)$:

$$\begin{aligned} & G_A(s, T) \int_{S_T} (s^2 f(s, x, y) - s \zeta_0(x, y) + \\ & + \vec{\nabla}(D(x, y) \dot{u}_0(x, y))) dS = -V_{A0} s \zeta(s, A). \end{aligned}$$

Обозначив интеграл через $Q_T(s)$ и множитель при $\zeta(s, A)$ в правой части равенства через $Q_A(s)$, получим:

$$G_A(s, T) Q_T(s) = \zeta(s, A) Q_A(s). \quad (4)$$

Это соотношение по форме совпадает с известным традиционным соотношением взаимности [1]. В отличие от традиционного соотношения, в котором все составляющие – постоянные величины, в соотношении (4) все величины являются функциями параметра s преобразования Лапласа.

Соотношение (4) выражает принцип взаимности для нестационарных волн. В нем $G_A(s, T)$, $Q_A(s)$ – заданные (расчетные) функции, $\zeta(s, A)$ – искомая функция, $Q_T(s)$ – неизвестная функция. В силу последнего, соотношение (4) не может быть использовано для расчета цунами, т.е. функции $\zeta(s, A)$.

3. Неизвестная Q_T может быть исключена при наличии информации из некоторого промежуточного пункта M , в котором измеряется уровень моря. Задавая в т. M начальное возвышение $G_{M0}(x, y)$ в виде произведения δ -функций, решая для $G_M(t, x, y)$ задачу, аналогичную задаче для $G_A(t, x, y)$, можно получить выражение, подобное (4):

$$G_M(s, T) Q_T = \zeta(s, M) Q_M. \quad (5)$$

Исключая неизвестную Q_T из (4) и (5), получим

$$\zeta(s, A) = \zeta(s, M) \frac{G_A(s, T) Q_M}{G_M(s, T) Q_A}. \quad (6)$$

Здесь $\zeta(s, A)$ – искомая функция,

$\zeta(s, M)$ – известная функция (измерения уровня),

$G_A(s, T)$, $G_M(s, T)$, Q_A , Q_M – расчетные функции.

Как видно, механизм возбуждения цунами, описываемый исключенной функцией Q_T , не существен.

Можно получить более простое и удобное выражение для оценки $\zeta(s, A)$. Соотношение, подобное (6), может быть получено для некоторого модельного цунами с начальным возвышением свободной поверхности в области с центром в T и тех же, что и выше, функций Грина $G_A(s, T)$ и $G_M(s, T)$:

$$\eta(s, A) = \eta(s, M) \frac{G_A(s, T) Q_A}{G_M(s, T) Q_M}.$$

В этом соотношении все функции являются известными (расчетными). Отсюда и из выражения (6) окончательно получаем:

$$\zeta(s, A) = \zeta(s, M) \frac{\eta(s, A)}{\eta(s, M)}. \quad (7)$$

Выведенное соотношение позволяет, решая прямую задачу распространения длинных волн от простого начального возвышения свободной поверхности в области с центром в T (эпицентр землетрясения) для точек A и M (функции $\eta(s, A)$ и $\eta(s, M)$), используя данные уровенной станции в т. M (функция $\zeta(s, M)$), получить форму волны цунами в заданной т. A .

4. Для окончательной оценки цунами в заданной т. A необходимо выполнить обратное преобразование Лапласа от (7). В настоящей работе обратное преобразование Лапласа осуществляется следующим способом, называемым ниже первым.

Исходные функции для (7) являются дискретными, поэтому их образы Лапласа могут быть представлены в виде рядов, например,

$$\zeta(s, M) = \frac{1 - e^{-s\tau}}{s} \sum_{k=0}^N \zeta(k, M) e^{-ks\tau},$$

где $\zeta(k, M)$ – значения уровня в т. M в моменты времени $t = k\tau$, $k = 0 \dots N$, τ – интервал времени между отсчетами. За начало отсчета всех функций при преобразовании Лапласа принят момент вступления волны в соответствующую точку. Интервалы времени между отсчетами измеряемых и расчетных функций считаются одинаковыми.

После представления функций в виде рядов и замены переменных $z = e^{-s\tau}$, (7) перепишется в виде

$$\zeta(z, A) = \sum_{k=0}^N \zeta(k, M) z^k \frac{\sum_{k=0}^N \eta(k, A) z^k}{\sum_{k=0}^N \eta(k, M) z^k}. \quad (8)$$

Множитель $\frac{1 - e^{-s\tau}}{s}$, как не представляющий интереса, здесь и в дальнейшем опущен.

Деление и умножение полиномов в (8) дает полином $\zeta(z, A) = \sum_{k=0}^N f_k z^k = \sum_{k=0}^N f_k e^{-ks\tau}$. Результатом обратного преобразования Лапласа этого полинома является последовательность, состоящая из δ -функций с множителями, равными коэффициентам полинома. Эти множители f_k являются значениями искомого уровня цунами в моменты времени $t = k\tau$, $k = 0 \dots N$, после ожидаемого момента вступления волны в точку A .

В выражении (8), а также в последующих выражениях верхние пределы сумм одинаковы. В противном случае различных пределов в результате обратного преобразования возникали бы недостоверные слагаемые.

Отношение в правой части (8) играет роль передаточной функции. Результат действия этой функции будет устойчивым (сходящимся), если нули знаменателя по переменной z имеют модули, не меньшие 1 [2]. Анализ знаменателя при численном

моделировании показывает, что он имеет нули с модулями, как меньшими, так и большими 1.

Для получения устойчивого результата применяется процедура “вытеснения” нулей. Она заключается в следующем. Нули знаменателя с модулями, меньшими 1, заменяются нулями с модулем, равным или несколько большим 1, но при сохранении аргумента.

После преобразования знаменателя и деления и перемножения полиномов формируется сходящийся, но искаженный, ряд $\sum_{k=0}^N f_k z^k$. Для компенсации искажений над результирующим рядом выполняется операция, подобная примененной к знаменателю.

Результатом всех операций является ряд $\zeta(z, A) = \sum_{k=0}^N \zeta 1_k z^k$, в котором коэффициенты $\zeta 1_k$ рекуррентным образом выражаются через расчетные данные $\eta(k, A)$ и $\eta(k, M)$, и данные измерений $\zeta(k, M)$ и являются искомыми значениями уровня в т. A в моменты времени $t = k\tau$ ($k = 0 \dots N$) после ожидаемого времени прихода цунами.

Для сравнения результатов параллельно с изложенным способом обращения преобразования Лапласа применялся способ обращения на основе решения плохо обусловленной системы линейных уравнений [8]. Этот способ ниже называется вторым. Представляя искомую функцию $\zeta(z, A)$ в виде суммы $\zeta(z, A) = \sum_{k=0}^N \zeta(k, A) z^k$, выражение (8) можно переписать в виде

$$\sum_{k=0}^N \zeta(k, A) z^k \sum_{k=0}^N \eta(k, M) z^k = \sum_{k=0}^N \zeta(k, M) z^k \sum_{k=0}^N \eta(k, A) z^k, \quad (9)$$

где искомыми являются коэффициенты $\zeta(k, A)$. После перемножения сумм и приравнивания коэффициентов при одинаковых степенях z (в произведениях удерживаются только $N + 1$ слагаемых) может быть составлена система уравнений:

$$M\zeta_2 = b, \quad (10)$$

где

$$M = \begin{pmatrix} \eta(0, M) & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \eta(1, M) & \eta(0, M) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \eta(2, M) & \eta(1, M) & \eta(0, M) & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \eta(N, M) & \eta(N-1, M) & \eta(N-2, M) & \eta(N-3, M) & \dots & \eta(0, M) \end{pmatrix} \text{ – матрица,}$$

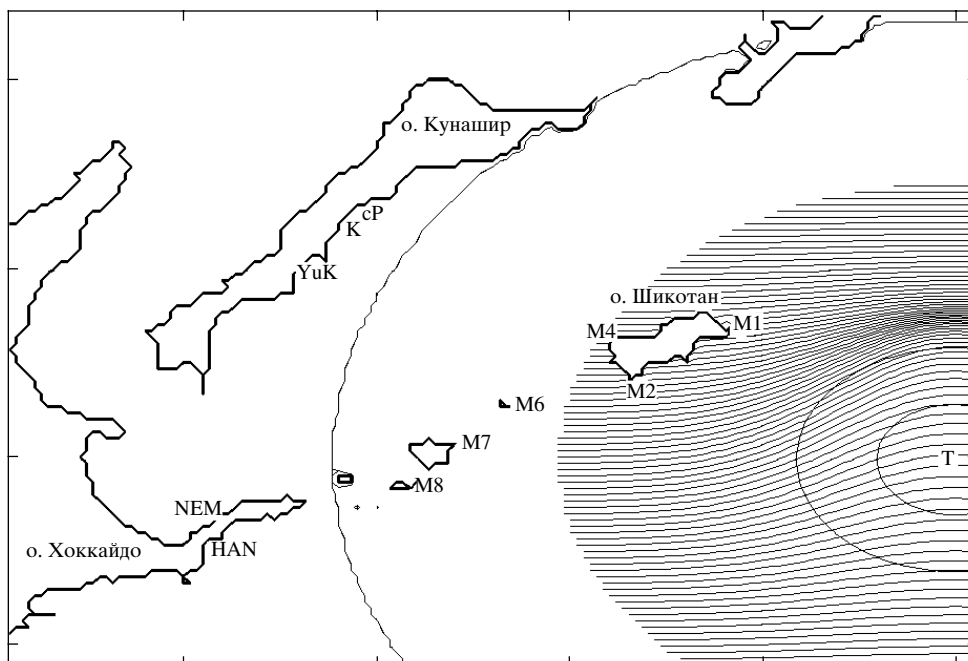


Рис. 1. Расчетная схема с источником цунами.

составленная из значений уровня в т. M , рассчитанных от модельного источника, ζ_2 – столбец неизвестных, b – столбец, составленный из коэффициентов при степенях z^k произведения в правой части (9).

Система (10) может быть решена следующим способом. Приближенное решение задачи может быть получено из решения системы

$$M'M\zeta_2 + \alpha E\zeta_2 = M'b, \quad (11)$$

где M' – транспонированная матрица; E – единичная матрица; α – параметр регуляризации [3]. При решении системы использовалось значение параметра регуляризации $\alpha = 0.5$. Результаты расчетов практически идентичны для значений α в интервале от 0.1 до 3.0.

5. Способ оценки цунами по данным уровенной станции проверялся на численной модели с реальной батиметрией. Для моделирования был выбран район южных Курильских островов. Эпицентр источника цунами и модельного источника находился километрах в 120 восточнее острова Шикотан. Предполагается, что уровенные станции расположены вблизи побережья о. Шикотан. Одна из них ($M1$) находится вблизи берега, обращенного к очагу цунами, другая ($M4$) – с обратной стороны (в зоне “тени”) острова. Цунами оценивалось для Южно-Курильска (точка YuK) на о. Кунашир, Немуро и Ханасаки (точки NEM и HAN) на о. Хоккайдо.

Расчетная схема с источником цунами, указанием этих пунктов, а также уровенных станций изображена на рис. 1.

Численный эксперимент заключался в следующем. Производился расчет цунами от источника в виде некоторого начального возвышения свободной поверхности. Рассчитывались изменения формы волны цунами вблизи оповещаемых пунктов (точки YuK , NEM , HAN) – ожидаемое цунами, а также в точках $M1$, $M4$ – уровенные данные. Модельный источник во всех экспериментах задавался в виде кругового возвышения свободной поверхности $\eta_0(r) = h_0 \cos(\pi r/2R)$, где r – радиальная координата, отсчитываемая от эпицентра в точке T , $R = 25$ км, $h_0 = 1$ м.

Расчеты производились с использованием комплекса программ, описанного в [6].

Результаты расчета изменения уровня приведены ниже на рисунках 2–4. На рисунках везде сплошной линией изображены данные, относящиеся к ожидаемому цунами. Пунктиром изображены данные, относящиеся к прогнозу (расчету по предлагаемому способу). В качестве источника цунами было выбрано начальное возвышение $\zeta_0(r) = 2 \cos(\pi r/2R)$, где $R = 50$ км.

Для оценки качества прогноза сравнивались спектры уровня (относительно среднего) ожидаемого и расчетных цунами. Рассчитывались также коэффициенты корреляции между ними: коэффициент корреляции между ожидаемым цунами и расчетным по первому способу обращения преобразования Лапласа ρ_1 , коэффициент корреляции

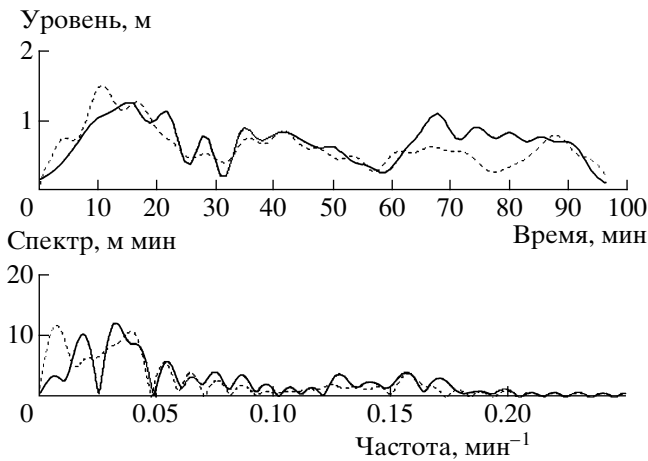


Рис. 2. Результат оценки цунами в Южно-Курильске от кругового источника диаметром 100 км с использованием данных уровенной станции М4, расположенной в зоне “тени” о. Шикотан.

Здесь и далее: вверху – уровень, внизу – спектр уровня; сплошная линия – ожидаемое цунами, пунктир – расчет по предлагаемому способу.

Обращение преобразования Лапласа выполнено способом “вытеснения” нулей.

Коэффициенты корреляции $\rho_1 = 0.96, \rho_2 = 0.97, \rho_{12} = 0.98$

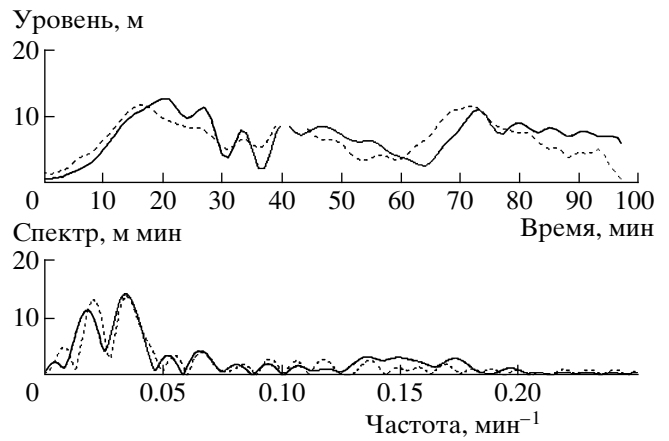


Рис. 3. Результат оценки цунами в Южно-Курильске от того же источника с использованием данных уровенной ст. М1.

Обращение преобразования Лапласа выполнено путем решения системы уравнений.

Коэффициенты корреляции $\rho_1 = 0.96, \rho_2 = 0.97, \rho_{12} = 0.98$.

между ожидаемым цунами и расчетным по второму способу обращения ρ_2 , коэффициент корреляции между расчетными цунами по первому и второму способам обращения ρ_{12} . Рисунок 2. Рисунок 3. Рисунок 4. Оценки цунами для Немуро от того же кругового источника с использованием данных уровенных станций М1 и М4 дают близкие по качеству результаты. Все коэффициенты корреляции в этих экспериментах лежат в интервале 0.91–0.99.

Эксперименты с другими формами круговых источников цунами дают близкие результаты. Коэффициенты корреляции между ожидаемым и расчетным цунами во всех случаях лежат в пределах 0.83–0.99. Коэффициенты корреляции ρ_{12} находятся в пределах 0.90–0.99.

6. Соображения симметрии, аналитические (асимптотические) решения некоторых задач распространения длинных волн в бассейнах с простой батиметрией показывают, что в данной реализации способа оценки цунами модельный источник и источник цунами должны иметь аксиальную симметрию. Приведенные выше выводы соотношений требуют также, чтобы величины Q_A, Q_T и Q_M были отличны от нуля.

Несмотря на это, были выполнены эксперименты с источниками цунами, не удовлетворяющими указанным условиям.

Эксперименты с источниками цунами эллиптической в плане формы, симметричными и асимметричными, различной ориентации относительно направления север-юг дают хорошее совпадение ожи-

даемого и расчетного цунами, что подтверждается величинами коэффициента корреляции, лежащими в пределах 0.87–0.99.

В одном из экспериментов источник представлял собой антисимметричное начальное возвышение свободной поверхности, для которого $Q_T = 0$. Для этого случая предлагаемый способ оценки цунами заведомо не справедлив. Коэффициенты корреляции для разных точек наблюдения имеют большой разброс: $0.69 < \rho_1, \rho_2 < 0.94$. Но и в этом случае наблюдается качественное совпадение низкочастотных составляющих. Различия в амплитудах волн практически нет.

Коэффициенты корреляции ρ_{12} между расчетными цунами первым и вторым способами обращения преобразования Лапласа во всех численных экс-

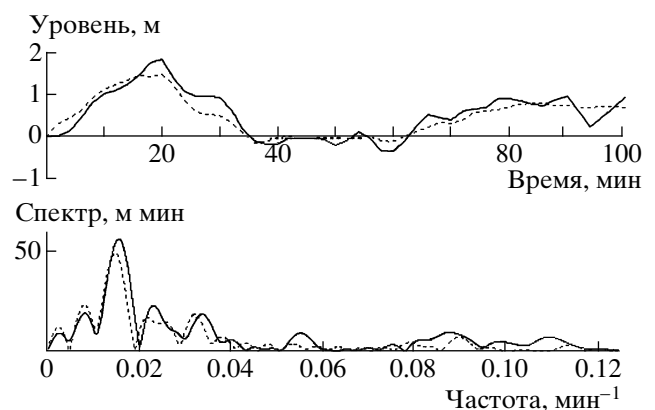


Рис. 4. Результат оценки цунами в Ханасаки с использованием данных уровенной ст. М4.

Обращение преобразования Лапласа выполнено способом “вытеснения” нулей. Коэффициенты корреляции $\rho_1 = 0.95, \rho_2 = 0.95, \rho_{12} = 0.99$.

периментах находятся в пределах 0.90–0.99. Коэффициенты корреляции ρ_1 между ожидаемой и расчетными формами волны цунами при обращении преобразования Лапласа первым способом, как правило, меньше, чем коэффициенты ρ_2 при обращении вторым способом. Но эти различия не превышают 5%, лишь в отдельных случаях достигают 10%. Однако быстрое действие первого способа заметно выше, чем второго.

7. Приведенные в настоящей статье выкладки опираются на систему уравнений мелкой воды без учета вращения Земли. Оценки, выполненные в [4], показывают, что, например, для таких районов как Курило-Камчатская зона, северная часть Тихого океана, Японское море вращение Земли не влияет на эволюцию цунами. Поэтому предложенный способ расчета цунами по уровенным данным справедлив для областей размерами порядка 1000 км.

Результаты расчетов показывают, что основные параметры расчетной волны (высота цунами, длительность цунами) достаточно хорошо совпадают с ожидаемыми. Причем это относится как к результатам, полученным с использованием данных уровенной станции М1, так и с использованием данных уровенной станции М4, расположенной в зоне тени острова.

На основании проведенного численного моделирования можно считать, что предложенный способ оценки цунами при наличии уровенных станций позволит не только уменьшить число ложных тревог и пропусков цунами, но и давать дифференцированное по отдельным участкам побережья предупреждение о цунами с информацией о количестве волн, их высотах, интервале между ними, а также об ожидаемом времени отбоя тревоги. Этот способ позволяет полностью автоматизировать расчет формы волны цунами, исключая необходимость вмешательства оператора в процесс расчета. Способ может быть применен как в региональной службе предупреждения о цунами, так и реализован в любом пункте побережья. В последнем случае этот пункт должен иметь возможность оперативного получения информации от сейсмологической службы о координатах землетрясения и данных уровенных станций.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, (проект № 02–05–65409).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бреховских Л.Н., Годин О.А.* Акустика слоистых сред. М.: Наука, 1989. 416 с.
2. *Дженкинс Г., Ваттс Д.* Спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1971. Т. 1. 320 с.
3. *Морозов В.А.* Алгоритмические основы методов решения некорректно поставленных задач // Вычислительные методы и программирование. 2003. Т. 4. № 1. С. 134–145.
4. *Пелиновский Е.Н.* Нелинейная динамика волн цунами. Горький: ИПФ АН СССР, 1982. 228 с.
5. *Поплавский А.А., Куликов Е.А., Поплавская Л.Н.* Методы и алгоритмы автоматизированного прогноза цунами. М.: Наука, 1988. 128 с.
6. *Поплавский А.А., Храмушин В.Н., Ненон К.И., Королев Ю.П.* Оперативный прогноз цунами на морских берегах Дальнего Востока России. Южно-Сахалинск: ДВО РАН, 1997. 272 с.
7. *Соловьев С.Л.* Проблема цунами и ее значение для Камчатки и Курильских островов // Проблема цунами. М.: Наука, 1968. С. 7–50.
8. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 288 с.
9. *Chung J.Y., Kim S.D., Ivanov V.V.* Tsunami Wave Hind-casting in the Japan Sea // Tsunamis: Progress in Prediction, Disaster Prevention and Warning.- Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995. С. 85–98.-(Advances in Natural and Technological Hazards Research, V. 4).
10. *Tatehata H.* The New Tsunami Warning System of the Japan Meteorological Agency//Perspectives on Tsunami Hazard Reduction.- Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1997. С. 175–188.-(Advances in Natural and Technological Hazards, V. 9).
11. *Voronina T.A.* Reconstruction of the initial tsunami waveform by the coastal observations inversion//Bulletin of Novosibirsk Computer Center, ser. Mathematical Methods in Geophysics. 2002. № 7. P. 89–100.
12. *Voronina T.A., Tcheverda V.K.* Reconstruction of tsunami initial form via level oscillation//Bulletin of Novosibirsk Computer Center, ser. Mathematical Methods in Geophysics. 1998. № 4. P. 127–136.
13. *Whitmore P.M., Sokolowsky T.J.* Predicting tsunami amplitudes along the North American coast from tsunamis generated in the northwest Pacific during tsunami warnings // Science of Tsunami Hazards. 1996. № 14. P. 147–166.

Tsunami Calculation for Short-term Forecast Using Data of Remote Level Gauges

Yu. P. Korolyov

The method of tsunami waveform calculation using level gauges measurements based on reciprocity principle is described. It is assumed that only epicentral coordinates of tsunami source are available. The fast calculated method of inverse Laplace transform is described. The method of tsunami calculation was tested by means of numerical simulation using true bathymetry model. Results show well coincidence between expectable and calculated tsunamis. This method, being applied in tsunami warning system, will improve tsunami short-term forecast.