

Регрессионные производные и их применение для регистрации вступления волны цунами по записи уровня моря*

С. М. АГАЯН¹, Ш. Р. БОГОУТДИНОВ¹, О. В. ИВАНЧЕНКО², Д. А. КАМАЕВ^{3,†}

¹Геофизический центр РАН, Москва, Россия

²Обнинский институт атомной энергетики — филиал Национального исследовательского ядерного университета “МИФИ”, Россия

³Научно-производственное объединение “Тайфун”, Обнинск, Россия

†Контактный e-mail: kda@feerc.ru

Структура дискретного временного ряда тесно связана со свойствами процесса, который он описывает. В рамках дискретного математического анализа имеется несколько подходов к анализу структуры дискретных рядов: геометрические меры, динамические коридоры и концепция тренда. Для дискретного временного ряда, заданного в общем случае на нерегулярной сетке, с характером тренда тесным образом связана регрессионная производная: области ее положительного (отрицательного) значения соответствуют возрастающим (убывающим) трендам, а границы между ними — экстремумам. В настоящей работе исследуются возможности применения методов дискретного математического анализа для разработки процедуры регистрации вступления волны цунами по оперативным данным измерения уровня моря.

Ключевые слова: дискретный математический анализ, регрессионная производная, тренд, волна цунами.

Библиографическая ссылка: Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Иванченко О.В., Камаев Д.А. Регрессионные производные и их применение для регистрации вступления волны цунами по записи уровня моря // Вычислительные технологии. 2019. Т. 24, № 1. С. 28–41. DOI: 10.25743/ICT.2019.24.1.003.

Введение

Важной составляющей Службы предупреждения о цунами (СПЦ) является сеть автоматизированных постов (АП) наблюдения за уровнем моря на дальневосточном побережье Российской Федерации. Получаемые данные об уровне моря используются для прогноза и оперативного предупреждения об опасности цунами, оценки продолжительности действия тревоги цунами и включения в единую систему сбора информации об уровне моря. Одной из функций системы информационной поддержки дежурного океанолога является оперативная автоматическая регистрация волны цунами за счет обработки поступающих от АП в центр цунами записей уровня моря.

*Title translation and abstract in English can be found on page 41

© ИВТ СО РАН, 2019.

Используемая в СПЦ процедура оценки времени вступления волны разработана в рамках задачи о выделении сигнала на фоне шума [1]. Регистрация времени вступления волны цунами выполняется на основе критерия: превышение порогового значения скорости изменения уровня моря — 5 см/мин. Скорость изменения отождествляется с разностью двух соседних значений уровня, деленной на время между ними. Для АП, расположенных вдали от берега, такая процедура дает удовлетворительные результаты. При обработке данных, полученных от береговых АП, используемый алгоритм обработки записи уровня моря обнаружил ряд недостатков [2], в частности, неоднократно он приводил к ложным сигналам. Простое увеличение порога, с одной стороны, не решает данную проблему, а с другой — может привести к пропуску заметного цунами. Таким образом, необходима разработка более гибких процедур обработки записей уровня моря для регистрации волны цунами.

В настоящей работе исследуются возможности применения методов дискретного математического анализа [3] для разработки процедуры регистрации вступления волны цунами по оперативным данным измерения уровня моря. Предлагаемый вариант обработки данных предназначен для оперативного обнаружения факта вступления волны цунами.

1. Задача автоматической регистрации волны цунами

Задача автоматической регистрации волны цунами по записи уровня моря возникает в различных ситуациях информационной поддержки дежурного океанолога. Соответственно, требования, предъявляемые к процедуре обработки записей уровня моря, зависят от особенностей ситуации функционирования процедуры.

На основе опыта работы СПЦ можно выделить следующие постановки задачи регистрации волны цунами.

1. Требуется оперативно обнаружить только факт вступления волны цунами с последующей автоматической подачей сигнала океанологу о возникновении опасной ситуации — вступлении волны цунами в пункте измерений. В такой постановке необходимо минимизировать время запаздывания выдачи сигнала относительно фактического момента вступления волны.
2. Помимо обнаружения факта вступления волны цунами требуется автоматически оценить время вступления. При этом оценка может быть ретроспективной: для проведения расчетов допустимо использовать довольно длинный отрезок записи уровня моря после момента вступления.
3. Процедура оценки может быть полуавтоматической: для обработки записи уровня моря допускается использовать результаты визуального анализа, выполняемого экспертом (дежурным океанологом).

Разработка эффективных процедур регистрации волны цунами на основе обработки записей уровня моря осложняется рядом обстоятельств. Записи уровня моря, получаемые АП, представляют собой среднее за 1 мин значение уровня моря. Запись уровня содержит приливную составляющую. Кроме того, на формирование записи цунами оказывают влияние локальные особенности рельефа дна, форма берега и пр. Следовательно, строгая формализация понятия “вступление волны цунами” предполагает использование довольно сложных моделей процессов генерации, распространения и наката на берег волны цунами. Поэтому при разработке практической процедуры регистрации волны целесообразно ограничиться следующим неформальным соображением. Прояв-

ление цунами в записи уровня моря АП заключается в аномальном по сравнению с фоновым изменением (увеличением или уменьшением) уровня в течение периода от нескольких минут до нескольких десятков минут (минимальный период наблюдаемых цунами сейсмического происхождения составляет около 5 мин). Записи уровня моря могут содержать пропуски, что выдвигает требование устойчивости процедур обработки к возможной потере данных.

В настоящей работе в качестве основы для построения процедуры регистрации волны цунами используется следующая схема действий эксперта при визуальном анализе записи уровня моря. Эксперт просматривает график записи уровня моря, стараясь уловить тенденцию его изменения, не принимая во внимание кратковременные незначительные изменения, имеющие характер нерегулярных возмущений.

В процессе просмотра эксперт охватывает взглядом не всю запись сразу, а ее фрагмент, попадающий в скользящее временное окно просмотра заданной ширины. Запись уровня, находящаяся в пределах окна просмотра, анализируется на предмет выявления тренда: уровень моря эволюционирует в сторону возрастания/убывания или не меняется. Затем окно просмотра сдвигается вправо по оси времени и анализ повторяется.

Если в пределах некоторого окна просмотра экспертом фиксируется смена тренда — изменение уровня моря стало происходить с характерной для цунами интенсивностью, то делается вывод о появлении в записи уровня моря цунамиподобного компонента в момент времени, приблизительно совпадающий с моментом смены тренда.

2. Регрессионные производные и тренды

Построение процедуры обработки записи уровня моря, имитирующей действия эксперта при визуальном анализе, можно осуществить средствами дискретного математического анализа. В рамках дискретного математического анализа имеется несколько подходов к морфологическому анализу дискретных рядов: геометрические меры [4, 5], динамические коридоры [6] и концепция тренда, которая используется в настоящей работе. Для дискретного временного ряда, заданного в общем случае на нерегулярной сетке, регрессионная производная тесным образом связана с характером тренда: области ее положительного (отрицательного) постоянства знака соответствуют возрастающим (убывающим) трендам, а границы между ними — экстремумам. Перейдем к формальному изложению этого принципа.

Пусть $BP[a, b]$ — пространство конечных временных рядов $x = \{x(t_l), l = 1, \dots, N\}$ на дискретном отрезке $[a, b]$ с узлами $t_i, i = 1, \dots, N, t_N = b$. Соответствие $x_i = x(t_i)$ превращает $BP[a, b]$ в N -мерное пространство.

Роль окрестности узла t_i выполняет нечеткая структура $\delta_{t_i}(t_j)$, выражающая свойство близости к t_i остальных узлов: $\delta_{t_i}(t_j)$ — мера близости узла t_j к узлу t_i . Всегда должно быть

$$\delta_{t_i}(t_j) \in [0, 1], \quad \delta_{t_i}(t_i) = 1,$$

но возможны случаи $\delta_{t_i}(t_j) \neq \delta_{t_j}(t_i)$. При построении регрессионных производных будет использоваться локальная конструкция близости:

$$\delta_{t_i}(t_j) = \begin{cases} \left(1 - \frac{|t_j - t_i|}{r}\right)^p, & |t_j - t_i| \leq r, \\ 0, & |t_j - t_i| > r. \end{cases}$$

С мерой близости $\delta_{t_i}(t_j)$ связывается матрица

$$A = (a_{ij}), \quad a_{ij} = \frac{\delta_{t_i}(t_j)}{\sum_{k=0}^{N-1} \delta_{t_i}(t_k)}, \quad i = 0, 1, \dots, N-1, \quad j = 0, 1, \dots, N-1, \quad \sum_j a_{ij} = 1.$$

Заметим, что матрицу A можно представить в форме

$$A = KA_0, \quad A_0 = \delta_{t_i}(t_j), \quad K \equiv \text{diag}(k_i) = \text{diag} \left(\frac{1}{\sum_{k=0}^{N-1} \delta_{t_i}(t_k)} \right).$$

Пусть функция $n(\varepsilon): R^+ \rightarrow [0, 1]$ задает нечеткое понятие близости ε к нулю (например, $n(\varepsilon) = 1 - 2\pi^{-1} \arctg(\varepsilon)$).

В нечеткой окрестности узла t_i исходный ряд аппроксимируется линейной функцией $y_i(t)$ — функцией регрессии:

$$y_i(t) = \alpha_i(t - t_i) + \beta_i, \quad i = 1, \dots, N, \quad (1)$$

где α_i, β_i — коэффициенты регрессии, которые находятся из условия минимума функционала

$$J(\alpha_i, \beta_i) = n \left(\sum_j a_{ij} [x_j - \alpha_i(t_j - t_i) - \beta_i]^2 \right),$$

по j суммирование производится по всем значениям. Значение $J(\alpha_i, \beta_i)$ задает меру близости исходного ряда и функции регрессии (1).

Условия минимума функционала $J(\alpha_i, \beta_i)$ приводят к системе уравнений

$$\begin{cases} \sum_j a_{ij}(t_j - t_i)[x_j - \alpha_i(t_j - t_i) - \beta_i] = 0, \\ \sum_j a_{ij}[x_j - \alpha_i(t_j - t_i) - \beta_i] = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Введем оператор $M_i(y) = \sum_j a_{ij}y_j$, действующий на ряды вида $y = (y_1, \dots, y_N)$, который совпадает с математическим ожиданием дискретной случайной величины $y = (y_1, \dots, y_N)$, принимающей значение y_j с вероятностью a_{ij} . Аналогично выражение $D_i(t) = M_i(t^2) - M_i(t)^2$ есть дисперсия $D_i(t)$, поэтому она может быть равна нулю только при $t_1 = t_2 = \dots = t_N$. Таким образом, в нашем случае $D_i(t) \neq 0$. С помощью оператора $M_i(y)$ решение системы (2) выражается в виде

$$\begin{aligned} \alpha_i &= (D_i(t))^{-1} [M_i(tx) - M_i(t)M_i(x)], \\ \beta_i &= M_i(x) - (D_i(t))^{-1} [M_i(tx) - M_i(t)M_i(x)](M_i(t) - t_i). \end{aligned}$$

Угловой коэффициент α_i называется регрессионной производной ряда $x = \{x(t_l), l = 1, \dots, N\}$ в узле t_i и обозначается $(RD_{[a,b]}x)(t_i)$. Значение β_i называется регрессионным значением ряда $x = \{x(t_l), l = 1, \dots, N\}$ в узле t_i и обозначается $(RV_{[a,b]}x)(t_i)$.

Отметим некоторые свойства регрессионной производной.

1. Построенная регрессионная производная может рассматриваться как линейный оператор $RD_{[a,b]}: BP[a,b] \rightarrow BP[a,b]$.
2. Регрессионная производная связана с трендами дискретного ряда: области положительного (отрицательного) знакопостоянства $(RD_{[a,b]}x)(t_i)$ соответствуют возрастающим (убывающим) трендам, а границы между ними — экстремумам.
3. Зависимость $RD_{[a,b]}$ от меры близости $\delta_{t_i}(t_j)$ дает возможность поиска трендов для дискретного ряда $x = \{x(t_l), l = 1, \dots, N\}$ в разных масштабах.

Регрессионные производные позволяют построить процедуру анализа записи уровня моря, имитирующую действия эксперта при визуальной обработке записи. Как уже отмечалось, вступление волны цунами должно приводить к изменению тренда. Концепция подхода к исследованию трендов дискретного ряда с помощью регрессионных производных состоит в следующем. Регрессионная производная $(RD_{[a,b]}x)(t_i)$ отражает конкуренцию между трендами: формально говоря, в точке t_i подъем и спад уравниваются друг друга, если значение $(RD_{[a,b]}x)(t_i)$ мало. Если в точке t_i происходит смена тренда, то значения $(RD_{[a,b]}x)(t_i)$ и $(RD_{[a,b]}x)(t_{i+1})$ должны существенно различаться.

С целью формализации приведенных соображений для ряда $x = \{x(t_l), l = 1, \dots, N\}$ построим дискретный ряд $\Phi_x(i)$ по следующему правилу. Введем параметры локального обзора — натуральные числа $h^-, h^+, h^- \geq h^+$. Фрагментом обзора с номером i , построенным на основе ряда x , назовем его отрезок $I_i(x) = \{x(t_l), l = i - h^-, \dots, i, \dots, i + h^+\}$. Для каждого фрагмента обзора $I_i(x)$ вычислим ряд регрессионных производных RDx . Далее формируем ряд $\Phi_x(i) = |(RD_{[i-h^-, i+h^+]}x)(t_i)|$, значения которого равны абсолютным величинам регрессионных производных в соответствующих точках.

Рассмотрим на отрезке $\Lambda(i) = [i - h^-, i + h^+]$ весовую функцию $\varrho_i(j) > 0$, например

$$\varrho_i(j) = \begin{cases} \frac{j - i + h^- + 1}{h^- + 1}, & j \in [i - h^-, i], \\ \frac{i - j + h^+ + 1}{h^+ + 1}, & j \in [i, i + h^+]. \end{cases}$$

Весовая функция задает значимость точек обзора по отношению к центру i . В приведенном варианте весовой функции больший вес придается точкам, более близким к центру. По мере удаления от него вес точек линейно убывает. Возможно использование и других выражений для весовой функции.

Рассмотрим на неотрицательной полупрямой $p_i(\varphi)$ нечеткую меру “быть больше $\Phi_x(i) + d$ при условии нулевой оценки точек интервала $(0, \Phi_x(i))$ ”

$$p_i(\varphi) = \begin{cases} 0, & 0 \leq \varphi \leq \Phi_x(i), \\ \frac{\varphi - \Phi_x(i)}{d}, & \Phi_x(i) \leq \varphi \leq \Phi_x(i) + d, \\ 1, & \Phi_x(i) + d \leq \varphi. \end{cases}$$

Соответственно, ее нечеткое отрицание $\bar{p}_i(\varphi) = 1 - p_i(\varphi)$. Параметр $d > 0$ имеет смысл скачка регрессионной производной.

“Аргументом” в пользу того, что в момент t_i не произошло изменения тренда, можно считать величину

$$\sigma^-(i) = \sum_{j \in [i, i+h^+]} \bar{p}_i(\Phi_x(j)) \varrho_i(j).$$

Аналогично “аргументом” в пользу изменения тренда в точке t_i можно считать величину

$$\sigma^+(i) = \sum_{j \in [i, i+h^+]} p_i(\Phi_x(j)) \varrho_i(j).$$

В самом деле, в случае вступления волны должно произойти изменение тренда. Величина $\sigma^+(k)$ с учетом веса отражает общую “массу” выхода значений $\Phi_x(j)$ за пределы интервала $(\Phi_x(i), \Phi_x(i) + d)$. Аналогичный смысл имеет величина $\sigma^-(k)$ — это общая “масса” значений $\Phi_x(j)$, оставшихся в пределах интервала $(\Phi_x(i), \Phi_x(i) + d)$. Сравнение

$$\mu(t_i) \equiv \mu(i) = \frac{\sigma^+(i) - \sigma^-(i)}{\max\{\sigma^-(i), \sigma^+(i)\}} \in [-1, 1]$$

может рассматриваться как нечеткая мера смены тренда в момент времени t_i . При помощи меры $\mu(t_i)$ можно ввести критерий смены тренда: t_i — точка смены тренда уровня не ниже α , если $\mu(t_i) > \alpha$. Соответственно, если $\mu(t_i) \leq \alpha$, то следует считать, что в точке t_i изменения тренда не наблюдалось.

Однако для интерпретации момента времени t_i как момента вступления волны условие $\mu(t_i) > \alpha$ необходимо дополнить условием “изолированности” — на отрезках $[i - h^-, i - 1]$ и $[i + 1, i + h^+]$ совокупная мера смены тренда должна быть невелика. Для формализации условия “изолированности” введем дополнительные односторонние меры $\mathcal{L}_\alpha \Phi_x(i)$ и $\mathcal{R}_\alpha \Phi_x(i)$ — левую и правую соответственно. Рассмотрим вспомогательную функцию:

$$\psi_\alpha(t) = \begin{cases} \frac{t - \alpha}{1 - \alpha}, & t \in [\alpha, 1], \\ \frac{t - \alpha}{1 + \alpha}, & t \in [-1, \alpha]. \end{cases}$$

Для суперпозиции $\mu_\alpha(i) = \psi_\alpha(\mu(i))$ выполняются свойства

$$\mu_\alpha(i) > 0 \Leftrightarrow \mu(i) > \alpha,$$

$$\mu_\alpha(i) = 0 \Leftrightarrow \mu(i) = \alpha,$$

$$\mu_\alpha(i) < 0 \Leftrightarrow \mu(i) < \alpha.$$

Односторонние меры $\mathcal{L}_\alpha \Phi_x(i)$ и $\mathcal{R}_\alpha \Phi_x(i)$ имеют вид

$$\mathcal{L}_\alpha \Phi_x(i) = \frac{\sum_{j \in [i-h^-, i-1]} \mu_\alpha(j) \varrho_i(j)}{\sum_{j \in [i-h^-, i-1]} \varrho_i(j)},$$

$$\mathcal{R}_\alpha \Phi_x(i) = \frac{\sum_{j \in [i+1, i+h^+]} \mu_\alpha(j) \varrho_i(j)}{\sum_{j \in [i+1, i+h^+]} \varrho_i(j)}.$$

Односторонние меры $\mathcal{L}_\alpha \Phi_x(i)$ и $\mathcal{R}_\alpha \Phi_x(i)$ можно рассматривать как знакопеременные функции принадлежности t_i к нечеткому множеству точек, в которых наблюдается смена тренда слева и справа соответственно.

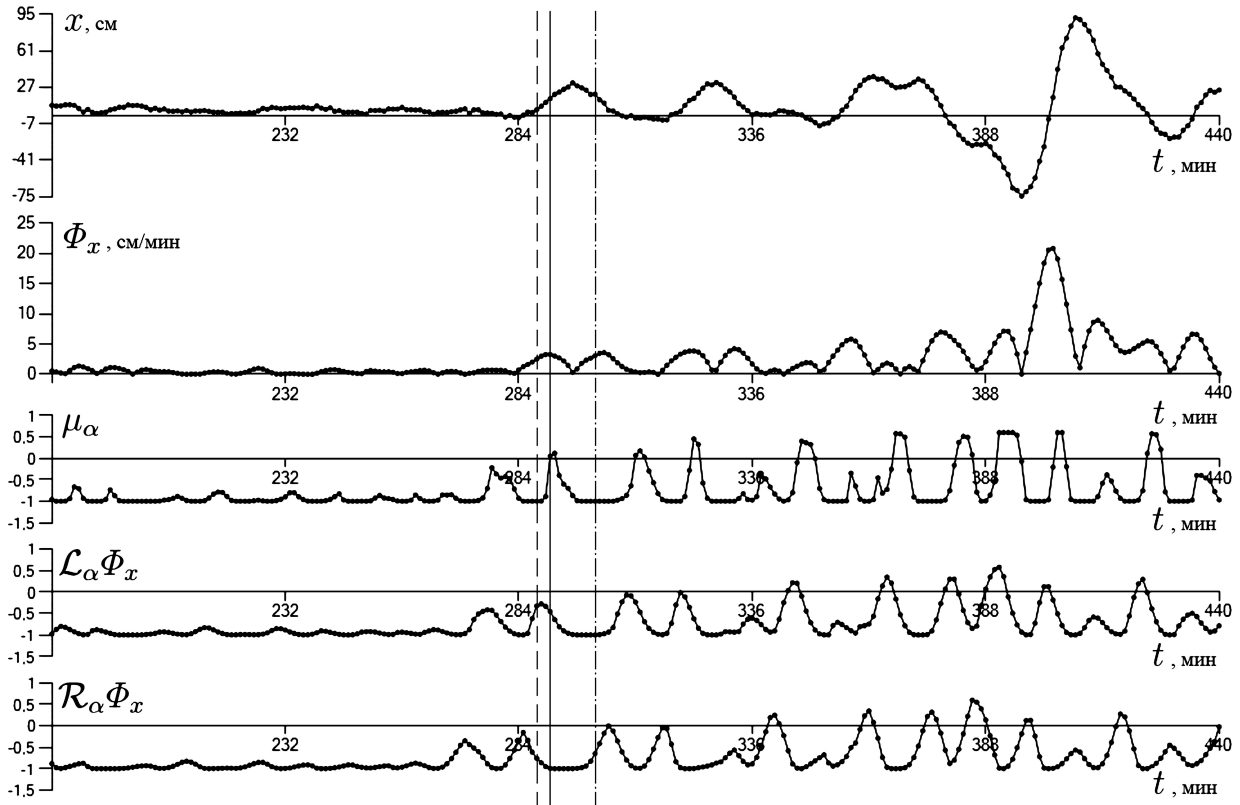


Рис. 1. Результат вычисления характеристик $\Phi_x(i)$, $\mu_\alpha(i)$, $\mathcal{L}_\alpha \Phi_x(i)$, $\mathcal{R}_\alpha \Phi_x(i)$ для записи уровня моря при прохождении цунами в результате землетрясения в Чили, пункт измерений Ханасаки, приливная составляющая в записи удалена на основе предвычислений. Каждое измерение — среднее значение уровня моря за минуту, поэтому $t_i = i$, $p = 2$, $r = 5$ мин, $h^- = 10$ мин, $h^+ = 5$ мин, $d = 1.9$, $\lambda = 0$, $\alpha = 0$. Сплошная вертикальная линия — результат оценки времени вступления волны на основе формального условия; штриховая вертикальная линия — экспертная оценка времени вступления; штрихпунктирная вертикальная линия — оценка на основе превышения порога скорости изменения уровня в 5 см/мин

При помощи введенных мер можно ввести формальное условие момента вступления волны (α, λ) : точка t_i считается (α, λ) точкой вступления волны на записи “ x ”, если выполняются условия $\mu(i) > \alpha$, $\mathcal{L}_\alpha \Phi_x(i) < \lambda$, $\mathcal{R}_\alpha \Phi_x(i) < \lambda$. Пример вычисления характеристик $\Phi_x(i)$, $\mu_\alpha(i)$, $\mathcal{L}_\alpha \Phi_x(i)$, $\mathcal{R}_\alpha \Phi_x(i)$ для записи уровня моря приведен на рис. 1.

3. Процедура определения момента вступления волны цунами по дискретной записи уровня моря

Введенные меры $\mu_\alpha(i)$, $\mathcal{L}_\alpha \Phi_x(i)$ и $\mathcal{R}_\alpha \Phi_x(i)$ позволяют сформировать процедуру определения точек вступления волны по дискретной записи уровня моря (далее — процедура).

Процедура имеет следующие параметры: $\delta_{t_i}(t_j)$ — нечеткая мера близости; h^- , h^+ — параметры локального обзора; d — величина скачка регрессионной производной; α , λ — пороговые уровни.

Если выбраны значения параметров и имеется отрезок записи уровня моря $x[t_1, t_k] = \{x(t_j) : j = 1, \dots, k\}$, то схема процедуры состоит из таких последовательных шагов, как:

- 1) на дискретном отрезке $[t_{1+h^-}, t_{k-h^+}]$ вычисляется ряд модулей регрессионных производных $\Phi_x(i) = |(RD_{[i-h^-, i+h^+]}x)(t_i)|$;
- 2) проверка для каждой точки $j \in [t_{1+2h^-}, t_{k-2h^+}]$ выполнения условий смены тренда: $\mu(i) > \alpha$, $\mathcal{L}_\alpha \Phi_x(i) < \lambda$, $\mathcal{R}_\alpha \Phi_x(i) < \lambda$;
- 3) если условия смены тренда выполняются для некоторых точек, то момент вступления волны := {наименьшее значение $j \in [t_{1+2h^-}, t_{k-2h^+}]$, для которого выполнены условия смены тренда};
- 4) если условия смены тренда не выполняются для всех точек, то делается вывод об отсутствии вступления волны.

Обозначим через $\Pi_{p,r,h^-,h^+,d,\lambda,\alpha}(x[t_1, t_k])$ результат применения к отрезку записи $x[t_1, t_k]$ процедуры со значениями параметров $p, r, h^-, h^+, d, \lambda, \alpha$. Выбор параметров процедуры осуществляется на основе следующих соображений. Вид меры близости $\delta_{t_i}(t_j)$ полностью определяется параметрами $r \geq 1$ и $p > 0$. Их значения следует выбирать так, чтобы график регрессионной производной довольно точно отражал исходные вариации ряда измерений. Однако занижение значения r и завышение значения p приводят к тому, что график регрессионной производной содержит множество резких изменений знака, обусловленных шумами.

Значения параметров локального обзора h^-, h^+ определяют размер нечеткой окрестности момента времени, для которого вычисляется регрессионная производная, ее знак должен отразить преобладающий тренд. Поэтому значения h^-, h^+ не должны быть слишком малыми, в противном случае график производной $(RD_{[i-h^-, i+h^+]}x)(t_i)$ будет содержать множество резких изменений знака, которые по большей части будут иметь шумовую природу. Поскольку величина $2h^+$ определяет нижнюю границу запаздывания срабатывания процедуры, ее значение следует выбирать по возможности малым. В соответствии с принципами применения нечетких сравнений [7] пороговые значения (α, λ) знакопеременных нечетких мер $\mu(i)$, $\mathcal{L}_\alpha \Phi_x(i)$, $\mathcal{R}_\alpha \Phi_x(i)$ следует выбирать $\alpha \geq 0$, $\lambda \geq 0$.

Величины скачка регрессионной производной d и порога α являются наиболее чувствительными параметрами. Значение d априори может выбираться из представления о том, что характерная скорость изменения уровня моря во время наката на берег сильного цунами (амплитуда волн цунами существенно больше амплитуды “шума”) будут порядка 3–5 см/мин. В случае слабого цунами (амплитуда волны цунами сравнима с амплитудой “шума”) для правильного срабатывания процедуры величина скачка регрессионной производной d должна выбираться существенно меньше 3–5 см/мин.

При практическом использовании процедуры, если выбраны значения параметров p, r, h^-, h^+, λ , может быть обеспечена автоматическая подстройка значений d и α следующим способом. В соответствии с действующим регламентом службы предупреждения о цунами после получения дежурным океанологом сообщения о цунамигенном сейсмическом событии автоматизированные посты переводятся по его команде в режим ежеминутной передачи данных измерений уровня моря. На следующем шаге океанолог вычисляет t_d — оценку снизу времени вступления волны цунами в пункт измерений. Необходимые средства оценки снизу времени вступления волны цунами по данным о землетрясении имеются в распоряжении дежурного океанолога. Далее производится накопление не содержащего цунами начального массива данных $x[t_{d-L-N}, t_d] = \{x(t_l), l = d - L - N, \dots, d\}$, где L и N — натуральные числа.

После накопления начального массива на основе его части $x[t_{d-L-N+h^-}, t_{d-L-h^+}]$ вычисляется оценка значения

$$d^* = \max_{i \in [d-L-N+h^-, d-L-h^+]} \max_{j \in [i-h^-, i+h^+]} |\Phi_x(j) - \Phi_x(i)|.$$

С использованием значения d^* оценивается величина $\alpha^* = \max_{i \in [d-L-N+h^-, d-h^+]} \mu(i)$. Затем последовательно к отрезкам данных $x[t_{d-L+h^-+k}, t_{d-h^++k}]$, $k = 1, 2, \dots$, применяется процедура $\Pi_{p,r,h^-,h^+,d^*,\lambda,\alpha^*}$.

4. Применение процедуры определения момента вступления волны цунами

Приведем результаты применения процедуры для определения момента вступления волны цунами по данным уровня моря. Использовались записи цунами, образовавшегося в результате Великого восточно-японского землетрясения (11 марта 2011 г.), которые получены такими береговыми АП, как: Малокурильское, Южно-Курильск, Курильск, Рейдово, Крильон, Корсаков, Поронайск, Стародубское, Невельск, Холмск, Углегорск, Находка, Преображение, Рудная пристань, Семячки, Никольское, Петропавловск, Ханасаки. Использовались также записи цунами от землетрясения в районе островов Самоа (29 сентября 2009 г.) и землетрясения у берегов Чили (27 февраля 2010 г.). При анализе записей уровня моря приливная составляющая удалялась на основе предвычислений.

В данных измерений уровня моря каждое измерение есть среднее значение уровня моря за минуту, поэтому далее везде полагается $t_i = i$. При обработке записей были выбраны следующие значения параметров процедуры: $h^+ = 5$ мин, $h^- = h^+ \varphi$, φ — параметр, $r = 5$ мин и $p = 2$. Значения $\lambda = [-0.2, 0]$, $\alpha = [0, 0.5]$, $d \in [0.1, 5.0]$ и $\varphi \in \{1, 2, 3\}$ подбирались на основе минимизации показателя качества: разницы между расчетной и экспертной оценками времени вступления.

Как уже отмечалось, наиболее чувствительными параметрами процедуры оказались величины скачка регрессионной производной d и порога α . Для всех исследуемых записей удалось подобрать значения d и α так, чтобы полученное с помощью процедуры время вступления волны различалось с экспертной оценкой не более чем на 2–3 мин. При этом значения d варьировались в пределах от 0.3 до 5.0 см/мин.

Таким образом, возможность подбора значений параметров процедуры, которые обеспечивают малое различие между экспертной и расчетной оценками времени вступления, показывает, что процедура вполне адекватно имитирует действия эксперта при визуальном анализе записи уровня моря.

Результаты использования процедуры оценки времени вступления волны с автоматической подстройкой величины скачка регрессионной производной d и порога α приведены в таблице. Расчеты выполнялись по следующей схеме. По записи цунами производилась экспертная оценка времени вступления волны $T_{\text{экс}}$. Оценка снизу времени вступления полагалась равной $t_d = T_{\text{экс}} - 60$ мин. Значения остальных параметров: $N = 60$ мин, $L = 30$ мин, $h^- = 10$ мин, $h^+ = 5$ мин, $r = 5$ мин, $p = 2$, $\lambda = 0$. (Величиной $T_{\text{скор}}$ в таблице обозначено время превышения порогового значения скорости изменения уровня моря (5 см/мин).)

Наибольшее различие между экспертной оценкой и оценкой, полученной с помощью процедуры с автоматической подстройкой $T_{\text{расч}}$, наблюдается для записей слабых цуна-

Результаты применения процедуры оценки времени вступления волны (мин) с автоматической подстройкой величины скачка регрессионной производной d и порога α ($N = 60$ мин, $L = 30$ мин, $h^- = 10$ мин, $h^+ = 5$ мин, $r = 5$ мин и $p = 2$, $\lambda = 0$)

№	$T_{\text{скор}}$	t_d	$T_{\text{экс}}$	$T_{\text{расч}}$	α	d	$T_{\text{расч}} - T_{\text{экс}}$
1	1	190	250	253	0.1	2.153	3
2	164	205	265	275	0.49	0.8149	10
3	301	228	288	283	0.22	1.2701	-5
4	334	220	280	281	0.1	1.4447	1
5	4	223	283	281	0.35	0.9808	-2
6	342	320	380	390	0	0.8265	10
7	210	245	305	305	0.18	0.4517	0
8	112	125	185	190	0.2	0.4673	5
9	180	118	178	179	0.5	0.7619	1
10	384	430	490	509	0	1.5667	19
11	158	320	380	392	0.4	0.5072	12
12	855	232	292	303	0.1	0.3943	11
13	543	230	290	291	0.1	0.3099	1
14	394	310	370	380	0	0.7702	10
15	174	95	155	152	0.1	0.4899	-3
16	236	178	238	237	0.4	0.6463	-1
17	151	100	160	163	0	0.691	3
18	7	228	288	288	0	0.5815	0
19	119	210	270	276	0	0.6553	6
20	111	49	109	108	0	0.5839	-1
21	112	49	109	113	0	0.6285	4
22	117	57	117	122	0.38	0.2603	5
23	120	52	112	106	0.25	0.2603	-6
24	116	49	109	114	0.4	0.2752	5
25	1427	820	880	886	0	0.839	6
26	164	104	164	161	0	0.6124	-3
27	23	400	460	464	0.1	0.9723	4
28	213	147	207	218	0	0.3891	11
29	18	228	288	284	0	1.9937	-4
30	46	500	—	—	0.5	2.9038	—

ми (2, 6, 10, 11, 12, 14, 28). Это обусловлено, по-видимому, близостью значений амплитуд волны цунами и “шума”. Следует отметить, что в случае слабых цунами экспертная оценка времени вступления выполняется неуверенно, поэтому также может содержать значительную ошибку. Сокращение разницы между t_d и $T_{\text{экс}}$ до 30 мин для перечисленных слабых цунами уменьшает разницу между экспертной и расчетной оценками времени вступления волны, для сильных цунами не приводит к существенным изменениям.

Все записи цунами, результаты обработки которых представлены в таблице под номерами 1–28, получены в условиях умеренного прибрежного волнения. Для проверки возможностей процедуры выполнена имитация ситуации вступления волны цунами

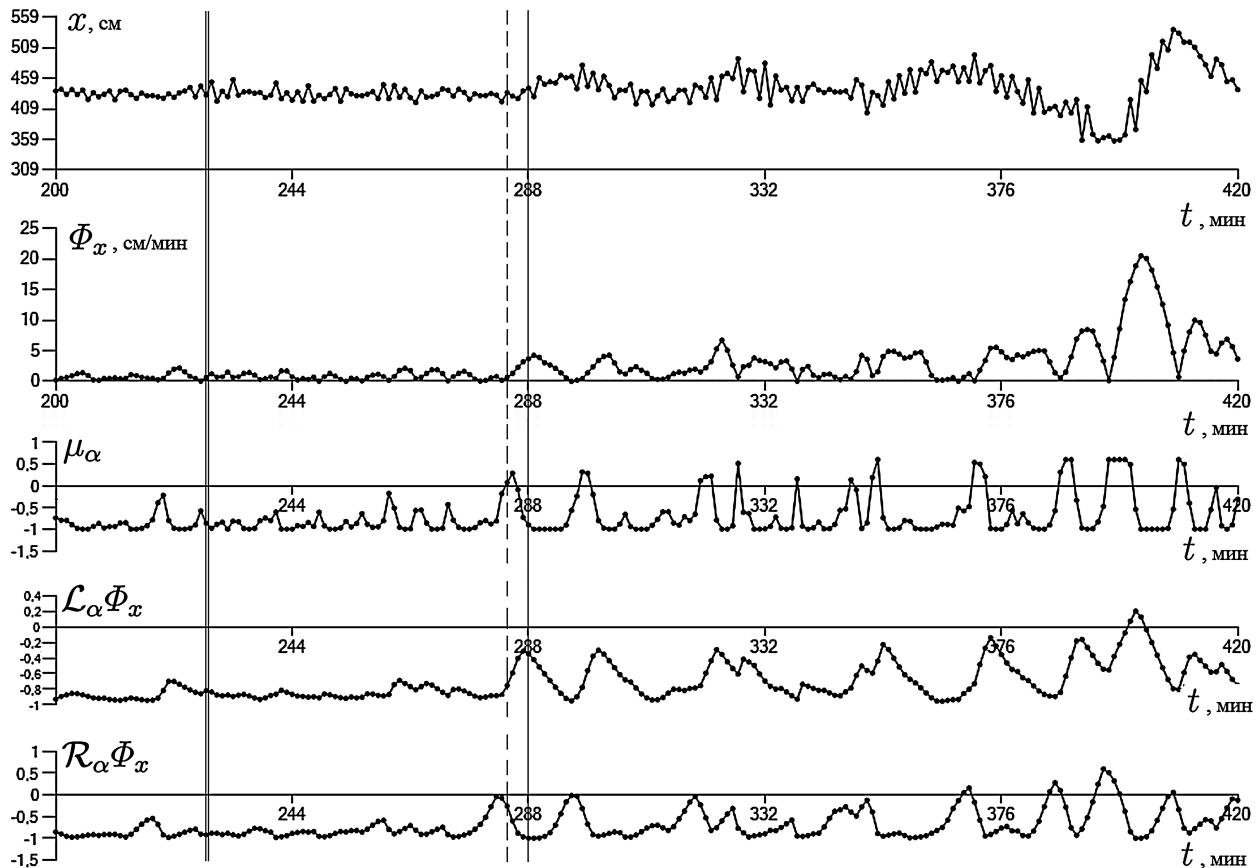


Рис. 2. Результат применения процедуры с автоматической подстройкой величины скачка регрессионной производной d и порога α ($t_i = i$, $N = 60$ мин, $L = 30$ мин, $h^- = 10$ мин, $h^+ = 5$ мин, $r = 5$ мин и $p = 2$, $\lambda = 0$), а также вычисления характеристик $\Phi_x(i)$, $\mu_\alpha(i)$, $\mathcal{L}_\alpha \Phi_x(i)$, $\mathcal{R}_\alpha \Phi_x(i)$ для ситуации вступления волны цунами в условиях усиливающегося штормового прибрежного волнения. Штриховая вертикальная линия — результат оценки времени вступления волны на основе процедуры; сплошная вертикальная линия — экспертная оценка времени вступления; двойная линия — оценка снизу времени вступления t_d

в условиях штормового прибрежного волнения. К записи постепенно усиливающегося штормового волнения прибавлена запись цунами. Результаты расчетов представлены на рис. 2 и в строке 29 таблицы.

Результаты обработки штормового волнения без цунамной составляющей представлены на рис. 3 и в строке 30 таблицы. Это соответствует ситуации, в которой после возникновения сейсмического события образования цунами не произошло, но была запущена процедура с автоматическим определением значений параметров на основе оценки снизу времени вступления волны. Выполнение процедуры не привело к обнаружению факта вступления волны цунами.

Заключение

Целями настоящей работы явились изложение приемов обработки данных средствами дискретного математического анализа, построение на их основе процедур обработки

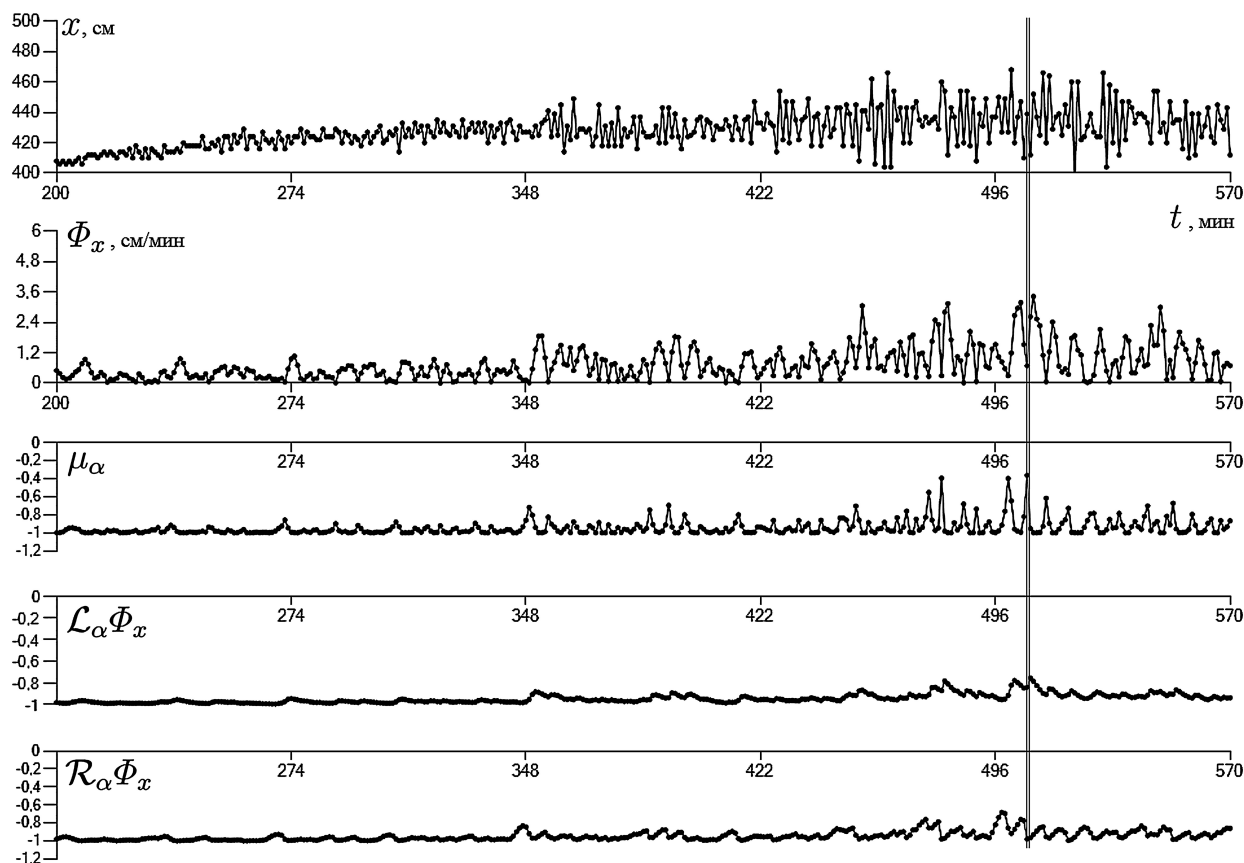


Рис. 3. Результат применения процедуры с автоматической подстройкой величины скачка регрессионной производной d и порога α ($t_i = i$, $N = 60$ мин, $L = 30$ мин, $h^- = 10$ мин, $h^+ = 5$ мин, $r = 5$ мин и $p = 2$, $\lambda = 0$), а также вычисления характеристик $\Phi_x(i)$, $\mu_\alpha(i)$, $\mathcal{L}_\alpha \Phi_x(i)$, $\mathcal{R}_\alpha \Phi_x(i)$ для ситуации, в которой после возникновения сейсмического события образования цунами не произошло. Двойная линия — оценка снизу времени вступления t_d . Верхний график — запись усиливающегося штормового прибрежного волнения

данных, а также демонстрация их применимости для задачи оперативной регистрации вступления волны цунами по данным измерений уровня моря.

С помощью аппарата регрессионных производных разработана процедура оперативной регистрации вступления волны цунами по данным измерений уровня моря и рассмотрена ее эффективность для записей цунами в ряде пунктов побережья Тихого океана. Результаты применения процедуры к записям цунами, полученным береговыми постами, показывают, что за счет выбора значений параметров процедуры можно обеспечить с ее помощью имитацию действий эксперта при визуальном анализе записи уровня моря.

При практическом применении разработанной процедуры оперативной регистрации вступления волны цунами выбор значений ее параметров должен осуществляться отдельно для каждого пункта измерений. При этом необходимо обеспечить автоматическую подстройку наиболее чувствительных параметров — величины скачка регрессионной производной d и порога α .

Средства дискретного математического анализа, в том числе аппарат регрессионных производных, имеют универсальный характер и не требуют при своем применении к нерегулярным дискретным рядам дополнительных статистических гипотез.

Благодарности. Авторы признательны А.В. Лоскутову за предоставленные записи цунами.

Список литературы / References

- [1] **Куликов Е.А.** Измерение уровня океана и прогноз цунами // Метеорология и гидрология. 1990. № 6. С. 61–68.
Kulikov, E.A. Sea level measurement and tsunami forecasting // Meteorologiya i Hidrologiya. 1990. No. 6. P. 61–68. (In Russ.)
- [2] **Ивельская Т.Н., Шевченко Г.В.** Результаты опытной эксплуатации автоматических постов наблюдения за уровнем моря в портах Корсаков и Холмск // Пробл. комплексного геофиз. мониторинга Дальнего Востока России: Тр. Второй регион. науч.-техн. конф., Петропавловск-Камчатский, 2009. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 264–268.
Ivelskaya, T.N., Shevchenko, G.V. Results for the trial operation of automatic posts monitoring sea level in the ports of Korsakov and Kholmsk // Problems of Integrated Geophysical Monitoring of the Russian Far East: Proc. of the Second Regional Sci. and Techn. Conf., Petropavlovsk-Kamchatsky, 2009. Petropavlovsk-Kamchatsky: GS RAN, 2010. P. 264–268. (In Russ.)
- [3] **Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р. и др.** Математические методы геоинформатики. III. Нечеткие сравнения и распознавание аномалий на временных рядах // Кибернетика и системный анализ. 2008. Т. 44, № 3. С. 3–18.
Gvishiani, A.D., Agayan, S.M., Bogoutdinov, Sh.R. et al. Mathematical methods of geoinformatics. III. Fuzzy comparisons and recognition of anomalies in time series // Cybernetics and Systems Analysis. 2008. Vol. 44, No. 3. P. 309–323.
- [4] **Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р.** Определение аномалий на временных рядах методами нечеткого распознавания // Докл. АН. 2008. Т. 421, № 1. С. 101–105.
Gvishiani, A.D., Agayan, S.M., Bogoutdinov, Sh.R. Fuzzy recognition of anomalies in time series // Doklady Earth Sci. 2008. Vol. 421, No. 1. P. 838–842.
- [5] **Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Гвишиани А.Д. и др.** Исследование морфологии сигнала на основе алгоритмов нечеткой логики // Геофиз. исследования. 2005. Т. 4, № 1. С. 143–155.
Agayan, S.M., Bogoutdinov, Sh.P., Gvishiani, A.D. et al Signal morphology study based on the algorithms of fuzzy logic // Geophysical Research. 2005. Vol. 4, No. 1. P. 143–155. (In Russ.)
- [6] **Каган А.И., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р.** Определение стохастической непрерывности методами нечеткой логики и геофизические приложения // Тез. докл. Междунар. конф. “Итоги электронного геофизического года”, Переславль-Залесский, 2009. С. 99.
Kagan, A.I., Agayan, S.M., Bogoutdinov, Sh.P. Definition of stochastic continuity by fuzzy logic methods and geophysical applications // Abstr. of the Intern. Conf. “Results of the Electronic Geophysical Year”, Pereslavl-Zalessky, 2009. P. 99. (In Russ.)
- [7] Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / А.Н. Аверкин, И.З. Батыршин, А.Ф. Блишун и др. М.: Наука, 1986. 312 с.
Fuzzy sets in models of control and artificial intelligence / A.N. Averkin, I.Z. Batyrshin, A.F. Blishun et al. Moscow: Nauka, 1986. 312 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию 14 января 2019 г.

Regression derivatives and their application for registration of a tsunami wave arrival by sea-level records

AGAYAN, SERGEY M.¹, BOGOUTDINOV, SHAMIL R.¹, IVANCHENKO, OLGA V.²,
КАМАЕВ, ДМИТРИЙ А.^{3,*}

¹The Geophysical Center of the RAS, Moscow, 119296, Russia

²Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, Obninsk, 249040, Russia

³Research and Production Association "Typhoon", Obninsk, 249038, Russia

*Corresponding author: Kamaev, Dmitry A., e-mail: kda@feerc.ru

The research addresses the possibility of application of the methods of discrete mathematical analysis to develop a procedure for recording tsunami wave arrival on the base of the operational data for measuring sea level. As a basis for constructing a tsunami wave registration procedure, this research uses a schematization of the actions of the oceanographer on-duty during visual analysis of the sea level records. The task of automatic registration of a tsunami wave by sea level recording arises in various situations of information support of the oceanographer on duty. Requirements for the processing of sea level records depend on the situation.

The structure of a discrete time series is closely related to the properties of the described process. As part of the discrete mathematical analysis, there are several approaches to the analysis of the structure of discrete series: geometric measures, dynamic corridors and the trend concept. For a discrete time series, given in the general case on an irregular grid, the regression derivative is closely related to the nature of the trend: the areas of its positive (negative) values correspond to the increasing (decreasing) trends, and the boundaries between them are extremes.

The content of this research is a presentation of data processing techniques using regression derivatives, constructing data processing procedures based on derivatives, as well as a demonstration of their applicability to the problem of recording tsunami wave arrival according to the measuring of sea level.

Keywords: discrete mathematical analysis, regression derivative, secular trend, tsunami wave.

Cite: Agayan, S.M., Bogoutdinov, Sh.R., Ivanchenko, O.V., Kamaev, D.A. Regression derivatives and their application for registration of a tsunami wave arrival by sea-level records // Computational Technologies. 2019. Vol. 24, No. 1. P. 28–41. DOI: 10.25743/ICT.2019.24.1.003. (In Russ.)

Acknowledgements. The authors are grateful to A.V. Loskutov for the providing of tsunami records.

Received 14 January 2019