

УДК 550.34

ДМА-АЛГОРИТМЫ РЕГИСТРАЦИИ ПРОЯВЛЕНИЯ ЦУНАМИ В ЗАПИСЯХ УРОВНЯ МОРЯ

© 2021 г. С. М. Агаян^{a, *}, Ш. Р. Богоутдинов^{a, b, **}, О. В. Иванченко^c, Д. А. Камаев^d

^aГеофизический центр РАН, ул. Молодежная, 3, Москва, 119296 Россия

^bИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Москва, 123242 Россия

^cНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Каширское шоссе, 31, Москва, 115409 Россия

^dНаучно-производственное объединение “Тайфун”, ул. Победы, 4, Обнинск, Калужская область, 249038 Россия

*e-mail: s.agayan@gcras.ru

**e-mail: shm@gcras.ru

Поступила в редакцию 28.07.2020 г.

После доработки 20.11.2020 г.

Принята к публикации 11.12.2020 г.

В настоящей работе исследуются возможности применения методов дискретного математического анализа (ДМА) для разработки алгоритмов регистрации проявления цунами по оперативным данным измерения уровня моря. Алгоритмы формируются на основе связи регрессионной производной с характером тренда записи: области ее положительных (отрицательных) значений соответствуют возрастающим (убывающим) трендам, а границы между ними – экстремумам. В статье приведены три ДМА-алгоритма регистрации проявления цунами в записях уровня моря, выполнен их сравнительный анализ.

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

DOI: 10.31857/S0203030621020024

ВВЕДЕНИЕ

Тихоокеанское побережье России, на котором находится значительная часть населения и экономики российского Дальнего Востока, подвержено разрушительному воздействию цунами, вызванных подводными землетрясениями и относящихся к чрезвычайно опасным явлениям. Своевременный и качественный прогноз катастрофических волн цунами является актуальной задачей. Служба предупреждения о цунами (СПЦ) в настоящее время основывается в своих прогнозах на оперативных сейсмологических данных, исходя из магнитудно-географического критерия (места расположения очага подводного землетрясения и его энергетического класса) [Чебров, 2007].

Принятый метод прогноза обеспечивает низкую оправдываемость [Соловьев, 1968; Гусяков, 2010], поэтому ее повышение может быть обеспечено за счет использования оперативных данных измерений уровня моря. Идея создания расположенных в открытом океане гидрофизических станций и заблаговременной регистрации с их помощью волн цунами была предложена членом-корр. АН СССР С.Л. Соловьевым [Жак, Соловьев, 1971].

Кроме гидрофизических станций в открытом океане в СПЦ развернута сеть береговых станций, с помощью которых осуществляется мониторинг проявления волн цунами у берега. Получаемые данные об уровне моря используются для уточнения прогноза и оперативного предупреждения об опасности цунами, оценки продолжительности действия тревоги цунами и включения в единую систему сбора информации об уровне моря. В частности, по оперативным данным об уровне моря осуществляется автоматическое обнаружение факта вступления волны с последующей автоматической подачей сигнала океанологу. Разработка эффективных процедур автоматической регистрации волны цунами на основе обработки записей уровня моря осложнено следующими обстоятельствами. Данные записи уровня моря, получаемые береговыми станциями, 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. Записи уровня моря могут содержать пропуски.

Используемая в настоящее время в СПЦ процедура оценки времени вступления волны разработана в рамках задачи о выделении сигнала на

фоне шума [Куликов, 1990]. Факт вступления волны цунами отождествляется с превышением порогового значения скорости изменения уровня (разностью двух соседних значений уровня) – 5 см/мин. Для расположенных в открытом океане гидрофизических станций используемая процедура дает удовлетворительные результаты. При обработке данных, полученных от береговых станций, используемый алгоритм обнаружил ряд недостатков [Ивельская, Шевченко, 2010], в частности, неоднократно приводил к ложным сигналам. Таким образом, представляется актуальной задача разработки более гибких процедур обработки записей уровня моря для регистрации волны цунами.

Одним из возможных подходов к разработке процедур оценки времени вступления волны заключается в использовании экспертной информации, которая может учесть особенности данных измерений. 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 фиксированной ширины. Анализируя запись уровня, находящуюся в пределах окна просмотра, эксперт определяет характер 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 цунамиподобной компоненты в момент времени, приблизительно совпадающий с моментом смены тренда.

Таким образом, анализ поведения ряда предполагает локализацию: рассмотрение его значений не только в отдельной точке – временном узле, но и одновременный учет значений в некоторой его окрестности. Локализация осуществляется с помощью нечеткой структуры, которая выполняет для каждого узла роль окрестности и выражает свойство близости к нему остальных узлов. Совокупность значений ряда вместе с введенной нечеткой структурой близости называется нечетким образом ряда.

В настоящей работе исследуются возможности применения методов дискретного математического анализа (ДМА) [Гвишиани и др., 2010] для разработки процедуры регистрации вступления волны цунами по оперативным данным измерения уровня моря.

ИСХОДНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

Далее термины “временной ряд” и “запись уровня” будут использоваться как синонимы, подразумевая под ними результаты измерений уровня моря.

Пусть $BP[a, b]$ – N -мерное пространство конечных временных рядов $x = \{x(t_i), i = 1, \dots, N\}$ на дискретном отрезке $[a, b]$ с узлами $t_i, i = 1, \dots, N, t_1 = a, t_N = b$.

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: $\delta_{t_i}(t_j) \in [0, 1], \delta_{t_i}(t_i) = 1$, при этом возможны случаи $\delta_{t_i}(t_j) \neq \delta_{t_j}(t_i)$.

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

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

$$j = 1, \dots, N, \quad \sum_j a_{ij} = 1.$$

Далее будет использоваться локальная конструкция близости:

$$\delta_{t_i}(t_j) = \begin{cases} \left(1 - \frac{|t_j - t_i|}{r}\right)^p, & |t_j - t_i| \leq r, \quad p > 0. \\ 0, & |t_j - t_i| > r \end{cases} \quad (2)$$

Тренд дискретного ряда x удобно описывать, используя понятие регрессионной производной [Агаян и др., 2019]: в нечеткой окрестности $\delta_{t_i}(\bullet)$ (2) узла t_i исходный ряд аппроксимируется функцией линейной регрессии: $y_i(t) = \alpha_i(t - t_i) + \beta_i, i = 1, \dots, N$, где α_i, β_i – коэффициенты регрессии, которые находятся из минимума функционала $J(\alpha, \beta) = \sum_j a_{ij} [x_j - \alpha(t_j - t_i) - \beta]^2$. Угловым коэффициентом α_i называется регрессионной производной ряда x в узле t_i и обозначается $(RDx)(t_i) = D_x(i)$.

ДМА-АЛГОРИТМЫ РЕГИСТРАЦИИ ПРОЯВЛЕНИЯ ЦУНАМИ В ЗАПИСЯХ УРОВНЯ МОРЯ

В приводимых ниже алгоритмах время прихода волны цунами рассматривается как момент изменения тренда ряда. Алгоритмы различаются трактовкой средствами ДМА момента изменения тренда.

Обозначим через \mathfrak{D}_x ряд абсолютных величин регрессионной производных: $\mathfrak{D}_x = \{|D_x(i)|, i =$

$= 1, \dots, N\}$, а через $\mathfrak{D}_x(i) = \mathfrak{D}_x(i, h^-, h^+)$ его фрагменты в интервале $[i - h^-, i + h^+]$, где $h^-, h^+, h^- \geq h^+$ – параметры обзора.

Пусть $\rho_i(j) > 0$ – несимметричная весовая функция, задающая значимость точек обзора по отношению к центру “ i ”:

$$\rho_i(j) = \begin{cases} \frac{j - i + 1 + h^-}{h^- + 1}, & j \in [i - h^-, i] \\ \frac{-j + i + 1 + h^+}{h^+ + 1}, & j \in [i, i + h^+] \end{cases}. \quad (3)$$

Функция $\rho_i(j)$ (3) предназначена для построения левосторонних и правосторонних регрессионных производных. Возможно использование и других выражений для весовой функции.

Опишем структуру **алгоритма 1** регистрации проявления цунами в записях уровня моря [Агаян и др., 2019].

Пусть $p_i(\varphi), \varphi \geq 0$ – нечеткая мера “быть больше $D_x(i) + d$ при условии нулевой оценки для точек интервала $(0, D_x(i))$ ”

$$p_i(\varphi) = \begin{cases} 0, & 0 \leq \varphi \leq D_x(i) \\ d^{-1}(\varphi - D_x(i)), & D_x(i) \leq \varphi \leq D_x(i) + d \\ 1, & D_x(i) + d \leq \varphi. \end{cases} \quad (4)$$

Функцию $p_i(\varphi)$ (4) можно понимать как меру принадлежности к нечеткому понятию “скачка регрессионной производной D_x в момент времени t_i величиною в d ”.

Через $\bar{p}_i(\varphi)$ обозначим нечеткое отрицание $1 - p_i(\varphi)$.

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

нечеткая мера смены тренда в момент времени t_i , где $\sigma^-(i) = \sum_{j \in [i, i+h^+]} \bar{p}_i(D_x(j)) \rho_i(j)$ – “аргумент” в пользу того, что в момент t_i не произошло изменения тренда, а $\sigma^+(i) = \sum_{j \in [i, i+h^+]} p_i(D_x(j)) \rho_i(j)$ – “аргумент” в пользу изменения тренда.

При помощи меры $\mu(t_i)$ вводится критерий смены тренда: “ t_i ” – точка смены тренда уровня не ниже α , если $\mu(t_i) > \alpha$; если $\mu(t_i) \leq \alpha$, то следует считать, что в точке t_i изменения тренда не наблюдалось.

Для интерпретации момента времени t_i как момента вступления волны условие $\mu(t_i) > \alpha$ не-

обходимо дополнить условием “изолированности”: на отрезках $[i - h^-, i - 1]$ и $[i + 1, i + h^+]$ совокупная мера смены тренда должна быть невелика. Условие “изолированности” формализуется с помощью односторонних мер

$$\mathfrak{L}_\alpha \mathfrak{D}_x(i) = \frac{\sum_{j \in [i-h^-, i-1]} \rho_i(j) : \mu(j) > \alpha}{\sum_{j \in [i-h^-, i-1]} \rho_i(j)}, \quad (5)$$

$$\mathfrak{R}_\alpha \mathfrak{D}_x(i) = \frac{\sum_{j \in [i+1, i+h^+]} \rho_i(j) : \mu(j) > \alpha}{\sum_{j \in [i+1, i+h^+]} \rho_i(j)}.$$

Точка t_i считается (α, λ) -точкой вступления на записи “ x ”, если выполняются условия: $\mu(i) > \alpha, \mathfrak{L}_\alpha \mathfrak{D}_x(i) < \lambda, \mathfrak{R}_\alpha \mathfrak{D}_x(i) < \lambda$.

Алгоритм 1 имеет параметры $p, r, h^-, h^+, d, \alpha, \lambda$ и сводится к последовательности шагов:

1. Вычисление на дискретном отрезке $[t_{1+h^-}, t_{k-h^+}]$ ряда $\mathfrak{D}_x(i)$;

2. Проверка для каждой точки $j \in [t_{1+2h^-}, t_{k-2h^+}]$ выполнения условий смены тренда:

$$\mu(j) > \alpha, \quad \mathfrak{L}_\alpha \mathfrak{D}_x(j) < \lambda, \quad \mathfrak{R}_\alpha \mathfrak{D}_x(j) < \lambda;$$

3. Определение момента вступления волны $\equiv \{ \text{наименьшее значение } j \in [t_{1+2h^-}, t_{k-2h^+}] \text{, для которого выполнены условия смены тренда} \}$.

Перейдем к описанию **алгоритма 2** регистрации проявления цунами в записях уровня моря.

В данном алгоритме потребуется дополнительное разбиение фрагмента $\mathfrak{D}_x(i)$ на левую и правую части:

$$\mathfrak{D}'_x(i) = \{ |D_x(j)|, j \in [i - h^-, i - 1] \}, \quad (6)$$

$$\mathfrak{D}''_x(i) = \{ |D_x(j)|, j \in [i, i + h^+] \}.$$

Рассмотрим функцию распределения $\mathfrak{F}_i(s)$ для правого фрагмента $\mathfrak{D}''_x(i)$:

$$\mathfrak{F}_i(s) = \frac{|\{j: |D_x(j)| < s, j \in [i, i + h^+]\}|}{h^+}. \quad (7)$$

Если $\beta \in [0, 1]$, то правее квантиля $\alpha_{1-\beta}(i)$ распределения $\mathfrak{F}_i(s)$ (7) находится 100% элементов из множества $\mathfrak{D}''_x(i)$ (6). β можно понимать как уровень экстремальной “массовости” во фрагменте $\mathfrak{D}''_x(i)$ (6).

Критерий вступления волны вводится на основе нечеткого сравнения (в данном случае инду-

цированного арктангенсом) квантили $\alpha_{1-\beta}$ с левым фрагментом $\mathfrak{D}'_x(i)$ (6): t_i есть момент вступления волны, если $\mu(i) > \gamma$:

$$\mu(i) = \frac{2}{\pi} \arctan \left| \frac{\sum D_x(j) : j \in [i - h^-, i - 1] - \alpha_{1-\beta}}{h^-} \right| \quad (8)$$

Алгоритм 2 имеет параметры $p, r, h^-, h^+, \beta, \gamma$ и сводится к последовательности шагов:

1. Вычисляются фрагменты $\mathfrak{D}_x(i), \mathfrak{D}'_x(i), \mathfrak{D}^r_x(i)$;
2. Строится функция распределения для правого фрагмента $\mathfrak{F}_i(s)$;
3. Вычисляется квантиль $\alpha_{1-\beta}$;
4. Проверяется условие момента вступления $\mu(i) > \gamma$.

Рассмотрим алгоритм 3 регистрации проявления цунами в записях уровня моря.

Идея алгоритма заключается в том, чтобы формализовать ответы на вопросы: в какой степени, с точки зрения поведения записи x , в момент времени t_i цунами наблюдается слева и справа от точки t_i на временной оси?

Формализацию можно провести следующим образом: пусть $p'_x(t_i) \equiv p'_x(i), p^r_x(t_i) \equiv p^r_x(i)$ представляют собой функции принадлежности к нечетким понятиям “цунами наблюдается слева” и “цунами наблюдается справа” от t_i .

Способ построения функций $p'_x(i), p^r_x(i)$ основан на понятии условной интенсивности изменения уровня моря в момент времени t_j при взгляде на него с позиции момента t_i . Если $p_x(t_j|t_i) \equiv p_x(j|i)$ – функция нечеткой принадлежности к этому понятию, и h^-, h^+ – параметры локального обзора слева и справа в момент времени t_i , то в качестве $p'_x(i), p^r_x(i)$ нужно взять усреднения:

$$p'_x(i) = \frac{\sum_{j \in [i-h^-, i-1]} p_x(j|i)}{h^-}, \quad p^r_x(i) = \frac{\sum_{j \in [i+1, i+h^+]} p_x(j|i)}{h^+}. \quad (9)$$

Функция условной интенсивности $p_x(j|i)$ получается из возрастающей функции $\varphi_s(l)$ с условиями $|\varphi_s(l)| \leq 1$ и $\varphi_s(s) = 0$ подстановкой $s = |D_x(i)|, l = |D_x(j)|$:

$$p_x(j|i) = \frac{\varphi_{|D_x(i)|}(|D_x(j)|) - \varphi_{|D_x(i)|}(-\infty)}{2}, \quad (10)$$

где функцию $\varphi_s(l)$ можно задать, например, следующим образом $\varphi_s(l) = \frac{l-s}{1+|s|+|l-s|}$.

С помощью функций $p'_x(i), p^r_x(i)$ (9) и выбора порога наблюдаемости $\alpha \in (0.5, 1)$ возникает полная классификация моментов t на каком-либо отрезке относительно наблюдаемости цунами в трехзначной шкале: “цунами не наблюдается”, “цунами возможно” и “цунами наблюдается”. Попадание ответа в полуоткрытый интервал $[0, 1 - \alpha)$ означает “цунами не наблюдается”, попадание ответа в интервал $[1 - \alpha, \alpha]$ означает “цунами возможно”, попадание ответа в полуоткрытый интервал $(\alpha, 1]$ означает “цунами наблюдается”.

Из полученной классификации моментов времени с точки зрения интенсивности записи нас интересуют следующие ситуации, которые можно трактовать как “регистрируется цунами”: слева – “цунами не наблюдается”, справа – “цунами наблюдается”:

$$p'_x(i) < 1 - \alpha, \quad p^r_x(i) > \alpha; \quad (11)$$

“возможно, регистрируется цунами”: слева – “цунами возможно”, справа – “цунами наблюдается”:

$$1 - \alpha \leq p'_x(i) \leq \alpha, \quad p^r_x(i) > \alpha. \quad (12)$$

Условием вступления волны цунами в момент времени t_i будем считать первое по времени выполнение неравенства:

$$p^r_x(i) - p'_x(i) > 2\alpha - 1. \quad (13)$$

Если для t_i ситуация определяется как “возможно, регистрируется цунами”, то этот момент считается предварительной оценкой времени вступления волны.

Алгоритм 3 имеет параметры p, r, h^-, h^+, α и сводится к последовательности шагов:

1. Вычисляются производные $D_x(i)$;
2. Строятся функции $p'_x(i), p^r_x(i)$;
3. Проверяется условие момента вступления волны $p^r_x(i) - p'_x(i) > 2\alpha - 1$.

Замечание: возникновение ситуации “возможно, регистрируется цунами” в результате обработки записи может использоваться в центре предупреждения о цунами в качестве предварительного сигнала дежурному океанологу для перехода в режим повышенной готовности.

ПРИМЕНЕНИЕ ДМА-АЛГОРИТМОВ

Приведенные выше алгоритмы обработки применялись к записям цунами Тохоку (11 марта

2011 г.), полученным береговыми автоматизированными постами вблизи побережья Курильской гряды и полуострова Камчатка и глубоководными станциями DART в северо-западной части Тихого океана. Также использовались записи цунами от землетрясения в районе о. Самоа (29 сентября 2009 г.) и землетрясения у берегов Чили (27 февраля 2010 г). С целью выделения составляющей волны цунами из записи уровня моря вычиталась приливная составляющая, вычисленная по гармоническим постоянным.

Приведем соображения, на основе которых подбирались параметры алгоритмов для проведения вычислений.

Для алгоритмов значения параметров обзора h^-, h^+ определяют размер нечеткой окрестности момента времени, для которого вычисляется регрессионная производная, знак которой должен отразить преобладающий тренд. Поэтому значения h^-, h^+ не должны быть слишком малыми, в противном случае график производной будет содержать множество резких изменений знака, которые по большей части имеют шумовую природу. Однако величина $2h^+$ определяет нижнюю границу запаздывания срабатывания процедуры, поэтому ее значение следует выбирать по возможности малым.

Мера близости $\delta_i(t_j)$ (2) выбиралась одинаковой, ее вид полностью определяется параметрами $r \geq 1$ и $p > 0$. Их значения следует выбирать так, чтобы график регрессионной производной достаточно 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.

Для алгоритма 1 пороговые значения (α, λ) знакопеременных нечетких мер в соответствии с принципами применения нечетких сравнений следует выбирать $\alpha \geq 0, \lambda \leq 0$. Величина d выбирается из представления о том, что характерная скорость изменения уровня моря во время наката на берег сильного цунами (амплитуда волн цунами существенно больше амплитуды “шума”) имеет значение порядка 3–5 см/мин.

Для алгоритма 2 величина β – уровень массовости, регулирующий количество элементов из множества $\mathcal{D}_x^r(i)$ (6), находящихся правее квантили $\alpha_{1-\beta}$. Выбирая этот параметр равным единице, мы требуем, чтобы все элементы из множества $\mathcal{D}_x^r(i)$ (6) были правее квантили α_0 . Т.е. находим квантиль из уравнения $\mathcal{F}(\alpha_0) = 1$, что покажет нам максимальное значение правых производ-

ных. Соответственно, при $\beta = 0$ получим минимальное значение правых производных. Параметр $\gamma \geq 0$ является пороговым значением меры $\mu_i(\alpha_{1-\beta})$ и подбирается в соответствии с принципами применения нечетких сравнений.

Наиболее чувствительными параметрами оказались для алгоритма 1 параметры d и α , для алгоритма 2 – параметр γ и для алгоритма 3 – параметр α . Если выбраны значения остальных параметров, то может быть обеспечена автоматическая подстройка этих параметров следующим способом. В соответствии с действующим регламентом службы предупреждения о цунами, после получения дежурным океанологом сообщения о цунамигенном сейсмическом событии автоматизированные посты переводятся в режим ежеминутной передачи данных измерений уровня моря. Затем, океанолог по данным о землетрясении с помощью соответствующих средств выполняет вычисление t_k – консервативной оценки снизу времени вступления волны цунами в пункт измерений. Далее производится накопление не содержащего цунами начального массива данных $x[t_e, t_k] = \{x(t_l), l = e, \dots, k\}$, t_e – время начала регистрации землетрясения и вычисление на основе его части $x[t_{e+h^-}, t_{k-h^+}]$ для алгоритма 1 оценки значения $d^* = \max_{i, j \in [e+h^-, k-h^+]} |D_x(j) - D_x(i)|$ и $\alpha^* = \max_{i \in [e+h^-, k-h^+]} \mu(i)$; для алгоритма 2 – $\gamma^* = \max_{i \in [e+h^-, k-h^+]} \mu(i)$ и для алгоритма 3 – $\alpha^* = \frac{1}{2} \left(1 + \max_{i \in [e+h^-, k-h^+]} (p_x^r(i) - p_x^l(i)) \right)$.

Итак, при вычислениях выбирались следующие параметры:

1. Алгоритм 1. $h^- = h^+ = 5$ мин, $r = 5$ мин, $p = 2, \lambda = 0$, параметры α и d подбирались автоматически;
2. Алгоритм 2. $h^- = 10$ мин, $h^+ = 5$ мин, $r = 5$ мин, $p = 2, \beta = 0.75$, параметр γ подбирался автоматически;
3. Алгоритм 3. $h^- = 10$ мин, $h^+ = 5$ мин, $r = 5$ мин, $p = 2$, параметр α подбирался автоматически.

Для каждого алгоритма посчитано время вступления волны цунами $T_i, i = 1, 2, 3$ и вычислена разница между экспертной оценкой и T_i . Для выборки полученных результатов $|T_i - T_{f1,2,3}|$ вычислены следующие оценки: выборочное среднее $M_i, i = 1, 2, 3$ и среднеквадратичное отклонение $\sigma_i, i = 1, 2, 3$. Получены следующие оценки. Для алгоритма 1 – $M_1 = -3.8$ мин, $\sigma_1 = 5.9$ мин (рис. 1), для алгоритма 2 – $M_2 = -0.6$ мин, $\sigma_2 = 9.8$ мин (рис. 2), для алгоритма 3 – $M_3 = 0.6$ мин, $\sigma_3 = 10$ мин

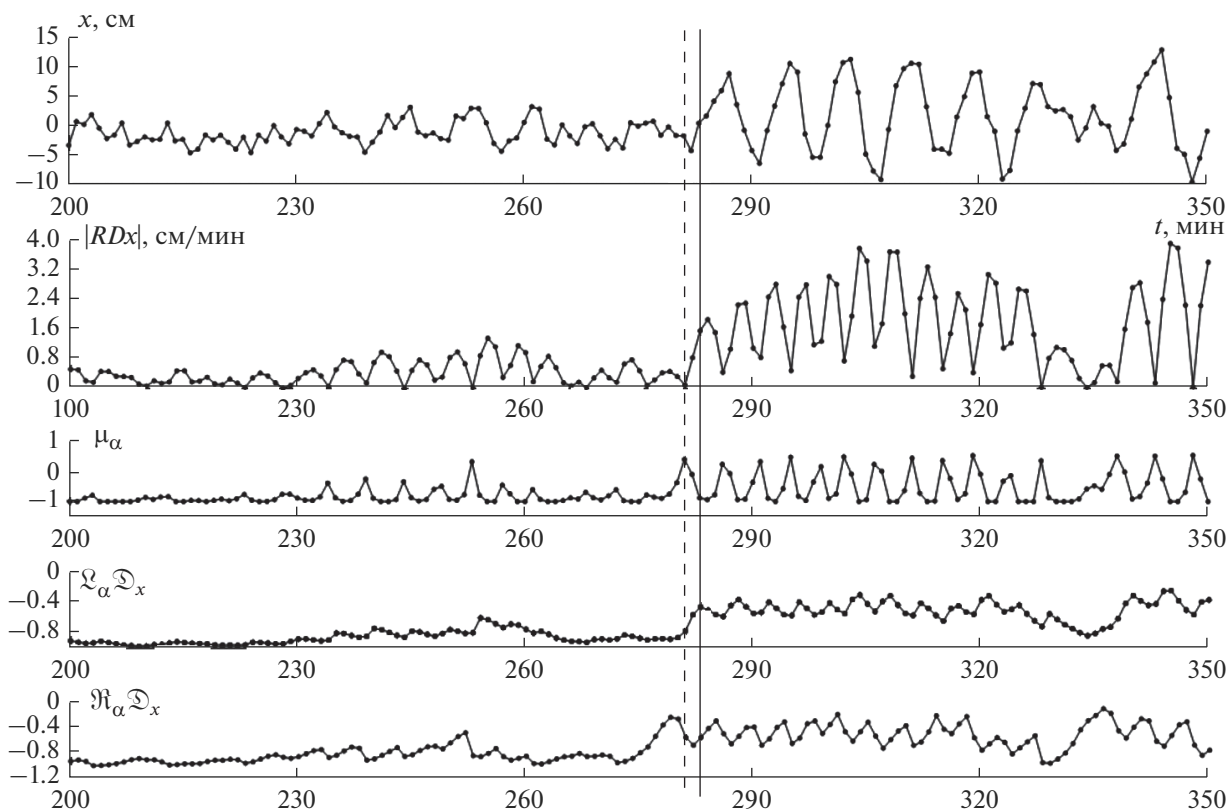


Рис. 1. Результаты распознавания алгоритмом 1 цунами в Самоа, пункт измерения на о. Шикотан, бухта Маячная ($43^{\circ}49'28''N$, $146^{\circ}54'29''E$). Сплошная вертикальная линия – оценка эксперта, пунктирная линия – оценка по алгоритму.

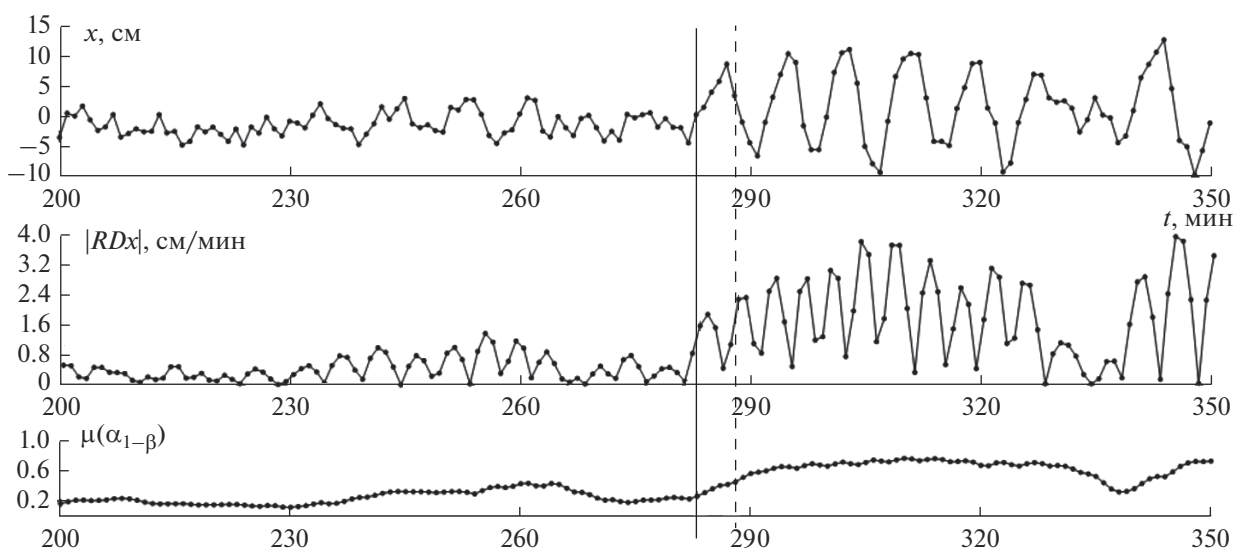


Рис. 2. Результаты распознавания алгоритмом 2 цунами в Самоа, пункт измерения на о. Шикотан, бухта Маячная ($43^{\circ}49'28''N$, $146^{\circ}54'29''E$). Сплошная линия – оценка эксперта, пунктирная линия – оценка по алгоритму.

(рис. 3). Предварительные оценки времени вступления волны “возможно цунами”, полученные с помощью алгоритма 3, в среднем оказывались на 14 мин раньше, чем основные оценки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе сравнительного анализа результатов обработки записей уровня моря с помощью приведенных в работе ДМА-алгоритмов реги-

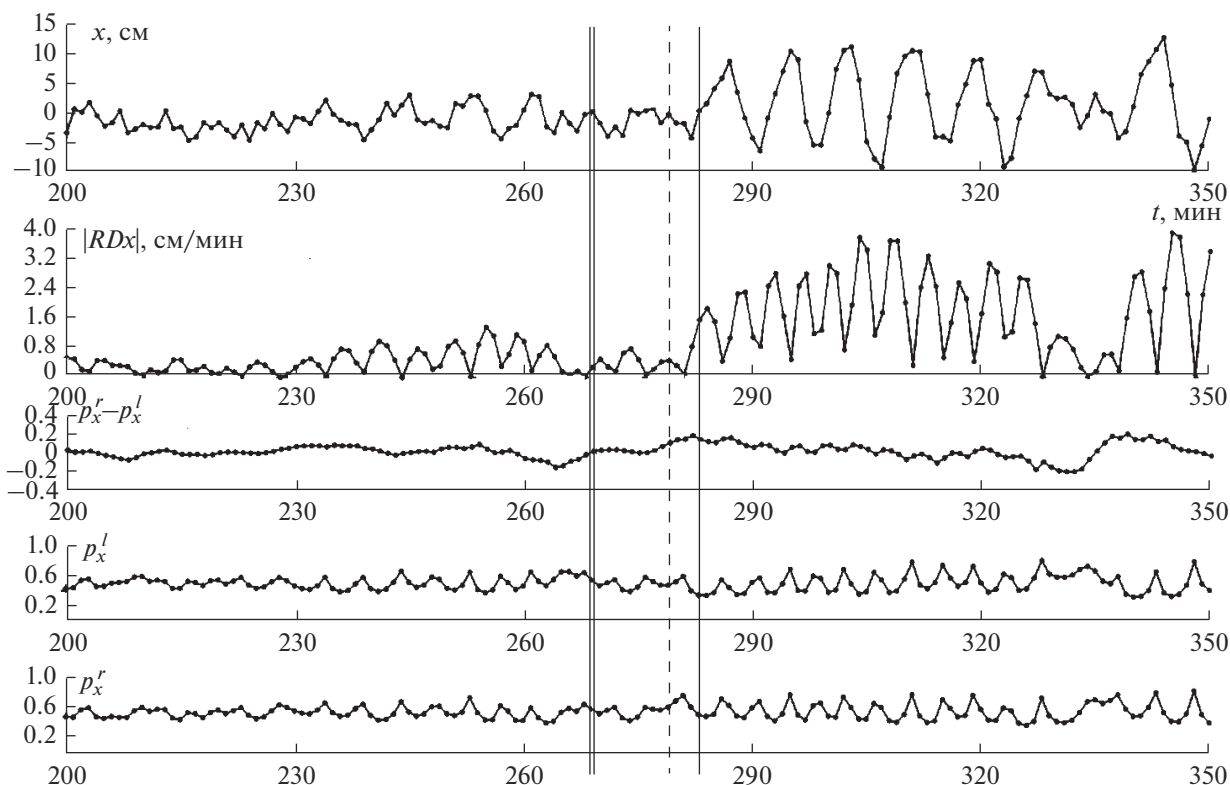


Рис. 3. Результаты распознавания алгоритмом 3 цунами в Самоа, пункт измерения на о. Шикотан, бухта Маячная (43°49'28"N, 146°54'29"E). Сплошная линия – оценка эксперта, двойная сплошная линия – предварительная оценка “возможно цунами”, пунктирная линия – оценка по алгоритму.

страции проявления цунами можно сделать следующие выводы:

1. При сравнении результатов применения приведенных в работе ДМА-алгоритмов с экспертной оценкой времени вступления волны цунами наилучший результат показал алгоритм 3. При этом алгоритм определяет время вступления волны цунами в среднем по использованному массиву записей цунами раньше, чем эксперт.

2. Минимальный разброс (среднеквадратичное отклонение) результатов имеет алгоритм 1, при этом он лучше срабатывает на слабых цунами. На сильных цунами отклонения от экспертной оценки в трех алгоритмах близки и равны 1–5 мин.

3. Наибольшее различие между экспертной оценкой и оценками, полученными с помощью алгоритмов 1, 2 и 3, наблюдается для записей слабых цунами. 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.

4. Все алгоритмы достаточно просты в реализации и не требуют больших вычислительных

мощностей, но алгоритм 3 является наиболее удобным и простым, поскольку имеет наименьшее количество параметров, причем порог наблюдаемости цунами можно подобрать автоматически.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания Геофизического центра РАН, утвержденного Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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.
 Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Камаев Д.А., Добровольский М.Н. Стохастические тренды на основе нечеткой математики // Чебышевский сборник. 2019. Т. 20. Вып. 3. С. 25–39.

Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Соловьев А.А. Дискретный математический анализ и геолого-геофизические приложения // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. № 2. Вып. 16. С. 109–125.

Гусяков В.К. Магнитудно-географический критерий прогнозирования цунами: анализ практики применения за 1958–2009 гг. // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 3. С. 5–21.

Жак В.М., Соловьев С.Л. Дистанционная регистрация слабых волн цунами на шельфе Курильских островов // Докл. АН СССР. 1971. Т. 198. № 4. С. 816–817.

Ивельская Т.Н., Шевченко Г.В. Результаты опытной эксплуатации автоматических постов наблюдения за уровнем моря в портах Корсаков и Холмск // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Даль-

него Востока России // Труды Второй региональной научно-технической конференции, Петропавловск-Камчатский, 11–17 октября 2009 г. / Отв. ред. В.Н. Чебров. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 264–268.

Куликов Е.А. Измерение уровня океана и прогноз цунами // Метеорология и гидрология. 1990. № 6. С. 61–68.

Соловьев С.Л. Проблема цунами и ее значение для Камчатки и Курильских островов // Проблема цунами. М.: Наука, 1968. С. 7–50.

Чебров В.Н. Развитие системы сейсмологических наблюдений для целей предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. № 1. Вып. 9. С. 27–36.

DMA-Algorithms for Registration of a Tsunami Arrival in Sea-Level Records

S. M. Agayan^{1, *}, S. R. Bogoutdinov^{1, 2, **}, O. V. Ivanchenko³, and D. A. Kamaev⁴

¹The Geophysical Center of the RAS, Molodezhnaya str., 3, Moscow, 119296 Russia

²Schmidt Institute of Physics of Earth RAS, Bolshaya Gruzinskaya str., 10, bld. 1, Moscow, 123242 Russia

³National Research Nuclear University MEPhI, Kashirskoe highway, 31, Moscow, 115409 Russia

⁴Research and Production Association “Typhoon”, Pobedi str., 4, Obninsk, Kaluzhskaya obl., 249038 Russia

*e-mail: s.agayan@gcras.ru

**e-mail: shm@gcras.ru

The research addresses the possibility of application of the discrete mathematical analysis (DMA) methods to develop algorithms for registration tsunami arrival on the base of operational data for measuring sea level. Algorithms are based on the relationship between the regression derivative and the trend of the record: areas of derivatives positive (negative) values correspond to increasing (decreasing) trends. Boundaries between areas of derivatives are extremes. The article describes three DMA-algorithms for registration tsunami arrival, and performs a comparative analysis.

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