

*Камаев Д.А., Павельев А.С.*

*Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-производственное объединение «Тайфун», г. Обнинск, post@typhoon.obninsk.ru*

### **Введение**

Важным направлением развития Службы предупреждения о цунами (СПЦ) является создание сети автоматизированных постов наблюдения за уровнем моря (АП) 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. Создаваемые АП устанавливаются в непосредственной близости у берега, как правило, в населенных пунктах. Это создает при обработке данных проблему снижения искажающего влияния волнения, которая не возникает при размещении датчика на шельфе.

Одной из функций системы информационной поддержки дежурного океанолога является оперативная автоматическая регистрация волны цунами по записи уровня моря. В автоматизированной информационно-управляющей системе центра предупреждения о цунами (АИСПЦ), которая является в настоящее время технологической базой функционирования центра цунами, предусматривается автоматическая подача сигнала океанологу о возникновении опасной ситуации – вступлении волны цунами в пункт измерений. Регистрация и определение времени вступления волны цунами осуществляется за счет обработки поступающих в центр цунами записей уровня моря от АП.

В АИСПЦ оценка времени вступления волны рассматривается в рамках задачи о выделении сигнала на фоне шума [6]. В процессе функционирования АИСПЦ используемый алгоритм обработки записи уровня моря обнаружил ряд недостатков [5]. В частности, критерий определения опасной ситуации (пороговое значение скорости изменения уровня – 5 см/мин) неоднократно 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 уровенных данных для регистрации волны цунами.

В докладе предлагается подход к задаче оценки времени вступления волны цунами по уровенным данным, основанный на применении методов нечеткой математики (теории нечетких множеств) к анализу дискретных временных рядов [2, 3]. Излагается разработанный алгоритм оценки, имитирующий действия океанолога (эксперта) при визуальной оценке времени вступления волны цунами.

### **Процедура оценки времени вступления волны цунами по записи уровня моря**

Данные записи уровня моря, получаемые АП, представляют собой среднее за 1 мин. значение уровня моря. Проявление цунами в записи уровня моря автоматизированным постом заключается в аномальном по сравнению с фоновым изменении (увеличении или уменьшении) уровня моря в течение периода от нескольких минут до нескольких десятков минут. (Минимальный период наблюдаемых цунами сейсмического происхождения составляет около 5 минут.) При этом на формирование записи цунами оказывают влияние локальные особенности рельефа дна, форма берега и пр. Кроме того, запись уровня содержит приливную составляющую.

В практической ситуации дежурный океанолог (эксперт) использует визуальный анализ записи уровня моря для оценки времени вступления волны цунами.

Построение процедуры оценки времени вступления волны опирается на имитацию визуального анализа записи уровня моря, который осуществляет океанолог (эксперт), выполняя следующие действия. Сначала он мысленно просматривает изображенную в виде кривой на графике запись уровня моря и выделяет на фоне приливной составляющей слабо изменяющиеся фрагменты, а также фрагменты с более резкими и длительными изменениями. Затем, после такого выделения, осуществляется анализ фрагментов с резкими изменениями. Приведенная ниже процедура осуществляет имитацию действий эксперта на уровне алгоритма обработки.

Начальный шаг процедуры заключается в устранении приливной составляющей в записи, что является одной из основных задач обработки гидрофизического сигнала [6]. Из записи вычитаются

приливные колебания, предвычисление которых осуществляется по известным заранее константам. Эта процедура не изменяет амплитуды и фазы других составляющих и не нуждается в настройке. Далее предполагается, что обрабатываемая запись не содержит приливной составляющей.

Следующий шаг: имитация действий эксперта при определении характера изменений уровня моря. При анализе записи эксперт мысленно старается уловить тенденцию изменения уровня моря, не принимая во внимание кратковременные незначительные изменения, имеющие характер нерегулярных возмущений. С целью их устранения из записи применяется процедура гравитационного сглаживания [4].

Пусть имеется дискретная запись наблюдаемого процесса – дискретный временной ряд  $y$  – последовательность чисел  $y = [y_k = y(kh): k = 0, 1, 2, \dots, N]$ , определенная на «связном» (без пропусков) подмножестве  $T$  дискретной полуоси  $R_h^+ = \{kh: h > 0, k = 0, 1, 2, \dots\}$  – области записи. Для упрощения формул везде далее считается  $h = 1$ .

Натуральные числа  $\Delta_1, \Delta_2 \in N$  – параметры процедуры сглаживания, которая применяется к отрезку временного ряда:  $\Delta_{1,2}^k y = \{y_{k-\Delta_1}, y_{k-\Delta_1+1}, \dots, y_k, \dots, y_{k+\Delta_2}\}$ . На отрезке натурального ряда  $[k - \Delta_1, k + \Delta_2]$  задается нечеткая структура [1], задающая «значимость» точек отрезка по отношению к фиксированной точке  $j \in [k - \Delta_1, k + \Delta_2]$ . Например, это может быть весовая функция  $\delta_j(i) > 0$  следующего вида:  $\delta_j(i) = (\max\{|k - \Delta_1 - j|, |k + \Delta_2 - j|\} + 1)^{-1} |j - i|$ . По мере удаления от  $j$  вес точек линейно убывает. Дискретное выражение гравитационной непрерывности [4] для произвольного ряда  $\Delta_{1,2}^k z$  в узле  $j$  означает равенство  $z_j = \sum_{i=k-\Delta_1}^{k+\Delta_2} a_{ij} z_i$ , где  $a_{ij} = \delta_i(j) (\sum_{s=k-\Delta_1}^{k+\Delta_2} \delta_i(s))^{-1}$  – элементы матрицы  $A = (a_{ij})$ . Соответственно, отклонение от непрерывности в узле  $j$  задается невязкой  $C(z)(j) = (z_j - \sum_{i=k-\Delta_1}^{k+\Delta_2} a_{ij} z_i)^2$ . Общая невязка непрерывности задается суммой  $C(z) = \sum_{i=k-\Delta_1}^{k+\Delta_2} C(z)(j)$ . По такой же схеме можно формализовать гравитационную гладкость дискретного ряда, используя оператор дискретного дифференцирования [4].

Процедура гравитационного сглаживания по отношению к отрезку временного ряда:  $\Delta_{1,2}^k y$  состоит в построении отрезка ряда  $\Delta_{1,2}^k z$  на основе минимизации функционала  $F_\lambda(z) = \lambda C(z) + (1 - \lambda) \sum_{j=k-\Delta_1}^{k+\Delta_2} (y_j - z_j)^2$ , где настраиваемый параметр  $\lambda \in [0, 1]$ . Результат сглаживания в точке  $k$  есть значение  $z_k$ . В отношении всей записи процесса описанная процедура применяется для каждой точки  $k = 0, 1, 2, \dots, N$ .

Далее вычисляется оценка скорости изменений уровня  $v_\lambda(kh) = h^{-1}(y_\lambda(kh) - y_\lambda((k-1)h))$ , где  $y_\lambda$  – результат гравитационного сглаживания записи уровня моря.

На основе оценки скорости изменения уровня моря находятся связанные (без пропусков) временные отрезки  $I_p^+, I_q^-$ , в пределах которых скорость положительна (отрицательна):  $v_\lambda(kh) > 0, kh \in I_p^+ (v_\lambda(kh) < 0, kh \in I_q^-)$ . При этом отрезки  $I_p^+, I_q^-$ , максимальные, т.е. невозможно их расширение с сохранением свойства постоянства знака скорости. Для каждого временного отрезка  $I_p^+, I_q^-$ , вычисляется изменение уровня моря  $H(I_p^+) = \sum \{v_\lambda(kh): kh \in I_p^+\}$ ;  $H(I_q^-) = \sum \{|v_\lambda(kh)|: kh \in I_q^-\}$

Вступлению цунами (цунамиподобного события) соответствует появление отрезка  $I_p^+(I_q^-)$ , для которого значение величины  $H(I_p^+)(H(I_q^-))$  существенно в сравнении с фоновым. Для формализации сравнения используются нечеткие сравнения. Пусть  $n(a, b)$  – какое-либо нечеткое сравнение положительных чисел [6], выражающее степень превосходства  $b > 0$  над  $a > 0$ . (Например,  $n_2(a, b) = (b - a)(a^2 + b^2)^{-1/2} \in [-1, 1]$ ). Для числового множества  $A = \{a_1 \leq a_2 \leq \dots \leq a_N\}$  можно определить  $n(A, b)$  – сравнение  $A$  с  $b$ :  $n(A, b) = \frac{1}{N} \sum_j n(a_j, b) \in [-1, 1]$ . Считается, что значение величины  $H(I_p^+)(H(I_q^-))$  соответствует проявлению цунами, если  $n(J, H(I_p^+)) > \gamma$  ( $n(J, H(I_q^-)) > \gamma$ ), где  $J$  есть множество значений величин  $H(I_p^+), (H(I_q^-))$ , соответствующих фоновым,  $\gamma > 0$  – пороговое значение (настраиваемый параметр).

Блок-схема процедуры автоматической оценки времени вступления волны цунами представлена на рисунке 1.

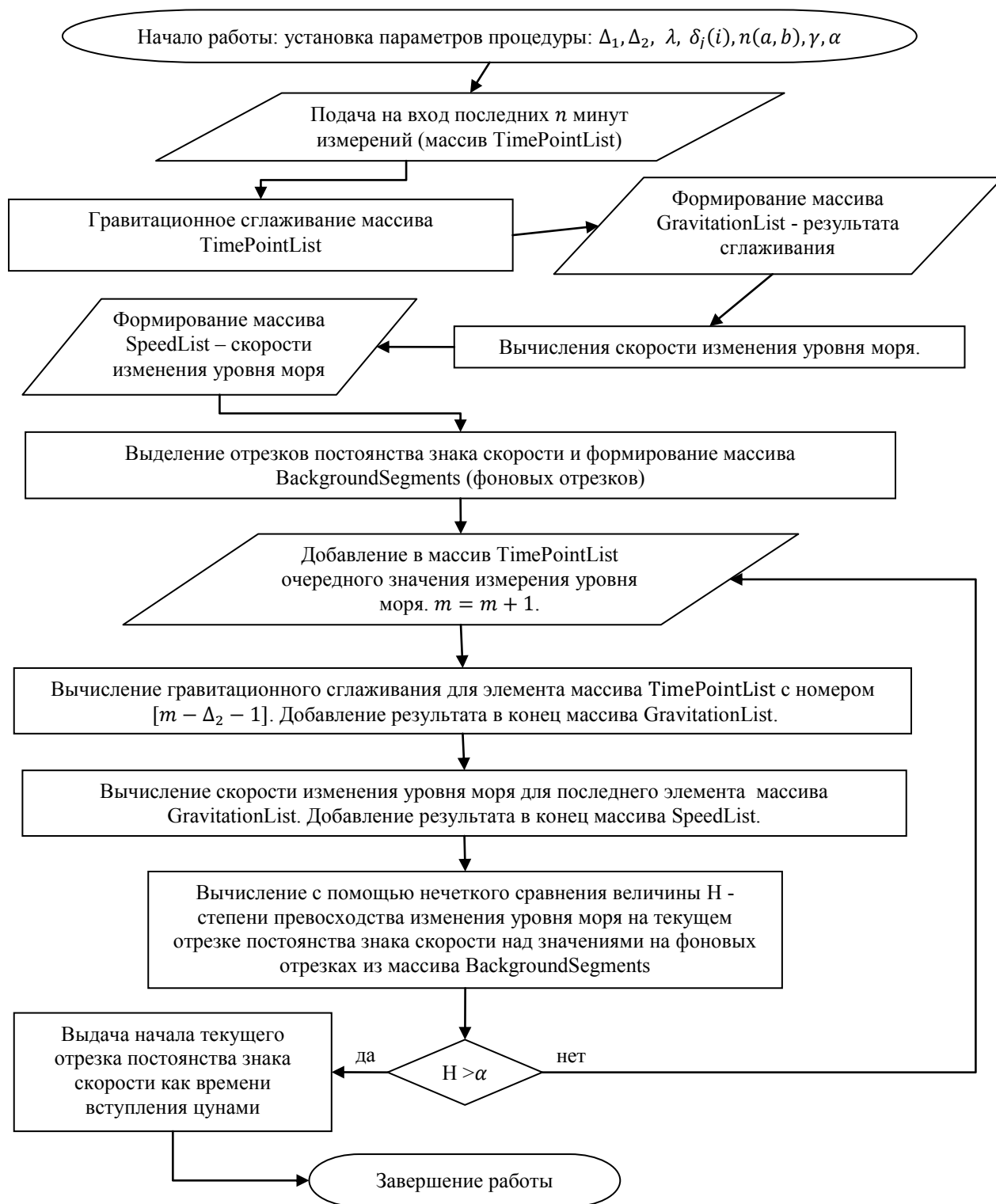


Рис. 1. Блок-схема процедуры автоматической оценки времени вступления волны цунами

### Выбор параметров процедуры и результаты обработки записей уровня моря

Параметрами изложенной процедуры оценки времени вступления волны цунами являются:

- натуральные числа  $\Delta_1, \Delta_2 \in N, \lambda \in [0, 1]$  – параметры процедуры сглаживания;
- весовая функция  $\delta_j(i)$ ;
- нечеткое сравнение  $n(a, b)$ ;
- пороговое значение  $\gamma > 0$ .

Процедура оценки имеет эвристический характер, поэтому выбор параметров осуществлялся на основе опыта обработки записей цунами. При обработке использовались записи цунами от Великого восточно-японского землетрясения (11 марта 2011 года), полученные береговыми АП: Малокурильское, Южно-Курильск, Курильск, Рейдово, Крильон, Корсаков, Поронайск, Стародубское, Невельск, Холмск, Углегорск, Находка, Преображение, Рудная пристань, Семячки, Никольское, Петропавловск, Ханасаки. В результате оказалось:

- параметры процедуры сглаживания обеспечивают её эффективность при  $\Delta_1 \sim 10$  мин,  $\Delta_2 \sim 1-3$  мин,  $\lambda \sim 0.5$ ; весовая функция может быть линейно убывающей;
- в качестве нечеткого сравнения использовалось сравнение положительных чисел, приведенное в тексте, а также сравнение  $n(a,b) = (\max\{a,b\})^{-1}(b-a)$  – в обоих случаях удавалось подобрать пороговое значение  $\gamma$ , обеспечивающее приемлемую оценку времени вступления волны.

Выбор порогового значения  $\gamma$  осуществлялся на основе анализа отрезка записи, который заведомо не содержал обусловленной цунами составляющей. Для такого отрезка строилось  $J$  – множество значений величин  $H(I_p^+), (H(I_q^-))$ . Затем для каждого элемента  $H(I_p^+)$  множества  $J$  вычислялось значение  $\Gamma(J, H(I_p^+)) = n(J - H(I_p^+), H(I_p^+))$ . Множество значений  $\Gamma(J, H(I_p^+))$  позволяло оценить фоновое значение нечетких сравнений. Пороговое значение выбиралось равным  $\gamma = \max\{0.5; 0.5(1 + \max\{\Gamma(J, H(I_p^+)) : H(I_p^+) \in J\})\}$ .

#### Замечание

Для сильно зашумленных данных можно использовать автоматическую подстройку параметра  $\lambda$  (например, по оценке дисперсии). Кроме того, за счет введения ограничения снизу на длину отрезка постоянства знака скорости изменения уровня моря можно обеспечить автоматический пропуск кратковременных скачков скорости, обусловленных случайными возмущениями или сбоями в работе АП.

На рисунках 2–5 представлены этапы обработки данных уровня моря для АП «Холмск» с помощью процедуры оценки времени вступления волны цунами. Жирной линией на графиках выделен участок постоянства знака скорости изменения уровня моря, соответствующей вступлению волны цунами.

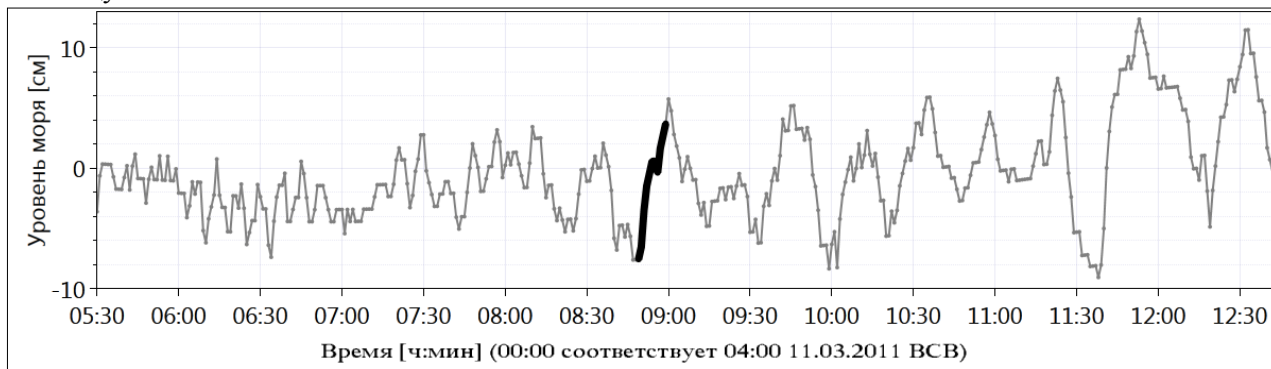


Рис. 2. Измерения уровня моря

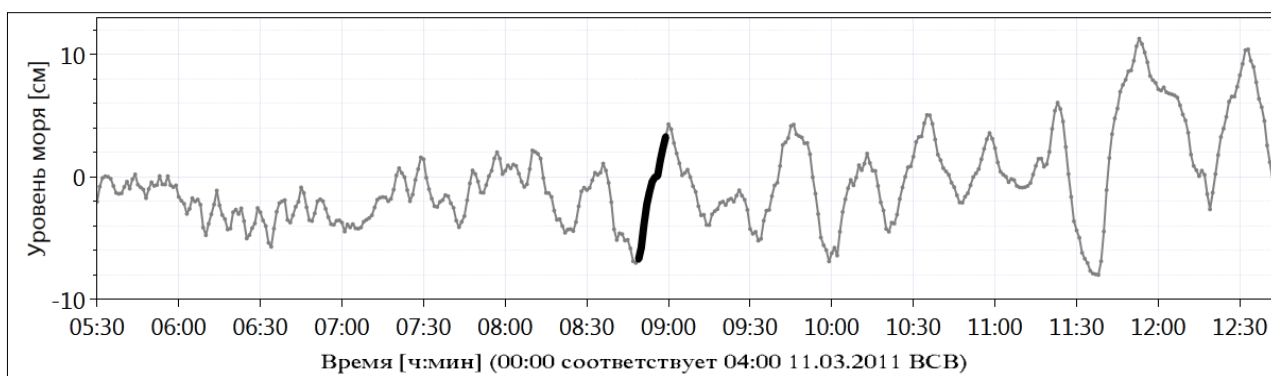


Рис. 3. Гравитационное сглаживание измерений уровня моря

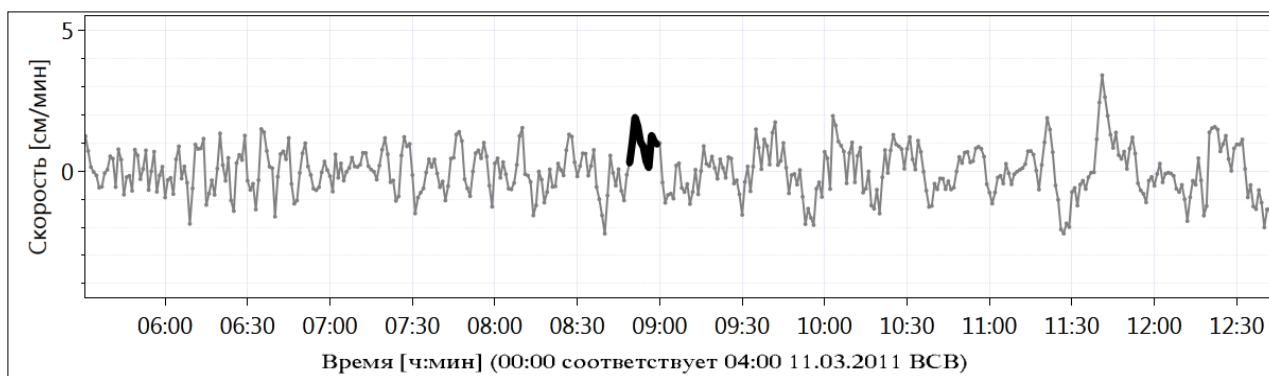


Рис. 4. Оценка скорости изменения уровня моря

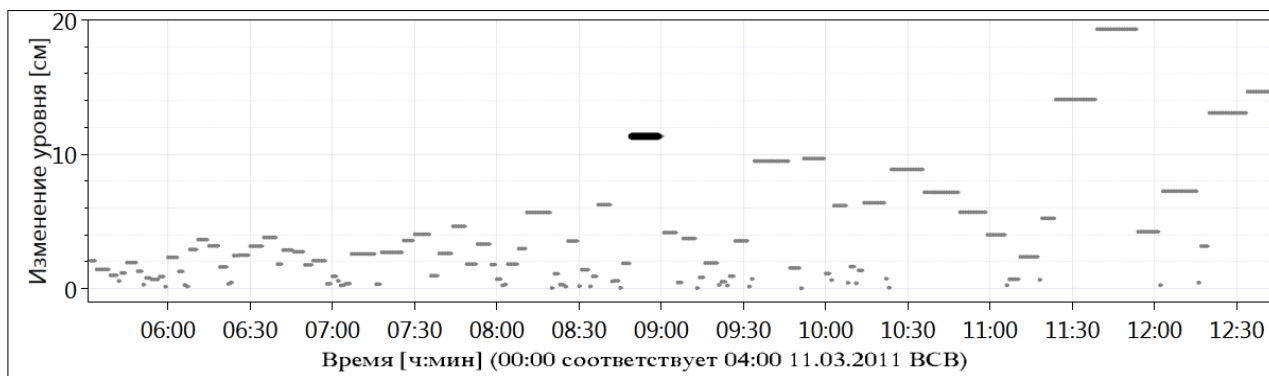


Рис. 5. Оценка изменений уровня моря для участков постоянства знака скорости

### Заключение

Построенная эвристическая процедура оценки времени вступления волны цунами по данным береговых автоматизированных постов при соответствующей настройке позволяет имитировать действия эксперта при визуальной обработке записи уровня моря и может использоваться в автоматическом режиме для информационной поддержки дежурного океанолога.

Настройка процедуры (выбор параметров) может осуществляться в режиме обучения индивидуально для каждого автоматизированного поста и каждого пользователя на основе анализа записей цунами.

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

### Список литературы

1. Аверкин А.Н., Батыршин И.З., Блишун А.Ф., Силов В.Б., Тарасов В.Б. Нечёткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта. Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1986. 312 с.
2. Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р. Определение аномалий на временных рядах методами нечеткого распознавания. // Доклады Академии наук. 2008. Т. 421. №1. С. 101-105.
3. Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Злотники Ж., Боннин Ж. Математические методы геоинформатики. III. Нечеткие сравнения и распознавание аномалий на временных рядах. // Кибернетика и системный анализ. 2008. Т. 44. №3. С. 3-18.
4. Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Каган А.И. Гравитационное сглаживание временных рядов. // Труды института математики и механики УрО РАН. Т. 12. №2. С.1-9.
5. Ивельская Т.Н., Шевченко Г.В. Результаты опытной эксплуатации автоматических постов наблюдения за уровнем моря в портах Корсаков и Холмск. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Второй региональной научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН. 2010. С.264-268.
6. Куликов Е.А. Измерение уровня океана и прогноз цунами. // Метеорология и гидрология. 1990. №6. С. 61-68.