

# Вычислительный эксперимент в проблеме моделирования и оценки риска природных катастроф

Ю.И. Шокин<sup>1</sup>, Л.Б. ЧУБАРОВ<sup>1</sup>, К.В. СИМОНОВ<sup>2</sup>, З.И. ФЕДОТОВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия*  
*e-mail: shokin@ict.nsc.ru*

<sup>2</sup>*Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия*  
*e-mail: lena@icm.krasn.ru*

This work presents method of nonlinear multiparameter regressional analysis of tsunami data, description of the algorithm and program complex along with a pilot variant of expert system for automatic making decision of tsunami danger for Primorie.

## Введение.

В работе представлено описание информационно-вычислительной технологии моделирования и оценки риска неблагоприятного природного процесса – цунами, которая обеспечивает обработку расчетных и натурных данных, и связывает численное и статистическое моделирования в рамках единого вычислительного эксперимента.

Цель исследований – построение пространственно-временных распределений изучаемой величины – риска природного катастрофического события (высоты цунами), для решения основных прикладных задач (прогноз цунамиопасности и цунамирайонирование). При этом понятие риска определяется как случайный элемент (случайная величина, случайный процесс).

Таким образом, в процессе вычислительного эксперимента моделирование явления цунами выполняется на основе детерминированных гидродинамических моделей, а процедура построения искомых регрессионных соотношений, связывающих параметры источника возмущения (очаг цунами) и наблюдаемые характеристики (распределение коэффициентов усиления цунами и высот волн вдоль побережья), соответствует статистическому моделированию. На этапе регрессионного моделирования происходит оценивание точностей входных и выходных величин, а также подбор весовых коэффициентов искомой регрессионной модели.

Предлагаемая технология реализована для прогнозирования проявления волн цунами в акватории Японского моря. Построены регрессионные соотношения связи

с целью оценки риска цунами и детального цунамирайонирования побережья. Разработан прообраз экспертной системы для поддержки принятия решения о степени цунамиопасности для побережья Приморья.

В результате, на основании полученных данных, разработана экспертная система для поддержки принятия решения о степени цунамиопасности (риска) для побережья Приморья. Система для поддержки принятия решения о степени цунамиопасности адаптируется к особенностям пункта наблюдения в п. Ольга в береговой зоне побережья Приморья и цунамигенной зоны в Японском море.

## **1 Численное моделирование волн цунами.**

### **1 Описание вычислительного эксперимента.**

Исследование посвящено разработке вычислительной технологии моделирования и оценки риска цунами в режиме реального времени в рамках локальной системы предупреждения о цунами (СПЦ), построенной на основе численного моделирования волн цунами и нелинейного регрессионного анализа натурных и расчетных данных о цунами в рамках единого вычислительного эксперимента.

Отметим, что основными компонентами локальных систем предупреждения о цунами являются: схема рациональной расстановки гидрофизических датчиков, а также система для поддержки принятия решений, которая позволяет оценить опасность зарегистрированной волны для конкретных точек побережья.

Предполагается, что локальная система может работать в двух режимах: в режиме ожидания события и в оперативном режиме. В режиме ожидания неблагоприятного события с помощью гидрофизических датчиков ведется контроль за уровнем моря. При регистрации на одном из датчиков аномального изменения уровня моря Система переходит в оперативный режим. После этого выполняется оценка параметров ожидаемой волны, и выдаются сообщения о вероятных границах зон затопления, силе и длительности воздействия цунами.

Рассмотрим основные этапы гидродинамической части вычислительного эксперимента, предназначенного для построения локальной СПЦ.

На первом этапе вычислительного эксперимента выполняется численное моделирование распространения волн цунами в акватории Японского моря от пяти основных очаговых зон цунами, местоположение которых характеризуется широтной координатой, изменяющейся от 38 град. с.ш. до 44 град. с.ш. Соответствующие сейсмические события (цунамигенные землетрясения) в этих очаговых областях произошли в 1741, 1940, 1964, 1983 и 1993 гг.

В результате по данным условных (расчетных) мареографов (береговые и морские точки) строятся соответствующие распределения высот (амплитуд) волн цунами вдоль побережья Приморья для оценки степени цунамиопасности применительно к региональной области.

На втором этапе вычислительного эксперимента проводятся расчеты

локальной области побережья – в районе п. Ольга. Выделение этой области произведено по критерию заблаговременности регистрации волн цунами, т.е. здесь наблюдалось минимальное время прихода волн от цунамигенной области по сравнению с другими расчетными пунктами. В процессе моделирования использовались те же очаги цунами, что и на первом этапе вычислительного эксперимента.

Здесь также для ряда расчетных мареографных пунктов (береговые, морские и шельфовые точки) построены соответствующие распределения высот (амплитуд) волн цунами вдоль исследуемого локального побережья.

Опишем расчетную область, где проведены указанные исследования. Для моделирования цунами использована карта глубин Японского моря с шагом по области в одну секунду. При проведении расчетов с помощью разностной схемы шаг принят равным  $\Delta x = 1854$  м, размерность массива глубин составила  $960 \times 1119$ .

Моделирование распространения волн цунами выполнено на основе классической линейной модели теории мелкой воды. Для проведения расчетов использована конечно-разностная схема второго порядка аппроксимации.

Для региональных расчетов (первый этап вычислительного эксперимента) зафиксированы пять локальных зон вдоль побережья Приморья. В каждой локальной зоне рассматривались по два пункта (береговые, глубина около 10 м и морские мареографы, глубина около 15 м), в которых производилась запись высоты, проходящих волн цунами – мареограммы.

Анализ результатов численного моделирования цунами (решений прямой задачи) показал, что без потери информации о распространении волн расчетную область можно сделать меньше, взяв лишь фрагмент области. Названия пунктов и координаты мареографов (номера узлов) приведены в таблице 1.

### **Пункты и координаты расчетных мареографов для региональной области.**

*Таблица 1.*

Название пункта	Береговая, номер узла	Глубина, м	Морская точка, номер узла	Глубина, м
п. Терней	(601,731)	$h = 9.2$	(592,716)	$h = 69.2$
п. Рудная Пристань	(558,696)	$h = 9.4$	(564,693)	$h = 58.6$
п. Ольга	(513,637)	$h = 10.5$	(521,652)	$h = 59.2$
п. Валентин	(486,619)	$h = 11.1$	(491,622)	$h = 62.0$
г. Находка	(356,582)	$h = 10.2$	(357,576)	$h = 60.1$
г. Владивосток	(311,606)	$h = 11.1$	(311,598)	$h = 62.1$

## **2 Расчеты параметров цунами для региональной области.**

Обработка данных расчетов распространения цунами для региональной области показала, что для анализа волновой картины необходимо увеличение числа мареографов. В таблице 2 приведены координаты тридцати мареографов, включенных

**Координаты тридцати мареографов, включенных в расчет  
для моделирования цунами для региональной области.**

*Таблица 2.*

Координаты	Комментарии
(347,442), (338,427)	п. Терней
(304,407), (310,404)	п. Рудная Пристань
(259,348), (267,363)	п. Ольга
(232,330), (237,333)	п. Валентин
(102,293), (103,287)	г. Находка
(57,317), (58,309)	г. Владивосток
(487,314), (425,314), (364,314)	1940 (очаг и две точки в западном направлении)
(469,276), (425,276), (364, 276)	1993
(467,222), (425,222), (367,222)	1741
(478,158), (425,158), (364,158)	1983
(475,74), (425, 74), (365, 74)	1964
(34,304), (36,297), (41,301)	дополнительные точки вблизи г. Владивостока

В этих точках на протяжении всего времени процесса расчета (два часа распространения цунами) велась запись высот волн цунами. Начальное возмущение амплитуды  $\xi_0$  задано в виде верхней половины эллипса:

$$\xi = \xi_0 \sqrt{1 - \frac{(x - x_0)^2}{r^2} - \frac{(y - y_0)^2}{R^2}}.$$

Рассматривались два типа очага цунами, характеризующиеся радиусом и высотой волны в очаге  $\xi_0$ :

- А) малый очаг (радиус  $r = 20\Delta x$  и  $R = 40\Delta x$ ),  $\xi_0$  равной 2 м,
- В) большой очаг (радиус  $r = 30\Delta x$ ,  $R = 50\Delta x$ ),  $\xi_0$  равной 4 м.

Результаты расчетов распространения цунами для региональной области приводятся в виде пригодном для последующего анализа.

### 3 Расчеты параметров цунами для локальной области.

Следующая серия расчетов распространения цунами в Японском море (второй этап вычислительного эксперимента) проведена с целью исследования волнового режима для выделенной локальной области в районе п. Ольга.

Данный пункт выбран на основе результатов моделирования цунами для региональной области в связи со следующими, выявленными по результатам расчетов, обстоятельствами:

- рельеф дна для этой локальной области характеризуется значительными глубинами на сравнительно близких расстояниях от берега;
- указанные особенности обуславливают для данного пункта минимальное время

в Японском море по сравнению с другими пунктами наблюдений вдоль побережья Приморья.

Следовательно, расположение данного пункта может рассматриваться в первом приближении, как местоположение для организации локальной СПЦ, которая способна "прикрыть" своевременным прогнозом цунамиопасности значительный участок береговой зоны побережья Приморья от разрушительных цунами.

Для описания волнового поля в указанной локальной области рассмотрены три группы мареографов, каждая из которых состоит из пяти точек приблизительно на одной глубине, соответственно.

Результаты расчетов распространения цунами для локальной области используются далее для регрессионного моделирования данных о цунами.

## **2 Статистическое моделирование данных о цунами.**

В этой части представлено описание нелинейного регрессионного многопараметрического подхода для статистического моделирования данных о цунами. Приведено описание соответствующих алгоритмов и комплекса программ, а также регрессионных моделей для оценки степени цунамиопасности побережья Приморья, построенных на основе данных вычислительного эксперимента, описанного в предыдущей части.

### **1 Регрессионный подход к анализу данных о цунами.**

Помимо задач, допускающих детерминированное описание – гидродинамическое моделирование цунами, существуют задачи, когда взаимосвязи параметров и характеристик явления описываются вероятностной моделью, такой задачей является статистическая оценка цунамиопасности – риска цунами.

Процедура решения задачи прогноза цунамиопасности является ядром системы поддержки принятия решений, которая позволяет оперативно оценить параметры волны цунами в различных пунктах и от различных очагов цунами. При этом возникает проблема выявления закономерностей в наборах расчетных и натурных данных, характеризующих известные и модельные (гипотетические) цунамигенные землетрясения.

В нашем случае применение традиционных статистических методов не всегда дает удовлетворительные результаты вследствие априорной неясности вида искомых закономерностей. Регрессионные (нейросетевые) алгоритмы позволяют проводить поиск закономерностей в больших массивах данных при произвольном статистическом распределении случайных величин. В случае, если закономерности выявлены, построенная сетевая модель может быть использована для прогноза цунами и

## 2 Методика построения регрессионной модели.

В большинстве случаев в нейросетевом подходе используются оптимизационные принципы. Строится функционал, оценивающий качество нейросетевой модели, и оптимизируется градиентными, либо другими методами.

В классическом методе наименьших квадратов минимизируется функционал, оценивающий соответствие модели эксперименту:

$$H = \sum_i (y(\vec{x}_i, \vec{p}) - \tilde{y}_i)^2,$$

где  $i$  – номер эксперимента,  $\tilde{y}_i$  – экспериментальное значение,  $x$  – вектор переменных, от которых находится зависимость,  $y(\vec{x}, \vec{p})$  – аппроксимирующая функция,  $\vec{p}$  – вектор настраиваемых параметров функции.

В результате находятся параметры стандартной функции (обычно линейной), аппроксимирующей экспериментальную зависимость. Но в эксперименте (численном или натурном) не все данные могут иметь одинаковую достоверность, поэтому во взвешенном методе наименьших квадратов вводятся веса отражающие влияние каждого эксперимента.

$$H = \sum_i \left( \frac{y(\vec{x}_i, \vec{p}) - \tilde{y}_i}{\delta \tilde{y}_i} \right)^2,$$

где  $\delta \tilde{y}_i$  – доверительный интервал, точность с которой определен  $\tilde{y}_i$ .

Не всегда минимум отклонения модели по координатам  $\tilde{y}$  будет удовлетворять лучшему ее соответствию изучаемому явлению. В этой связи по аналогии с взвешенным МНК, где вклад каждого слагаемого в функционале делится на его точность, предлагается оптимизировать следующий функционал:

$$H = \sum_i^n \left( \sum_j^m \left( \frac{x_{ij} - \tilde{x}_{ij}}{\delta \tilde{x}_{ij}} \right)^2 + \left( \frac{y(\vec{x}_i, \vec{p}) - \tilde{y}_i}{\delta \tilde{y}_i} \right)^2 \right),$$

где  $x_{ij}$  – аргументы аппроксимирующей функции предполагаемые моделью,  $\tilde{x}_{ij}$  – измеренные аргументы аппроксимирующей функции, не совпадающие с  $x_{ij}$ ,  $\tilde{y}$  – аппроксимируемая функция,  $\delta x$  и  $\delta y$  – доверительные интервалы;  $n$  – количество точек в выборке;  $m$  – число аргументов функции.

Для построения регрессионных моделей применялся комплекс программ "Модели", где используется нейросетевая аппроксимация зависимости выходов от входов следующего вида:

$$\alpha_a^t = b_a + c_a \sum \sin(\varphi_{aj} + \sum w_{ji} X_i^t),$$

где  $X$  – входные данные,  $i$  – номер входа,  $j$  – номер нейрона,  $t$  – номер задачи в выборке,  $a$  – номер выхода нейросети,  $b, c, w, \varphi$  подстраиваемые параметры,  $b$  и  $c$ , определяются при предобработке, а  $w$  и  $\varphi$  при обучении.

Программный комплекс "Модели" предназначен для оперативного синтеза по большим массивам эмпирическим и экспериментальным данным аналитических моделей. Синтезируемые аналитические модели приближенно воспроизводят характерные для исходного объекта причинно-следственные связи, в той мере в какой эти связи проявили себя при сборе эмпирических данных. Имея аналитическую модель, можно вместо экспериментов с исходным объектом прибегать к численным экспериментам с моделью.

Для работы программы (версия для среды Excel) необходимо указать расположение в рабочих книгах "Excel" исходных эмпирических данных, а также позиций, в которые будут размещаться итоги работы программы. Предполагается, что эмпирические данные организованы в виде бимассива, состоящего из двух связанных между собой массивов – массива входов ("причин") и массива выходов (ответов, "следствий").

Еще два бимассива нужны для вывода результатов: бимассив "Прогнозы", имеющий ту же структуру и размеры, что и бимассивы эмпирических данных и их точностей, и бимассив "Модель", имеющий те же горизонтальные размеры, что и прочие бимассивы, но отличающийся по вертикальным размерам, задаваемым пользователем.

Минимально допустимый вертикальный размер бимассива "Модель" равен трем. В бимассиве "Прогнозы" размещаются результаты модельного сглаживания эмпирических данных, в бимассиве "Модель" сохраняется информация о параметрах аналитической модели.

Две верхние строки бимассива "Модель" имеют информационный статус – в частности, в первой строке первого входного столбца размещена ошибка модели по результатам последнего обучения, величины во второй строке указывают значимость соответствующего входного параметра для предсказаний – чем меньше эта цифра, тем менее важна соответствующая входная информация.

### **3 Регрессионные модели для оценки цунамиопасности.**

Следующим этапом вычислительного эксперимента, применительно к разработке системы предупреждения о цунами, явилось построение на основе численного моделирования базовых регрессионных моделей для региональной области побережья Приморья и локальной области в п. Ольга.

#### **1 Регрессионные модели оценки цунамиопасности для региональной области.**

Базовые регрессионные модели для мареографных точек (береговых и морских) вдоль исследуемой региональной области – ведущий элемент системы поддержки

вычислительного эксперимента, показал перспективность п. Ольга для построения локальной СПЦ. В этом районе наблюдается минимальное время добегания волн цунами от основных цунамигенных зон Японского моря.

В работе анализировались графики базовых расчетных мареограмм для п. Рудная пристань (мареографы №№ 3–4, береговые и морские точки) региональной области: очаги цунами 1–5; тип очага А (вариант "а") и В (вариант "б"); расчеты выполнены по линейной модели.

Изучались также графики базовых расчетных мареограмм для п. Ольга (мареографы №№ 5–6, береговые и морские точки) региональной области: очаги цунами 1–5; тип очага А (вариант "а") и В (вариант "б"); расчеты выполнены по линейной модели.

Исследовались графики базовых расчетных мареограмм для условного п. Валентин (мареографы №№ 7–8, береговые и морские точки) региональной области, очаги цунами 1–5, тип очага А (вариант "а") и В (вариант "б"). Расчеты выполнены по линейной модели.

Указанные данные, полученные в ходе вычислительного эксперимента, позволяют построить базовую регрессионную модель с помощью программного комплекса "Модели" для региональной области и каждого типа мареографных точек (береговых и морских).

Эти материалы позволяют организовать процедуру прогноза цунамиопасности от различных вариантов местоположения и типа источника цунами для цунамигенной зоны Японского моря. В результате регрессионного моделирования данных созданы соответствующие базовые модели для региональной области со следующими параметрами: число нейронов – 20, значение параметра спектра равно 0.5.

В итоге представлены результаты прогноза цунамиопасности для условного п. Ольга (береговая и морская точки) в зависимости от местоположения очага цунами (1 – –5): вариант расчета – – высота в очаге цунами 2 м, тип очага – – ; вариант расчета – – высота – – 4, тип очага – – .

В работе приведены прогноз высоты цунами и расчетные данные моделирования цунами. Видно, что имеется хорошее совпадение расчетных и прогнозных данных, ошибка по регрессионной модели существенно меньше 1%.

## **2 Регрессионные модели оценки цунамиопасности в районе п. Ольга.**

Следующий этап создания локальной СПЦ на основе вычислительного эксперимента и статистического моделирования расчетных данных – построение локальных регрессионных моделей и анализ расчетных данных для мареографных точек (береговых, морских и шельфовых) вдоль исследуемой локальной области.

Анализ данных, полученных в ходе численного моделирования цунами, подтвердил перспективность пункта наблюдения п. Ольга в качестве места для построения локальной СПЦ.

Далее в работе приводятся графики базовых расчетных мареограмм для пункта наблюдения п. Ольга (мареографы №№ 3, 8, 13 – центральные береговые, морские



и В (вариант "б"), расчеты выполнены по линейной модели.

Представленные здесь данные, полученные в ходе вычислительного эксперимента, позволяют построить базовую регрессионную модель с помощью программного комплекса "Модели" для локальной области и каждого типа мареографных точек (береговых, морских и шельфовых). И, таким образом, уточняются прогнозы цунамиопасности от различных вариантов местоположения и типа источника цунами для исследуемой цунамигенной зоны Японского моря.

В результате регрессионного моделирования указанных данных создан набор соответствующих моделей для локальной области со следующими параметрами: число нейронов – 10, значение параметра спектра равно 0.5.

В работе приведены результаты прогноза цунамиопасности для п. Ольга (для центральной береговой, морской и шельфовой точек) в зависимости от местоположения очага цунами (1 – 5): вариант расчета – высота в очаге цунами 2 м, тип очага А; вариант расчета – высота – 4 м, тип очага В. На графиках показаны прогноз высоты цунами и расчетные данные моделирования цунами. Имеется хорошее совпадение расчетных и прогнозных данных, ошибка по регрессионной модели меньше 1%.

### **3 Экспертно-аналитическая компьютерная система поддержки принятия решения.**

В этом разделе приводится описание экспертно-аналитической компьютерной системы поддержки принятия решения (версия для среды "Excel") с помощью комплекса программ "Модели", для оценки степени цунамиопасности побережья Приморья и цунамигенной системы в Японском море.

Подготовка разработанного комплекса программ к работе и начало моделирования осуществляется следующим образом.

В каталоге "Office\Library" размещается каталог "Model", содержащий файл "Модели.xls" и динамическую библиотеку "NEU.dll". После этого входим в "Excel" и устанавливаем программу "Модели.xls" с помощью опции "Надстройки" меню "Сервис".

Далее необходимо запустить файл 4-tidal-tzun-log.xls. На листе 1 "Excel" представлены основные информационные таблицы системы, взаимосвязанные между собой, этот лист в обычном режиме закрыт для оператора-пользователя. На листе 2 "Excel" показываются возможности системы по оценке цунамиопасности на основе сейсмологической информации, на листе 3 "Excel" приведены возможности системы по оценке цунамиопасности на основе гидрофизической информации.

Для оценки коэффициента усиления волны цунами в изучаемом пункте вдоль побережья Приморья необходимо на листе 2 "Excel" в соответствующую ячейку ввести условные координаты точки наблюдения, широту местоположения очага цунами и магнитуду землетрясения. В экспертной системе на листе 2 ячейки управления (ввода информации) обведены рамкой.

Система выдаст прогноз степени цунамиопасности для данного пункта наблюдений и график распределения коэффициентов усиления волны цунами для всего исследуемого побережья, а также оценку этого показателя степени цунамиопасности для выделенных пунктов регистрации цунами в береговой зоне Приморья.

учетом поступающей дополнительной гидрофизической информации о волнах цунами, как на побережье Приморья, так и на побережье Японских островов.

Таким образом, предлагаются следующие правила действий для оператора–пользователя данной системой в период мониторинга и осуществления прогноза степени цунамиопасности в режиме реального времени.

### **Использование информации сейсмической подсистемы оперативного прогноза о цунами.**

- Тревожный режим — сработала сейсмическая подсистема оперативного прогноза цунами, определены основные параметры цунамигенного землетрясения — магнитуда и координаты гипоцентра.
- При превышении соответствующего порога  $M > 7.0$  для данной цунамигенной зоны в Японском море объявляется тревога цунами для всего побережья Приморья без указания ожидаемой высоты волны цунами в защищаемых пунктах.
- Далее, на этом этапе развития кризисной ситуации, предлагается использование разработанной экспертной системы:
  - ввод исходных данных о сильном землетрясении, произошедшем в цунамигенной зоне Японского моря производится на листе 2 "Excel" (см. описание системы), исходные данные вводятся в соответствующие ячейки;
  - оценка цунамиопасности выполняется на основе распределения коэффициентов усиления волны цунами вдоль изучаемого побережья, которое является результатом работы системы, показываются данные о цунами для ряда пунктов наблюдения вдоль береговой зоны Приморья.

### **Использование информации гидрофизической подсистемы оперативного прогноза о цунами.**

Далее, при развитии чрезвычайной ситуации, обусловленной цунами, начинает поступать информация о проявлениях волн цунами на Японских островах и на побережье Приморья.

Ввод исходных данных о проявлениях цунами производится на листе 3 Excel (см. описание системы) с помощью вызываемого окна управления (Ctrl+N), где далее показывается результат оценки степени цунамиопасности в виде распределения ожидаемых высот волн цунами вдоль побережья Приморья и приводятся ожидаемые высоты цунами в отдельных пунктах наблюдения вдоль береговой зоны.

На этом этапе анализа информации и действий оператора–пользователя системы по оценке цунамиопасности возможно возникновение трех ситуаций.

*Вариант 1.* Основой для прогноза, является оценка начальной высоты волны в очаге цунами, которая рассчитывается по регрессионным соотношениям связи для рассматриваемого региона между магнитудой цунамигенного землетрясения и высотой волны цунами в очаге, что позволяет пересчитать ее в распределение высот волн вдоль изучаемого побережья Приморья (данные вводятся в окне управления).

*Вариант 2.* Оценка цунамиопасности выполняется по гидрофизическим данным о проявлениях цунами вдоль побережья Приморья (данные о наблюдаемой высоте

*Вариант 3.* Оценка цунамиопасности выполняется по гидрофизическим натурным данным о проявлениях цунами на побережье Японии, в этом случае необходимо предварительно "набрать" значения наблюдаемых высот волн цунами и занести их в соответствующее окно управления. Набор информации о наблюдаемых высотах волн цунами в Японии производится в указанных ячейках на листе 3 "Excel".

### **Заключение.**

В работе представлено описание методики оценки риска цунами на основе локальной системы предупреждения о цунами, которая моделируется средствами вычислительного эксперимента: гидродинамическое моделирование волн и нелинейный регрессионный многопараметрический анализ данных о цунами.

Представлены результаты вычислительного эксперимента по численному моделированию распространения цунами в Японском море и регрессионного анализа данных для построения локальной СПЦ в районе п. Ольга.

В результате, на основании полученных данных разработана система для поддержки принятия решения о степени цунамиопасности побережья Приморья.