

На правах рукописи



Никонорова Оксана Александровна

**Математическая модель и программный комплекс
для определения периодов повышенной сейсмической
опасности**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2010

Диссертация выполнена на кафедре программных систем Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева (национальный исследовательский университет)» (СГАУ)

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Коварцев Александр Николаевич

Официальные оппоненты

заслуженный работник высшей школы
Российской Федерации,
доктор технических наук, профессор
Прохоров Сергей Антонович

доктор технических наук, профессор
Мясникова Нина Владимировна

Ведущая организация Учреждение Российской академии наук
Международный институт теории прогноза
землетрясений и математической геофизики
(МИТП РАН) (г.Москва)

Защита диссертации состоится «29» октября 2010 года в 13 часов
на заседании диссертационного совета Д212.215.05 при СГАУ по адресу:
443086, г.Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГАУ

Автореферат разослан « 28 » сентября 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
д.т.н., профессор



Фурсов В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Возникновение чрезвычайных ситуаций обусловлено объективно существующими очагами зарождения и развития неблагоприятных стихийных явлений. Землетрясения занимают лидерство среди чрезвычайных ситуаций по экономическому ущербу и одно из первых мест по числу человеческих жертв. Наибольшее количество землетрясений концентрируется на границах литосферных плит. Каждая из границ представляет собой сложную систему разломов, так же как и другие природные объекты, - это открытые нелинейные динамические системы, поэтому на современном уровне развития науки не представляется возможным предложить детальные математические модели, обладающие достаточной предсказательной силой. Вместо детального описания процесса подготовки катастрофы используются общие свойства нелинейных динамических систем.

С таких позиций для вероятного определения места, силы и времени сильного землетрясения выполнены работы В.И. Кейлис-Бороком, В.Г. Кособоковым, Г.А. Соболевым, А.Д. Завьяловым, П.Н. Шебалиным и др. При этом в качестве ведущих алгоритмов можно указать, в частности, такие алгоритмы, как «Магнитуда 8» (М8), «Калифорния-Невада» (КН), «Карта ожидаемых землетрясений» (КОЗ), «RTL», «Обратное прослеживание предвестников» (ОПП), которые базируются на комплексе долгосрочных и среднесрочных предвестников. При реализации этих алгоритмов объявляемый период повышенной сейсмической опасности составляет около 6 месяцев в алгоритме «М8», около 9 месяцев в «ОПП», в «КОЗ» около 5 лет.

Для повышения вероятности более точного определения времени землетрясения в комплексе с долгосрочными и среднесрочными предвестниками землетрясений необходимо использовать и краткосрочные предвестники, среди которых можно выделить следующие тестируемые в последние годы: форшоковая активизация (А.И. Малышев, И.Н. Тихонов и др.); электромагнитные предвестники (В.М. Бардаков, Б.О. Вугмейстер, А.С. Гуров, А.В. Петров, А.А. Храмцов, А.Н. Кролевец, В.К. Павлюков и др.); атмосферно-ионосферные процессы (В.В. Богданов, А.В. Бузевич, Г.И. Дружин и др.); вариации высокочастотного сейсмического шума (В.А. Салтыков, В.Н. Чебров, В.И. Сеницын, Ю.А. Кугаенко) и другие, а также и те природные процессы, которые могут опосредованно инициировать землетрясение, если тектонические напряжения в области подготовки землетрясения достигли критического уровня.

В качестве таковых могут быть рассмотрены приливные силы, что согласуется с теорией диссипативных структур, предложенной И.Р. Пригожиным. Приливные напряжения создают небольшую знакопеременную добавку к фоновому полю напряжений земной коры и могут либо усиливать, либо ослаблять развитие геодинамического процесса. О связи сейсмического процесса с приливными силами отмечается во многих работах: С.А. Федотов, 1983; В.И. Валяев, Ю.А. Копытенко, В.И. Почтарев, М.М. Погребников, С.В. Серова, 1986; А.В. Николаев, 1994; Ю.В. Волков, 2002; В.А. Салтыков, В.В. Иванов, 2003;

Приходовский М.А., 2004; Е.Ф. Юрков, В.Г. Гиттис, 2005; Б.В. Левин, 2007 и другие. Хотя расчет приливных воздействий может быть строго и однозначно формализован, что является необходимым условием при оценке эффективности предвестника землетрясений, до настоящего времени не выделено прогностического признака, базирующегося на приливных силах.

Поэтому актуальным является разработка модели и программного комплекса для поиска предвестника путем сопоставления моментов землетрясений с вычисленными на перекрывающемся интервале времени вариациями компонент приливной силы, которые позволят выделять периоды повышенной сейсмической опасности.

Цель и задачи исследования

Целью исследования является повышение надежности определения периодов повышенной сейсмической опасности на основе анализа изменения приливных сил тяжести в сейсмоактивных регионах страны.

Поставленная цель определяет следующие основные задачи:

1. Исследование современного состояния проблемы определения периодов повышенной сейсмической опасности.
2. Разработка математической модели определения периодов повышенной сейсмической опасности заданного региона, использующей приливные силы тяжести.
3. Разработка методов и алгоритмов определения периодов повышенной сейсмической опасности на основе анализа изменения приливных сил тяжести в сейсмоактивных регионах страны.
4. Разработка архитектуры и программного комплекса определения периодов повышенной сейсмической опасности.
5. Экспериментальная проверка эффективности предложенного метода.

Научная новизна

1. Построена математическая модель, предназначенная для определения периодов повышенной сейсмической опасности по «шаблонам землетрясений», отражающих динамику развития приливных факторов в день землетрясения, и позволяющая сузить временное окно ожидания землетрясения до одного месяца.
2. С помощью вычислительных экспериментов установлено, что усиление геодинамических процессов происходят в моменты снижения амплитуды суточных вариаций приливных сил тяжести, на основе чего разработан оригинальный метод определения «шаблонов малой динамики», позволяющий формировать периоды повышенной сейсмической опасности в заданном регионе.
3. На примере Курило-Камчатской фокальной зоны доказана статистически значимая связь между землетрясениями и суточными вариациями приливных сил тяжести.
4. Разработан программный комплекс, предназначенный для определения периодов повышенной сейсмической опасности заданного региона с использованием приливных сил тяжести.

Практическая ценность работы заключается в разработке метода, ал-

горитмов и программного комплекса, позволяющих на основе анализа динамики изменения приливных сил тяжести в сейсмоактивных регионах Земли определять периоды повышенной сейсмической активности земной коры, и повышающих эффективность прогноза землетрясений.

На защиту выносятся:

1. Математическая модель определения периодов повышенной сейсмической опасности по «шаблонам землетрясений», отражающим динамику развития приливных факторов в день землетрясения.

2. Метод формирования периодов повышенной опасности землетрясений в заданном регионе с использованием «шаблонов малой динамики» анализа приливных сил тяжести.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на Второй Всероссийской научно-практической конференции по проблемам геоэкологии южного Урала (г.Оренбург, 2005), Всероссийской научно-практической конференции “Современные информационные технологии в науке, образовании и практике” (г.Оренбург, 2005), Второй Международной научно-технической конференции “Информационные технологии в науке, образовании и производстве” (г.Орел, 2006), Международной научно-технической конференции “Современные информационные технологии” (г.Пенза, 2006), Международном симпозиуме «Надежность и качество» (г. Пенза, 2008), Второй Всероссийской научной конференции с международным участием «Научное творчество XXI века» (г. Красноярск, 2010), Объединенном семинаре отделений Института Физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (г. Москва, 2010), на 32-й Генеральной Ассамблеи Европейской Сейсмологической Комиссии (Франция, г.Монпелье, 2010).

Публикации

По теме диссертации опубликована 21 печатная работа, в том числе 3 свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ и 4 статьи, опубликованные в изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией.

Внедрение результатов работы

Результаты работы внедрены в учебном процессе кафедры информационных системы и технологии Оренбургского государственного университета для специальности 230201 – «Информационные системы и технологии», а также в филиале Российского университета нефти и газа имени И.М. Губкина в г.Оренбурге для специальности 130503 – «Разработка и использование нефтяных и газовых месторождений».

Результаты работы отмечены премией Губернатора Оренбургской области для молодых ученых за 2008 год.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 132 страницах машинописного текста, в том числе 20 таблиц и 33 рисунка, списка литературы из 103 наименований и 5 приложений.

В первой главе дается краткий обзор и анализ современного состояния

решения задачи определения периодов повышенной вероятности землетрясений. Выделяются основные подходы, используемые при оценке эффективности алгоритмов определения наиболее опасных интервалов времени возникновения землетрясений, по которым можно судить, насколько предлагаемый прогностический признак будет полезным для практического применения.

Обобщенно задача определения периодов повышенной вероятности землетрясений может быть сформулирована следующим образом.

Рассматривается сейсмический регион в пределах пространственно-временного объема $T \times S$ (где T - время и S - территория) и последовательность землетрясений $\{(t_i, \varphi_i, \lambda_i, Mg_i) | t_i \in T, (\varphi_i, \lambda_i) \in S, Mg_i \geq Mg_s\}$ (где Mg_s - порог полноты регистрации).

Территория сейсмического региона разбивается на области исследования $\{S_\alpha\}$, предполагая, что область S пропорциональна размеру очага сильного землетрясения. В каждый момент времени $t \in T$ каждая область исследования S характеризуется вектор-функцией $P_S(t)$, координаты которой определяются значениями ряда прогностических признаков внутри рассматриваемой области.

Интервал времени $(t, t + \tau)$ для области S классифицируется как период повышенной вероятности землетрясения, если координаты $P_S(t)$ принимают аномальные или критические значения.

Задача определения периодов повышенной сейсмической опасности сводится к определению множества интервалов времени $(t, t + \tau)$ для каждой из исследуемых областей S .

Для оценки эффективности алгоритмов предсказания землетрясений в настоящее время известно несколько общепризнанных методик.

В частности для метода, предложенного А.А. Гусевым (А.А. Гусев, 1974), эффективность алгоритма J_t распознавания периодов повышенной вероятности землетрясений для одной и той же пространственной области и одного и того же энергетического диапазона определяется по формуле

$$J_t = \frac{n}{N \frac{T_{al}}{T}}, \quad (1)$$

где n - количество землетрясений, прогнозируемого диапазона энергий (магнитуд), принадлежащих интервалам времени повышенной сейсмической опасности,

N - общее количество произошедших землетрясений за время мониторинга сейсмической обстановки по рассматриваемому методу,

T_{al} - общее время тревоги, т.е. суммарная длительность всех периодов повышенной сейсмической опасности,

T - общее время мониторинга сейсмической обстановки по рассматриваемому методу.

Интерпретировать полученный результат J_t можно согласно качествен-

ной характеристике информативности этого показателя (А.Д. Завьялов, 2006). Математическая модель и алгоритм будут полезными для практического применения, если выполняется условие $1.5 \leq J_t \leq 2$ и весьма полезными при условии $J_t > 2.7$.

Для метода «диаграмм ошибок», предложенного Г.М. Молчаным (Г.М.Молчан, 1992), строится квадрат со стороной, равной единице, точки которого с координатами (Pr, Tr) , где Pr - процент пропусков цели, Tr - процент тревог соответствуют результатам прогноза по прогностическому признаку. Крайние точки главной диагонали квадрата соответствуют тривиальным стратегиям, другие точки главной диагонали соответствуют стратегии «случайного угадывания». Нетривиальные стратегии представляются точками, лежащими ниже диагонали, следовательно, оценить эффективность прогностического признака можно по формуле

$$\Gamma = 1 - (Pr + Tr), \quad (2)$$

где $Tr = \frac{T_{al}}{T}$ - процент тревог,
 $Pr = \frac{1-n}{N}$ - процент пропусков цели.

Во второй главе рассматриваются вопросы, связанные с поиском прогностического признака и построения математической модели формирования периодов повышенной вероятности землетрясений, основанного на использовании приливных сил тяжести. Выбор данного предвестника землетрясений связан с установлением зависимости числа этих землетрясений от фазы лунного прилива с периодом 18,6 года (С.А. Федотов, 1984).

Пусть $X = (x, \dot{x}, \ddot{x}, \ddot{\ddot{x}}, \ddot{\ddot{\ddot{x}}})'$ - вектор приливных вариаций силы тяжести, включающий кроме самой приливной силы x , первую, вторую и т.д. производные, т.к. быстрое изменение внешних гравитационных сил также может оказывать воздействие на неустойчивое напряжённое состояние локальных объемов земной коры.

Для одного из сейсмоактивных регионов размером $1^\circ \times 1^\circ$ из оперативного каталога Мирового центра данных по физике твердой Земли (<http://zeus.wdcb.ru/wdcb/sep/hp/seismology.ru.html>) рассмотрена последовательность землетрясений

$$(t_i, \varphi_i, \lambda_i, Mg_i), \quad i = \overline{1, N},$$

где N - количество землетрясений,
 t_i - время события (часы),
 (φ_i, λ_i) - географическая широта и долгота (градусы и минуты),
 Mg_i - магнитуда, причем $Mg_i \geq Mg$, где Mg - уровень представительной регистрации.

В географической точке с координатами (φ_i, λ_i) на момент времени t_i

рассчитаем значения приливной силы тяжести, создаваемой Луной и Солнцем в час землетрясения - x_i в мГал. Используя известную модель вертикальной компоненты приливообразующей силы, т.е. редуцированной до первого члена разложения с точностью r^2/R^2 получим

$$x = \frac{fm_l r}{R_l^3} (3 \cos^2 Z_l - 1) + \frac{fm_c r}{R_c^3} (3 \cos^2 Z_c - 1), \quad (3)$$

где f - постоянная тяготения,
 m_l - масса Луны, m_c - масса Солнца,
 r - радиус Земли,
 R_l - расстояние от Земли до Луны, R_c - расстояние от Земли до Солнца,
 Z_l - зенитное расстояние Луны и Z_c - зенитное расстояние Солнца, которые можно получить из соотношения

$$\cos Z = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos H, \quad (4)$$

где φ - широта места наблюдения,
 δ - склонение светила,
 H - часовой угол светила.

Необходимые экваториальные координаты Луны, т.е. часовой угол и склонение можно вычислить на основе формул теории Брауна, используя при этом только те члены, которые обеспечивают точность в координатах $\pm 0,5'$.

Для получения экваториальных координат Солнца достаточно использовать только Кеплеровы элементы на выбранную эпоху.

На моменты землетрясений вычислим компоненты вектора $X = (x, \dot{x}, \ddot{x}, \ddot{\ddot{x}}, \ddot{\ddot{\ddot{x}}})'$. В результате составим матрицу признаков

$$F = \begin{pmatrix} x_1 & \dot{x}_1 & \dots & \ddot{\ddot{x}}_1 \\ x_2 & \dot{x}_2 & \dots & \ddot{\ddot{x}}_2 \\ & & \dots & \\ x_N & \dot{x}_N & \dots & \ddot{\ddot{x}}_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X'_1 \\ X'_2 \\ \dots \\ X'_N \end{pmatrix}, \text{ где } i = \overline{1, N}. \quad (5)$$

После центрирования и нормирования компонент матрицы признаков F

$$\tilde{x}_i^{(j)} = \frac{x_i^{(j)} - \bar{x}_i}{\sigma_i}, \quad (6)$$

где \bar{x}_i , σ_i - соответственно среднее значение i признака и его среднеквадратическое отклонение, получим приведенную матрицу \tilde{F} .

Для исключения взаимного влияния признаков друг на друга воспользуемся методом главных компонент, который в частности уменьшает размерность

пространства приведенных признаков.

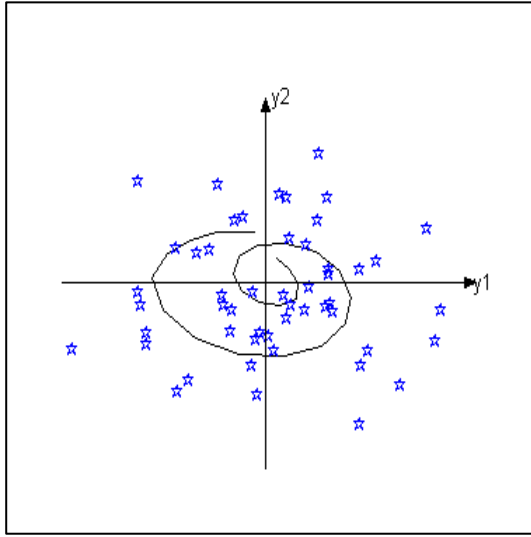
Используя матрицу преобразования U , компонентами которой являются координаты собственных векторов ковариационной матрицы, построенной на основе приведенной матрицы наблюдений \tilde{F} с помощью преобразования $F_y = U\tilde{F}'$ пересчитаем матрицу признаков землетрясений \tilde{F} в координатах первых двух главных компонент.

В новом базисе основной вклад в вариабельность преобразованных факторов землетрясений, являющихся линейной комбинацией исходных признаков, оказывают первые два фактора. Например, для исследованных секторов Южной части Курильских островов они составляют примерно 90% от общей дисперсии, что позволяет уменьшить размерность пространства приведенных признаков. А это, в свою очередь, позволяет визуализировать набор точек данных с помощью ортогонального проецирования на плоскость первых двух главных компонент.

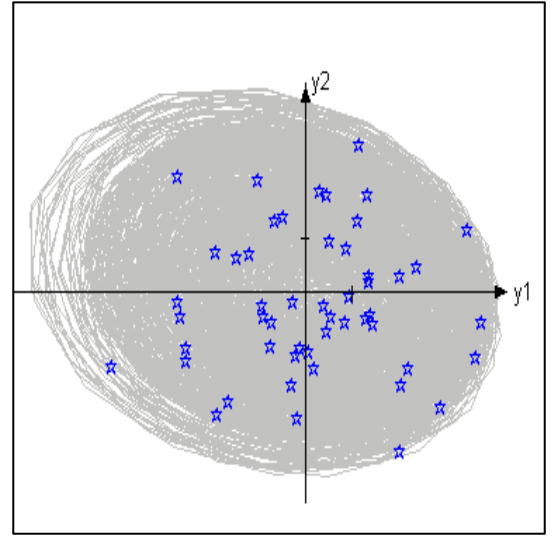
Используя этот подход была проведена проверка гипотезы о том, что прогностическим признаком может являться определенное сочетание значений приливных факторов в момент землетрясения. Для этого было рассмотрено развитие приливных сил в метрике главных компонент за первые сутки 2004 года (рис.1 (а)) и за весь год (рис.1 (б)), а также набор точек данных для 51 землетрясения с магнитудами выше пяти (без афтершоков и группируемости), произошедшие в тестируемом секторе в течение двадцати лет, начиная с 1983 г. (отмечены на рис.1 маркером). Из рисунка видно, что в принципе приливные силы, оцениваемые на моменты землетрясений, образуют неразрывный и компактный кластер, однако являются недостаточно информативными для определения периодов повышенной сейсмической опасности, т.к. другие временные срезы, не приводящие к возникновению землетрясений, попадают в этот же кластер.

В связи с этим выдвинем гипотезу о том, что прогностическим признаком повышения сейсмической активности являются процессы изменения приливных сил тяжести и их компонент за определенный период времени, которые подготавливают условия для реализации катастрофических изменений структуры земной коры в сейсмоопасной зоне.

Теперь будем запоминать не сочетания значений приливных факторов, которые были отмечены в час землетрясений, а фрагменты векторной функции $Y_i(t) = (\tilde{y}_1^{(i)}(t), \tilde{y}_2^{(i)}(t))' \quad \forall t, t \in \Omega_{t_i}$, описывающие процесс изменения приливных факторов в окрестностях времени землетрясения, т.е. для периода $\Omega_{t_i} = [t_i - 12; t_i + 11]$, где t_i - час i -го землетрясения от начала года из каталога землетрясений для рассматриваемого сектора, $i = \overline{1, N}$, N - количество землетрясений в каталоге. При этом в качестве приливных факторов рассматриваются первые две главные компоненты.



(а) приливный процесс за сутки



(б) приливный процесс за год

Рис. 1 – Кластер землетрясений и развитие приливного процесса в координатах главных компонент y_1 и y_2

В качестве «образца землетрясения» рассмотрим дискретный аналог векторной функции $Y_i(t)$, т.е.

$$\tilde{Y}_i = \begin{Bmatrix} \tilde{y}_{1,1}^{(i)} & \tilde{y}_{1,2}^{(i)} & \dots & \tilde{y}_{1,24}^{(i)} \\ \tilde{y}_{2,1}^{(i)} & \tilde{y}_{2,2}^{(i)} & \dots & \tilde{y}_{2,24}^{(i)} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \tilde{Y}_1^{(i)} \\ \tilde{Y}_2^{(i)} \end{Bmatrix}, \quad (7)$$

где $\tilde{y}_{k,j}^{(i)} = \tilde{y}_k^{(i)}(t_j)$, $t_j = t_i + (j-13)$, $j = \overline{1,24}$.

Смысловое назначение введенного понятия заключается в том, что при совпадении «характера» поведения изменения приливных сил тяжести с одним из «образцов» реального землетрясения можно ожидать аналогичного развития сейсмоактивности. Пример «образца землетрясения» представлен на рис.2.

Совокупность «образцов» для каталога землетрясений заданной географической области образует базу данных «образцов землетрясений».

В качестве меры близости между «поведением» изменений главных факторов приливных сил тяжести и «образцами землетрясений» использовалась евклидова метрика близости дискретных функций

$$\rho(Y, \tilde{Y}_i) = \sqrt{(Y_1 - \tilde{Y}_1^{(i)})'(Y_1 - \tilde{Y}_1^{(i)}) + (Y_2 - \tilde{Y}_2^{(i)})'(Y_2 - \tilde{Y}_2^{(i)})}, \quad (8)$$

где Y - наблюдаемый 24 часовой фрагмент поведения приливных сил тяжести в координатах главных компонент.

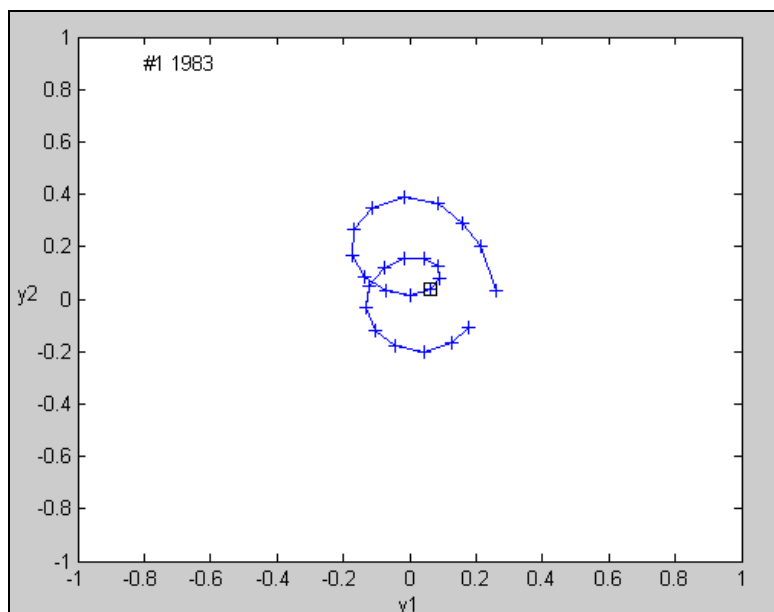


Рис. 2 – Пример «образца землетрясения»

Тогда днем повышенной сейсмической опасности (ПСО) будет являться день от начала года d_{nco} , в который развитие приливного процесса происходит по сценарию, схожему с образцом из базы данных «образцов землетрясений», т.е. когда выполняется условие $\rho(Y, \tilde{Y}_i) \leq \varepsilon_{зад}$.

Если T_{max} – объявляемое время тревоги, тогда периодом повышенной сейсмической опасности будет интервал $\left[d_{nco} - \frac{T_{max}}{2}; d_{nco} + \frac{T_{max}}{2} \right]$.

Анализ «образцов землетрясений» для секторов Курильской гряды показал, что образцы, участвующие в прогнозе землетрясений более чем два раза, обладают ограниченной («минимальной») вариацией главных компонент приливной силы тяжести. По сути дела повышенная сейсмическая активность наблюдается в моменты наименьшего изменения главных компонент приливных сил тяжести. Назовем «шаблонами малой динамики» участки изменения главных компонент приливных сил тяжести, принадлежащих «минимальному окну» их вариации, т.е.

$$\begin{cases} y_{\min 1} \leq y_1^{(i)} \leq y_{\max 1}, \\ y_{\min 2} \leq y_2^{(i)} \leq y_{\max 2}, \end{cases} \quad i = \overline{1, 24}. \quad (9)$$

Оказалось, что между реальными землетрясениями и «шаблонами малой динамики» приливных сил существует заметная статистическая связь, на основе которой несложно построить алгоритм определения зон повышенной сейсмической опасности, без использования базы данных «образцов землетрясений». Для этого достаточно для любого региона Земли рассчитать «шаблоны малой динамики» приливных сил тяжести.

Близость статистической связи между наблюдаемыми землетрясениями

и рассчитанными «шаблонами малой динамики» исследовалась методами интервального корреляционного анализа. Пусть $\tilde{x}(t_s)$ - бинарный процесс прогнозируемых моментов землетрясений, в котором нулями обозначается отсутствие землетрясения, 1 – прогноз землетрясения на момент времени t_s , а $\tilde{y}(t_i)$ - аналогичный процесс для реальных землетрясений ($\tilde{x}(t_s), \tilde{y}(t_i) \in \{0, 1\}$). Тогда оценка интервальной корреляционной функции, характеризующая распределение отсчетов в потоке, находящихся на временном интервале $J \cdot \Delta$ может быть рассчитана по формуле

$$C_{\tilde{x}\tilde{y}}(J) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{s=1}^L \delta_{i,s}, \quad (10)$$

где Δ - ширина временного интервала ($\Delta \approx 7$ дней), $\delta_{i,s}$ индикатор состояния, который однозначно определяет отсчет $\tilde{x}(t_s)$, отстоящий от отсчета $\tilde{y}(t_i)$ на временном интервале $J \cdot \Delta$ (С.А. Прохоров, 2007):

$$\delta_{i,s} = \begin{cases} 1, & \text{если } \text{ceil}\left[\frac{t_s^{(\tilde{y})} - t_i^{(\tilde{x})}}{\Delta} + 0.5\right] = J. \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (11)$$

Усреднение на серии экспериментов, используя статистику разных лет, можно реализовать по формуле

$$C_{\tilde{x}\tilde{y}}(J) = \frac{1}{\sum_{k=1}^n N_k} \sum_{k=1}^n \left(\sum_{i_k=1}^{N_k} \sum_{s_k=1}^{L_k} \delta_{i_k, s_k}^{(k)} \right). \quad (12)$$

Усредненная оценка интервальной корреляционной функции за период с 1983 по 2003 годы для нескольких секторов южной части Курильской гряды показана на рис.3.

Анализ статистической обработки временных рядов на тестовой выборке для 1983-2003 годов указывает на существенную временную корреляционную связь между землетрясениями и днями повышенной сейсмической опасности, полученными по методу выявления шаблонов малой динамики. Это позволяет утверждать, что приливные силы для исследуемого региона оказывают существенное влияние на формирование кризисных ситуаций.

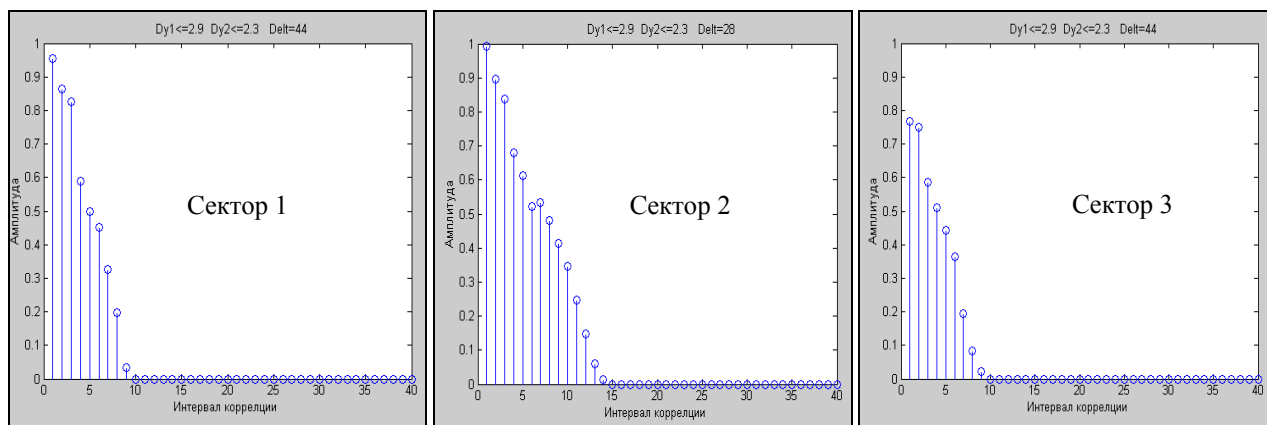


Рис. 3 – Оценка корреляционной функции для тестовой выборки

В третьей главе изложены результаты проектирования и разработки программного комплекса PMD 1.0 по определению периодов повышенной сейсмической опасности, необходимую основу для разработки которого создают как данные оперативной обработки сейсмических наблюдений, так и данные банка сейсмологических данных на web-сервере Геофизической службы РАН в г. Обнинске. Программный комплекс PMD 1.0 разработан средствами пакета MatLab7, его структуру составляют следующие элементы (рис.4).

Подсистема расчета вектора приливных сил тяжести на каждый час прогнозируемого года, которая для повышения быстродействия программного комплекса реализована в виде внешней процедуры на языке C++, на основе которой разработан MEX-файл путем создания интерфейсной процедуры с использованием функций MatLab API и последующей генерацией MEX-файла с помощью встроенного в пакет MatLab компилятора Lcc для приложений на C++. В среде Windows MEX -файл является динамически подключаемой библиотекой и имеет расширение dll.

Подсистема определения «шаблонов малой динамики» реализует предлагаемый алгоритм определения периодов повышенной сейсмической опасности, который схематически изображен на рис.5.

Основными шагами данного алгоритма являются:

- 1) На каждый час прогнозируемого года рассчитать вектор приливных сил и составить матрицу признаков F по формуле (5).
- 2) Вычислить матрицу \tilde{F} путем центрирования и нормирования матрицы F по формуле (6).
- 3) Рассчитать для матрицы \tilde{F} ковариационную матрицу S .
- 4) Для матрицы S вычислить матрицу факторных нагрузок и выделить первые две главные компоненты.
- 5) Получить новую матрицу признаков Y , пересчитав матрицу \tilde{F} в главных компонентах.
- 6) На каждые 24 часа рассматриваемого года определить вариации главных компонент приливных сил, геометрически представляющие собой диаметры шаблонов.
- 7) Проверить условие принадлежности шаблона окну с задаваемыми параметрами $\varepsilon_1, \varepsilon_2$. Если оно истинно, то рассматриваемый участок является «шаблоном»

малой динамики» и соответственно день от начала рассматриваемого года, для которого был определен этот «шаблон» является днем повышенной сейсмической опасности.

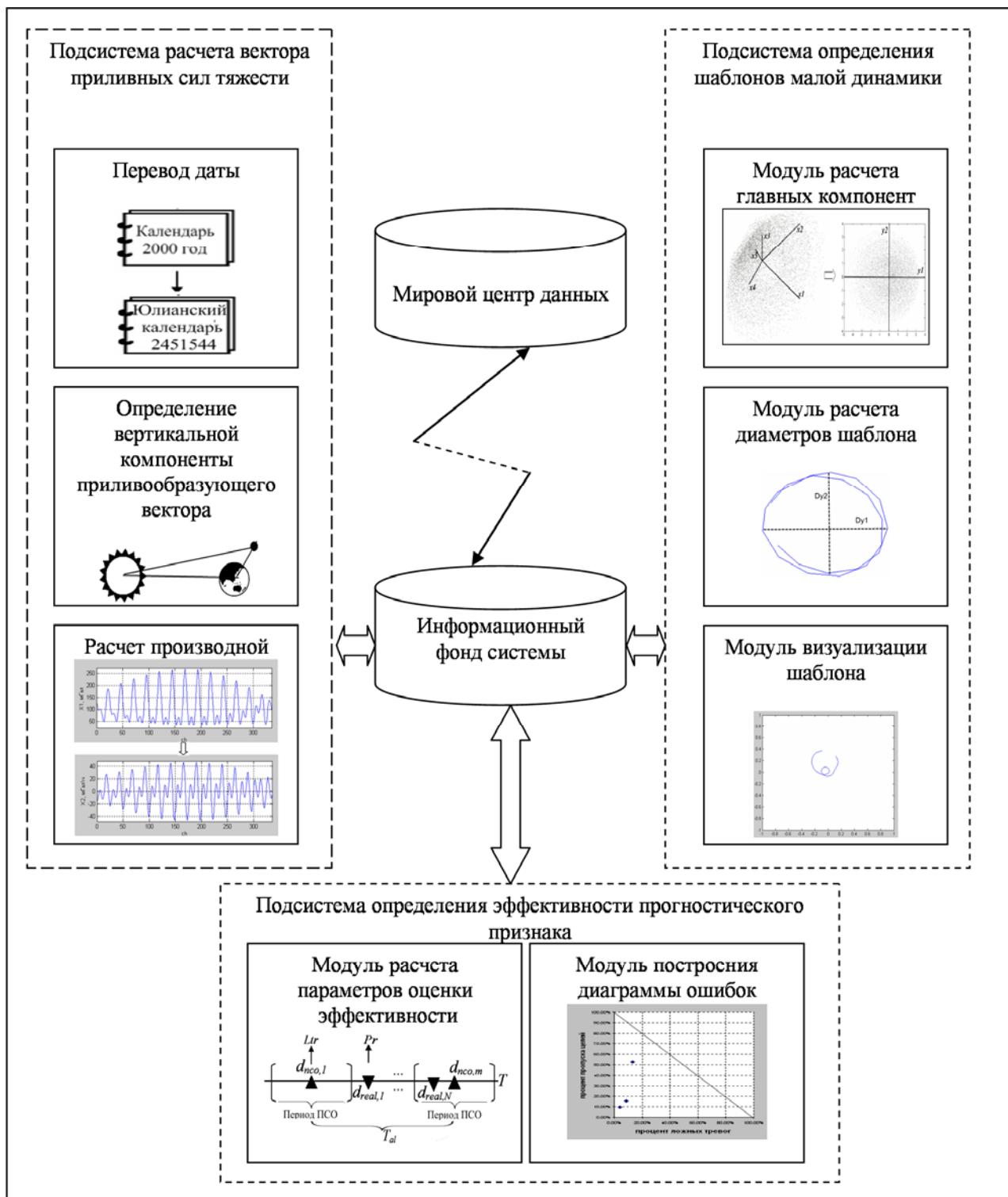


Рис.4 - Структура программного комплекса PMD 1.0

Подсистема определения эффективности прогностического признака реализует алгоритмы расчета параметров Tr , Pr , n , N , T_{al} и T , характеризующих

результаты ретроспективного прогноза на основе данных о землетрясениях, полученных из сейсмологического банка данных и позволяет осуществить оценку эффективности полученных результатов J_i и Γ по формулам (1) и (2) соответственно.

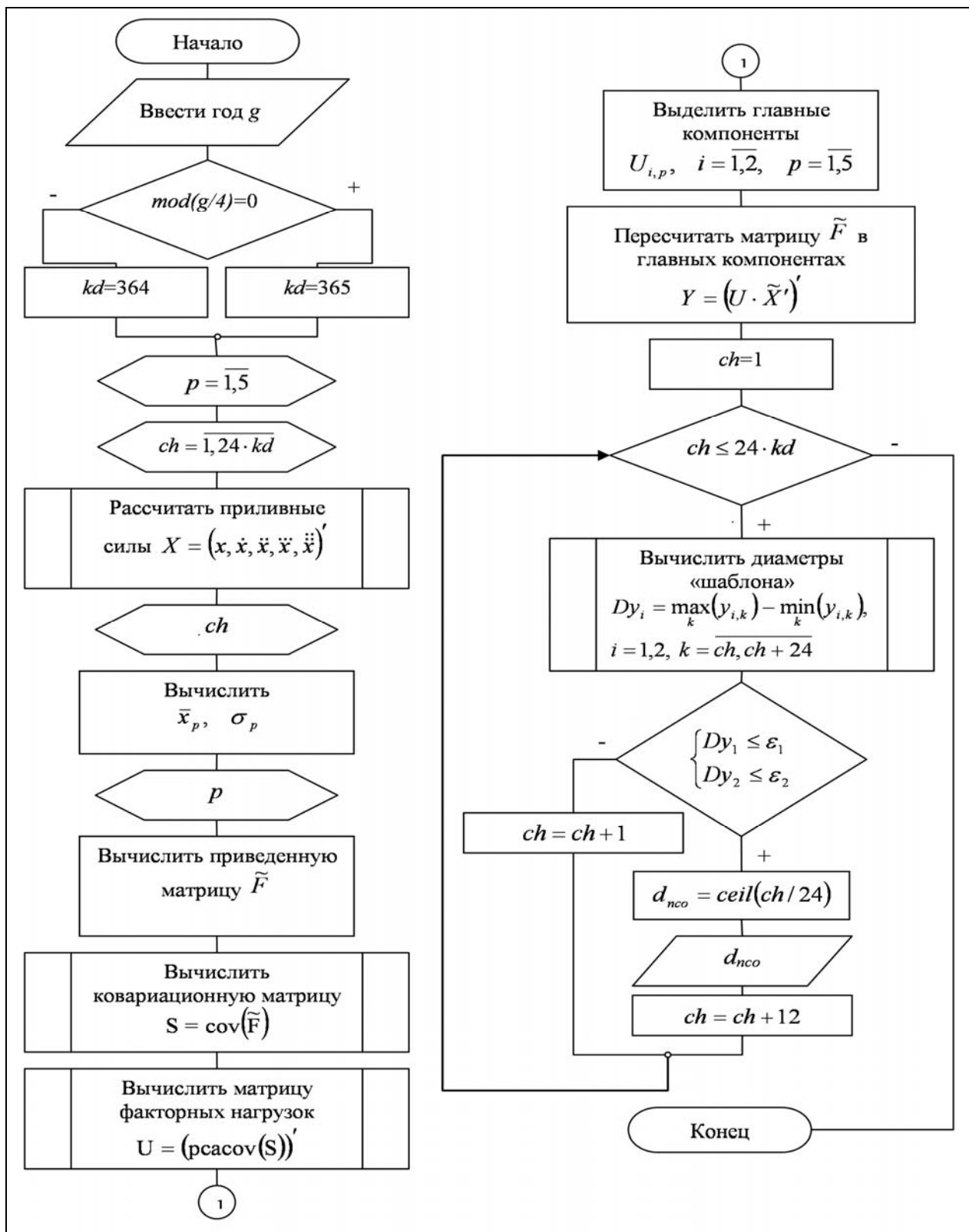


Рис.5 – Схема алгоритма определения периодов повышенной сейсмической опасности по шаблонам малой динамики

В четвертой главе рассмотрены результаты вычислительного эксперимента на базе разработанного программного комплекса PMD 1.0 для определения периодов повышенной сейсмической опасности.

Для этого выделены секторы с наибольшим количеством землетрясений за период с 1983 по 2008 гг. для южной части Курильских островов, которые обозначены арабскими цифрами на рис.6.

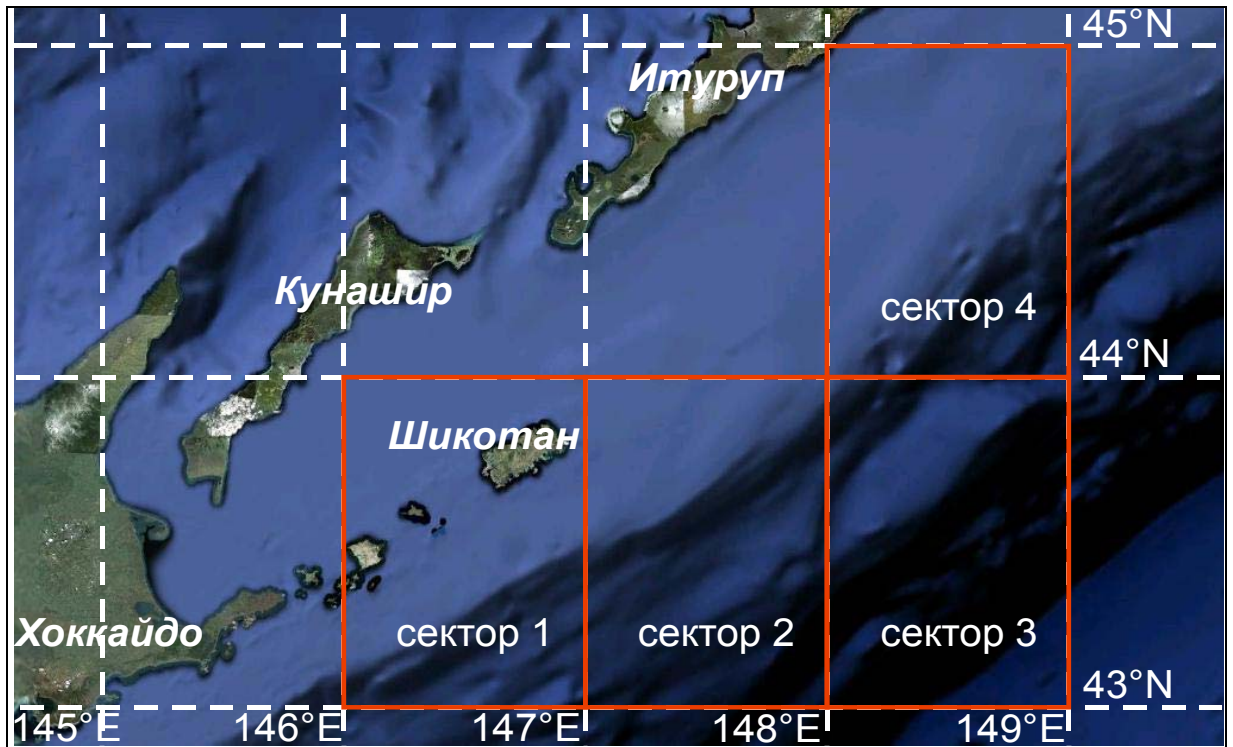


Рис.6 – Фрагмент карты южной части Курильской гряды

Анализ графиков изменения диаметров 24-часовых фрагментов поведения приливных сил тяжести в координатах главных компонент на каждый год, один из которых представлен на рис.7, где по оси абсцисс - номер часа от начала года, по оси ординат - суточные вариации главных факторов приливных сил тяжести Dy_1 и Dy_2 показал, что размеры окна для «шаблонов малой динамики» должны быть

$$\begin{cases} 2 \leq Dy_1 \leq 3, \\ 2 \leq Dy_2 \leq 3. \end{cases} \quad (13)$$

Для каждого рассматриваемого сектора на каждый год при вариациях параметров $Dy_1 = Dy_2 \in [2,3]$ по предложенному выше алгоритму рассчитаны дни повышенной сейсмической опасности d_{nco} , для которых в свою очередь определены периоды повышенной сейсмической опасности $\left[d_{nco} - \frac{T_{max}}{2}; d_{nco} + \frac{T_{max}}{2} \right]$ при объявляемом времени тревоги $T_{max} = \overline{2,30}$.

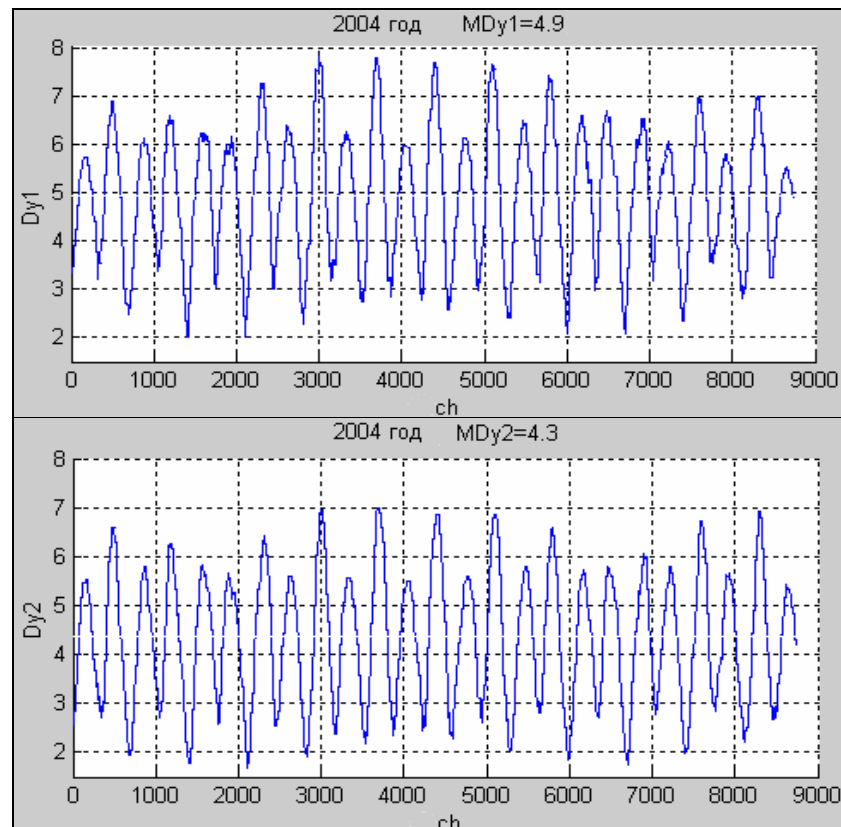


Рис.7 – Изменение диаметров участков набора главных факторов

Для ретроспективных данных о землетрясениях рассматриваемого региона на каждый год была рассчитана эффективность прогностического признака «шаблонов малой динамики».

Результаты для значений параметров, при которых сумма процентов пропусков цели и общего времени тревог минимальна, оцененные по методу построения «диаграммы ошибок», представлены на рис.8, откуда видно, что предложенный алгоритм является нетривиальной стратегией, так как полученные значения лежат ниже диагонали.

Результаты оценки показателя эффективности J_i для распознавания периодов повышенной вероятности землетрясений для одной и той же пространственной области и одного и того же энергетического диапазона в виде средних значений за 26 лет $\overline{J_i}$ сведены в таблицу 1. Из таблицы видно, что в среднем для 4 рассматриваемых секторов время повышенной сейсмической опасности определено верно:

- для 66% землетрясений с магнитудой большей уровня представительной регистрации;
- для 67% землетрясений с магнитудой больше 5;
- и для 77% сильных землетрясений с магнитудой больше 5.5.

Из приведенных данных следует, что использование предлагаемого алгоритма в Южной части Курильских островов будет полезным для практического применения, т.к. $\overline{J_i} > 2.7$.

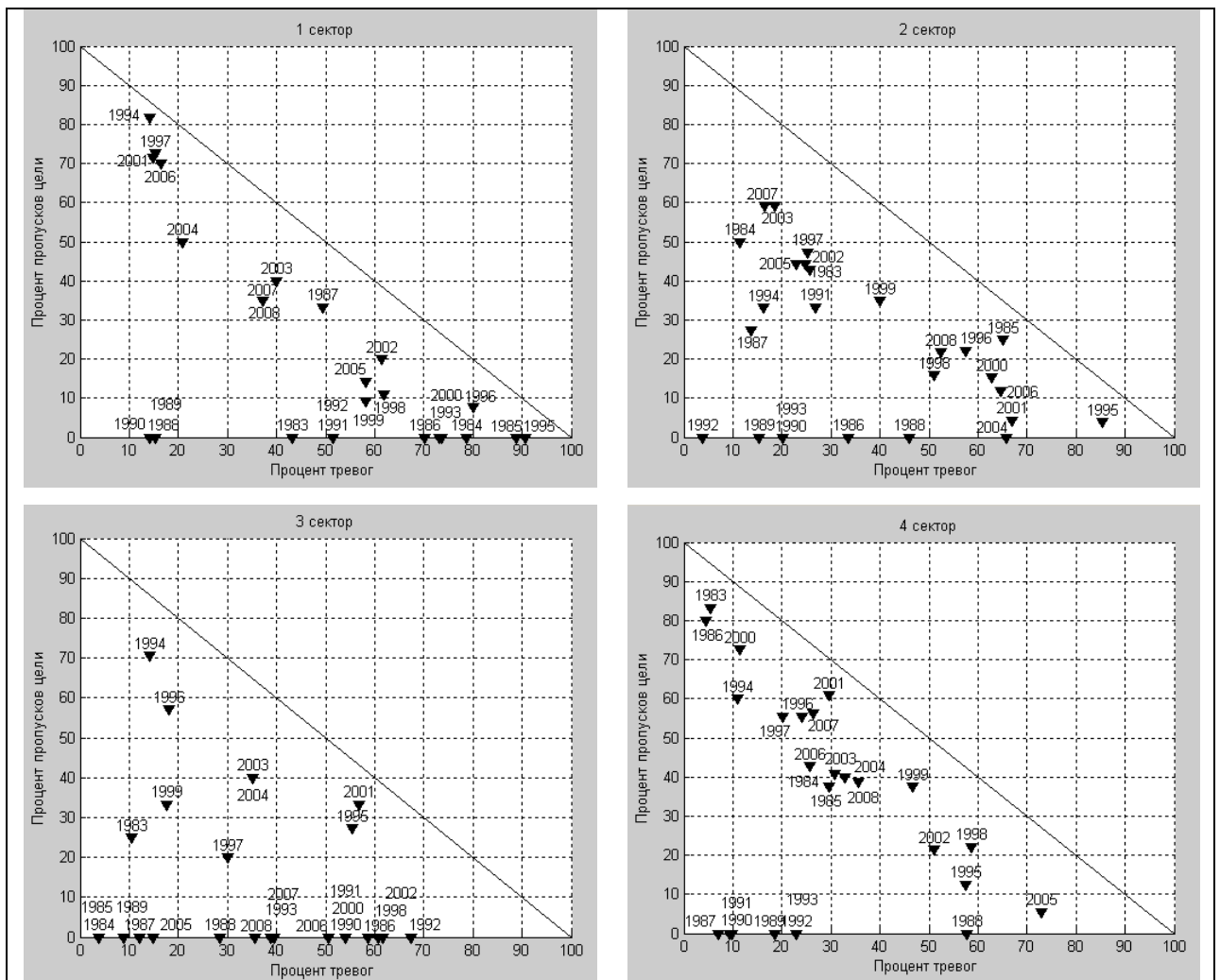


Рис.8 – Диаграмма ошибок

Таблица 1 – Оценка результатов алгоритма шаблонов малой динамики

№ сектора	Среднее значение показателя эффективности \overline{J}_t за 26 лет	Количество землетрясений, определенных по методу шаблонов малой динамики из произошедших с магнитудой					
		$Mg \geq Mg_s, Mg_s$ - порог регистрации		$Mg \geq 5$		$Mg \geq 5.5$	
1	3.11	137	196	59	76	27	31
2	3.36	198	300	115	193	51	73
3	4.27	69	96	30	43	10	13
4	3.49	138	236	51	70	24	28
Всего		542	828	255	382	112	145

В работе по данным о сильных землетрясениях мира, произошедших в первом квартале 2010 года, для секторов с центром координат в эпицентрах этих событий построена визуализация размещения «шаблонов малой динамики» главных компонент приливных сил в зависимости от Dy_1 (Dy_2), представленная в таблице 2. На рисунках по оси абсцисс - номер дня от начала года, а по оси ординат - вариации параметров окна Dy_1 (Dy_2). Вертикальными линиями обозначены дни повышенной сейсмической опасности.

Таблица 2 - Размещение шаблонов малой динамики для других регионов

Сведения о землетрясении	Визуализация размещения шаблонов малой динамики на 2010 год
<p>Гаити, 12 января 2010, 18,45° с.ш. 72,53° з.д. M=7</p>	
<p>Чили, 27 февраля (58) 2010 35,9° ю.ш. 72,73° з.д. M=8,8</p>	
<p>Тайвань, 4 марта (63) 2010, 22,9° с.ш. 120,6° в.д. M=6,7</p>	
<p>Турция, 8 марта (67) 2010 38,84° с.ш. 40,00° в.д. M=6</p>	

Получены обнадеживающие результаты, а именно времена землетрясений на Гаити, в Чили, Тайване и Турции принадлежат интервалам времени тревог, рассчитанным по методу «шаблонов малой динамики» приливных сил.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Рассмотрено современное состояние исследований по проблеме определения периодов повышенной сейсмической опасности, в результате которого выявлено, что на данном этапе развития науки невозможно предложить детальные математические модели, обладающие предсказательной силой. Однако для сейсмически активных регионов при условии, что тектонические напряжения находятся в конечной стадии подготовки землетрясения при определении периодов повышенной сейсмической опасности целесообразно использовать приливные силы тяжести.

2. Предложена динамическая модель определения периодов повышенной сейсмической опасности, основанная на формировании базы данных «образцов землетрясений», описывающих процесс изменения приливных факторов в окрестностях времени землетрясения.

3. Проведена оценка рейтинга «образцов землетрясений» по критерию количества срабатывания их при определении периодов повышенной сейсмической опасности с 1983 по 2008 годы, которая показала, что фазовые портреты «образцов землетрясений» с наибольшим рейтингом имеют небольшую амплитуду размаха в координатах главных компонент.

4. Предложен метод определения «шаблонов малой динамики», который позволяет избавиться от необходимости ведения базы данных «образцов землетрясений» выбранных для многих лет в исследуемом секторе, что снимает проблему отбора образцов.

5. Спроектирована архитектура и разработан программный комплекс PMD1.0 средствами пакета MatLab для определения периодов повышенной сейсмической опасности, реализующего общеизвестные, а также разработанные автором алгоритмы, который может быть рассмотрен как подсистема для системы прогноза землетрясений по комплексу краткосрочных прогностических признаков.

6. На примере южной части Курильских островов проведено экспериментальное исследование подтверждающее эффективность разработанного метода «шаблонов малой динамики» для определения периодов повышенной сейсмической опасности при размерах окна для 24-часовых фрагментов поведения приливных сил тяжести в координатах главных компонент $\in [2,3]$ при объявляемом времени тревог $T_{\max} = \overline{2,30}$ дней.

Список работ опубликованных по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК

1. Чепасов В.И., Рычко О.К., Никонорова О.А. Обусловленность темпе-

ратуры воздуха приливными изменениями силы тяжести // Вестник Оренбургского государственного университета. - 2005. - №6. - С. 109 - 112.

2. Никонорова О.А., Чепасов В.И. Прогноз землетрясений по приливным изменениям силы тяжести // Вестник Оренбургского государственного университета. - 2006. - №10(2). - С. 370 - 373.

3. Никонорова О.А. Оценка эффективности алгоритма прогноза землетрясений по приливным вариациям силы тяжести // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. - №1(9). – С.40-47.

4. O.Nikonorova, A.Kovartsev Dynamic model of determining periods of the highest seismic danger // ESC2010: European Seismological Commission 32nd General Assembly Abstract book. – Montpellier, France, September 6-10, 2010. – P.220.

Авторские свидетельства и патенты

5. Никонорова О.А., Чепасов В.И. Программный комплекс для прогноза геофизических параметров по приливным вариациям силы тяжести. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Зарегистрировано в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам №2007614269, 08.10.2007.

6. Чепасов В.И., Никонорова О.А., Осипов О.В. Программа для построения оптимальных моделей прогноза. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Зарегистрировано в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам №2008613126, 20.05.2008.

7. Коварцев А.Н., Никонорова О.А. Программная реализация алгоритма определения периодов повышенной сейсмической опасности по паттернам малой динамики. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Зарегистрировано в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам №2010613763, 09.06.2010.

Публикации в других изданиях

8. Никонорова О.А. Прогнозирование геофизических параметров по приливным изменениям силы тяжести // Перспектива. Сборник статей молодых ученых № 5. - Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005. - С. 215 - 218.

9. Никонорова О.А. Обусловленность некоторых климатических элементов приливными изменениями силы тяжести // Проблемы геоэкологии южного Урала: Материалы второй Всероссийской научно-практической конференции. Часть II. - Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2005. - С. 31 - 35.

10. Никонорова О.А. Информационные технологии как средство решения задачи прогнозирования свойств системы // Современные информационные технологии в науке, образовании и практике: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. - Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005. - С. 231 - 233.

11. Чепасов В.И., Никонорова О.А. Обусловленность и прогноз геофизических параметров приливными изменениями силы тяжести // Современные информационные технологии в науке, образовании и практике: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. - Оренбург: ГОУ ОГУ,

2005. - С. 21 - 26.

12. Никонорова О.А. Этапы развития проблемы прогнозирования землетрясений // Рукопись деп. в ВИНТИ 30.11.05. №1569 – В2005. – 4 с.

13. Никонорова О.А. Определение парных обусловленностей между параметрами землетрясений и приливными изменениями силы тяжести. // Рукопись деп. в ВИНТИ 30.11.05. №1568 – В2005. – 5 с.

14. Никонорова О.А. Определение групповых обусловленностей между параметрами землетрясений и приливными изменениями силы тяжести // Рукопись деп. в ВИНТИ 30.11.05. №1567 – В2005. – 5 с.

15. Никонорова О.А. Количественная обусловленность и прогноз землетрясений по приливным изменениям силы тяжести // Рукопись деп. в ВИНТИ 30.11.05. №1570 – В2005. – 6 с.

16. Никонорова О.А. Определение периодической закономерности землетрясений по приливным изменениям силы тяжести // Рукопись деп. в ВИНТИ 30.11.05. №1566 – В2005. – 5 с.

17. Никонорова О.А. Построение гармонических моделей прогноза параметров землетрясений по алгоритму определения периодов с наилучшей аппроксимацией исследуемого процесса // Современные информационные технологии - 2006: Материалы Международной научно-технической конференции. – Пенза: ПГТА, 2006. - С. 79 – 83.

18. Никонорова О.А. Построение моделей прогноза параметров землетрясений ступенчатым регрессионным методом // Известия ОрелГТУ. Серия «Информационные системы и технологии». - 2006. - №1(2). – С.118 – 121.

19. Никонорова О.А. Проектирование программного комплекса для краткосрочного прогноза землетрясений по приливным изменениям силы тяжести // Надежность и качество: труды Международного симпозиума: в 2-х т. / под. ред. Н.К. Юркова. – Пенза: Информационно-издательский центр ПензГУ, 2008. – 1 т. – 557 с. – С. 283 -285.

20. Чепасов В.И., Никонорова О.А., Курякова Т.А., Тетерин А.П. Прогноз землетрясений по периодам гармоник с максимальной амплитудой местного времени землетрясений, дней землетрясений, приливных изменений силы тяжести // Вестник Оренбургского государственного университета. - 2009. -№4. - С. 160 - 164.

21. Коварцев А.Н., Никонорова О.А. Динамическая модель определения периодов повышенной сейсмической опасности // Научное творчество XXI века - 2010: Материалы II Всероссийской научной конференции. – Красноярск: ПГТА, 2010. - С. 79 – 83.

Подписано в печать 20.09.2010.
Тираж 100 экз.
Отпечатано с готового оригинал – макета в СГАУ
443086 г.Самара, Московское шоссе, 34