# ======= ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ========

# Подход к автоматическому прогнозу землетрясений<sup>1</sup>

# В.Г. Гитис, А.Б. Дерендяев

Институт проблем передачи информации, Российская академия наук, Москва, Россия Поступила в редколлегию 18.05.2016

Аннотация — Рассматривается новый подход к автоматическому прогнозу землетрясений. Сейсмотектонические процессы отображаются с помощью пространственно-временных полей. Параметрами прогноза по нескольким полям являются линейная прогнозирующая функция, значение порога принятия решения об объявлении тревоги, а также размеры пространственно-временной области тревоги. Рассмотренный подход не привязан к определенному типу данных. Результаты моделирования показывают, что автоматический прогноз по доступным в сети Интернет каталогам землетрясений осуществим и достаточно эффективен.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** прогноз землетрясений, пространственно-временные поля, каталоги землетрясений, прогнозирующая функция, ГИС GeoTime 3.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Тектоническое землетрясение происходит в результате разрыва сплошности геологической среды и подвижки по разлому. Данные физического моделирования процесса разрушения и реальные наблюдения показывают, что землетрясению предшествуют процессы, которые формируют в области очага ожидаемого землетрясения аномальные изменения [1]. Эти аномалии называются предвестниками землетрясений.

При прогнозе требуется указать место, время и энергию землетрясения. Обычно указывается пространственная область, которая содержит эпицентр ожидаемого землетрясения, временной интервал события и нижний порог его магнитуды. Сложность задачи обусловлена многими факторами: недостаточной изученностью сейсмического процесса, ограниченностью сетей мониторинга, невозможностью измерений свойств геологических процессов, которые напрямую определяют изменение энергетических и структурных свойств земной коры, а также относительно малым количеством прогнозируемых событий.

Для оценки и прогноза сейсмической опасности используются системы сейсмического, геофизического, геодезического и геохимического мониторинга. Изучение предвестников землетрясений по данным мониторинга часто ограничивается анализом временных рядов, относящихся к заранее выбранной области. Значениями таких рядов являются, например, параметры закона Гутенберга-Рихтера или измерения станций геомониторинга [2,3]. В этом анализе отсутствует пространственная компонента данных. В технологии ГеоТайм [4] предвестники землетрясений ищутся в 3D пространственно-временных полях (две координаты – широта, долгота; третья координата – время). Это позволяет обнаруживать аномалии, которые синхронизированы во времени и в пространстве.

Наиболее развитая сеть мониторинга землетрясений представлена сетями сейсмических станций. Результаты наблюдений обрабатываются в мировых и региональных центрах данных и затем с небольшой задержкой координаты, время и энергии землетрясений добавляются в каталоги землетрясений и публикуются в свободном доступе в сети Интернет.

Каталоги землетрясений несут информацию о ряде энергетических и структурных свойств геологической среды. Во многих работах показано, что значимые изменения этих параметров в пространстве и во времени свидетельствуют о подготовке сильных землетрясений [5]. Другие

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-50-00150).

типы данных, такие, как временные ряды станций геомониторинга, ионосферные измерения, данные космической геодезии, низкочастотный сейсмический шум, менее доступны и часто известны только для небольшого числа регионов.

В нашей работе мы рассматриваем подход, который позволит регулярно оценивать вероятность сильного землетрясения в автоматическом режиме. Раздел 2 посвящен методу оценивания прогнозирующей функции. В разделе 3 рассматривается технология автоматического прогноза и приводятся результаты моделирования по данным, загруженным с нескольких сайтов сейсмического мониторинга.

# 2. МЕТОД ПРОГНОЗА

#### 2.1. Прогнозирование по одному полю

Будем исходить из предположения о том, что при подготовке сильного землетрясения пространственно-временные *аномалии* свойств геологической среды возникают в окрестности будущего события. Аномалии отображаются в геофизических полях, которые определяют различные свойства сейсмического процесса. Аномалиями являются такие значения полей, вероятность которых достаточно мала. Аномальные значения полей могут предшествовать сильным землетрясениям. Эти значения называют предвестниками землетрясений. Будем считать, что вероятностные распределения анализируемых полей таковы, что аномалиями, а следовательно и предвестниками, могут быть только близкие к наибольшим или к наименьшим значения полей. В этом случае прогноз по одному полю осуществляется с помощью порогового решающего правила.

Будем рассматривать только ситуации, когда решающее правило объявляет *сигнал тревоги* на время *T*, если значение поля  $f_n$  в *n*-м узле координатной сетки  $(x_n, y_n, t_n)$  превышает порог  $\theta$ . Это не ограничивают общности изложения, так как условия объявления тревоги при  $f_n > \theta$  и при  $f_n < \theta$  эквивалентны. При объявлении тревоги в узле сетки поля  $(x_n, y_n, t_n)$  конструируется *цилиндр тревоги* с центром основания в этой точке, с радиусом основания *R* и образующей  $[(x_n, y_n, t_n), (x_n, y_n, t+T)]$ . Прогноз является успешным, если эпицентр землетрясения попадает в область, состоящую из объединения цилиндров тревоги. Отсюда следует, что прогноз землетрясения с координатами эпицентра  $(x^*, y^*, t^*+\delta t)$ , где  $\delta t$  – не превышает шага сетки по временной оси, будет успешным, если в цилиндре, центр основания которого находится в точке  $(x^*, y^*, t^*)$ , радиус *R* и образующая  $[(x^*, y^*, t^*-T), (x^*, y^*, t^*)]$ , имеется хотя бы один узел сетки со значением  $f_n > \theta$ . Этот цилиндр будем называть *цилиндром предвестника*.

Для оценивания точности прогноза используется выборка сильных землетрясений. Качество прогноза определяется долей правильно предсказанных событий  $u(\theta)=N_1/N$  (уровнем прогноза) и отношением числа точек сетки, попадающих в области тревоги g, к числу всех точек сетки G выбранной для анализа пространственно-временной области  $v(\theta)=g/G$  (объемом тревоги). Уровень прогноза  $u(\theta)$  при достаточно большом числе предсказываемых независимых событий является оценкой вероятности правильного прогноза при условии порога  $\theta$ . Объем тревоги  $v(\theta)$  показывает степень неопределенности прогноза места и времени событий и является оценкой вероятности тревоги  $\theta$ .

Для оценки прогнозирующей силы поля удобно использовать функцию u(v), которая напоминает общепринятую Рабочую характеристику приемника (РХП) [6]. Отличие состоит в том, что в РХП v обозначало бы либо долю ложных тревог, после которых землетрясений не наблюдались. В нашем случае использование ложной тревоги может привести к получению тривиальных результатов. Действительно, с формальной точки зрения размер цилиндрической области тревоги можно установить любым. Например, если размер области тревоги будет совпадать со всей областью прогнозирования, то уровень прогноза будет составлять 100%, число ложных тревог как и объем ложной тревоги будут равны 0%, но объем тревоги будет равен 100%, что указывает на неопределенность прогноза. Легко видеть, что функция u=v показывает зависимость уровня прогноза от объема тревоги для случайного поля.

Параметрами прогноза по одному полю являются размеры R и T цилиндра прогноза и значение порога  $\theta$ , которое назначается по функции u(v), вычисляемой по учебной выборке. Уровень прогноза  $u(\theta)$  и объем тревоги  $v(\theta)$  определяются по тестовой выборке.

#### 2.2. Прогнозирование по нескольким полям

Рассмотрим алгоритм прогноза по нескольким полям. Пусть эти поля приведены к единой координатной сетке, учебная выборка состоит из эпицентров сильных землетрясений с номерами q=1,...,Q и полей  $\mathbf{F}_i$ , i=1,...,I, которые представляют I свойств сейсмического процесса. Для прогноза используется поле, вычисленное по I исходным полям  $\Psi = \psi(\mathbf{F}_1,...,\mathbf{F}_I, \mathbf{a})$ , где  $\psi$  – правило прогноза,  $\mathbf{a}$  – вектор параметров.

Критерием нахождения решающего правила является максимальная вероятность правильного прогноза при заданном объеме тревоги. Детерминистский алгоритм решения этой задачи состоит в следующем. Рассмотрим цилиндр предвестника землетрясения с номером q. Объявление тревоги в любом узле сетки этого цилиндра обеспечит правильный прогноз землетрясения q. Обозначим значения полей в произвольном узле сетки анализируемой области  $\mathbf{f}_n = \{f_{ni}\}$ , а в узле сетки цилиндра предвестника  $\mathbf{f}_{am} = \{f_{amii}\}$ . Минимальный объем тревоги, сгенерированной в узле сетки со значением  $\mathbf{f}_{am}$ , определяется количеством узлов сетки  $\mathbf{f}_n$  анализируемой области, для которых выполняется условие  $f_{ni} > f_{ami}$  для всех i=1,...,I. Выберем в каждом цилиндре прогноза по одному узлу, для значения  $\mathbf{f}_q$  которого объем тревоги  $v_q$  является минимальным. Получим выборку  $\{v_q, \mathbf{f}_q\}, q=1,2,...,Q$ . Правило прогноза q-го землетрясения, обеспечивающее минимальный объем тревоги, имеет вид  $C_q = \min_{<i>>} \{f_{ni} - f_{qi}\} > 0$ . Правило для нескольких землетрясе-

ний имеет вид  $\psi = \max_{q>} \{C_q\} > 0$ . Алгоритм нахождения решающего правила состоит в выборе

подмножества  $\Theta \subset Q$ , для которого объем тревоги не превышает заданного объема  $v(\Theta) = \bigcup_{q \in \Theta} v_q \leq v^*$ . Параметрами прогнозирующей функции здесь являются значения  $f_{qi}$  и их количество, равное произведению  $I \cdot \Theta$ , может быть велико по отношению к числу эпицентров учебной выборки. Известно, что при таком соотношении числа оцениваемых параметров и объема выборки, правила прогноза обычно плохо экстраполируют результаты обучения на независимый тестовый материал. Поэтому следует использовать более простую прогнозирующую функцию. Для этого можно аппроксимировать точки выборки функцией, которая минимально увеличивает объем тревоги  $v(\Theta)$ . Один их способов аппроксимации выборки в классе логических функций рассматривается в [7,8].

Рассмотрим два способа аппроксимации в классе линейных моделей.

Пусть даны поля  $\mathbf{F}_1$ ,  $\mathbf{F}_2$ ,...,  $\mathbf{F}_I$ . Алгоритмы нахождения вектора параметров **a** прогнозирующей функции состоят из трех шагов.

На первом шаге создается обучающая выборка. Для этого в цилиндрах предвестников каждого события q выбираются по  $K_q$  точек сетки со значениями  $f_{ani}$ , которые дают минимальные объемы тревоги. В результате получим множество векторов { $v_{qn}$ ,  $\mathbf{f}_{qn}$ }, q=1,...,Q, n=1,...,K.

На втором шаге находится правило прогноза. Здесь алгоритмы отличаются. В первом случае вектор **a** ищется из условия максимизации взвешенной суммы проекций векторов  $\mathbf{f}_{an}$ . При этом вес  $w_{an}$  каждого вектора увеличивается при уменьшении объема тревоги  $v_{an}$ . Это позволяет преимущественно максимизировать проекции векторов с малым объемом тревоги. Очевидно, что максимум достигается для вектора, равного нормированной сумме этих взвешенных векторов

$$\mathbf{a} = \frac{\sum_{q=1}^{Q} \sum_{n=1}^{K_q} w_{qn} \mathbf{f}_{qn}}{\sqrt{\sum_{q=1}^{Q} \sum_{n=1}^{K_q} w_{qn}^2 \mathbf{f}_{qn}^T \mathbf{f}_{qn}}}$$
(1)

Второй способ состоит в нахождении правила прогноза, которое аппроксимирует объемы тревоги. Алгоритм состоит в решении регрессионной задачи методом наименьших квадратов. Параметры прогнозирующей функции находятся путем минимизации функционала

$$\mathbf{a} = \arg\min_{\langle \mathbf{a} \rangle} \sum_{q=1}^{Q} \sum_{n=1}^{K_q} (v_{qn} - w_{qn} \mathbf{a}^T \mathbf{f}_{qn})^2$$
(2)

На третьем шаге вычисляется прогнозное поле  $\Psi = a_1 \mathbf{F}_1 + a_2 \mathbf{F}_2 + \ldots + a_I \mathbf{F}_I$ .

#### ГИТИС, ДЕРЕНДЯЕВ

Далее для полученного прогнозного поля находится пороговое правило θ.

## 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ

#### 3.1. Технология прогноза

В предыдущем разделе мы видели, что при прогнозе землетрясений задействованы два поля: *поле прогноза* и *поле предвестника*. Решение определяется двумя временными интервалам: *интервалом прогноза* (t, t+T) и *интервалом предвестника* (t-T, t). Прогнозы даются через некоторый постоянный временной интервал, который удобно приравнять шагу сетки прогнозирующего поля  $\Delta t$ . В любой момент t прогноз представляет собой временной срез, состоящий из объединения цилиндров прогноза, сгенерированных с интервалом  $\Delta t$ . Эти цилиндры порождаются полем предвестника на всех временных срезах интервала (t-T, t). На следующем временном срезе  $t+\Delta t$  прогноз обновляется: закрываются прогнозные цилиндры, сгенерированные на последнем временной срезе t-T интервала предвестника T, и добавляются прогнозные цилиндры, сгенерированные на первом временном срезе  $t+\Delta t$  интервала предвестника. Пороговое правило задает долю предсказанных землетрясений  $u(\theta)$  относительно всех событий выборки с магнитудой  $M \ge M^*$ , которую можно считать оценкой вероятности правильного прогноза при условии  $\theta$ , и долю узлов сетки в области тревоги  $v(\theta)$  относительно всех узлов сетки анализируемого региона, которую можно считать вероятностью тревоги при условии  $\theta$ .

На каждом временном срезе прогнозного поля указана область прогноза, для которой по выборке примеров оценивается вероятность P, с которой в течение следующих T лет ожидается землетрясение с магнитудой  $M \ge M^*$ . При достаточно большом числе прогнозируемых событий N можно считать, что результаты прогноза являются случайными величинами с биномиальным распределением. Тогда оценку вероятности прогноза можно записать в виде

$$\hat{P} = \frac{N_1}{N} \pm \sqrt{\frac{N_1}{N}(1 - \frac{N_1}{N})}$$
, где  $N_1$  – число правильных прогнозов на выборке примеров.

Величина объема тревоги определяет точность пространственно-временной локализации прогноза эпицентров землетрясений. Для одного временного среза *t* объем тревоги прогнозного поля равен  $v_t = \frac{g_t}{G_t}$ , где  $G_t$  – число узлов сетки анализируемой области на временном срезе *t*,  $g_t$  – число узлов сетки области тревоги на этом же временном срезе. Оценку среднего объема тревоги для одного среза поля запишем как  $\hat{v} = \bar{v} \pm \sigma(\bar{v})$ , где  $\bar{v}$  - среднее значение объема тре-

воги,  $\sigma(\bar{v})$  - среднеквадратичное отклонение среднего. Среднее значение  $\bar{v} = \frac{1}{N_t} \sum_{n=1}^{N_t} v_t = \frac{v}{N_t}$ , где

 $N_t$  – число временных срезов. Значения поля предвестника, а следовательно и поля прогноза, коррелированны. Поэтому оценить среднеквадратичное отклонение объема тревоги можно только с помощью неравенства  $\sigma(\bar{v}) \le \sigma(v_t)$ , где  $\sigma(v_t)$ - среднеквадратичное отклонение объема тревоги на временном срезе.

Технология автоматического прогноза землетрясений частично реализована в сетевой платформе мониторинга И анализа сейсмической активности http://dcs.isa.ru/geo/2/, http://dcs.isa.ru/geo/3/ [9]. В ней применяется двухуровневый анализ данных. При прогнозе землетрясений на первом уровне будут выполняться функции автоматической обработки входных данных и наглядного представления результатов. Ключевыми элементами технологии здесь являются следующие операции: регулярная загрузка данных с сайтов сейсмологического мониторинга, вычисление по исходным данным пространственно-временных полей, представляющих свойства сейсмического процесса, оценивание прогнозирующей функции и вероятностных параметров прогноза, визуализация поля прогноза и его компонентов. Этот уровень позволяет специалисту сформулировать гипотезу о полготовке землетрясения. На втором уровне запускается многофункциональная ГИС ГеоТайм 3 с ГИС-проектом, включающим в себя все исходные данные первого уровня и результаты их обработки. ГИС ГеоТайм 3 позволяет вводить дополнительные данные и использовать для прогноза широкий набор инструментов анализа пространственно-временных процессов.

Рассмотрим далее примеры моделирования технологии автоматического прогноза землетрясений, которые выполнялось с помощью ГИС ГеоТайм 3 <u>http://geo.iitp.ru/GT3/</u> [10].

#### 3.2. Регион Камчатки

5

Рассмотрим пример обучения прогнозному правилу для региона Камчатки. Для анализа выбран полигон 155°-170° в.д., 48°-56° с.ш. и временной интервал 01.01.1990 – 01.02.2016. Координатная сетка пространственно-временных полей имеет шаг 0.15° по долготе, 0.1° по широте и 47 суток 15 час 15 мин по временной оси.

Для моделирования методов прогноза использовался каталог землетрясений 1990-2016 гг с сайта Камчатского филиала Геофизической службы РАН <u>http://www.emsd.ru/ts/alldemo.php</u>. Анализировались 26596 землетрясений с магнитудами от 3.5 до 7.1 и с глубинами гипоцентров  $H \le 300$  км., которые произошли в интервале от 01.01.2006 до 01.02.2016. Пример обучения прогнозному правилу выполнялся для всех землетрясений от 2009 по 2016 гг с глубинами гипоцентров до 100 км и магнитудами  $M \ge 5.5$ ,  $M \ge 6.0$  и  $M \ge 6.5$ . Анализируемый регион, эпицентры землетрясений за 1990-2016 гг. с магнитудами  $M \ge 3.5$  и  $H \le 300$  км, и эпицентры землетрясений с магнитудами  $M \ge 5.5$  и  $H \le 100$ км показаны на Рис. 1.



Рис. 1. Регион анализа. (1) Анализируемая область региона; (2) эпицентры землетрясений анализируемого каталога; (3) эпицентры прогнозируемых землетрясений с магнитудами *M*≥5.5.

Моделирование прогноза выполняется в ограниченной сейсмически активной пространственно-временной области региона, которая выбрана по двум следующим правилам: 1 - в каждом круге радиуса R=50 км за период 1990-2016 гг. имеется не менее 100 эпицентров землетрясений и 2 - в каждом прямоугольном окне с основанием 200 км × 200 км × 1095 суток имеется не менее 25 эпицентров землетрясений. Соответствующая этим условиям пространственно-временная область содержит 449971 узел сетки.

Для прогноза использовались два поля признаков: поле аномалий плотности эпицентров и поле аномалий наклона графика повторяемости магнитуд землетрясений (параметр *b*-value закона Гутенберга-Рихтера). Значения поле плотности эпицентров вычислялись с экспоненциальной ядерной функцией:

$$d(x, y, t) = C \sum_{n} \left[ \exp\left(-\left(\frac{r_n}{R_0}\right)^2\right) * \exp\left(-\left(\frac{t_n}{T_0}\right)^1\right) \right] * \left[\left(\varepsilon - \frac{r_n}{R_0}\right) * \left[\left(\varepsilon - \frac{t_n}{T_0}\right)\right] \right]$$
(3)

где: *C* – константа,  $1(u) = \begin{bmatrix} 1, u \ge 0 \\ 0, u < 0 \end{bmatrix}$ , (x, y, t) – координаты узла 3D сетки, *n* – номер события,

 $r_n$  [км] – расстояние от узла сетки до события,  $t_n$  [сутки] – временной интервал от узла сетки до события,  $t - \varepsilon T \le t_n \le t$ ,  $R_0$  [км],  $T_0$  [сутки] - коэффициенты затухания,  $\varepsilon$  – пороговый коэффициент.

Параметрами поля являются: радиус  $R_0$ =50 км, временной интервал  $T_0$ =50 суток, пороговый коэффициент  $\varepsilon$ =2.

Для наклона графика повторяемости землетрясений использовалась стандартная оценка с помощью метода максимального правдоподобия:

$$b = \beta \lg e \approx 0.43\beta, \tag{4}$$

где  $\beta = \frac{1}{N_{m_0}} \sum_{m_i \ge m_0} (m_i - m_0)^{-1}$ ,  $m_0$ - минимальная представительная магнитуда землетрясений,

 $N_{m_0}$  - количество землетрясений с магнитудой  $m \ge m_0$ .

Параметрами поля *b*-value являются размеры прямоугольного окна оценивания: основание 200 км × 200 км и временной интервал 1095 суток.

Для оценивания полей аномалий сейсмической активности и b-value используется выборки значений узлов сетки, которые берутся для двух временных срезов 3D полей:  $n_1$ =22 срезов относится к фоновому интервалу  $T_1$ =1095 суток, и  $n_2$ =4 срезов относится к тестовому интервалу  $T_2$ =200 суток. Аномалии оцениваются по статистике Стьюдента

$$\tau = (A_2 - A_1) \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{(n_1 + n_2)(s_1^2 + s_2^2)}}$$
(5)

где:  $A_1$  и  $A_2$  – средние значения полей (сейсмической активности или b-value) на интервалах  $T_1$  и  $T_2$ ,  $s_1$  и  $s_2$  – суммы квадратов отклонений значений полей от средних значений. Если статистика t близка к 0, то средние значения фоновых и тестовых срезов мало изменялись по сравнению с их среднеквадратичными отклонениями. Чем больше величина статистики  $|\tau|$ , тем с большей уверенностью можно предполагать, что поле на интервале  $T_2$  значимо изменилось по отношению к интервалу  $T_1$ .

Правило прогноза оценивалось по данным временного интервала от 02.02.2006 до 19.01.2016 гг. Прогнозное поле искалось с помощью алгоритма (1). При этом вес *w*<sub>an</sub> каждого вектора выборки выбирался обратно пропорциональным соответствующему минимальному объему тревоги. Правило прогноза имеет вид

#### $\Psi = a_1 \mathbf{F}_1 + a_2 \mathbf{F}_2$ ,

где  $\mathbf{F}_1$ - поле аномалий плотности эпицентров,  $\mathbf{F}_2$ - поле аномалий *b*-value, параметры прогнозного поля R=25 км, T=1095 суток,  $a_1$  = 0.5913,  $a_2$  = - 0.80644.

На Рис. 2 показаны графики зависимостей u(v), соответствующие магнитудам землетрясений  $M \ge 5.5$ ,  $M \ge 6.0$  и  $M \ge 6.5$ . В анализируемую область попадает 84 из 159, 22 из 41 и 5 из 7 эпицентров землетрясений с  $M \ge 5.5$ ,  $M \ge 6.0$  и  $M \ge 6.5$  соответственно. Можно видеть, что с увеличением магнитуды качество прогноза улучшается. Зависимость u=v, соответствующая прогнозу по случайному полю, показана красной линией. Сравнивая значения этой зависимости с экспериментальными u(v), можно видеть, насколько полученное решение отличается от случайного. Так, например, для выбранного объема тревоги v=0.07 решения для магнитуд  $M \ge 5.5$ ,  $M \ge 6.0$  и  $M \ge 6.5$  лучше случайных в 8, 10 и 11 раз соответственно. Заметим, что безошибочное решение u=1 было бы при v=0.07 лучше случайного в 14 раз.





В таблице 1 сравнивается уровень прогноза землетрясений с магнитудами  $M \ge 5.5$ ,  $M \ge 6.0$  и  $M \ge 6.5$  по двум признакам и по каждому из признаков в отдельности для одного и того же объема тревоги v=0.07. Можно видеть, что качество прогноза по двум признакам значимо улучшается. Уровень прогноза определим здесь как оценки вероятности P того, что эти случайные величины превосходят порог, соответствующий объему тревоги 7% (значения порогов  $\theta$ : для по-

ля  $\Psi$  равно 7.8, для поля  $\mathbf{F}_1$  равно 6.2 и для поля  $\mathbf{F}_2$  равно -7.8). Гистограммы значений полей показаны на Рис 3. Из них можно видеть, что пороговые величины действительно соответствуют аномальным значениям полей.



**Рис. 3.** Гистограммы значений полей слева направо: **Ψ**, **F**<sub>1</sub> и **F**<sub>2</sub>. Значения порогов, дающих объем тревоги *v*=0.07, равны 7.8, 6.2 и -7.8 соответственно.

В таблице 1 значения уровня прогноза землетрясений с магнитудами  $M \ge 5.5$ ,  $M \ge 6.0$  и  $M \ge 6.5$  даны в виде  $P \pm \sigma$ , где  $\sigma$  - оценка среднеквадратичного отклонения оценок прогноза для выборок  $N \ge 20$  землетрясений.

#### Таблица 1.

	Уровень прогноза	Уровень прогноза	Уровень прогноза 5и		
	84х событий с <i>М</i> ≥5.5	22х событий с <i>М</i> ≥6.0	событий с <i>М</i> ≥6.5		
Прогноз для поля ${f \Psi}$	$0.55 \pm 0.07$	0.64±0.13	0.80		
Прогноз для поля $\mathbf{F}_1$	$0.43 \pm 0.08$	$0.50 \pm 0.15$	0.40		
Прогноз для поля $\mathbf{F}_2$	0.41±0.08	0.31±0.18	0.20		

#### Уровень прогноза при объеме тревоги и=7%

#### 3.3 Регион Аляски

Регион Аляски определяется полигоном: 180°-141° з.д., 49°-67° с.ш., 01.01.1990 – 01.02.2016. Координатная сетка пространственно-временных полей имеет шаг 0.25° по долготе, 0.125° по широте и 47 суток 22 час 50 мин по временной оси. Прогноз выполнялся по каталогу землетрясений 1990-2016 гг с сайта Национального информационного сейсмологического центр (NEIC) <u>http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/feed/</u>.

Анализировались 24614 землетрясений в магнитудном интервале от 3.0 до 7.9 и с глубинами гипоцентров до 300 км. Прогнозировались землетрясениия с магнитудами  $M \ge 6.0$  и с глубинами гипоцентров до 100 км. На Рис. 4 показаны эпицентры землетрясений за 1990-2019 гг с магнитудами  $M \ge 3.5$  и глубинами  $H \le 300$  км, анализируемый регион, ограниченный условием, по которому в круге радиуса 100 км с центром в узлах сетки за время наблюдения попадает не менее 100 эпицентров землетрясений, и выборка эпицентров землетрясений с магнитудами  $M \ge 6.0$  и глубинами  $M \ge 6.0$  и глубинами  $M \ge 100$  км.



**Рис. 4.** Регион анализа: (1) эпицентры землетрясений за 1990-2019 гг с магнитудами  $M \ge 3.5$  и глубинами гипоцентров  $H \le 300$  км, (2) область анализа и выборка эпицентров землетрясений с  $M \ge 6.0$  и  $H \le 100$  км.

Моделирование прогноза выполнялось для одного поля. Цилиндр прогноза имел радиус основания R=25 км и продолжительность T=365 суток. При моделировании на этапе обучения продолжительностью в 10 лет, вычислялось поле плотности эпицентров землетрясений (2) с параметрами  $R_0=50$  км,  $T_0=50$  суток и  $\varepsilon=2$ . Далее определялся порог тревоги, затем результат тестировался на интервале в 3 года. После этого выполнялся сдвиг на 3 года и процедура повторялась. В Таблице 2 приведены результаты обучения (Оценка) и прогноза на контрольной выборке (Тест): число эпицентров в анализируемой пространственно-временной области, значение порога, уровень прогноза и объем тревоги.

#### Таблица 2.

	Оценка 1990 – 2000	Тест 2000 – 2003	Оценка 1993 – 2003	Тест 2003 – 2006	Оценка 1996 – 2006	Тест 2006 – 2009	Оценка 1999 – 2009	Тест 2009 – 2012	Оценка 2002 – 2012	Тест 2012– 2015	Оценка 2005 – 2015	Тест 2015 – 2016
Число событий	38	10	30	5	27	18	33	12	35	8	38	12
Значение порога	2.44	2.44	2.64	2.64	2.94	2.94	3.04	3.04	3.75	3.75	3.95	3.95
Уровень прогноза	0.368	0.60	0.60	0.60	0.556	0.722	0.606	0.667	0.514	0.25	0.474	0.417
Объем тревоги	0.142	0.152	0.144	0.196	0.147	0.194	0.148	0.226	0.14	0.17	0.146	0.153

Результаты обучения и прогноза землетрясений с магнитудой *М*≥6

Из таблицы можно видеть, что средние величины уровня прогноза при обучении и тестировании составляют 0.52 и 0.54 соответственно. Отличия в средних значениях объема тревоги более существенные: 0.15 при обучении и 0.18 при тестировании.

#### 3.4. Регион Японии

Регион Японии определяется полигоном: 128°-148° в.д., 30°-45° с.ш., 01.01.1990 – 01.02.2016. Координатная сетка пространственно-временных полей имеет шаг 0.16° по долготе, 0.125° по широте и 47 суток 22 час 50 мин по временной оси. Для прогноза использовался загруженный с сайта Международного сейсмологического центра (ISC) <u>www.isc.ac.uk</u> каталог из 241635 землетрясений за период 1990-2016 гг с магнитудами от 2.5 до 9.0 и с глубинами гипоцентров до 602 км.

Моделирование прогноза выполнялось для двух полей. Прогнозировались землетрясениия с глубинами гипоцентров до 100 км и магнитудами  $M \ge 6$ . На Рис. 5 показаны эпицентры землетрясений за 1990-2019 гг с магнитудами  $M \ge 3.5$  и глубинами гипоцентров  $H \le 300$  км, один из временных срезов анализируемой области региона, ограниченной условием, по которому в прямоугольном окне 100 км × 100 км × 1095 попадает не менее 25 эпицентров землетрясений, и выборка эпицентров землетрясений с магнитудами  $M \ge 6.0$  и  $H \le 100$  км.



**Рис. 5.** Анализируемый регион: (1) полигон, (2) анализируемые эпицентры землетрясений (3) анализируемая область региона и эпицентры землетрясений с магнитудами *М*≥6.

Прогноз выполнялся с помощью алгоритма (1), при этом вес  $w_{qn}$  выбирался обратно пропорциональным соответствующему минимальному объему тревоги. Прогнозное поле построено по двум полям:

1. Поле плотности эпицентров землетрясений с глубинами гипоцентров до 300км. Поле вычислено по формуле (2) с параметрами ядерной функции  $R_0=50$  км,  $T_0=50$  суток, eps=2.

2. Поле аномалий b-value. Поле *b*-value вычислено по формуле (3) с прямоугольным окном 100 км × 100 км × 1095 суток. Поле аномалий *b*-value вычислялось по статистике Стьюдента (4) с параметрами: длительность фонового окна  $T_1$ =1095 суток, длительность тестового окна  $T_2$ =200 суток.

Цилиндр прогноза имеет радиус R=13 км и продолжительность T=70 суток. При моделировании на этапе обучения продолжительностью в 10 лет, вычислялись поля-признаки, по ним вычислялось прогнозирующее поле, для которого определялся порог тревоги, затем результат тестировался на интервале в 3 года. После этого выполнялся сдвиг на 3 года и процедура повторялась. В Таблице 3 приведены результаты обучения (Оценка) и прогноза на контрольной выборке (Тест) при прогнозе землетрясений с магнитудой  $M \ge 6$  и постоянном значении порога  $\theta=11.01$ .

Таблица 3.

	Оценка 1993 – 2003	Тест 2004 – 2007	Оценка 1997 – 2007	Тест 2007 – 2010	Оценка 2000 – 2010	Тест 2010 – 2013	Оценка 2003 – 2013	Тест 2013 – 2015	Оценка 2005 — 2015
Число событий	63	29	67	17	74	131	176	20	167
Уровень прогноза	0.714	0.931	0.806	0.647	0.824	0.931	0.903	0.80	0.88
Объем тревоги	0.145	0.10	0.124	0.062	0.105	0.159	0.109	0.189	0.127

Результаты обучения и прогноза землетрясений с магнитудой *М*≥6 для порога θ=11.01

Из таблицы можно видеть, что средние величины уровня прогноза и объема тревоги при обучении и тестировании мало отличаются друг от друга: *и*<sub>обучения</sub>=0.83, *и*<sub>тестирования</sub>=0.82, *v*<sub>обучения</sub>=0.12, *v*<sub>тестирования</sub>=0.13.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы рассмотрели подход к автоматическому прогнозу землетрясений. Методы и элементы технологии прогноза моделировались с помощью ГИС ГеоТайм 3. Моделирование выполнялось на данных каталогов землетрясений, загруженных с сайтов сети Интернет.

Основные элементы подхода состоят в следующем.

#### ГИТИС, ДЕРЕНДЯЕВ

Сейсмотектонические процессы отображаются с помощью пространственно-временных полей. В этих полях ищутся аномалии. В отличие от временных рядов аномалии полей несут информацию как о временных, так и о пространственных свойствах анализируемых процессов. Предполагается, что аномалии, предшествующие землетрясениям, близки к максимальным либо минимальным значениям полей. Это упрощает алгоритмы прогноза. Параметрами прогноза по нескольким полям являются линейная прогнозирующая функция, значение порога принятия решения об объявлении тревоги, а также размеры пространственно-временной области тревоги.

Рассмотренный подход не привязан к определенному типу данных.

Примеры показывают, что (1) автоматический прогноз по доступным в сети Интернет каталогам землетрясений осуществим и достаточно эффективен; (2) экстремальные значения пространственно-временных полей параметров сейсмического процесса и полей изменений параметров сейсмического процесса могут являться предвестниками землетрясений.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Соболев Г. А. Физика очага и прогноз землетрясений //М., ИФЗ РАН. 1992.
- 2. Keilis-Borok V., Soloviev A. A. (ed.). Nonlinear dynamics of the lithosphere and earthquake prediction. – Springer Science & Business Media, 2013. 337p.
- 3. Amei A., Fu W., Ho C. H. Time series analysis for predicting the occurrences of large scale earthquakes //International Journal of Applied Science and Technology. – 2012. – T. 2. – №. 7.
- Gitis V.G., Osher B.V., Pirogov S.A., Ponomarev A.V., Sobolev G.A., Jurkov E.F. A System for Analysis of Geological Catastrophe Precursors. // Journal of Earthquake Prediction Research, vol. 3, 1994, 540-555.
- 5. Завьялов А. Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М. : Наука, 2006.
- 6. Харкевич А. А. Борьба с помехами. Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1965. 280 с
- 7. Gitis V., Derendyaev A., Metrikov P., Shogin A. Network geoinformation technology for seismic hazard research. // Natural Hazards: Volume 62, Issue 3. 2012. Pp. 1021-1036.
- Гитис, Ермаков, 2004. Основы пространственно-временного прогнозирования в геоинформатике // М., ФИЗМАТЛИТ, 2004. 256 С.
- Gitis V., Derendyaev A., Weinstock A. Web-based GIS Technologies for Monitoring and Analysis of Spatio-Temporal Processes //International Journal of Web Information Systems. 2016. T. 12. №. 1.
- 10. Gitis V., Derendyaev A., Metrikov P., Shogin A.: Network geoinformation technology for seismic hazard research. Natural Hazards 62.3, pp. 1021-1036 (2012)

# An approach to the automatic prediction of earthquakes

# V.G. Gitis, A.B. Derendyaev

Institute for Information Transmission Problems, Russian Academy of Sciences (Kharkevich Institute)

We present a new approach to automatic prediction of earthquakes. The system presents seismotectonic processes as spatio-temporal fields. The attributes of the forecast are as follows: linear predictive function, the value of the alarm decision threshold, the size of the spatio-temporal alarm domain. The present approach is not tied to a specific data type. The simulation results show that the automatic forecast is available on the Internet catalogs of earthquakes feasible and effective enough.

**Keywords:** earthquake prediction, spatial-temporal field, earthquake catalogs, predictive function, GIS GeoTime 3.