

На правах рукописи

ШЕБАЛИН Петр Николаевич

**Возрастание радиуса корреляции
сейсмичности как предвестник сильных
землетрясений: методология прогноза с
периодом ожидания менее года**

Специальность 25.00.10 -
«Геофизика,
геофизические методы поиска
полезных ископаемых»

Автореферат диссертации на
соискание ученой степени доктора
физико-математических наук

Москва - 2004

Работа выполнена в Международном институте теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской Академии наук (МНТП РАН), г. Москва

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН
НИКОЛАЕВ Алексей Всеволодович

доктор технических наук
член-корреспондент РАН
МАЛОВИЧКО Алексей Александрович

доктор физико-математических наук
ТЮПКИН Юрий Степанович

Ведущая организация:

Физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Защита состоится 18 ноября 2004 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.118.01 в Международном институте теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН по адресу: *113556 Москва, Варшавское шоссе, д. 79, корп. 2, конференц-зал.*

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МНТП РАН.

Автореферат разослан 27 сентября 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



Б.М. Наймарк

2005.4

881799

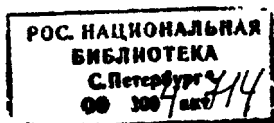
15237

Общая характеристика работы

В работе излагаются результаты исследований автора по решению крупной проблемы, имеющей большое научное и хозяйственное значение - разработке метода прогноза землетрясений с периодом ожидания менее года. Помимо оценки времени, места и силы землетрясения, метод включает необходимую для практических целей оценку вероятности ложной тревоги. Первые неоспоримые успехи заблаговременных документированных прогнозов по этому методу позволяют считать задачу в целом решенной. Удачные прогнозы вперед и результаты большого числа ретроспективных тестов подтверждают также главные теоретические посылки метода - гипотезы о возрастании радиуса корреляции сейсмичности перед сильными землетрясениями и о пространственной корреляции среднесрочных и краткосрочных предвестников.

Актуальность работы. Актуальность работы имеет практический и теоретический аспекты. Решение проблемы прогноза землетрясений является одной из важнейших задач, стоящих перед человечеством. Ежегодные потери от землетрясений составляют сегодня десятки тысяч человеческих жизней, а ущерб исчисляется десятками и сотнями миллиардов долларов. При этом уязвимость человечества перед землетрясениями постоянно растет, несмотря на принимаемые меры по улучшению качества строительства. Прогноз землетрясений на любой стадии открыл бы возможность уменьшения ущерба и предотвращения гибели людей. Актуальность теоретического аспекта вытекает из ставшей очевидной в последние годы невозможности объяснить возникновение землетрясений в рамках классических теорий, рассматривающих лишь локальные процессы их подготовки. Выдвигаемые новые гипотезы на основе интерпретации литосферы как сложной динамической системы, требуют всесторонней проверки и конкретизации. В отсутствии фундаментальных уравнений лишь достоверный прогноз, основанный на какой-либо научной гипотезе, является надежным критерием ее проверки.

Цель исследования. Цель диссертационной работы - разработка основанного на явлении возрастания радиуса корреляции сейсмичности метода прогноза сильных землетрясений с временем ожидания менее года и проверка его достоверности и эффективности.



Методология. Для достижения поставленной цели предложено оригинальное методологическое решение совместного анализа среднесрочных и более краткосрочных предвестников. Среднесрочные предвестники анализируются в пространственной области, указываемой краткосрочным предвестником, и, таким образом, они анализируются в порядке, обратном их появлению. При наличии пространственной корреляции средне- и краткосрочных предвестников такой подход обладает очевидным преимуществом по сравнению с прямым анализом.

Все расчеты и оценки в работе базируются на алгоритмически воспроизводимом анализе малых выборок с использованием распознавания образов и математической статистики, включая сопоставление результатов, полученных по реальным и случайным данным.

Основные гипотезы. Идея метода основывается на гипотезах большого радиуса корреляции сейсмичности и его возрастании перед сильными землетрясениями и гипотезе пространственной корреляции среднесрочных и краткосрочных предвестников. Эти гипотезы опираются на концепцию литосферы как сложной иерархической самоорганизующейся системы. Возрастание радиуса корреляции перед критическими переходами является одним из известных свойств таких систем. Пространственная корреляция предвестников, проявляющихся на разных этапах процесса подготовки землетрясений, является проявлением другого известного свойства таких систем, известного как признак чередования (*intermittence*). На каждом этапе система частично сохраняет память о предыдущих состояниях и, поэтому, предвестники реализуются примерно в том же пространственном объеме.

Источники данных. В работе использованы опубликованные и доступные в реальном времени каталоги землетрясений ведущих глобальных и региональных сейсмологических агентств.

Новые научные результаты и положения, выносимые на защиту.

1. Введено определение специальной пространственно-временной структуры - цепочки эпицентров, являющейся индикатором кратковременного возрастания радиуса корреляции сейсмичности. На основе совместного анализа ретроспективных данных и соответствующих случайных данных, проведенного в ряде сейсмоопасных регионов мира, установлено, что цепочки эпицентров с высокой степенью достоверности являются предвестни-

ками сильных землетрясений с временем ожидания несколько месяцев.

2. Разработан метод прогноза сильных землетрясений с временем ожидания менее года на основе анализа цепочек эпицентров и предшествующей им сейсмичности (*RTP*). Метод включает выделение пространственной области и интервала времени, в которых ожидается землетрясение, оценку его магнитуды, оценку стационарной вероятности возникновения землетрясения в пространстве-времени прогноза (вероятности случайного угадывания) и набор тестов для оценки вероятности ложной тревоги.
3. Первые результаты тестирования метода *RTP* в реальном времени в ряде сейсмоопасных регионов мира (из пяти документированных прогнозов уже оправдались три), а также многочисленные ретроспективные тесты и тесты со случайным каталогом свидетельствуют о высокой эффективности метода и подтверждают исходные гипотезы.

Научная новизна. Разработанный автором метод впервые позволяет осуществлять прогноз сильных землетрясений с временем ожидания несколько месяцев и вероятностью случайного угадывания в среднем менее 10%. Существующие методы пока давали возможность только среднесрочного (годы) и долгосрочного (десятилетия) прогноза. Автором предложена и реализована принципиально новая методология прогноза, в которой совместно анализируются среднесрочные и более краткосрочные предвестники землетрясений. Последние реализуются в виде цепочек эпицентров, указывающих на пространство для анализа среднесрочных предвестников, и, таким образом, предвестники анализируются в порядке, обратном их появлению. Идея метода основана на гипотезе пространственной корреляции среднесрочных и более краткосрочных предвестников и позволяет обнаруживать предвестники, не проявляющиеся при прямом анализе.

Практическая значимость. На основе методики *RTP* в различных сейсмоопасных регионах мира к настоящему времени было сделано пять документированных прогнозов сильных землетрясений с периодом ожидания до 9 месяцев. Вероятность случайного угадывания в каждом из прогнозов составляет в среднем менее 10%. Три прогноза подтвердились в точности. Еще один прогноз по досадному недоразумению формально не является успехом, но со всей очевидностью

свидетельствует о правильности метода. В рассматриваемых восьми регионах пока не произошло землетрясений вне прогноза. И лишь одна тревога оказалась ложной. Такая высокая эффективность на фоне других существующих методов, а также возможность оценки вероятности ложной тревоги для конкретного прогноза, позволяют рекомендовать его применение для инициации проведения различных превентивных мероприятий, направленных на сокращение экономического и социального ущерба от землетрясений. Кроме того, целенаправленное проведение в областях прогноза по алгоритму *RTP* исследований по поиску более краткосрочных и (или) более локализованных в пространстве предвестников может привести к быстрому результату.

Апробация работы. Результаты исследований были представлены на международных, всесоюзных и российских научных конференциях и совещаниях, в том числе на Всероссийской научной конференции "Геология, Геохимия и Геофизика на рубеже XX XXI веков", Москва, 2002; на XXII-XXIII Генеральных Ассамблеях Международного Союза по Геодезии и Геофизике, (Гамбург, Германия, 1983; Бирмингем, Великобритания, 1999; Саппоро, Япония, 2003); на Генеральной Ассамблее Международной Ассоциации по Сейсмологии и Физике Недр Земли (Стамбул, Турция, 1989; Салоники, Греция, 1997); на Осенних Собраниях Американского Геофизического Союза (Сан-Франциско, Калифорния, 1999, 2000, 2002, 2003); на конференции "Наука прогноза землетрясений" (Лос Анжелес, 2004), на Годовом собрании Американского сейсмологического общества (Палм Спрингс, Калифорния, США, 2004); на 26 и 27 Генеральных Ассамблеях Европейской Сейсмологической Комиссии (Москва, 1984; Тель-Авив, Израиль, 1998; Генуя, Италия, 2002); на Международной Конференции по Математической Геофизике "Экстремальные события на Земле" (Вильфранш, Франция, 2000); на 25 и 27 Генеральных Ассамблеях Европейского Геофизического Сообщества (Ницца, Франция, 2000, 2002); на Совместной Ассамблее Европейского Геофизического Сообщества, Американского и Европейского Геофизических Союзов (Ницца, Франция, 2003); на Генеральной Ассамблее Европейского Союза Наук о Земле (Ницца, Франция, 2004); на школах по Нелинейной Динамике и Прогнозу Землетрясений, Триест, Италия, 1995, 2003). Основные результаты исследований по теме диссертационной работы изложены в 76 публикациях на русском и английском языках, в том числе в 2 монографиях (в соавторстве) и 33 статьях в реферируемых международных и российских журналах Доклады АН СССР и РАН, "Вулканология и сейсмология", "Journal of Geophysical

Research", "Geophysical Journal International", "Tectonophysics", "Physics of the Earth and Planetary Interiors", "Geophysical Research Letters" и др.

Личный вклад автора. Прогнозный алгоритм *RTP* разработан в соавторстве с академиком В.И. Кейлис-Бороком при обсуждении отдельных деталей с другими соавторами по публикациям. В.И. Кейлис-Бороку принадлежат идеи использования гипотезы о возрастании радиуса корреляции для поиска краткосрочных предвестников землетрясений, использования методов распознавания для анализа комплекса среднесрочных предвестников и большинства используемых среднесрочных предвестников. Автору принадлежит идея и окончательная формализация цепочек эпицентров как индикаторов возрастания радиуса корреляции и пространства для поиска среднесрочных предвестников. Автором разработано также формальное представление среднесрочных предвестников с минимальным суммарным числом параметров и другие конкретные детали алгоритма. Методика стандартных тестов и оценок также разработана автором при активном обсуждении с В.И. Кейлис-Бороком. Автором выполнены все расчеты и необходимая для них работа по разработке конкретных алгоритмов и программ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Она содержит 255 страниц машинописного текста, 83 рисунка, 20 таблиц и список литературы из 268 наименований.

Благодарности. Автор бесконечно признателен академику Владимиру Исааковичу Кейлис-Бороку, вовлекшего его в интереснейшую проблему прогноза землетрясений, за постоянное, внимание и поддержку в работе, за чрезвычайно плодотворные обсуждения и споры, за переданный опыт и идеи. Автор не может не вспомнить с огромной благодарностью своего отца Н.В. Шебалина, с раннего детства пробудившего интерес к землетрясениям и до конца жизни дававшего пример настоящего исследователя.

Работа была выполнена в Международном Институте теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук. Автор благодарен всем без исключения сотрудникам института за помощь и поддержку. Особые слова благодарности хочется выразить чл.-корр. РАН А. А. Соловьеву за постоянную помощь

и как ученого, и как администратора. Автор признателен за ценные обсуждения и полезные советы В.Ф. Писаренко, Г.М. Молчану, И.М. Ротвайну, В.Г. Кособокову, Д.В. Рундквисту, И.В. Кузнецову, А.М. Габриэлову, А.Т. Исмаил-Заде, А.В. Ландеру, Б.Г. Букчину.

Сотрудничество с другими организациями и учеными и просто встречи с ними в России и за рубежом помогли формированию представлений автора, реализованных в диссертационной работе. Автор благодарен А. Агнону, К. Аки, К. Аллегру, Л.Р. Ботвиной, А.Д. Гвишиани, Т. Джордану, Ж.-Л. Ле Муэлю, Я. Кагану, Т. Нагао, К. Нарто, Г.А. Соболеву, С. Уйеде, Д. Хили, М. Хольшнайдеру, Н.Н. Цыбину, Т.Л. Челидзе. На разных этапах работа поддерживалась Программой 13 фундаментальных исследований Президиума РАН, Российским фондом фундаментальных исследований (проекты 96-05-64800, 02-05-65231), Программой поддержки ведущих научных школ России (НШ-00-15-98507, НШ-1269.2003.5), ИНТАС (Гранты 01-0748), Международным научно-техническим центром (проекты 415 и 4638), грантом Фонда Дж. МакДоннэла "Совместные усилия в XXI веке по изучению сложных систем".

Содержание работы

Во введении кратко формулируются актуальность диссертационной работы, цели и методология исследования, основные гипотезы, основные защищаемые положения, научная новизна и практическая значимость работы.

Глава 1. Задача и методы прогноз землетрясений. Задача прогноза землетрясений требует точной формулировки. Множество определений, которое она допускает и не вполне установившаяся терминология порождают обилие противоречивых публикаций. Можно выделить три группы определений или представлений: утверждение о возможности возникновения землетрясения определенной силы в конкретной области пространства-времени (прогноз событий), различные оценки условной вероятности землетрясений (вероятностный прогноз) и представления, не имеющие точных формулировок. Вследствие ограниченности ретроспективных данных, а также из-за недопустимости локальной экстраполяции закона повторяемости во втором подходе оценки условной вероятности оказываются по сути лишь некоторыми оценками условной интенсивности, лишь нормированными, как вероятность. В дальнейшем под прогнозом будет пониматься

прогноз событий.

Определение прогноза было выработано и согласовано в 1976 году общими усилиями специально организованной представительной Комиссии по прогнозу землетрясений Национальной Академии Наук США. Оно включает шесть основных пунктов: (1-3) должны быть указаны интервал времени, пространственная область и интервал магнитуд ожидаемого землетрясения; (4) должно быть дано указание на степень уверенности автора в надежности прогноза; (5) должна быть дана оценка шансов случайного угадывания землетрясения данной силы в данной пространственно-временной области; (6) прогноз должен быть документирован и представлен в доступном для оценивания результатов виде. Лишь немногие прогнозы удовлетворяют этим требованиям, среди них известный глобальный тест алгоритма M_8 .

Оценивание прогнозов является сложной статистической задачей даже в случае фиксированной пространственной области. Четкое разделение успехов и неудач возможно благодаря однозначному делению прогнозов на успешные (или подтвержденные) и ложные тревоги, а землетрясения-цели прогноза на предсказанные и пропуски цели. Хотя жесткие рамки таких определений не могут учесть ошибки в определении гипоцентра сильного землетрясения и его магнитуды, без заранее фиксированных условий статистическая задача оценивания прогноза практически неразрешима. Следует различать статистические характеристики прогнозного алгоритма и отдельных прогнозов.

Основными характеристиками прогнозного алгоритма являются статистическая значимость и эффективность. Оценка *статистической значимости* α отличия прогнозов от случайного угадывания основывается на биномиальной модели: $1 - \alpha = 1 - B(n - 1, N_t, p)$, где N_t и n - соответственно общее число сильных землетрясений-целей прогноза и число предсказанных землетрясений, B - функция кумулятивного биномиального распределения. Вероятность p случайного угадывания одного землетрясения подсчитывается как относительный пространственно-временной объем тревог, взвешенный по сейсмичности:

$$p = \hat{\tau} = \frac{1}{T} \int_0^T dn(t)dt \quad (1)$$

Здесь $dn(t)$ - доля основных толчков $M_c \geq M_r$ а весь рассматриваемый период, эпицентры которых лежат в области, находящейся в момент t в состоянии тревоги. Обычно в работе используется значение $M_r = 4.0$.

Для оценки *эффективности* прогнозного алгоритма Г.М. Молчан предложил теорию стратегий прогноза, которая связывает собственно прогноз с его потенциально оптимальным использованием. Коротко резюмируем основные ее положения. Эффективность семейства прогнозных алгоритмов, например, порожденного изменением свободных параметров одного алгоритма, характеризуется нижней огибающей Γ множества точек $\{\hat{n}, \hat{\tau}\}$, где $\hat{n} = \frac{1-n}{N}$ - процент пропусков цели и $\hat{\tau}$ - процент тревоги. Чем больше отклонение Γ от случайного угадывания, а именно, множества точек $\{\hat{n} + \hat{\tau} = 1\}$, тем выше эффективность алгоритма. Компромисс между \hat{n} и $\hat{\tau}$ зависит не только от выбора параметров алгоритма, но и от функции потерь $\gamma(\hat{n}, \hat{\tau})$, которая может быть разной для разных практических целей. При фиксированной функции потерь точка, в которой линия уровня γ и огибающая Γ касаются друг друга, определяет одновременно минимальный из достижимых уровень потерь и оптимальный набор параметров алгоритма прогноза.

В качестве характеристики эффективности прогнозного алгоритма часто используется введенная К. Аки величина J , которую он назвал "*вероятностный выигрыш*". Оценка J легко выражается через величины \hat{n} и $\hat{\tau}$: $J(\hat{n}, \hat{\tau}) = \frac{1-\hat{n}}{\hat{\tau}}$. Величина J не включает в себя функцию потерь γ , поэтому для оценивания прогноза пара значений $(\hat{n}, \hat{\tau})$ всегда предпочтительнее.

При оценивании прогнозов важной дополнительной характеристикой может оказаться число ложных тревог n_{fa} . Таким образом, статистическую значимость и эффективность прогнозного алгоритма мы будем оценивать с помощью следующего набора четырех чисел: n , N_t , $\hat{\tau}$ и f . Для сравнения различных прогнозов удобна *диаграмма ошибок*, графически представляющая эти величины. При использовании диаграммы ошибок нет необходимости заранее вводить функцию потерь.

Статистическими характеристиками конкретного прогноза являются его нетривиальность и вероятность ложной тревоги. *Нетривиальность* прогноза характеризуется стационарной вероятностью возникновения сильного землетрясения в области и в период прогноза в предположении Пуассоновского распределении событий во времени. Если область прогноза достаточно велика, то есть превышает размер очага предсказываемого землетрясения, то для ее оценки можно воспользоваться экстраполяцией по накопленному графику повторяемости. Для небольших пространственных ячеек такая оценка неприменима.

Адекватно оценить вероятность того, что данный прогноз является ложной тревогой, можно лишь имея большую статистику ре-

альных прогнозов. Грубая оценка все же может быть получена и по ретроспективным данным. Для этого необходимо при настройке параметров использовать лишь часть данных, а *вероятность ложной тревоги* оценивать по оставшейся части.

Любой алгоритм прогноза использует как минимум один предвестник землетрясений, то есть некоторое аномальное поведение перед землетрясениями какого-то из регистрируемых геофизических полей. Для использования в прогнозном алгоритме предвестники должны быть строго и однозначно формализованы. При этом велика опасность "переподгонки", ведущей к резкому падению эффективности алгоритма при прогнозе вперед. Максимальное сокращение числа оптимизируемых элементов и некоторое закругление параметров значительно снижают этот риск, одновременно увеличивается робастность предвестника.

Существует распространенное мнение, что помимо строгой формализации необходимо ясно представлять физический механизм предвестников. Следует признать, что теория процессов подготовки землетрясений находится пока на стадии накопления эмпирических данных и закономерностей, и поэтому, наоборот, достоверно устанавливаемые явления необходимы для разработки теории. Для сложных явлений успешный прогноз является чуть ли не единственным критерием достоверности.

В главе рассмотрены *основные вехи в развитии методов прогноза*. Толчком к началу активных исследований по прогнозу землетрясений послужило развитие сетей сейсмостанций в середине 60-х годов. В 1964 г. В.И. Кейлис-Борок и Л.Н. Малиновская обнаружили возрастание активности землетрясений средней силы в обширной области вокруг будущего очага сильного землетрясения, которое они характеризовали суммарной площадью разрывов, грубо оцениваемой функцией $\Sigma(t) = \sum_{t-s}^t 10^{dM}$ с параметром d , выбранным так, чтобы каждое слагаемое соответствовало, с точностью до постоянного коэффициента, площади разрыва в очаге землетрясения средней силы, или энергии в степени $2/3$. Позднее Ч. Буфе и Д. Варнес предложили концепцию степенного возрастания перед сильными землетрясениями накопленной деформации по Беньоффу, отличающейся от величины Σ лишь значением коэффициента d .

В 1965 г. С.А. Федотов обнаружил, что облака афтершоков от сильных землетрясений на западе Тихого океана не пересекаются в пространстве, образуя "бреши", в которых наиболее вероятно возникновение последующих землетрясений. Определенная регулярность в заполнении брешей позволила на основе теории упругой отдачи Рей-

да выдвинуть гипотезу "сейсмического цикла". Теория брешей хорошо сочеталась с возникшей чуть позже тектоникой плит. Теория брешей получила дальнейшее развитие в работах К. Моги и К. Сайкса и его коллег. Определенные затруднения теории брешей привели к концепции характеристического землетрясения, которую Д. Шварц и К. Коппершмит обобщили на внутриплитовые землетрясения. Хотя значимость долгосрочных прогнозов на основе теории брешей неоднократно подвергалась сомнению, именно на этой теории основаны многие национальные программы, включая такие дорогостоящие эксперименты как Паркфильдский и Токайский.

- Исследования по идентификации заключительной стадии сейсмического цикла сосредоточились на поиске пространственно-временных паттернов сейсмичности, среди которых наибольшую известность получило *сейсмическое затишье*. Помимо известных работ группы Л. Сайкса, М. Висса и др., различные представления затиший (иногда в комбинации с активизацией) используются в алгоритмах *RTL Т.К. Соболева* и Ю.С. Тюпкина, *Сценарий Мендосино, MSc В.Г. Кособокова* с соавторами, *SR П.Н. Шебалина* с соавторами.

Среди предвестниковых паттернов сейсмичности на особом месте стоит аномальная активность афтершоков. "Взрыв афтершоков" - единственный из известных к настоящему времени отдельных предвестников, для которого установлена высокая статистическая значимость. Аномальная активность афтершоков используется в качестве составной части в алгоритмах *КН, М8, RTP*.

Значительное место в исследованиях по прогнозу землетрясений занимают лабораторные эксперименты по разрушению образцов горных пород и других материалов. Фрактальная природа, подобие процессов на разных масштабах предполагает наличие общих критериев макроразрушения в лабораторных экспериментах и в литосфере. Одним из таких критериев является концентрационный критерий накопления трещин Журкова-Соболева. Он используется в алгоритмах *М8, КОЗ*. Недавно В.Б. Смирнову и А.Д. Завьялову удалось получить более устойчивую характеристику концентрации разрывов с учетом фрактальности сейсмичности по пространству.

С середины 70-х годов в практику исследований стали внедряться математические методы распознавания образов. Сотрудничество научных коллективов академиков В.И. Кейлис-Борока и И.М. Гельфанда привело к строгой постановке и разработке методов решения сначала задачи прогноза мест возможного возникновения сильных землетрясений, а затем и задачи прогноза времени землетрясений. Была поставлена задача распознавания *периодов повышенной веро-*

ятности (ППВ) возникновения землетрясений в заранее фиксированной пространственной области. На основе ретроспективного анализа паттернов сейсмичности в Калифорнии и прилегающих областях Невады И.М. Ротвайн и В.И. Кейлис-Бороком был разработан среднесрочный прогнозный алгоритм *КН*. Другой алгоритм среднесрочного прогноза, *М8*, также построенный на идее распознавания *ППВ*, широко известен благодаря многолетнему глобальному тесту, принятому В.Г. Кособоковым совместно с американскими коллегами Дж. Хили и Дж. Дьюи. Результаты теста опровергают утверждение о принципиальной невозможности прогноза сильных землетрясений.

В рамках концепции литосферы как сложной динамической системы ожидаемым явлением является возрастание радиуса корреляции сейсмичности перед сильными землетрясениями. Это явление в реальной сейсмичности удалось обнаружить П.Н. Шебалину и В.И. Кейлис-Бороку с соавторами сначала на примере сейсмичности Малой Анtilьской дуги. Исследование этого явления и основанный на нем метод прогноза составляют основное содержание данной диссертации.

Рассмотренные выше исследования по прогнозу опираются на данные лишь каталогов землетрясений. Все их недостатки в последние несколько лет с лихвой компенсируются почти мгновенной доступностью в Интернете и огромным объемом доступных данных. По сравнению с другими геофизическими наблюдениями, связанными с землетрясениями, это к настоящему времени наиболее полный и однородный источник информации. Наблюдения о каких-либо изменениях перед землетрясениями других полей нацелены почти всегда на краткосрочный прогноз. Среди таких исследований, вызвавших в разное время наибольший резонанс, можно выделить точные измерения локальных деформаций, измерения отношения скоростей продольных и поперечных сейсмических волн, электрического сопротивления и потенциала, исследование аномалий магнитного поля, аномалий в распространении радиоволн, изменений уровня или химического состава грунтовых вод. Большинство из "кандидатов" в предвестники были затем отвергнуты, другие носят несистематический характер и требуют дополнительных подтверждений.

Глава 2. Цепочки землетрясений как индикатор возрастания радиуса корреляции сейсмичности. Линейный размер области, в которой наблюдаются предвестники землетрясения, на один-два порядка превышают размер его очага. Классическая механика не дает объяснения этим явлениям, поэтому поиск ведется в направлении ис-

следования абстрактных моделей сейсмичности, в которых литосфера рассматривается как сложная динамическая система, а землетрясения как критические явления в этой системе. Аналогия с другими, более изученными, сложными системами подсказывает не только возможность возрастания радиуса корреляции по мере приближения момента критического явления. В реальной сейсмичности это явление впервые было обнаружено в работе П.Н. Шебалина с соавторами в 2000 г. Также как и многие другие предвестники, возрастание радиуса корреляции является спорадическим короткоживущим явлением, не обязательно отражающим устойчивые тренды сейсмичности. По сравнению с другими известными предвестниками, основанными на паттернах сейсмичности, это явление проявляется в более коротком масштабе времени перед сильными землетрясениями: за недели или месяцы.

Ранее была предпринята попытка построить прогноз на двух разных предвестниках, отражающих возрастание радиуса корреляции: *KOC* и *Accord*. Ретроспективные результаты оказались весьма обнадеживающими. Было замечено, что эти предвестники хорошо коррелированы между собой, поэтому естественно было попытаться найти предвестник, который объединял бы их свойства. Автором было предложено использовать с этой целью "цепочку" землетрясений, определяемую как особую форму односвязного кластера эпицентров землетрясений средней силы, составленного из пар эпицентров, достаточно близких по времени и расстоянию. Главное преимущество цепочек состоит в том, что нет необходимости заранее определять пространственную область для поиска предвестника, цепочки выделяют ее сами. Вместе с тем, цепочки, являясь сравнительно краткосрочным предвестником, дают большое число ложных тревог.

С целью сокращения числа ложных тревог была поставлена задача распознавания предвестниковых цепочек по наличию в их пространственной окрестности сформировавшихся среднесрочных предвестников. Успешное решение этой задачи ретроспективно в Калифорнии и Японии позволило разработать двухступенчатый прогнозный алгоритм, получивший название *Обратное прослеживание предвестников* (в английской транскрипции *Reverse Tracing of Precursors, RTP*). На первой ступени идентифицируются цепочки землетрясений, которые являются "кандидатами" в предвестники с периодом ожидания несколько месяцев. На второй степени исследуется наличие среднесрочных предвестников в выделенной области и, при их достаточном количестве, "кандидат" принимается окончательно. Более краткосрочные и среднесрочные предвестники анализируются, таким об-

разом, в последовательности обратной их появлению; отсюда название алгоритма. Целью данной главы является исследование первой составной части алгоритма *RTP*- цепочек эпицентров. Здесь цепочки рассматриваются как самостоятельный предвестник, на основе которого строится гипотетический прогнозный алгоритм. Различные тесты ретроспективного прогноза по этому алгоритму и тесты со случайным каталогом позволяют оценить статистическую значимость и эффективность предвестника.

Определение цепочки землетрясений. В рассматриваемом регионе мы будем использовать каталог основных толчков (афтершоки исключены) с магнитудой $M \geq M_{min}$. Назовем два землетрясения *соседями*, если их эпицентры находятся на расстоянии r или менее, и если они произошли в пределах τ_0 по времени друг от друга. *Цепочка* — это последовательность землетрясений, в которой каждое землетрясение имеет хотя бы одного *соседа*, принадлежащего этой последовательности, и не имеет *соседей* вне этой последовательности. Средняя плотность эпицентров убывает с увеличением магнитуды землетрясений. Соответственно, величина r масштабирована следующим правилом:

$$r = r_0 10^{c(\underline{m}-2.5)} \quad (2)$$

где \underline{m} - минимальная магнитуда в паре. Рассматриваются только цепочки, с достаточно большими характеристиками: числом землетрясений $k \geq k_0$ и диаметром цепочки (наибольшим расстоянием между эпицентрами в цепочке) $l \geq l_0$

Определим также *R-окрестность* цепочки. Рассмотрим все эпицентры, входящие в цепочку, не обращая внимания на их последовательность во времени, кроме первого. Найдем эпицентр в цепочке, ближайший к первому, и соединим их отрезком прямой. Затем найдем эпицентр, находящийся на минимальном расстоянии к эпицентрам, уже соединенным отрезком, и соединим соответствующие точки. Будем повторять процедуру до тех пор, пока не будут исчерпаны все элементы цепочки. *D-окрестностью* цепочки назовем область, образованную объединением кругов радиуса R с центрами вдоль всех проведенных отрезков.

В данной работе мы будем рассматривать восемь регионов, где в настоящее время ведется эксперимент по прогнозу вперед по алгоритму *RTP* сильных землетрясений с $M \geq M_0$. В таблице 1 приведены используемые значения параметров цепочек (регионы 1-8). Но в начале этой главы для иллюстрации цепочек как самостоятельно-го предвестника рассмотрены также два больших региона (I и II в

табл.1), в которых цепочки являются предвестниками сильнейших землетрясений.

Регион	M_0	M_{min}	τ , дни	r_0 , км	c	k_0	l_0 , км
I. Калифорния	7.2	3.4	20	60	0.35	15	350
II. Хонсю-Хоккайдо-Ю.Курилы	8.0	3.8	20	50	0.33	25	1800
1. Южная Калифорния	6.4	2.9	20	50	0.35	6	175
2. Центральная Калифорния	6.4	2.9	30	50	0.35	10	250
3. Восточная Калифорния	6.2	2.9	30	50	0.35	8	175
4. Северная Калифорния	6.4	2.9	45	50	0.35	8	175
5. Хонсю-Хоккайдо-Ю.Курилы	7.2	3.5	20	50	0.33	25	800
6. Восточное Средиземноморье	6.5	3.0	40	50	0.35	8	175
7. Дол.По, Альпы, С.Динариды	5.5	2.9	45	50	0.35	8	175
8. Центральные Апеннины	5.5	2.9	45	50	0.35	8	165

Таблица 1: Значения параметров цепочек.

При вариации параметров для всей Калифорнии ($31^\circ - 44^\circ$ с.ш., $130^\circ - 114^\circ$ з.д.) в интервале времени 1965-2004 гг. наиболее устойчивы оказались цепочки, возникающие менее чем за 6 месяцев перед двумя сильнейшими землетрясениями в регионе за рассматриваемый период: Ландерс (28.06.1992, $M=7.6$) и Гектор Майн (16.10.1999, $M=7.3$). В значительном количестве вариантов возникают цепочки лишь перед этими двумя землетрясениями. На Рис. 1 приведены карты цепочек для одного из таких вариантов (Табл. 1, регион I). Цепочки возникли соответственно за 1.7 и 4.6 месяцев до указанных землетрясений. Помимо этого в рассмотренный период возникла лишь еще одна цепочка - за 1.8 месяца до землетрясения Гектор Майн.

Аналогичная ситуация наблюдается для периода времени с 1980 г. и в регионе Хонсю-Хоккайдо-Южные Курилы. Две из трех наиболее протяженных цепочек возникли непосредственно перед двумя сильнейшими за этот период землетрясениями - Шикотанским (1994.10.04, $M_w = 8.3$) и Токачи-Оки, Хоккайдо (2003.09.22, $M_w = 8.3$).

Для проверки неслучайности результата были проведены тесты с разными вариантами рандомизации каталога. Наиболее подходящим для целей теста является вариант, при котором, с целью сохранения пространственной структуры сейсмичности, координаты эпицентров и магнитуда берутся из реального каталога, при этом последовательность событий случайным образом перемешивается, и событиям

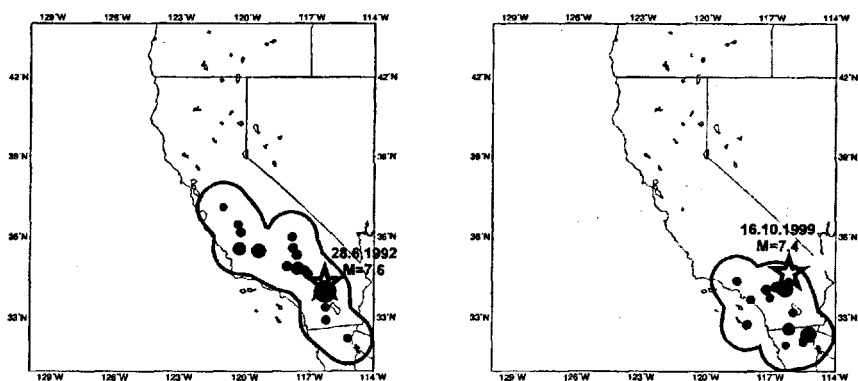


Рис. 1: Карты цепочек в Калифорнии. Обозначения: темные кружки - эпицентры, формирующие цепочку (размер кружков возрастает с магнитудой); оконтуренная область — R-окрестность цепочки ($R=100$ км); звездочки - эпицентры сильных землетрясений.

приписываются реальные времена в исходной последовательности. В каждом регионе было сгенерировано по 1000 реализаций каталога и повторена процедура идентификации цепочек. В Калифорнии ни в одном из вариантов не "предсказались" оба сильных землетрясения, и лишь в 33 вариантах "предсказалось" одно из них. В дальневосточном регионе эти цифры соответственно 5 и 117. Были сделаны также оценки $\hat{\tau}$, они составляют в двух регионах соответственно 0.015 и 0.109. Эти оценки хорошо соответствуют результатам тестов со случайным каталогом, поэтому исключается возможность того, что хороший ретроспективный результат есть просто удачный выбор из большого числа результатов, каждый из которых является случайным.

Была также исследована стабильность результатов при вариации параметров определения цепочек. Для каждого из параметров были взяты по три значения: значение из таблицы 1 и, говоря в целом, эти значения $\pm 5\%$. Таким образом, общее число комбинаций составило 729. В данном эксперименте были зафиксировали значения параметров тревог $R = 100$ км (радиус для R-окрестности) и $T_{al} = 9$ месяцев (продолжительность тревоги). Для Калифорнии эксперимент демонстрирует потрясающую устойчивость: ни в одном из 729 результатов не было двух пропусков цели (лишь в трети вариантов один пропуск цели), а оценка $\hat{\tau}$ находится в пределах 0.07. Для дальневосточного региона результат немного хуже, но стабильность тоже очень высока. Тесты по вариации каждого параметра в отдельности показали

устойчивость в широком диапазоне значений. Наиболее чувствительны результаты к изменению параметров r_0 и k_0 .

Аналогичные тесты были проведены и в восьми регионах, где ведется экспериментальный прогноз по алгоритму *RTP* (регионы 1-8 в таблице 1). Применение только цепочек в данном случае дает не очень эффективный прогноз, поскольку велико число ложных тревог. Однако результаты далеки от случайных. Лишь в одном из регионов (регион 5) вероятность случайности результата превышает 1.5% и составляет по \hat{r} 4.4%, а по случайному каталогу 2.9%. Различие оценок по \hat{r} и по случайному каталогу невелико, что позволяет надеяться на аналогичные результаты при прогнозе вперед.

Цепочки землетрясений отражают возросший радиус корреляции сейсмичности. Естественно предположить, что размер готовящегося землетрясения связан с масштабом пространственной корреляции сейсмичности. Помимо длины предвестниковых цепочек, действительно коррелированной с магнитудой сильных землетрясений, в главе рассмотрена еще одну характеристику масштаба пространственной корреляции. При анализе допустимых пределов вариации отдельных параметров было обнаружено интересное свойство цепочек. Оказалось, что при вариации параметра c в широком диапазоне значений каждый раз удается найти такое минимальное значение параметра r_0 , что цепочки перед сильными землетрясениями воспроизводятся (новая цепочка включает как минимум 80% эпицентров, входивших в первоначальную). Графики зависимости (2), построенные для полученных таким образом пар значений (c, r_0) как оказалось, пересекаются практически в одной точке (\hat{m}, \hat{r}_0) . Таким образом, параметры \hat{m} и \hat{r}_0 являются инвариантами цепочки относительно изменения параметра c и могут характеризовать масштаб корреляции сейсмичности, выявляемой данной цепочкой. Величина \hat{r}_0 имеет смысл радиуса корреляции, а величина же \hat{m} определяет характерный уровень энергии землетрясений. Обе величины хорошо коррелированы с магнитудой предсказываемых землетрясений (рис. 2). 84% точек лежат внутри полосы $M_0 = \hat{m} + 3 \pm 0.6$. Это обстоятельство является весьма важным для практических целей прогноза, так как дает оценку магнитуды предсказываемого сильного землетрясения.

Была рассмотрена статистика ретроспективных результатов с различными значениями параметров R и T_{al} прогнозного алгоритма *RTP*. Более, чем в трети случаев из 40 рассмотренных время ожидания t_{al} между окончанием цепочки и сильным землетрясением составляет менее 2 месяцев, в половине случаев - менее 3 месяцев, и лишь примерно в четверти случаев - от 6 до 9 месяцев. Окончательно принято зна-

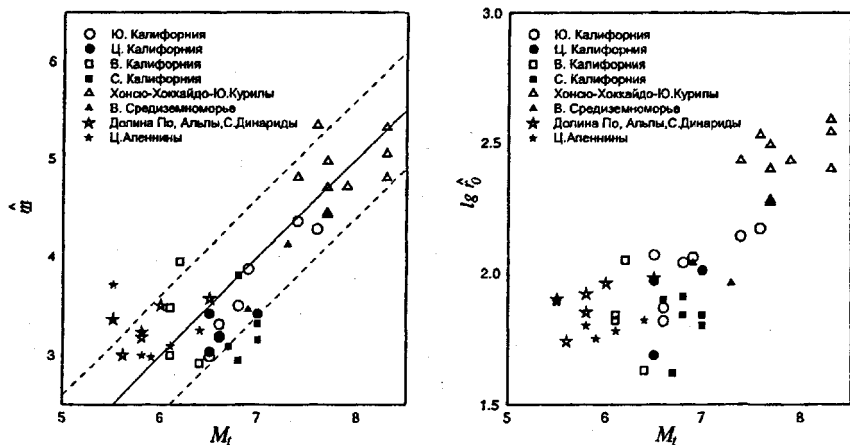


Рис. 2: Соотношение магнитуды землетрясения-цели прогноза и параметров \hat{m} и \hat{r} для 43 цепочек-предвестников в 8 регионах. Сплошная линия на левом графике соответствует соотношению $M_t = \hat{m} + 3$, пунктирная линия выделяет полосу $M_t = \hat{m} + 3 \pm 0.6$.

чения $T_{al} = 9.9$ месяцев. Оказалось, что в 36 из 40 случаев во всех регионах достаточно установить $R = 50$ км. Для дальневосточного региона было принято значение $R = 100$ км, поскольку это больше соответствует большей протяженности цепочек (более 800 км).

Размеры, форма и длительность цепочек, очевидно, зависят от способа и параметров выделения афтершоков. В данной работе во всех регионах мы использовали "оконный" метод Гарднера-Кнопва с оригинальными значениями параметров. Тесты, проведенные в двух регионах, продемонстрировали высокую устойчивость: при вариации порогов в пределах как минимум 40% суммарная ошибка возрастает не более, чем на 0.1.

Глава 3. Анализ среднесрочных предвестников в R-окрестности цепочек эпицентров: методология RTP. На втором этапе алгоритма RTP анализируются среднесрочные предвестники в R-окрестности каждой такой цепочки в интервале времени T лет, предшествующем началу цепочки. Мы рассмотрим четыре типа предвестников из восьми, предложенных академиком В.И. Кейлис-Бороком в качестве первой парадигмы прогноза землетрясений, а) возрастание сейсмической активности; б) возрастание группирования землетрясе-

ний в пространстве и времени; в) возрастание радиуса корреляции землетрясений; г) преобразование распределения магнитуд (графика повторяемости).

Формализованное представление предвестников аналогично принятому в алгоритмах *M8* и *КН*. Для каждого предвестника P вводится функционал $F_p(t, G, s)$, определенный для каждого момента времени t в области G (в данном случае это D -окрестность цепочки эпицентров). Значения функционала зависят от интервала накопления $(t - s, t)$. Появление предвестника P в момент t фиксируется условием $F_p(t, G, s) \geq C_p$, где C_p - заданный порог. В алгоритме *RTP* для каждой цепочки вводится еще один интервал $(t_0 - T, t_0)$, где t_0 - время возникновения первого события в данной цепочке. Факт появления предвестника P фиксируется, если в этом интервале было зафиксировано пусть даже краткосрочное превышение функционалом порога C_p .

На начальной стадии разработки алгоритма *RTP* мы рассмотрели различные модификации каждого из предвестников, испробовав суммарно более сотни функционалов. Похожие функционалы сравнивались прежде всего по индивидуальной эффективности предвестника. Обозначим $\hat{F}_P(G, T)$ максимум по времени функционала $F_p(t, G, s)$ в интервале $(t_0 - T, t_0)$. Наличие предвестника P перед данной цепочкой определяется соотношением $\hat{F}_P(G, T) \geq C_p$. Функционал является эффективным, если предвестниковые цепочки и цепочки-ложные тревоги хорошо разделяются по величине $\hat{F}_P(G, T)$ оптимальным значением порога C_p . В качестве меры эффективности ζ_P мы используем суммарную относительную ошибку обоих родов по ретроспективным данным. Чем меньше суммарная ошибка, тем выше эффективность.

Помимо выбора наиболее эффективных функционалов для каждого предвестника, была поставлена задача минимизации общего числа параметров. Поэтому предпочтение отдавалась вариантам с меньшим числом параметров, пусть даже за счет небольшой потери эффективности. Другим важным требованием была стабильность индивидуальной эффективности к вариации параметров. Это требование особенно существенно при использовании общих параметров для разных функционалов, поскольку оптимальные значения для разных функционалов различны; необходимо, чтобы эффективность оставалась высокой при выборе какого-то компромиссного для всех функционалов значения. Разные функционалы не являются, вообще говоря, независимыми; отбирались минимально коррелированные между собой варианты.

Окончательно было отобрано 8 функционалов. Все 8 функционалов описываются суммарно лишь четырьмя параметрами, не считая

еще двух параметров, которые входят в определение цепочки. Параллельно рассматриваются два варианта функционалов - во временной и событийной шкалах. Во временной шкале фиксируется интервал накопления или осреднения $(t-s, t)$. В событийной шкале функционал $F_p(t_j, G, N)$ определен для моментов времени t_j событий в каталоге для данной области G , а интервал накопления определяется числом N последовательных событий: $j - N, j - N + 1, \dots, j$. Каждый из вариантов шкал обладает определенными преимуществами и недостатками. Функционалы в событийной шкале более чувствительны к быстрым изменениям, которые могут оказаться сильно сглаженными во временной шкале, они лучше адаптируются к пространственной неоднородности сейсмичности. Функционалы во временной шкале менее чувствительны к артефактам, порождаемым недостатками каталога землетрясений.

Площадь R -окрестности разных цепочек различна; различной может быть и сейсмичность для цепочек, возникших в разных частях рассматриваемого региона. Поэтому, используя закон Гутенберга-Рихтера, мы задаем *нормировку функционалов* по нижнему пределу рассматриваемых магнитуд M^* , определяемой условием $n(M^*) = n^*$, где $n(M^*)$ - среднегодовое число основных толчков с магнитудой $M \geq M^*$, определяемое в интервале $(t_0 - 5 \text{ лет}, t_0 - 1 \text{ год})$; t_0 - время первого события в цепочке. Рассматриваемый способ нормализации уравнивает усредненное по большим интервалам времени число основных толчков в R -окрестности разных цепочек. Отметим, что этот же прием успешно используется в алгоритме *M8*. Нормировка по n^* применяется ко всем функционалам, но для некоторых из них она оказывается недостаточной.

Отобранные функционалы. Для каждого отобранных предвестников ниже приведены по два варианта функционалов: во временной и событийной шкалах. Функционалы в событийной шкале помечены тильдой. Суммирование во всех формулах ведется по основным толчкам с эпицентрами в R -окрестности данной цепочки с магнитудой $M \geq M^*(n^*)$ и временем или номером, принадлежащим интервалу суммирования. Число событий, определяемое условием C , обозначим N_C

Число событий. Это простейший функционал, используемый во многих алгоритмах.

$$F_U(t, s) = \frac{N_{t-s \leq t_k < t}}{s}; \quad \widetilde{F}_U(t_j, N) = \frac{N}{t_j - t_{j-N+1}}. \quad (3)$$

Предвестник Σ . Нормировка по n^* для этого функционала не доста-

точно, так как слабые землетрясения дают малый вклад в его значения. Поэтому при суммировании берется не значение магнитуды каждого основного толчка, а ее превышение над значением M^* .

$$F_{\Sigma}(t, s) = \sum_{t-s \leq t_k < t} 10^{M_k - M^*}; \quad \widetilde{F}_{\Sigma}(t_j, N) = \sum_{k=j-N+1}^j 10^{M_k - M^*}. \quad (4)$$

Возрастание магнитуды. В качестве кандидатов для этого предвестника первоначально было рассмотрено несколько вариантов функционалов. Самым простым и одновременно эффективным оказался функционал, представляющий разность средних магнитуд во второй и первой половине (по времени во временной шкале или по числу событий в событийной шкале):

$$F_M(t, s) = \frac{\sum_{t-\frac{s}{2} \leq t_k < t} M_k}{N_{t-\frac{s}{2} \leq t_k < t}} - \frac{\sum_{t-s \leq t_k < t-\frac{s}{2}} M_k}{N_{t-s \leq t_k < t-\frac{s}{2}}};$$

$$\widetilde{F}_M(t_j, N) = \frac{1}{[N/2]} \left(\sum_{k=j-N+1}^{j-N+[N/2]} M_k - \sum_{k=j-[N/2]+1}^j M_k \right). \quad (5)$$

Квадратными скобками здесь и в других формулах обозначена целая часть числа.

Ускорение. Для второй и первой половины (по времени или числу событий, в зависимости от шкалы) усредняется интенсивность основных толчков, оцениваемая по интервалу времени между последовательными событиями. Рассматривается разность этих усредненных значений:

$$F_C(t, s) = \frac{\sum_{t-\frac{s}{2} \leq t_k < t} \frac{1}{t_k - t_{k-1}}}{N_{t-\frac{s}{2} \leq t_k < t}} - \frac{\sum_{t-s \leq t_k < t-\frac{s}{2}} \frac{1}{t_k - t_{k-1}}}{N_{t-s \leq t_k < t-\frac{s}{2}}};$$

$$\widetilde{F}_C(t_j, N) = \frac{1}{[N/2]} \left(\sum_{k=j-N+1}^{j-N+[N/2]} \frac{1}{t_k - t_{k-1}} - \sum_{k=j-[N/2]+1}^j \frac{1}{t_k - t_{k-1}} \right). \quad (6)$$

Рои. Наиболее эффективным среди большого числа кандидатов оказался следующий функционал. Рассмотрим, как обычно, события с магнитудой $M > M^*$ во временном или событийном окне, имеющие эпицентры внутри R -окрестности данной цепочки. Пусть $A_r(t)$ площадь объединения кругов радиуса r с центрами в этих эпицентрах,

тогда функционал имеет вид:

$$F_W(t, s) = 1 - \frac{A_r(t)}{\pi r^2 N_{t-s \leq t_k < t}}; \quad \widetilde{F}_W(t_j, N) = 1 - \frac{A_r(t_j)}{N \pi r^2}. \quad (7)$$

Вопрос о необходимости дополнительной нормировки исследовался экспериментально. Оказалось, что эффективность функционала выше, если нормировать r аналогично предельному расстоянию для соседей в определении цепочки с теми же значениями параметров s и r_0 : $r = r_0 10^{c(M^* - 2.5)}$

Афтершоковая активность. Среди нескольких функционалов, отражающих как число, так и энергию или суммарную площадь очагов афтершоков, наиболее устойчивым и эффективным оказался функционал, подсчитывающий значение Σ для афтершоков в первые два дня после соответствующих основных толчков с $M \geq M^*$ (соответственно, мы назвали предвестник "В-микро", или B_μ). Функционал, аналогично F_Σ , удачно нормируется значением M^* :

$$.F_{B_\mu}(t, s) = \sum_{t-s \leq t_k < t} \sum_l 10^{M_{kl}}; \quad \widetilde{F}_{B_\mu}(t_j, N) = \sum_{k=j-N+1}^j \sum_l 10^{M_{kl}}$$

Здесь M_{kl} - магнитуда l -ого афтершока от k -ого основного толчка; суммирование по l ведется за первые два дня после основного толчка.

Аккорд (возрастание радиуса корреляции). Предвестник Аккорд есть, по определению, близкая по времени активизация различных частей большой пространственной области. Для того чтобы избежать деления R -окрестности цепочек на подобласти, в качестве меры используется площадь объединения кругов с центрами в эпицентрах из рассматриваемого пространственно-временного окна. Если воспользоваться введенной выше величиной $A_r(t)$, то функционал имеет вид:

$$F_A(t, s) = \widetilde{F}_A(t, N) = \frac{A_r(t)}{\pi r^2} \quad (9)$$

Так же как и в случае функционала F_W , экспериментально было установлено, что эффективность выше, при нормировке $r = r_0 10^{c(M^* - 2.5)}$ и, таким образом, величина γ не является дополнительным параметром.

Гамма (график повторяемости). При отборе этого функционала мы рассмотрели более десятка вариантов, отражающих как просто уменьшение наклона графика повторяемости, так и излом графика в

области средних магнитуд. Наиболее эффективным оказался функционал, отражающий выполаживание графика в правой части:

$$F_G(t, s) = \widetilde{F}_G(t, N) = \frac{1}{N_{M_k \geq M_{1/2}}} \sum_{M_k \geq M_{1/2}} (M_k - M^*), \quad (10)$$

где $M_{1/2}$ - медиана распределения магнитуд в данном пространственно-временном окне.

Выбор значений параметров опирался на априорные соображения и лишь грубую оптимизацию без детального поиска оптимальных значений. Использование серии наборов параметров решило проблему универсальности в разных регионах. Для каждого из параметров, кроме p^* , было независимо выбрано по два значения, и, таким образом, общее число комбинаций составило восемь. Выбраны значения $T = 6$ и 12 мес; во временной шкале $R = 50$ и 100 км, $n^* = 20$, $s = 24$ и 60 мес, в событийной шкале $N = 20$ и 50, $R = 50$ км и $n = 10$ или $R = 100$ км и $n = 20$.

Методика автоматического определения порогов S_r для функционалов по материалу обучения. В материал обучения входят цепочки двух классов: D (предвестниковые) и N (не предшествовавшие сильному землетрясению). Определения функционалов выбраны так, чтобы их большие значения соответствовали классу D . Для каждого значения порога вычисляются относительные ошибки двух родов: доля цепочек класса N (ложные тревоги), для которых функционал превышает порог, и доля землетрясений-целей прогноза, для которого не нашлось цепочки класса D с превышением порога (пропуски цели). Автоматическое определение порогов состоит в минимизации суммарной относительной ошибки двух родов (в качестве порога выбирается середина интервала, в котором реализуется минимальное значение). Значения порогов в разных регионах определяются по материалу обучения для данного региона.

Распознавание предвестниковых цепочек. Задача состоит в том, чтобы на основе анализа поведения функционалов перед цепочками двух классов D и N в материале обучения распознавать, к какому из этих классов относится вновь возникшая цепочка. Для решения этой задачи мы используем простую меру распознавания образов, получившую название расстояние Хемминга. Наличие предвестника в каждом из 64 случаев фиксируется условием $\hat{F}_P(T) \geq C_P$, где $\hat{F}_P(T)$ - максимум функционала F_P в интервале времени T до начала цепочки. Таким образом, среднесрочные предвестники в R_{ai} -окрестности данной цепочки представляются 64-компонентным бинарным векто-

ром P_U . Решающее правило для отбора предвестниковых цепочек используется условие $|P_U| \geq C$.

Предполагаемая физическая основа подхода RTP. Возможный физический механизм, лежащий в основе методологии *RTP*, базируется на моделях динамических систем и геодинамики. Возрастание радиуса корреляции, проявлением которого являются цепочки, является известным симптомом критического перехода в статистической физике и бифуркации в нелинейной динамике. Можно предположить, что *RTP* идентифицирует редкие коротко-масштабные возмущения, которые сохраняют "память" о более длинно-периодной предыстории системы разломов (примером может служить известный эффект Кайзера в акустической эмиссии при разрушении горных образцов). Поэтому цепочки-предвестники формируются примерно в той же пространственной области, что и среднесрочные предвестники. По-видимому, процесс, включающий средне- и краткосрочные предвестники, проходит с ускорением, и цепочки эпицентров, имеющие масштаб времени порядка 10^{-1} лет, являются завершающим этапом в этом масштабе времени. Отметим, что как цепочки эпицентров, так и среднесрочные предвестники рассматриваемых типов являются спорадическими и ограниченными во времени явлениями, не обязательно отражающими устойчивый тренд сейсмичности. Поэтому естественно предполагать, что оба явления являются симптомами, но не причинами сильных землетрясений: они сигнализируют о его приближении, но не являются спусковым механизмом. Возрастание радиуса корреляции сейсмичности, лежащий в основе нашей методики, является, по-видимому, возрастанием радиуса именно корреляции, а не взаимодействия. Конкретные физические механизмы возрастания радиуса корреляции сейсмичности, спорадический характер и пространственной корреляции средне- и краткосрочных предвестников еще предстоит выяснить.

С практической точки зрения методология обратного прослеживания предвестников не исключает, а дополняет прямой последовательный анализ. Этот алгоритм не дает среднесрочного прогноза с периодом ожидания более года, имеющего важное самостоятельное значение для проведения очень многих защитных мероприятий в зоне ожидаемого сильного землетрясения (таких как ревизия и укрепление зданий и сооружений, обучение различного персонала и т.д.).

Главным недостатком алгоритма *RTP* пока остается большая пространственная область тревоги. Этот недостаток в дальнейшем может быть устранен как в рамках подхода *RTP*, так, возможно, и прямого анализа.

Глава 4. Ретроспективные тесты прогнозного алгоритма *RTP*.

Эта глава посвящена ретроспективному анализу прогнозов по алгоритму *RTP* в тех же восьми сейсмоопасных регионах, в которых ведется экспериментальный прогноз вперед по алгоритму *RTP*. Перечислим основные вопросы, ответы на которые являются целью главы. Как влияет выбор материала обучения на автоматическое определение порогов C_P , и, как следствие, на результаты прогноза? Насколько эффективен прогнозный алгоритм и в какой степени результаты прогноза являются нетривиальными, то есть насколько они отличаются от случайного угадывания? Является ли отличие результатов прогноза от случайного угадывания статистически значимым?

Для исследования стабильности распознавания в каждом регионе мы будем варьировать материал обучения, последовательно увеличивая его на одну цепочку. Рассматриваются результаты распознавания всех имеющихся цепочек, включая материал обучения. Порог голосования C выбирается оптимизацией эффективности $\zeta_{RTP}(C)$, определенной как дополнение до единицы суммарной относительной ошибки распознавания. Тест проводится с функционалами, определенными как во временной, так и в событийной шкале; его результаты позволяют, в том числе, выбрать в качестве основного один из вариантов для дальнейших тестов и для прогноза вперед.

Такая же схема анализа удобна для тестов со случайным каталогом. В каждом регионе мы проведем три теста. Для удобства сопоставления с результатами, полученными по реальным данным, во всех трех тестах сильные землетрясения - цели прогноза совпадают с целями прогноза в реальном тесте. Рандомизированный каталог землетрясений используется либо для идентификации цепочек (вариант а), либо для распознавания цепочек по среднесрочным предвестникам (вариант б), либо и для того, и другого (вариант в). В тесте (а) проверяется базовая гипотеза о пространственной корреляции средне- и краткосрочных предвестников. В тесте используются лишь те реализации случайного каталога, которые дали комбинацию цепочек без пропусков цели. В большинстве регионов для этого потребовалось сгенерировать несколько тысяч (в некоторых регионах десятков тысяч) реализаций. Тест (б) служит для проверки фактора случайности при распознавании реальных цепочек. Если результаты таких тестов мало отличаются от реальных ретроспективных результатов, то это, скорее всего, означает, что алгоритм распознавания малоэффективен. Тест (с) служит для дополнительной проверки всей схемы прогноза.

Рассмотрим описанные тесты на примере региона Южной Калифорнии. В этом регионе диагностировано 54 цепочки, из них две в

данной главе не рассматриваются, поскольку с момента их окончания еще не прошло $T_{al} = 9$ месяцев. Уже при обучении по примерно 40% цепочек (три сильных землетрясения), по функционалам как в событийной, так и временной шкалах, результат ретроспективного прогноза (рис. 3) весьма устойчив и эффективен. Начиная с 60% цепочек и четырех сильных землетрясений в обучении суммарная ошибка распознавания составляет около 10% и менее. В качестве основного варианта мы рассматриваем вариант распознавания по функционалам во временной шкале с материалом обучения, состоящим из 35 цепочек (пять сильных землетрясений).

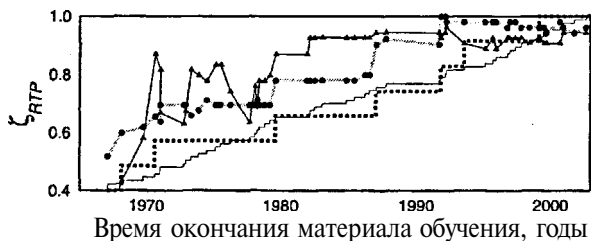
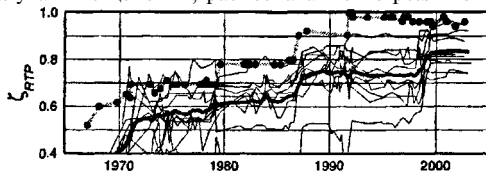


Рис. 3: Результаты проверки в регионе 1 (Южная Калифорния) устойчивости ретроспективного прогноза. В тесте последовательно увеличивалось на единицу число цепочек в материале обучения. Порог голосования S оптимизировался по максимуму ζ_{RTP} эффективности распознавания $\zeta_{RTP}(S)$. Кружками отмечены зависимости ζ_{RTP} от времени окончания материала обучения для функционалов во временной шкале, треугольниками — в событийной шкале. Тонкой и пунктирной линиями показаны доля цепочек и доля сильных землетрясений, вошедших в обучение.

Тесты со случайным каталогом (рис. 4) убедительно показывают, что, во-первых, реальные R -окрестности цепочек дают намного лучшие результаты распознавания по среднесрочным предвестникам, чем R -окрестности случайных цепочек (тест а); во-вторых, распознавание по реальному каталогу значительно отличается от распознавания по случайному каталогу (тест б). Ни один из десяти вариантов распознавания по случайному каталогу (обучение до 1992 г. включительно) не дает результатов близких к распознаванию по реальным данным.

Результаты тестов в остальных семи регионах в целом аналогичны результатам в Южной Калифорнии. Везде наблюдается высокая устойчивость результатов к изменению материала обучения. Скачки оценок эффективности приурочены в подавляющем большинстве случаев к добавлению в обучение еще одного сильного землетрясения. Сводка результатов основных вариантов ретроспективного про-

а) случайные цепочки, распознавание по реальному каталогу



б) реальные цепочки, распознавание по случайному каталогу

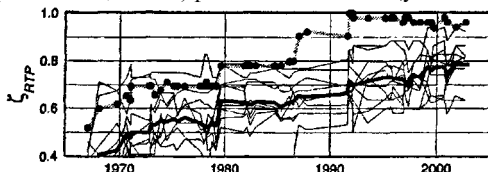


Рис. 4: Результаты тестов со случайным каталогом при увеличении материала обучения в регионе 1 (Южная Калифорния). Кружками и серой жирной линией показан результат с реальными данными. Тонкие линии соответствуют 10 реализациям случайного каталога в данном тесте; жирная линия представляет усреднение по этим 10 вариантам.

гноза приведена в таблице 2. В качестве основных рассматриваются варианты ретроспективного прогноза, выбранных так, чтобы при минимальном возможном объеме материала обучения с функционалами либо во временной, либо событийной шкале, результат прогноза был приемлемым. Мы видим, что оценка $\hat{\tau}$ составляет около 10% при небольшом числе пропусков цели. Эта значение оценивает вероятность того, что землетрясение-цель прогноза произойдет случайно в пространственно-временной области тревог, или вероятность случайного угадывания. При прогнозе вперед достижение такой эффективности было бы большим успехом. Результаты проведенных тестов со случайным каталогом позволяют надеяться, что реальная эффективность окажется примерно такой же.

В тестах (а) эффективность прогноза во всех регионах в среднем значительно хуже, чем при распознавании реальных цепочек. Это подтверждает исходную гипотезу о пространственной корреляции средне- и краткосрочных предвестников.

Проведенные тесты позволяют сравнить эффективность отдельных предвестников путем осреднения оценок индивидуальной эффективности каждого предвестника по всем комбинациям параметров отдельно и вместе по всем рассмотренным регионам. Обращает на себя внимание однородность усредненных оценок: лидер по всем регионам,

Регион	$\hat{\tau}$, %	N_t	$n_{fp}^{(1)}$	$n_{fp}^{(2)}$	$n^{(1)}$	$n^{(2)}$	$n_{fa}^{(O)}$	$n_{fa}^{(T)}$
1	8.3	7	0	0	52	8	0	0
2	12.4	3	0	0	10	4	0	1
3	4.9	3	0	0	23	4	1	0
4	7.9	5	0	0	38	7	2	0
5	18.4	9	1	0	28	10	1	2
6	1.9	2	0	0	11	2	0	0
7	12.5	5	0	0	58	10	1	3
8	9.6	6	0	1	22	5	1	0

Таблица 2: Сводная таблица основных результатов ретроспективного прогноза сильных землетрясений по алгоритму *RTP*. Обозначения: $\hat{\tau}$ пространственно-временной объем тревог, N_t - число землетрясений-целей прогноза, $n_{fp}^{(1)}$ - число пропусков на первом этапе алгоритма *RTP*, $n_{fp}^{(2)}$ - число пропусков цели на втором этапе, $n^{(1)}$ - число идентифицированных цепочек на первом этапе, $n^{(2)}$ - число цепочек, распознанных как предвестниковые на втором этапе, $n_{fa}^{(O)}$ - число ложных тревог в интервале обучения, $n_{fa}^{(T)}$ - число ложных тревог в интервале теста.

предвестник B_μ , не намного отличается от аутсайдера, предвестника A . В каждом отдельном регионе отличие крайних значений усредненной эффективности предвестников несколько больше. Помимо B_μ , в среднем по всем регионам наибольшей эффективностью отличаются предвестники Σ (активность по суммарной площади разрывов) и G (изменение графика повторяемости).

Глава 5. Первые результаты прогноза вперед по алгоритму *RTP*. Алгоритм *RTP* в нынешнем виде был разработан к лету 2003 г. и был представлен автором 1 июля и 2 июля на Генеральной Ассамблее Международного союза геодезии и геофизики (IUGG) в Саппоро. В обоих докладах был продемонстрирован текущий прогноз для обширной территории (рис. 5). Прогноз был дан на период до конца 2003 года. 25 сентября вблизи Хоккайдо, в области прогноза, произошло землетрясение с $M_W = 8.3$. В середине 2002 года в центральной Калифорнии была идентифицирована цепочка эпицентров. Ее исследование не дало оснований считать ее предвестниковой, однако она послужила толчком к проведению совместных прогнозных исследований групп В.И. Кейлис-Борока и К. Аки в центральной Калифорнии. По методике Аки была идентифицирована среднесрочная тревога в

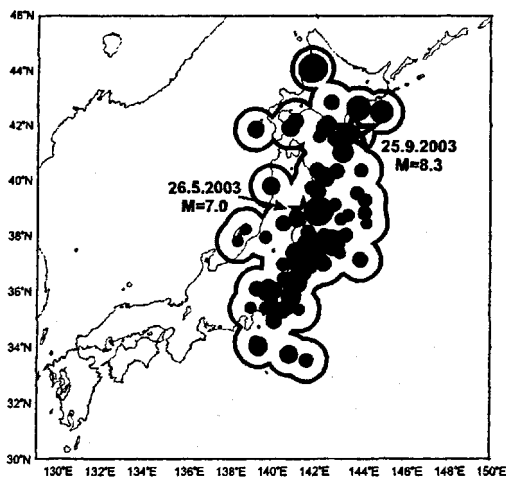


Рис. 5: Прогноз вперед по алгоритму *RTP* землетрясения Токачи-Оки, Хоккайдо, Япония, 25 сентября 2003 г., $M=8.3$. Оконтуренная область - R -окрестность цепочки ($R=100$ км), область прогноза землетрясения с $M \geq 7.0$ на период до 31.12.2003; темные кружки - эпицентры, формирующие цепочку (размер кружков возрастает с магнитудой). Звездочки — эпицентры сильных землетрясений, которые произошли в области и в период тревоги.

регионе. В мае 2003 года возникла новая цепочка эпицентров, на этот раз уверенно распознанная как предвестниковая. В июне 2003 года был подготовлен и разослан документ, содержащий как среднесрочный прогноз по методике Аки, так и более краткосрочный прогноз по методике *RTP* на период 27 мая 2003 г. - 28 февраля 2004 г. (рис. 6). Прогноз подтвердился 22 декабря 2003 г., когда произошло землетрясение вблизи г. Сан Симеон, Калифорния, с магнитудой $M = 6.5$. Успешный прогноз двух землетрясений подряд без ложных тревог и пропусков цели стимулировал расширение областей применения алгоритма. Определяющим при этом было наличие приемлемого каталога землетрясений за достаточно длительный срок. В восьми регионах, ретроспективный прогноз в которых описан выше, к началу 2004 года уже были проведены предварительные тесты, и стало ясно, что алгоритм в его второй части, распознавании цепочек, применим с единым набором параметров в разных регионах. Параметры выделения цепочек, тем не менее, пришлось оптимизировать в каждом регионе отдельно. Но и при этом наиболее чувствительные пространственные

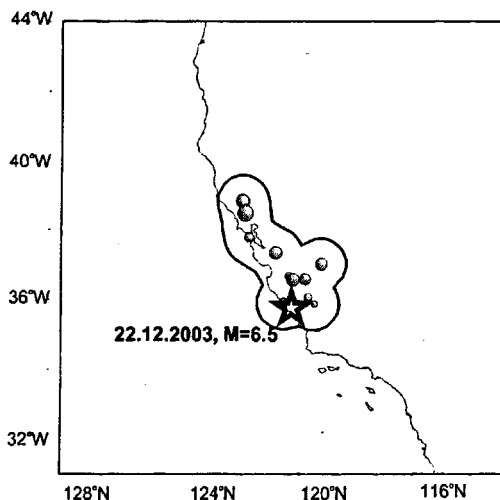


Рис. 6: Прогноз вперед по алгоритму *RTP* землетрясения Сан Симеон, Калифорния, США, 22 декабря 2003 г., $M=6.5$. Обозначения как на рис. 5 ($R = 50$ км). Землетрясение с $M > 6.4$ ожидается в период 27.05.2003 - 28.02.2004.

параметрыго и с удалось оставить стандартными во всех регионах. Исключение составляет дальневосточный регион (5). В этом регионе используется каталог *JMA*, в котором в середине 2003 года была проведена замена всей системы магнитуд. К счастью, для предыдущего периода магнитуды были пересчитаны по новой методике, но изменения были настолько существенны, что примерно на 5% изменился наклон графика повторяемости. Небольшая коррекция параметра c (от 0.35 до 0.33) позволила сохранить в целом структуру цепочек эпицентров, полученных ранее по старому каталогу.

В экспериментальном прогнозе по алгоритму *RTP* пока рассматривается восемь регионов, перечисленных в таблице 1. Для каждого прогноза по методике, описанной в главе 1, определяется, насколько он нетривиален, а по результатам большого числа дополнительных тестов оценивается вероятность ложной тревоги. Методика этих оценок приводится ниже. Прогнозы с вероятностью ложной тревоги менее 0.5 документируются путем рассылки краткого сообщения в стандартной форме ведущим специалистам и в заинтересованные организации.

Для практических целей очень важной характеристикой конкретного прогноза является оценка вероятности того, что объявленная

тревога является ложной. Очевидно, что чем меньше эта вероятность, тем более действенные и дорогостоящие меры по предотвращению ущерба целесообразно принимать. Адекватно оценить эту вероятность сложно из-за являющегося нормой недостатка ретроспективных данных и влияния дополнительных факторов. Мы рассмотрим три группы тестов и оценок. В первой группе исследуется стабильность данной цепочки, ее возможные отличия от цепочек, которые были диагностированы как предвестниковые, и сходство с ложными тревогами. Вторая группа включает тесты, в которых в качестве материала обучения для настройки алгоритма распознавания цепочек (определения порогов C_P и C) используется часть имеющихся данных, а по оставшейся части оценивается прогноз. Конечно, при этом подходе анализируемая часть данных не является полностью независимой; частично это будет компенсироваться массовостью тестов. В третьей группе проводится сравнительное исследование распознавания данной цепочки и ретроспективных результатов при изменении некоторых элементов алгоритма.

Рассмотрим эти тесты на примере прогноза в Южной Калифорнии, представляющего особый интерес из-за повышенного внимания к нему американской прессы. Тревога сформировалась в самом начале 2004 года, и о ней было сообщено коллегам и руководству Геологической службы США одновременно с информацией об успешном прогнозе вперед землетрясения Сан Симеон. Область прогноза землетрясения с магнитудой 6.4 охватывает малонаселенные районы пустыни Мохаве и к югу от нее вплоть до границы с Мексикой. Широкий резонанс прогноз получил не только в прессе. По инициативе Директора Южнокалифорнийского центра землетрясений (Southern California Earthquake Center, SCEC) Т. Джордана 20 февраля 2004 г. SCEC совместно с Геологической службой США организовали конференцию, специально посвященную этому прогнозу предварявшую заседание Калифорнийского совета по оценке прогнозов землетрясений (California Earthquake Prediction Evaluation Council, CEPЕC), который после некоторых колебаний признал методику законным подходом для прогноза. 5 сентября 2004 года истекло время рассматриваемой тревоги. Таким образом, тревога квалифицируется как ложная.

Рассмотрим сначала *особенности цепочки*. Она воспроизводится при минимальных значениях $r_0 = 46.5$ км и $\tau = 19.7$ дней, то есть почти на пределе по параметру τ . Еще одно ее отличие от всех рассмотренных предвестниковых цепочек в регионе состоит в небольших значениях магнитуды формирующих ее событий. При неформальном рассмотрении можно предположить, что данная цепочка была диагно-

стирована случайно. Другая возможная интерпретация особенностей цепочки может быть связана с величиной ожидаемого землетрясения. Для данной цепочки $\hat{m} = 3.0$, отсюда в соответствие с рис. 2, магнитуда ожидаемого землетрясения составляет 6.0 ± 0.6 (то есть вблизи нижнего предела $M_0 = 6.4$ землетрясений-целей прогноза).

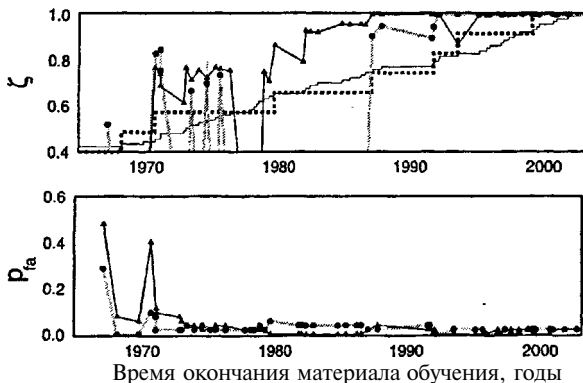


Рис. 7: Тест "сейсмическая история" для текущей тревоги в южной Калифорнии при последовательном увеличении материала обучения. Рассматривается три группы цепочек: О (обучение), Т (тест) и А (анализируемая цепочка). Пороги C_p определяются по цепочкам О. Эффективность распознавания ζ посчитана по цепочкам Т для значения C , оптимизированного по цепочкам О и Т. Величина p_{fa} - это доля ложных тревог, которые были бы диагностированы среди цепочек Т при значении порога C , равного голосованию $|P_U|$ для анализируемой цепочки; она дает оценку вероятности ложной тревоги. Кружками показаны результаты для функционалов во временной шкале, треугольниками - в событийной шкале. Тонкой и пунктирной линиями показаны доля цепочек и доля сильных землетрясений, вошедших в обучение.

В тесте "Сейсмическая история" мы будем последовательно увеличивать материал обучения на одну цепочку, начиная с первых двух по времени. На материале обучения автоматически определяются пороги C_p и алгоритм распознавания применяется к оставшимся цепочкам. Параллельно оценке ζ для каждого полученного набора порогов C_p подсчитывается голосование $|P_U|$ для анализируемой цепочки (текущей тревоги), и это значение затем берется в качестве порога C . С таким значением C мы подсчитаем долю p_{fa} ложных тревог. Анализ поведения величины ζ позволяет выбрать ту группу вариантов материала обучения, для которой "прогноз" оставшейся части устойчив и оптимален. Разброс значений p_{fa} для данной группы и дает

представление о вероятности того, что анализируемая цепочка окажется ложной тревогой. Тест "Обратная сейсмическая история" аналогичен предыдущему, но материал обучения изменяется в обратном направлении. Сначала берутся все цепочки, кроме "текущих", затем последовательно исключаются более ранние цепочки. Идея теста состоит в том, что каталог землетрясений для более ранних периодов может быть менее полон, поэтому из рассмотрения последовательно удаляется начальная часть данных.

Результаты двух тестов приведены на рис. 7 и 8. Варианты в обеих шкалах демонстрируют поразительную устойчивость и почти безошибочный "прогноз" для всех вариантов материала обучения, когда в него включено четыре сильных землетрясения. Величина p_{fa} лежит в пределах 0.05.



Рис. 8: Тест "обратная сейсмическая история" для текущей тревоги в южной Калифорнии. Время начала материала обучения последовательно увеличивается. По цепочкам, вошедшим в материал обучения, вычисляется эффективность распознавания ζ и величина p_{fa} , равная доли ложных тревог при выборе порога C , равного голосованию $|P_U|$ для анализируемой цепочки. Остальные обозначения как на рис. 7.

Другие тесты удобно проводить в форме теста "сейсмической истории". В стандартном алгоритме при автоматическом выборе порогов C_p ошибки двух родов учитываются с одинаковым весом. В тестах альтернативные стратегии выбора порогов C_p были рассмотрены также "мягкая" (большой вес придается пропускам цели) и "жесткая" (большой вес придается ложным тревогам) стратегии. Для рассматриваемой тревоги тест с "мягкой" стратегией выбора порогов оказался единственным, в котором оценка p_{fa} оказалась сравнительно высокой:

0.2 — 0.4. В тестах по *вариации набора функционалов* последовательно исключаются разные их комбинации: отдельные предвестники (все 8 функционалов), малоэффективные функционалы (ζ_p ниже заданного значения). Эти тесты показали, во-первых, очень высокую стабильность оценок при высокой эффективности прогнозов, во-вторых, оценка p_{fa} оказалась в пределах от 0 до 0.1 (в большинстве случаев даже от 0 до 0.05).

Таким образом, большинство проведенных тестов приводит к оценке p_{fa} в пределах 0.1. Вместе с тем, сама цепочка является, во-первых, не очень устойчивой, а, во-вторых, состоит из более слабых событий по сравнению с состоявшимися предвестниковыми цепочками. Несмотря на то, что период тревоги закончился, с учетом высокой устойчивости прогноза в различных тестах и низкой оценки вероятности ложной тревоги в пространственной области тревоги, вне формальных рамок методики, по мнению автора, по-прежнему следует ожидать сильное землетрясение. При этом северная часть области представляется более опасной.

Прогноз в северных Динаридах. Предвестниковая цепочка в регионе 7 (Долина По, Альпы и северные Динариды) была диагностирована 29 февраля 2004 года (Рис. 9). Прогноз был документирован 12 мая 2004 года. Ремлетрясение с $M > 5.5$ (предпочтение отдается Гарвардским оценкам $M_{цг}$) ожидается в пространственной области, показанной на рис. 9 до 28 ноября 2004 года. Описанные выше стандартные тесты для данной тревоги демонстрируют устойчивость цепочки и дают оценку p_{fa} в пределах 0 — 0.1. 12 июля 2004 года в

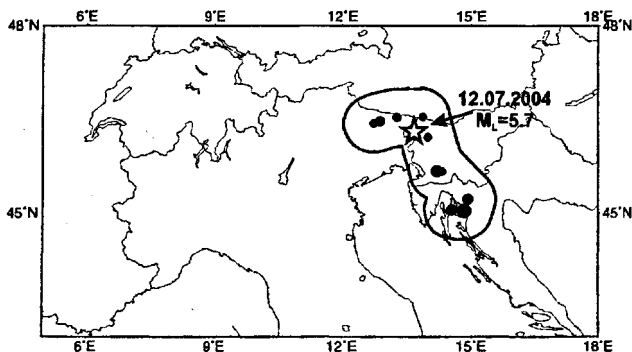
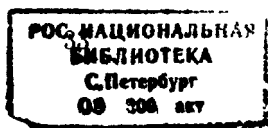


Рис. 9: Прогноз вперед землетрясения в северных Динаридах по алгоритму RTP. Обозначения как на рис. 5 ($R = 50$ км). Прогноз землетрясения с $M > 5.5$ диагностирован на период 29.2.2004-28.11.2004.



области тревоги произошло сильное землетрясение (его эпицентр обозначен звездочкой на рис. 9). Гарвардская группа не определила магнитуду M_W этого землетрясения, однако, по данным Геологической службы США, магнитуда события оценивается как $M_L(STR) = 5.7$. Таким образом, прогноз можно считать подтвердившимся. Отметим, что тревога остается действительной вплоть до 28 ноября 2004 года.

Прогноз в Японии. После предсказанного по алгоритму *RTP* землетрясения Токачи-Оки в регионе Хонсю-Хоккайдо-Южные Курилы была диагностирована новая тревога. Цепочка оканчивается 8 февраля 2004 г., поэтому время окончания тревоги - 8 ноября 2004 г.; она была документирована 1 июня 2004 года. Область тревоги изображена на рис. 10. Перечислим основные результаты проведенных стандарт-

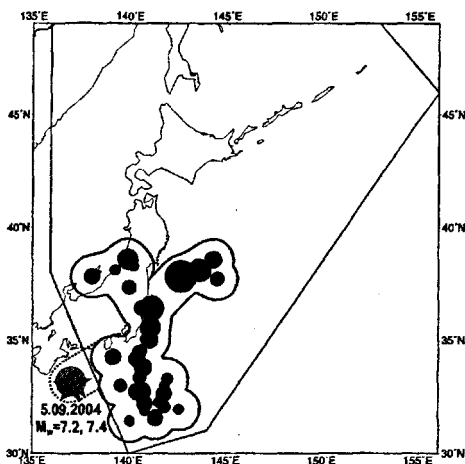


Рис. 10: Область прогноза вперед по алгоритму *RTP* в регионе Хонсю-Хоккайдо-Южные Курилы. Основные обозначения как на рис. 5. Землетрясение с $M_W(HRV) > 7.2$ ожидается до 8 ноября 2004 года. Пунктирной линией показана область, которая была бы включена в область тревоги при более широких границах региона; кружок в ней отмечает соответствующий эпицентр, который был бы добавлен в цепочку. Распознавание цепочки при этом не изменилось бы.

ных тестов. Во-первых, оказалось, что более стабильны и эффективны в данном регионе результаты распознавания с "жесткой" стратегией выбора порогов S_p . При такой стратегии больший вес придается ложным тревогам и, таким образом, значения порогов выше, чем в стандартной версии. Оценки $p_{fa} \approx 0.2$ для текущей тревоги оказались

Местоположение	Интервал прогноза (дата документа)	Земле- трясение	P	p_{fa}
Япония	31.03.2003-31.12.2003 (1.7.2003)	25.09.2003 $M_W = 8.3$	0.25	<0.5
Ц. Калифорния	27.05.2003-28.02.2004 (24.6.2003)	22.12.2003 $M_L = 6.5$	0.051	<0.5
Юж. Калифорния	05.12.2003-05.09.2004 (10.01.2004)	Ложная тревога	0.078	<0.1
С. Динариды	29.02.2004-28.11.2004 (12.05.2004)	12.07.2004 $M_L = 5.7$	0.067	<0.1
Ц. Япония	31.03.2003-08.11.2004 (01.07.2004)	05.09.2004 $M_W = 7.4^a$	0.074	0.1-0.2

^a Два землетрясения 5.9.2004, $M_W = 7.2$ и $M_W = 7.4$, имеют эпицентры вне рассматриваемого региона вблизи области тревоги

Таблица 3: Сводная таблица прогнозов вперед по методу *RTP*.

в этом варианте очень стабильными. В других стандартных тестах оценка p_{fa} колебалась в пределах 0.1 — 0.2.

5 сентября вблизи области тревоги произошло сразу два землетрясения с $M_W > 7.2$. В результате неудачного выбора границ их эпицентры оказались вне рассматриваемого региона и, соответственно, вне области тревоги. Если изменить границу региона, то оба эпицентра попадают в область тревоги. При этом даже значительное расширение границ не привело бы к дальнейшему увеличению цепочки. Заметим, также, что за последние 50 лет к югу от установленной границы региона вплоть до южной оконечности Японских островов землетрясения с $M_W > 7.2$ зарегистрированы не были. Поскольку эти уточнения сделаны апостериори, данный случай нельзя рассматривать как успешный прогноз вперед. Но, несомненно, ярким неформальным подтверждением методики он является.

Результаты всех сделанных к настоящему моменту прогнозов по методу *RTP* и оценки стационарной вероятности того, что землетрясение заданной силы произойдет в пространственно-временной области прогноза (вероятности случайного угадывания), P , и оценки вероятности ложной тревоги p_{fa} суммируются в таблице 3. Со времени начала эксперимента по прогнозу вперед цепочки возникли также в Восточной и Северной Калифорнии и в Восточном Средиземноморье. Все три цепочки распознаются как не опасные (вероятность ложности

тревоги во всех трех случаях превышает 0.7). Сильные землетрясения в этих регионах за данный период не происходили.

Глава 6. Пока не использованные возможности. В главе предложены некоторые пути совершенствования метода *RTP* в его наиболее уязвимой части - большой пространственной области прогноза. Каждое из направлений уже достаточно проработано автором в работах, не связанных с конкретной темой диссертации. В диссертации же они рассматриваются в прямой связи с методом *RTP*. *Анализ афтершоковых последовательностей.* Один из немногих достаточно надежно установленных универсальных законов поведения сейсмичности - закон Омори, в соответствие с которым число афтершоков в единицу времени убывает степенным образом. Вместе с тем, закон Омори не всегда выполняется или его выполнение ограничено временными рамками. В начале серии число афтершоков в единицу времени $\Lambda(t)$ практически всегда оказывается меньше ожидаемого в соответствие с законом Омори. Возможная физическая интерпретация дефицита афтершоков в начале серии может быть дана на основе модели, недавно предложенной автором совместно с К. Нарто и М. Хольпнайдером; работа стала естественным продолжением цикла работ с участием автора по моделированию афтершоковых последовательностей в рамках известной модели К. Аллегра и Ж.-Л. Ле Муэля *S. O.F. T.*

В результате землетрясения образуется сильно неоднородное поле повышенных напряжений на отдельных участках некоторой пространственной области очага землетрясения и его окрестностей; эти напряжения постепенно релаксируют за счет афтершоков. Предположим, что в процессе релаксации эти отдельные участки, "потенциальные афтершоки", не взаимодействуют между собой. Время жизни каждого участка до разрушения (момента возникновения афтершока) зависит от "перегрузки" σ_0 , параметра, характеризующего разность напряжения и прочности (явления "статическая усталость" и "коррозия напряжения"). Такой характер релаксации можно описать Марковским процессом со стационарной частотой перехода $\lambda(\sigma_0)$. Мы рассматриваем два варианта зависимости $\lambda(\sigma_0)$: (а) экспоненциальную $\lambda(\sigma_0) = \lambda_a e^{\frac{\sigma_0}{\sigma_a}}$ и (б) степенную $\lambda(\sigma_0) = \lambda_a (\frac{\sigma_0 + \sigma_a}{\sigma_a})^\delta$, где $\sigma_a \geq 0$ - масштабный параметр. В предположениях что каждый нагруженный участок может дать афтершок лишь один раз, и равномерного распределения перегрузки на отрезке $[0, s]$ оба варианта приводят к общему выражению:

$$\Lambda(t) = A \frac{\gamma(p, \lambda_b t) - \gamma(p, \lambda_a t)}{t^p}, \quad (11)$$

где $\lambda_b = \lambda(s)$, A - константа, $\gamma(\rho, x) = \int_0^x \tau^{\rho-1} e^{-\tau} d\tau$ - неполная Гамма-функция. При этом для случая (а) $p = 1$, $\lambda_b = \lambda_a e^{\frac{s}{\sigma_a}}$, а для случая (б) $p = 1 + 1/\delta$, $\lambda_b = \lambda_a \left(\frac{s + \sigma_a}{\sigma_a}\right)^\delta$. Отметим также, что вариант (б) в пределе при больших значениях δ эквивалентен варианту (а).

Выражение (11) в широком диапазоне времен и значений параметров мало отличается от закона Омори и, таким образом, предложенная модель дает физическую интерпретацию закона Омори, а формула (11) является его обобщением. В соответствии с моделью, чем больше величина s , то есть чем большая неоднородность напряжений возникает после основного толчка и чем больших значений достигает перегрузка σ_0 , тем раньше начинается степенной характер убывания числа афтершоков. Важно отметить, что характер функции $\Lambda(t)$ остается аналогичным и для более сложных распределений $N_0(\sigma_0)$. Например, в варианте (а) зависимости $\lambda(\sigma_0)$ для экспоненциально убывающего распределения $N_0(\sigma_0) = N_0 e^{-\frac{\sigma_0}{\sigma_c}}$, так же справедлива формула (11), при этом $p = 1 - \frac{s}{\sigma_c}$. Это, в частности, объясняет иногда получаемые оценки $p < 1$, физически необъяснимые из-за отсутствия сходимости последовательности афтершоков. Поскольку в формулу (11) величина s не входит в явном виде, то λ_b приобретает смысл самостоятельной меры напряженного состояния среды.

Параметры A , λ_a , λ_b , p формулы (11) мы оцениваем по фактическим наблюдениям афтершоков методом максимального правдоподобия. Если предположить постоянство зависимости $\lambda(\sigma_0)$ в рассматриваемом пространственном объеме, то вполне закономерным окажется совместный анализ нескольких афтершоковых последовательностей ("стеков") с совмещением времени соответствующих основных толчков, так как с точки зрения модели безразлично, в каком объеме рассматривается распределение $N_0(\sigma_0)$, вблизи одного основного толчка или вблизи некоторой совокупности основных толчков. В последнем случае получаемая оценка λ_b будет интегральной характеристикой напряженного состояния всего рассматриваемого пространственного объема. При использовании стеков мы можем исключить из рассмотрения серии афтершоков от сильных основных толчков, так как суммарное число афтершоков в небольших сериях может оказаться достаточным для надежных оценок. Это позволит избавиться от искажения оценок за счет неполноты каталога после достаточно сильных событий.

Пример такого анализа приведен на рис. 11. Мы видим, что ожидаемое резкое уменьшение λ_b после сильных землетрясений действительно имеет место. На рисунке виден и другой ожидаемый, но менее

очевидный факт: оценки λ_b плавно возрастают перед сильными землетрясениями, и землетрясения происходят на максимуме оценок. Интересно отметить, что в области текущей тревоги в южной Калифорнии (область 2 на рисунке) величина λ_b снизилась после землетрясения Гектор Майн в 1999 г., но затем снова достигла высокого значения. Это усиливает прогноз, сделанный по алгоритму *RTP*. Исходя из опи-

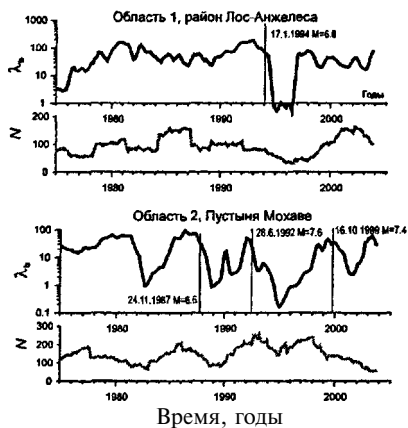


Рис. 11: Оценки λ_b по "стекам" афтершоков от землетрясений с $2.5 < M < 4.5$ в двух областях в южной Калифорнии. Область 1 примерно совпадает с R-окрестностью предвестниковой цепочки перед землетрясением Нортридж в 1994 г., область 2 - е областью текущей тревоги. На графиках показано также число N афтершоков, использованных для оценки λ_b .

санной модели можно надеяться, что анализ афтершоков поможет и лучшей локализации очага будущего землетрясения. При использовании более слабых событий есть шанс научиться пространственно локализовывать области высоких значений λ_b , то есть области большей неустойчивости, в которых естественно и ожидать предстоящее землетрясение.

Сейсмическое обращение. Совместная работа автора с академиком В.И. Кейлис-Бороком по прогнозу землетрясений началась в конце 80-х годов. С самого начала ставилась задача перехода к более краткосрочному прогнозу. Первым результатом оказался прогноз не столько краткосрочный, сколько более локализованный в пространстве. Сначала было обнаружено, что слабая сейсмичность, обычно сильно локализованная вдоль линейных структур (в качестве линейных структур использовались морфоструктурные линеаменты), за какое-то время до сильного землетрясения (от нескольких месяцев до двух лет) ме-

няет свою пространственную приуроченность: на фоне затишья вдоль линейных структур происходит активизация в остальном объеме. Эффект имеет пространственный размер в несколько линейных размеров будущего очага. Явление получило название "сейсмическое обращение" *seismic reversal*, *SR*. Аналогичное явление хорошо известно как "бублик Моги", но в нашем случае кольцеобразные структуры не наблюдались.

В дальнейшем аналогичный эффект удалось получить путем анализа только каталога землетрясений без использования морфоструктурных линейментов. Идея состоит в следующем. Все события в каталоге (афтершоки не исключаются) делятся на две группы: *A* и *N*. События *A* имеют эпицентры там, где уровень сейсмичности долговременно локально относительно высок, а события *N* - там, где он низок. Затем с определенным шагом по времени рассматриваемая территория сканируется кругами фиксированного радиуса (обычно 50 или 75 км), в которых в коротком временном окне (обычно 2 или 3 месяца) подсчитывается число событий *A* и *N* (обычно используются события с $M > 2.5$, если позволяет представительность каталога). Затем выделяется область, образованная компактным множеством кругов, в которых отношение числа событий *N* к числу событий *A* велико (обычно 5 или более). Эта область и формирует область прогноза на период T_{al} (обычно 1.5 или 2 года). В модификации алгоритма вместо сканирования кругами используется подход, аналогичный цепочкам эпицентров. В отличие от определения цепочки, допустимое расстояние между "соседями" не зависит от магнитуды. При таком подходе подсчитывается отношение числа событий *N* к числу событий *A* для всей цепочки.

Главный недостаток алгоритма *SR*, из-за которого он не получил широкого распространения, это сравнительно большое число ложных тревог. При совместном использовании с алгоритмом *RTP* этот недостаток может быть устранен, поскольку автоматически исключаются ложные тревоги вне тревог по *RTP*. Пространственная же локализация прогноза по алгоритму *SR* существенно лучше, чем по алгоритму *RTP*.

Рассмотрим возможности совместного использования алгоритмов *RTP* и *SR* на примере региона Долина По, Альпы и Северные Динариды. Используется версия алгоритма *SR*, основанная на построении цепочек, аналогичных рассмотренным в главе 1. Максимальное расстояние между "соседями" не зависит от магнитуды, оно принято равным 30 км. В цепочку добавляются эпицентры *A* и *N*, если они являются "соседями" по отношению к эпицентрам *N* (но не *A*) внут-

ри цепочки. Максимальное расстояние по времени τ принято равным 30 дням. Рассматриваются все события с $M > 2.5$. Прогноз по SR диагностируется в 75 км-окрестности цепочки на период 2 года, если эпицентры TV составляют как минимум 85% от общего числа эпицентров в цепочке. Окончательно, в качестве пространственно-временной области прогноза рассматривается пересечение областей прогноза по RTP и по SR (Рис. 12). Использование алгоритма SR в дополнение к RTP позволяет как минимум вдвое сократить пространственный размер тревог, правда, за счет одного пропуска цели. Отметим, что в данном регионе алгоритм SR ранее не применялся. Близкие результаты, но без пропусков цели, были получены в соседнем регионе, Центральные Апеннины. Аналогичные исследования, очевидно, целесообразно провести и в других регионах, особенно там, где ведется эксперимент по прогнозу вперед по алгоритму RTP .

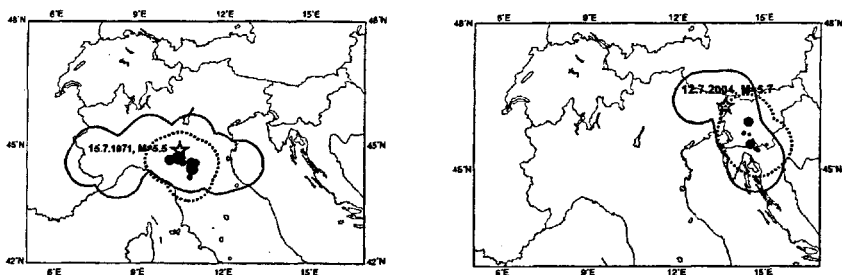


Рис. 12: Примеры совместного применения алгоритмов RTP и SR в регионе Долина По, Альпы и Северные Динариды. Сплошной линией оконтурена область прогноза по алгоритму RTP , пунктирной - по алгоритму SR , темные кружки — эпицентры, сформировавшие прогноз по SR , звездочками отмечены эпицентры сильных землетрясений-целей прогноза. Землетрясение 12.07.2004 произошло после публикации результатов.

Закключение. Диссертационная работа подводит итог исследованиям автора, проводившимся в период 1981-2004 гг. по разным аспектам изучения землетрясений и направленным в той или иной степени на решение проблемы прогноза. Конкретное содержание работы охватывает в основном период в последние несколько лет, когда работа была сосредоточена на решении задачи прогноза сильных землетрясений с периодом ожидания несколько месяцев. По разработанному автором методу RTP , основанному на гипотезах возрастания радиуса корреля-

ции сейсмичности перед сильными землетрясениями и пространственной корреляции среднесрочных и более краткосрочных предвестников, был сделан ряд заблаговременных прогнозов сильных землетрясений, и их неоспоримый успех позволяет считать задачу в целом решенной.

Разработанный метод включает систему оценок и тестов, которые позволяют приблизительно, но адекватно оценить вероятность ложной тревоги для каждого диагностируемого прогноза. Наличие таких оценок делает метод применимым для практических целей.

Первые успешные результаты тестирования метода *RTP* в реальном времени, а также результаты многочисленных ретроспективных тестов подтверждают исходные гипотезы о возрастании корреляции сейсмичности за несколько месяцев до сильных землетрясений и о пространственной корреляции среднесрочных и краткосрочных предвестников. Оба явления являются естественными в рамках концепции литосферы как сложной самоорганизующейся системы, но конкретные физические механизмы этих явлений в специфической геофизической среде еще требуют своего объяснения.

Для идентификации возросшего радиуса корреляции сейсмичности в работе предложена оригинальная пространственно-временная структура - цепочки эпицентров, формируемые парами близких по времени и расстоянию событий. Близость в пространстве нормирована минимальной магнитудой в паре, благодаря чему цепочки эпицентров выявляют возросший радиус корреляции в широком диапазоне энергий. Найдены характеристики цепочек, отражающий как пространственный, так и энергетический масштаб явления.

Задача прогноза землетрясений с временем ожидания менее года решается в методе *RTP* совместным использованием среднесрочных (время ожидания годы) и более краткосрочных (время ожидания месяцы) предвестников. Среднесрочные предвестники анализируются в пространственной области, указываемой цепочкой землетрясений, то есть более краткосрочным предвестником. Таким образом, анализ проводится в последовательности, обратной времени появления предвестников. При условии пространственной корреляции средне- и краткосрочных предвестников такой подход обладает очевидным преимуществом по сравнению с традиционным прямым анализом.

Публикации по теме диссертации

- 1 *Ботвина Л. Р., Шебалин П. Н., Опарина И. Б.* Механизм временных вариации сейсмичности и акустической эмиссии перед макроразрушением // Докл. РАН, 2001, Т. 37., №4. с. 480-48.
- 2 *Вьюков В. И., Гвишиани А. Д., Мостинский А. З., Шебалин П. Н.* Оперативный файл данных по сильным землетрясениям на территории СССР // Математическое моделирование и интерпретация геофизических данных. М.: Наука, 1984. С. 207-214. (Вычисл. Сейсмология; Вып. 16).
- 3 *Гвишиани А. Д., Мостинский А. З., Соловьев А. А., Шебалин П. Н.* Банк геофизических данных по прогнозу землетрясений. 1. Базы данных по сейсмологии и схемам линеаментов. Структура банка данных. Деп. В ВИНТИ №2556-83 от 12.05.83, Москва. 1983. 32 с.
- 4 *Гвишиани А. Д., Вьюков В. И., Желиговский В. А., Шебалин П. Н.* Информационная база "Каталоги землетрясений"банка геофизических данных по прогнозу землетрясений // Прогноз землетрясений. М.- Душанбе, Наука. 1986. Вып. 6. С. 165-181.
- 5 *Желиговский В. А., Шебалин П. Н.* Мировые каталоги землетрясений в Банке данных по прогнозу землетрясений: проверка, коррекция, объединение // Теория и анализ сейсмологической информации. М.: Наука, 1985. С. 164-175. (Вычисл. Сейсмология; Вып. 18).
- 6 *Кейлис-Борок В. И., Ротвайн И. М., Шебалин П. Н.* Пространственное перераспределение слабой сейсмичности в области подготовки сильных землетрясений // Математическое моделирование сеймотектонических процессов в литосфере, ориентированное на проблему прогноза землетрясений. Вып. 1. М.: МНТП РАН, 1993. С.46-52.
- 7 *Кейлис-Борок В. И., Кособокое В. Г., Шебалин П. Н.* Прогноз землетрясений: основы, достижения, перспективы // Материалы Всероссийской научной конференции "Геология, Геохимия и Геофизика на рубеже XX XXI веков", к 10-летию Российского фонда фундаментальных исследований. Том 3. "Геофизика". М.: Региональная общественная организация ученых по проблемам прикладной геофизики, 2002. С. 157.
- 8 *Кособокое В. Г., Дж.Х. Хили, Док. У. Дьюи, П.Н. Шебалин и И.Н. Тихонов.* Заблаговременный среднесрочный прогноз Южно-Курильских землетрясений 4 октября и 3 декабря 1995 года // Современные проблемы сейсмичности и динамики Земли. М.: Наука, 1996. С. 46-55 (Вычислительная сейсмология, Выпуск 28).
- 9 *Новикова О. В., Шебалин П. Н., Куйлис-Борок В. И.* Последовательное уточнение среднесрочного прогноза на примере двух сильнейших землетрясений юго-восточного Средиземноморья // Проблемы теоретиче-

- ской сейсмологии и сейсмичности, М.: ГЕОС, 2002. С. 186-206. (Вычисл. Сейсмология, Вып. 33).
- 10 *Шебалин П. Н.* Оперативный файл данных по сильным землетрясениям территории СССР // Банки данных в геофизике. М.: Междувед. геофиз. комитет АН СССР. 1984. С. 45-52.
 - 11 *Шебалин Л. Н.* Каталоги, использованные для диагностики периодов повышенной вероятности сильных землетрясений // Долгосрочный прогноз землетрясений (методические рекомендации) под ред. М.А. Садовского. М.: ИФЗ АН СССР. 1986. С.122-123.
 - 12 *Шебалин П. Н.* Компиляция каталогов землетрясений как задача кластеризации с обучением // Докл. АН СССР. 1987. Т. 292. №5. С. 1083-1086.
 - 13 *Шебалин П. Н.* Глобальные сейсмические характеристики мест возможного возникновения сильных землетрясений. Автореферат дисс. соиск. уч. ст. кандидата физ.-мат. наук. М.: ИФЗ АН СССР, 1988, 24 с.
 - 14 *Шебалин П. Н.* Афтершоки как индикаторы напряженного состояния в системе разломов // Докл. РАН. 2004. Т. 238,
 - 15 *Шебалин П. Н.* Цепочки эпицентров как индикатор возрастания радиуса корреляции сейсмичности перед сильными землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2004.
 - 16 *Шебалин П. Н., Шебалина Т. Ю., Никонов А. А.* Лихенометрический метод определения возраста поверхностных сейсмогенных образований. Деп. в ВИНТИ, 1981. №2784-81. 66 с.
 - 17 *Шебалин П. Н., Желиговский В. А.* Объединение каталогов землетрясений по данным различных источников // XIX Генеральная Ассамблея ЕСК, тезисы докладов. 1984. С. 148-149.
 - 18 *Шебалин П. Н., Гурвич В. А.* Идентификация дублей при объединении каталогов землетрясений // Математические методы обработки геофизической информации. М.: ИФЗ АН СССР. 1986. С. 214-223.
 - 19 *Шебалин П. Н., Ротвайн И. М., Кейлис-Борок В. И., Жирарден Н., Дюбуа Ж.* Локальное перераспределение активных зон как предвестник сильных землетрясений на Малой Антильской дуге // Современные проблемы сейсмичности и динамики Земли. М.: Наука, 1996. С.67-82 (Вычисл. сейсмология; Вып. 28).
 - 20 *Allegre C.J., Shebahn P., Le Moue'l J.-L., Narteau C* Energetic balance in scaling organization of fracture tectonics // Phys. Earth and Planet. Inter. 1998. V. 106. P. 139-153.
 - 21 *Botmna L. R., Shebahn P. N., Opanna I. B.* A Mechanism of Temporal Variation of Seismicity and Acoustic Emission prior to Macrofailure // Doklady Physics. V. 46. No. 2. 2001. P. 119-123.
 - 22 *Gabnelov, A.M., Dmiitneva O.E., Keihs-Borok V.I., Kossobokov V.G., Kouznetsov I.V., Levshma T.A., Mirzoev K.M., Molchan G.M., Negmatullaev S.Kh., Pisarenko V.F., Prozoroff A.G., Renhart W., Rotwam I.M., Shebahn P.N., Shnirman M.G., Schreider S.Yu.* Algorithms

- of long-term earthquakes' prediction, 1986. CERESIS, Lima, Peru. 61 p.
- 23 *Gvishiam A., Shebahn P., Gorshkov A., Cistemas A., Martinez J.M., Benito B., Garcia M.* Recognition of Earthquake-prone areas in the Pyrenees and metallic mineral deposits locations. Ministerio de Obras Publicas y Urbansmo. Publicacion Temica N18, Madrid, 1986. 51 p.
 - 24 *Gvishiam, A., Shebahn, P., Haberman, T., Chmnerly, M.* Testing pattern recognition earthquake prediction using recent seismicity catalogues // XXVIII International Geological Congress, 9-19 July 1989. Washington DC, USA, Abstracts. 1989. P. 603.
 - 25 *Gmshiani, A., Zhidkov, M., Shebahn, P., Soloviev, A.* Pattern recognition of strong earthquake prone-areas in Andes based on geomorphological and seismic parameters // VII Congresso Latinoamericano de geologia. Belem, Para, Brazil, 6-13 Novembro de 1988. Abstracts SBG-DNPM. 1988. P. 265.
 - 26 *Keihs-Borok, V. I., and P. N. Shebahn (eds.)* Dynamics of the lithosphere and earthquake prediction // Phys. Earth Planet. Inter., special issue. 1999. V. 111. P. 179-330.
 - 27 *Keihs-Borok, V., Gabrielov, A., Zahapm, I., Newman, W.I., Axen, G., and Shebahn, P.* Selforganization of critical transitions in the colliding cascades with applications to earthquake prediction // EOS, Transactions of the American Geophysical Union. 2000. V. 81. P. 556.
 - 28 *Keihs-Borok, V., Ismail-Zadeh, A., Kossobokov, V., Shebahn, P.* Non-linear dynamics of the lithosphere and intermediate-term earthquake prediction // Tectonophysics. 2001. V. 338 P. 247-280.
 - 29 *Keihs-Borok, V. I., Shebalin, P. N., and Zahapm, I. V.* Premonitory patterns of seismicity months before a large earthquake: Five case histories in Southern California // Proc. Natl. Ac. Sci. 2002. V. 99. P. 16562-16567.
 - 30 *Keihs-Borok, V. Shebalin P., Zahapm I., Novikova O., Gabrielov A.* On the short-term earthquake prediction: renormalization algorithm and observational evidence in S. California, E. Mediterranean, and Japan // EOS Trans. AGU. 2002. Fall Meeting, San Francisco, December 2002. Abstract NG52A-02.
 - 31 *Keihs-Borok, V.I., P.N. Shebalin, S.Uyeda, T.Nagao, and I.Zahapm* On the short-term earthquake prediction based on evolution of seismicity: Theory; scaling; application to 27 large earthquakes in Japan and California // IUGG2003, June 30 - July 11, 2003, Sapporo, Japan. Abstracts. 2003. P. A160.
 - 32 *Keihs-Borok V., Shebahn P., Gabrielov A., Zahapm I., Uyeda S., Nagao T.* Short-term premonitory rise of the earthquake correlation range // EOS Trans. AGU. 2003. V. 84 (46), Fall Meet. Suppl., Abstract NG41C-0068.
 - 33 *Keihs-Borok V., Shebahn P., Gabrielov A., and Turcotte D.* Reverse Detection of Short-Term Earthquake Precursors // <http://arxiv.org/abs/physics/0312088>. 2003. 17 p.
 - 34 *Keihs-Borok, V., Shebahn, P., Gabrielov A., Turcotte D.* Reverse tracing

- of short-term earthquake precursors // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2004. V. 145/1-4. P.75-85.
- 35 *Keilis-Borok V., Shebalin P., Gabnelov A.* Detection of the short-term earthquake precursors by "Tail Wags the Dog"analysis"// Preprint, The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics. ICTP, Trieste, Italy. 2003. 19 p.
 - 36 *Keilis-Borok V., Shebalin P., Akç K., Jin A., Gabnelov A., Turcotte D., Liu Z., Zahapm I.* Documented Prediction of the San Simeon Earthquake 6 Months in Advance: Premonitory Change of Seismicity, Tectonic Setting, Physical Mechanism // *Seismological Society of America, Annual Meeting, Palms Spring, California, April 2004. Abstracts.* 2004. Abstract 04-291.
 - 37 *Keilis-Borok V., Shebalin P., Zahapm I., Gabnerov A., Akç K., Uyeda S., Nagao T., Tsybm N.* Successful prediction, months in advance, of the tokachi-oki earthquake, September 25, 2003, $m=8.1$, and of the San Simeon earthquake, december 22, 2003, $M=6.5$ using new approach called reverse detection of precursors // *Geophysical Research Abstracts.* 2004. V. 6, 03782, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU04-A-03782.
 - 38 *Kossobokov V.G., Lee W.H.K., Ogata Y., Shebahn P.N., Utsu T.* Algorithms for Earthquake Statistics and Prediction. IASPEI Software Library. 1997. V. 6. 221 p.
 - 39 *Kossobokov V.G., Shebalin P.N., Healy J.H., Dewey J.W., Tikhonov I.N.* A real-time intermediate-term prediction of the October 4, 1994, and December 3,1995, southern Kuril Islands earthquakes // In D.K.Chowdhury (ed.), *Computational Seismology and Geodynamics / Am. Geophys. Un., Washington, D.C.* 1999. V. 4. P. 57-63.
 - 40 *Kossobokov V. G., and Shebahn P. N.* Comment on "Catalog Errors and the M8 Earthquake Prediction Algorithms"by Ray E.Habermann and Fred Creamer. Third Workshop on Non-Linear Dynamics and Earthquake Prediction, 6 - 17 November 1995, Trieste: ICTP, H4.SMR/879-11. 1995. 20 P-
 - 41 *Kossobokov, V., Keilis-Borok, V., Shebalin, P., Tsybm, N.* Reproducible earthquake prediction: State of the art // *Geophysical Research Abstracts.* 2002. V. 4. (Abstracts of the Contributions of the 27th General Assembly of the European Geophysical Society, Nice, France, 21-26 April, 2002). P. A-03545.
 - 42 *Kossobokov, V., Shebalin, P.* Earthquake prediction // in *Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction*, edited by V.I. Keilis-Borok and A.A. Soloviev. 2003. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg. P. 141-207.
 - 43 *Le Mouel J.-L., Blanter E., Shebalin P., Berthelier J.J., Shmrman M.* Analysis of small scale magnetic perturbations observed by Oersted // *Geophysical Research Abstracts,* V. 5, 2003. Abstracts of the Contributions of the EGS-AGU-EGU Joint Assembly, Nice, France, 06-11 April, 2003. EAE03-A-02233.

- 44 *Le Mouel J.-L., Mayaud P.-N., and Shebalin P.* Magnetic activity inside the auroral zones and field-aligned currents // *Comptes Rendus Geoscience*, Elsevier. 2003. V. 335, No. 13. P. 935-941.
- 45 *Meyers, H., Shebahn, P., Principal Compilers.* Directory of data sources for lithospheric investigations. World Data Center A for Solid earth Geophysics, Boulder, Colorado, USA. 1988. V. 1. 396 p.
- 46 *Narteau C, Shebahn P. Holschneider M., Mouel J.-L., Le, Allegre C.* Stress redistribution in a scaling organization of fracture tectonics (S.O.F.T.) // IUGG99, Birmingham, Abstracts. 1999. Week A, P. A146.
- 47 *Narteau C, Shebahn P., Holschneider M., Le Mouel J.-L., Allegre C.J.* Direct simulations of the stress redistribution in the scaling organization of fracture tectonics (SOFT) model // *Geophys. J. Int.* 2000. V. 141. P. 115-135.
- 48 *Narteau C, Shebalin P., Holschneider M.* Temporal limits of the power law aftershock decay rate. *Journal of Geophys. Res.* 2002. V. 107(B12). 2359. P.1201-1214.
- 49 *Narteau C, Shebahn P., Hamzl S., Zoller H., Holschneider M.* Emergence of a band-limited power law in the aftershock decay rate of a slider-block model // *Geophys. Res. Letters*, 2003. V. 30, No. 11. P. 1568-1572.
- 50 *Narteau C, Shebahn P., Hamzl S., Zoller G., Holschneider M.* Conditions for a band-limited power law in the aftershock decay rate // *Geophysical Research Abstracts*. 2003. V. 5. Abstracts of the EGS-AGU-EGU Joint Assembly, Nice, France, 06-11 April, 2003. EAE03-A-04928.
- 51 *Novikova O., Shebahn P., Keihs-Borok V.* A second approximation to intermediate-term earthquake prediction: two case histories for south-eastern Mediterranean // *Proc. 50th Anniversary of the European Seismological Commission (XXVIII General Assembly, Genoa, 1-6 September 2002, Italy)*. Abstracts. 2002. P. 146.
- 52 *Novikova O., Shebahn P.* Unusual contrast in seismic activity and raise of the earthquake correlation range months before earthquakes with $M \geq 5.5$ in Central and Northern Italy // *Geophysical Research Abstracts*. 2004. V. 6, 03876, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU04-A-03876.
- 53 *Shebahn, P.* Automatic duplicate identification in merged set of earthquake catalogues using clustering analysis // *XXV General Assembly of IASPEI, 21 August - 1 September 1989, Istanbul, Turkey*, Abstracts. P. 610.
- 54 *Shebahn, P.N.* Automatic duplicate identification in set of earthquake catalogues merged together, U.S. Geol. Surv. Open-File Report 92-401, Appendix II, 1992.
- 55 *Shebahn, P.* Methodology of short-term earthquake prediction, Part II // *SCEC/USGS/CGS Workshop "Science of Earthquake Prediction"*, 20 February 2004, SCEC, Los Angeles.
- 56 *Shebahn, P.N., Arefiev, A. A.* The pairs of earthquakes: statistics and prediction // *XVIII General Assembly of IUGG, Hamburg, 1983*. Abstracts.

P. 167.

- 57 *Shebahn P., Girardm N., Rotwain I., Keihs-Borok V.I., Dubots J., 1996.* Local overturn of active and non-active seismic zones as a precursor of large earthquakes in Lesser Antillean arc. *Phys. Earth Planet. Int.* 1996. V. 97. P. 163 -175
- 58 *Shebahn P. N., Rotwain I. M., Allegre C. J.* Fractal structure of the temporal distribution of aftershock sequences // Abstracts of the 29th General Assembly of the IASPEI. August 18-28, 1997, Thessaloniki, Greece. P. 400.
- 59 *Shebahn P., Narteau C, Allegre C, Le Mouël J.-L.* Dynamics of fracturing and hierarchical cascading of aftershockes in the S.O.F.T. model // XXVI General Assembly of the European Seismological Commission (ESC), Abstracts, Tel Aviv, Israel, August 23-28, 1998. P. 45.
- 60 *Shebahn P., Rotwain I.* Hyrarchical structure of the aftershock clustering in time // XXVI General Assembly of the European Seismological Commission (ESC), Abstracts, Tel Aviv, Israel, August 23-28, 1998. P. 38.
- 61 *Shebahn P., Tsybme N.* Phenomenon of "seismic reversal"before strong earthquakes in the Dead Sea transform zone // XXVI General Assembly of the European Seismological Commission (ESC), Abstracts, Tel Aviv, Israel, August 23-28, 1998. P. 47.
- 62 *Shebahn P.N., Rotwain J.M., Keihs-Borok V.J., Girardm N., Dubois J.* Local redistribution of active zones as the precursor of large earthquakes in Lesser Antillean Arc // In D.K.Chowdhury (ed.), *Computational Seismology and Geodynamics / Am. Geophys. Un* , 4, Washington, D.C. 1999. P. 71-81.
- 63 *Shebahn P.N., Keihs-Borok V.I.* Phenomenon of local "seismic reversal"before strong earthquakes // *Phys. Earth Planet. Int.* 1999. V. 111. P. 215 -227.
- 64 *Shebahn P., Tsybme N.* Why does coefficient C in the modified Omori low strongly depend on the magnitude cut-off of the aftershocks? // IUGG99, Birmingham, Abstracts, Week A, Monday 19 July to Saturday 24 July 1999. P. A155.
- 65 *Shebahn, P., Zahapm, I., and Keihs-Borok, V. I.* Premonitory rise of the earthquakes' correlation range: Lesser Antilles // *Phys. Earth Planet. Int.* 2000. V. 122. P. 241-249.
- 66 *Shebahn P., Soloviev A., Le Mouel J.-L.* Scaling organization in the dynamics of blocks-and-faults systems // *Physics of the Earth and Planetary Interiors.* 2002. V. 131. P. 141-153.
- 67 *Shebahn P., Narteau C, Holschneider M.* Temporal limits of the aftershock decay rate // *Geophysical Research Abstracts.* 2002. V. 4. EGS02-A-05949. (Abstracts of the 27th General Assembly of the European Geophysical Society, Nice, France, 21-26 April, 2002).
- 68 *Shebahn P., Keihs-Borok V.I., Zahapin I., Uyeda S., Nagao T., Tsybm N.* Short-term Premonitory Rise of the Earthquake Correlation Range // IUGG2003, June 30 - July 11, 2003, Sapporo, Japan. Abstracts. 2003. P.

A184.

- 69 *Shebahn P., Keihs-Borok V., Zahapin I., Uyeda S., Nagao T., Tsybin N.* Short-Term Advance Prediction of the Large Hokkaido Earthquake, September 25, 2003, magnitude 8.1: A Case History // *Geocities*. 2003. 6 p. (<http://www.geocities.co.jp/Technopolis/4025/030925eq.pdf>).
- 70 *Shebahn P., Keihs-Borok V., Zahapin I., Uyeda S., Nagao T., Tsybin N.* Short-term Premonitory Rise Of The Earthquake Correlation Range 22 case histories for largest earthquakes in Japan, in California, and in Eastern Mediterranean // Preprint, The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics. ICTP, Trieste, Italy. 2003. 6 p.
- 71 *Shebahn, P., Keihs-Borok, V., Zahapin, I., Uyeda, S., Nagao, T., Tsybin, N.* Advance Short-Term Prediction of the Large Tokachi-oki Earthquake, September 25, 2003, M-8.1 - A Case History // *Earth, Planets and Space*, Terrapub, Tokyo, Japan. 2004. V. 56. P. 715-724.
- 72 *Shebahn P., Narteau C, Holschneider M.* Aftershocks as indicators of the state of the stress in a fault system // *Geophysical Research Abstracts*. 2004. V. 6, 03830, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU04-A-03830.
- 73 *Shebahn P., Keihs-Borok V., Zahapin I., Gabnelov A., Turcotte D.* Chains of earthquakes - short-term precursors of strong earthquakes: reverse detection of precursors analysis // *Geophysical Research Abstracts*. 2004 V. 6, 03597, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU04-A-03597.
- 74 *Zahapin I. V., Keihs-Borok V.I., Shebahn P. N, Gabrielov A.M., Newman W.I.* Increase of earthquakes' correlation range prior to the strong earthquakes // 23rd International Conference on Mathematical Geophysics. Extreme Earth Events. June 18-23, 2000. La Citadelle, Villefrance sur Mer, France, 2000. P. 68.
- 75 *Zahapin L, Axen G., Gabrielov A., Ghil M., Keilis-Borok V., Newman W.I., Shebalin P.* Colliding Cascades and Boolean Delay Equations for Earthquake Prediction // *EOS Trans. AGU*. 2001. Fall Meeting, San Francisco, Abstract NG21A-0418
- 76 *Zahapin L, Keihs-Borok V., Shebahn P., Turcotte D., Liu Z., Zoller G.* Premonitory long-range earthquake correlations // *EOS Trans. AGU*. 2002. Fall Meeting, San Francisco, December 2002. AGU Fall meeting, San Francisco, December 2002. Abstract U72B-0023.
- 77 *Zahapin I., Keihs-Borok V., Shebahn P., Turcotte D., Liu Z., and Zoeller G.* Premonitory long-range earthquake correlations // *Geophysical Research Abstracts*. 2003. V. 5. Abstracts of the EGS-AGU-EGU Joint Assembly, Nice, France, 06-11 April, 2003. EAE03-A-07667.

Принято к исполнению 20/09/2004
Исполнено 22/09/2004

Заказ № 331
Тираж 100 экз

ООО «11-й ФОРМАТ» ИНН 7726330900
Москва, Балаклавский пр-т, 20-2-93
(095) 747-64-70
(095) 318-40-68
www.autoreferat.ru

№ 17832

РНБ Русский фонд

2005-4

15237