

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ  
РЕВОЛЮЦИИ, ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М.В. ЛОМОНОСОВА

---

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

*На правах рукописи*

НЕКРАСОВА Анастасия Корнельевна

**ОБЩИЙ ЗАКОН ПОДОБИЯ ДЛЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ  
ПРИМЕНЕНИЕ К СЕЙСМИЧЕСКИ АКТИВНЫМ  
РЕГИОНАМ МИРА**

Специальность 25.00.10 –«Геофизика,  
геофизические методы поисков полезных ископаемых»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

---

Москва – 2008 г.

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

**Научный руководитель:**

Доктор физико-математических наук  
Кособоков Владимир Григорьевич

**Официальные оппоненты:**

Доктор физико-математических наук  
Любушин Алексей Александрович

Доктор физико-математических наук  
Родкин Михаил Владимирович

**Ведущая организация:**

Институт динамики геосфер РАН

Защита состоится « 22 » \_\_\_\_\_ *мая* \_\_\_\_\_ 2008 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании  
Диссертационного совета Д.501.001.63 при МГУ им. М.В. Ломоносова по  
адресу: *119992 Москва, Ленинские горы, физический факультет, аудитория*

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета  
МГУ.

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2008 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д.501.001.63

кандидат физ.-мат. наук

**В.Б. СМИРНОВ**

## Общая характеристика работы

**Актуальность исследования.** Землетрясения относятся к классу явлений, которые могут приводить одновременно к исключительно большому числу человеческих жертв и существенным потерям материальных ресурсов. В 60-е годы среднегодовой ущерб от землетрясений составлял во всем мире 0.04 млрд. долл. в год и в 1995-1999 гг. вырос до 34.0 млрд. долл. в год. В частности, потери в результате всего одного землетрясения 1994 года в окрестности Лос-Анджелеса составили более 100 млрд. долл.. В целом по миру в 1965-1999 гг. на ущерб от землетрясений приходилось более 40% всех материальных потерь. Всемирная конференция по природным катастрофам, состоявшаяся в мае 1994 г. в Иокогаме (Япония), приняла декларацию, в которой сказано, что борьба за уменьшение ущербов от природных катастроф должна быть важным элементом государственной стратегии всех стран в достижении устойчивого развития цивилизации. Конференция обратилась ко всем странам с призывом перейти на новую стратегию борьбы с природными катастрофами, основанную на прогнозировании и предупреждении. Однако, несмотря на общепризнанную и принятую стратегию, сильнейшее Суматра-Андоманское землетрясение 26 декабря 2004 года и порожденное им в Индийском океане цунами вновь застало население неподготовленным. В результате по официальным данным ООН погибло 186983 и пропало 42883 человек, что в очередной раз указало на остроту и актуальность задач связанных с изучением природных катастроф тектонического характера и оценкой их возможных последствий. На территории России ущерб от землетрясений составляет 24% от общих потерь, вызванных всеми стихийными бедствиями. В частности, землетрясения представляют значительную опасность для 103 городов России с населением более 100000 жителей. Федеральная целевая программа "Сейсмобезопасность территории России", разработанная и принятая на период с 2002 по 2010 год, призвана обеспечить снижение сейсмического риска. Именно поэтому представленная диссертационная работа посвящена, безусловно, актуальной задаче оценки сейсмической опасности (включая изменяющуюся во времени).

**Цель исследования.** Основной целью диссертационной работы является исследование закономерностей и характеристик пространственно-временного распределения сейсмических событий разной силы, связанных с Общим законом подобия для землетрясений (ОЗПЗ), надежные представления о которых могут служить целям прогноза и предупреждения бедствия от землетрясений.

**Постановка конкретных задач.** Исследования потребовали рассмотрения и решения следующих задач:

- разработка модифицированного программного обеспечения для надежного оценивания параметров ОЗПЗ;

- построение карт значений коэффициентов ОЗПЗ в нескольких масштабах рассмотрения: от плитовой тектоники до локального картирования областей размером в десятки километров;
- исследование точности (ошибок) определения коэффициентов ОЗПЗ, для картирования надежных оценок параметров сейсмической опасности и сейсмического риска;
- анализ временных и пространственных вариаций коэффициентов ОЗПЗ в отсутствии или непосредственно перед сильнейшими событиями на рассмотренных территориях для прогностических целей;
- оценка параметров сейсмической опасности и сейсмического риска для более 800 (принципиальных) городов мира. В частности, для городов Российской Федерации включая Петропавловск-Камчатский, Иркутск, Улан-Удэ, Грозный и др. и мегаполисов мира включая Токио, Лос-Анджелес, Сан-Франциско, Рим, Милан и др..

**Научная новизна исследования.** В данной работе, на основе современных баз сейсмических данных впервые детально изучены распределения коэффициентов ОЗПЗ для различных магнитудно-пространственно-временных диапазонов в различных сеймотектонических регионах и в мире в целом. Впервые в мировой практике расчет параметров подобия сейсмичности выполнен по многим случайно ориентированным разбиениям пространства, что позволяет исключить возможность систематической ошибки определения. Впервые выполнено детальное картирование коэффициентов ОЗПЗ для всех наиболее активных сейсмических поясов мира и для отдельных сейсмоактивных регионов (Прибайкалье, Японские острова, Калифорния, Центральное Средиземноморье и Альпийская горная система).

**Описание источников информации.** В работе использованы опубликованные и доступные в реальном времени базы данных о параметрах землетрясений ведущих сейсмологических агентств мира.

**Основные результаты работы (выносимые на защиту):**

1. Разработана современная модификация алгоритма оценки коэффициентов ОЗПЗ, включающая многократное определение в случайно ориентированном разбиении окрестности точки рассмотрения и, как результат, оценивание надежности финального среднего определения.
2. Построена карта коэффициентов ОЗПЗ для всех наиболее активных сейсмических поясов мира.
3. Построены региональные карты коэффициентов ОЗПЗ в разных масштабах для отдельных сейсмически активных регионов мира, включая Прибайкалье, Японские острова, Калифорнию, Центральное Средиземноморье и Альпийскую горную систему.
4. В целом для мира коэффициенты ОЗПЗ надежно определяются в сейсмически активных областях с повторяемостью от менее одного события с магнитудой 5.0 в двадцать лет. При этом наклон графика повторяемости  $B$

сосредоточен в основном между 0.5 и 1.2, а фрактальная размерность эпицентров землетрясений  $C$  изменяется в основном в пределах от менее 0.8 до 1.4 и более. При этом оценка коэффициента  $C$  качественно соответствует тектонической раздробленности рассматриваемой территории.

5. Традиционная оценка сейсмической опасности для городов и промышленных агломераций, основанная на равной вероятности возникновения землетрясения в любой точке области рассмотрения, как правило, многократно недооценивает сейсмический риск. Использование ОЗПЗ позволяет получить оценки риска, более адекватные фрактальному характеру распределения сейсмичности, которые могут в 10-20 раз превосходить традиционные.

**Практическая значимость работы.** Несоответствие традиционной и предложенной оценок повторяемости указывает на актуальную необходимость учитывать фрактальные свойства подобия землетрясений в новой редакции карты сейсмического районирования Российской Федерации. Представленные в настоящей работе карты глобальных оценок коэффициентов Общего закона подобия для землетрясений вошли в Отчет Российской академии наук об основных научных достижениях за 2002 год. Локальные оценки, полученные для городов провинции Фриули-Венеция Джулия (Италия) приняты к рассмотрению региональным отделением Гражданской обороны в рамках «Программы обеспечения сейсмической безопасности» на 2007-2008 гг. Результаты регионального рассмотрения ОЗПЗ для Центрального Средиземноморья и Альпийской горной системы вошли отдельной главой в итоговый отчет по Проекту ALPS-GPSQuakenet (2007).

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Генеральных Ассамблеях Международного Союза по Геодезии и Геофизике (Саппоро, Япония, 2003; Перуджия, Италия, 2007), на Генеральных Ассамблеях Европейского Геофизического Союза (Ницца, Франция, 2003, Вена, Австрия, 2005), на конгрессах Американского Геофизического Союза (Сан-Франциско, США, 2002, 2003, 2005), а также, на научных семинарах в Международном институте теории прогноза землетрясений и математической геофизики и в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук.

Основные результаты работы по теме диссертации изложены в 14 публикациях, в том числе в 6 статьях в реферируемых международных и Российских журналах, включая две статьи в Докладах Российской академии наук.

**Личный вклад автора.** Автором разработана современная модификация алгоритма оценки коэффициентов ОЗПЗ, включающая многократное определение в случайно ориентированном разбиении окрестности точки рассмотрения и оценивание надежности результата расчета, алгоритм *SCE* (Scaling Coefficients Estimation). Модификация обеспечивает работу с современными объемами и структурами сейсмологических баз данных и

практически исключает возможность систематических ошибок в значениях определяемых коэффициентов, связанных с выбором пространственных координат. Автором проведен предварительный анализ каждой из сейсмологических баз данных, используемых в представленной работе, с целью определения пределов обеспечивающих надежную работу алгоритма *SCE*. Автором составлены глобальные, региональные и локальные карты оцененных коэффициентов ОЗПЗ. Полученные карты и распределения проанализированы как с учетом тектонических особенностей рассматриваемых регионов, так и с учетом их изменчивости при расчетах в скользящем временном окне. Автором получены оценки параметров сейсмического риска для крупнейших городов мира и принципиальных городов в отдельных рассмотренных сейсмически активных регионах учитывающие фрактальный характер распределения сейсмичности.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и четырех приложений, вынесенных в отдельный том. Общий объем диссертации 111 страниц машинописного текста, который содержит 39 рисунков, 8 таблиц и список литературы из 62 наименований, и четырех приложения на 93 страницах (57 страниц рисунков и таблица на 29 машинописных листов).

**Выполнение работы.** Результаты, изложенные в диссертации, получены автором в ходе работы в должности младшего научного сотрудника Международного института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН в период 1993- 2007 гг.

Автор глубоко признателен В.Г. Кособокову, А.А. Соловьеву, И.В. Кузнецову, А.И. Горшкову, Г.М. Молчану, Т.Л. Кронрод, А.В. Ландеру, Б.Г. Букчину сформировавшим научное мировоззрение автора. Автор также благодарен всем сотрудникам Института за дружеское внимание, поддержку и полезные обсуждения во время работы над диссертацией.

## Основное содержание работы

Во **Введении** дается общая характеристика диссертационной работы, включая вопросы ее актуальности, научной новизны, практической значимости, апробации и личного вклада автора, а также конкретно формулируются цели и задачи исследования и основные результаты работы, выносимые на защиту. Введение завершается изложением структуры и краткого содержания диссертационной работы.

### Глава 1. Алгоритм оценки коэффициентов подобия *SCE* (Scaling Coefficients Estimation)

В Главе представлен общий подход к описанию сложной иерархической системы – Общий закон подобия для землетрясений (ОЗПЗ), обобщающий фундаментальное соотношение Гуттенберга-Рихтера. ОЗПЗ учитывает

фрактальную природу землетрясений и предполагает изучение общих характеристик последовательностей землетрясений из разных энергетических диапазонов и разнообразных сейсмически активных регионов.

С учетом обычно игнорируемого линейного размера области рассмотрения  $L_0$  закон повторяемости принимает следующий вид:

$$\log_{10}N(M, L) = A + B(5 - M) + C \log_{10}L,$$

где коэффициенты  $A$  и  $B$  имеют тот же физический смысл, что  $a$  и  $b$  в соотношении Гутенберга-Рихтера, а коэффициент  $C$ , в соответствии с концепцией академика М.А. Садовского о самоподобии Земли, локально оценивает фрактальную размерность множества сосредоточения эпицентров землетрясений. Коэффициент  $A$  нормирован к одному году и оценивает ожидаемое среднее число землетрясений магнитуды 5.0 в сейсмоактивной области с линейным размером в единицу длины (например, в квадрате со стороной  $1^\circ$  меридиана Земли) из региона  $L_0 \times L_0$ .

Для алгоритма оценки коэффициентов  $A$ ,  $B$ , и  $C$  ОЗПЗ для пространственно-временной выборки сейсмических событий с фиксированными параметрами и стандартной выдачей результатов воспользуемся аббревиатурой *SCE* (Scaling Coefficients Estimation algorithm).

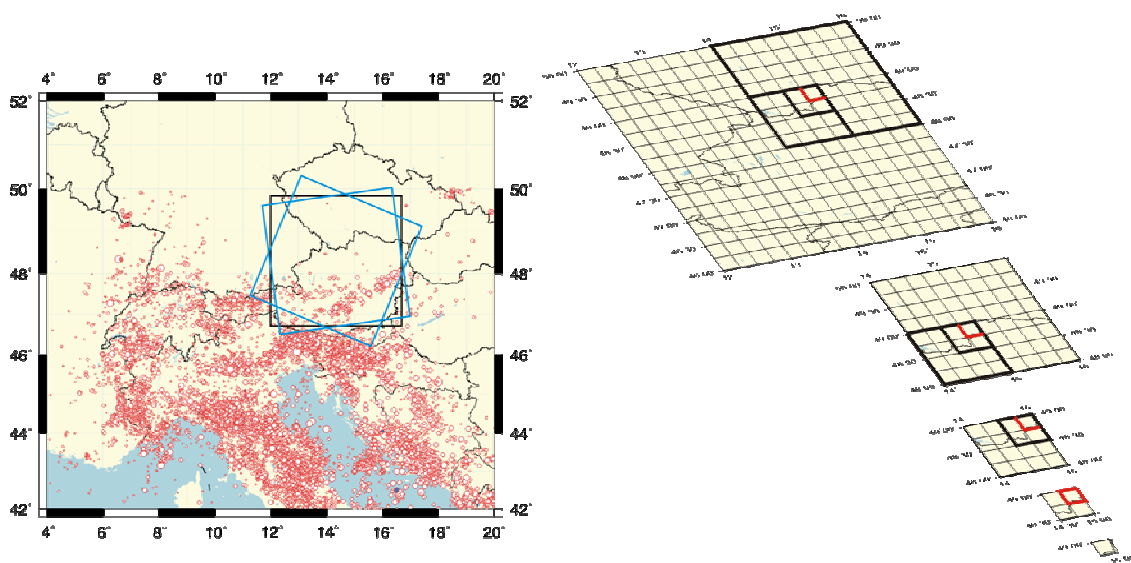


Рис. 1 Пример пространственной области  $L_0 \times L_0$  и пяти иерархических пространственных интервалов. Синими линиями показаны возможные варианты рандомизированных поворотов области  $S$ .

Приведено подробное описание модифицированного алгоритма *SCE*, а также тестовые примеры для модельных и реальных каталогов. Основное внимание уделено предложенной в модифицированной версии многократной оценке коэффициентов подобия по случайно ориентированным разбиениям пространства, позволяющей исключить возможность систематической ошибки определения, связанной с фиксированными географическими координатами. При картировании результатов, рассчитанные коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$  относятся к ячейкам размера  $l_0$  центром в центре вращения квадратов  $L_0 \times L_0$ ; выбор центров

вращения определяется наличием событий магнитудного диапазона  $M$  в такой ячейке.

## Глава 2. Глобальное распределение коэффициентов Общего закона подобия для землетрясений

В Главе рассмотрены глобальные оценки коэффициентов ОЗПЗ полученные с помощью алгоритма *SCE*. Для наиболее сейсмически активных районов мира получено содержательное распределение локальных оценок параметров  $A$ ,  $B$ , и  $C$ . Значения коэффициентов ОЗПЗ получены всюду, где Глобальной базы данных о гипоцентрах землетрясений *GHDB* за 1964-2002 оказалось достаточно для их надежного определения. Описаны исходные данные исследования, параметры алгоритма и пространственное распределение полученных коэффициентов ОЗПЗ.

Оценки коэффициентов получены с использованием *GHDB* за 1964-2002 годы включительно для неглубоких (с глубиной до 100 км) землетрясений с магнитудами 4 и более. Верхняя граница магнитудного диапазона не устанавливалась, однако реализовавшееся значение в различных регионах варьируется от 5.25 до 6.75. Изначально рассмотрены все 9276 точек с полужелтыми географическими координатами, где определенный по данным *GHDB* за 1964-2000 годы показатель сейсмической активности  $I_4$  превышает 0.027. Такое значение  $I_4$  соответствует одному событию с магнитудой от 4.0 и выше в ячейке  $1^\circ \times 1^\circ$  за весь представленный в каталоге период времени. Эти точки выбраны как центры перекрывающихся квадратов со стороной  $8^\circ$  градусов земного меридиана, который является высшей (пятой) ступенью рассмотрения пространственной иерархии и состоит из 1024 квадратов со стороной  $0.5^\circ$ .

Содержательные оценки коэффициентов  $A$ ,  $B$ , и  $C$  получены в 7258 точках, где данных *GHDB* оказалось достаточно для надежного использования алгоритма (Рис. 2).

Логарифмическая оценка сейсмической активности  $A$ , нормализованная к области  $1^\circ \times 1^\circ$ , изменяется в пределах от менее -1.2 до более 0.5 в год, что соответствует повторяемости землетрясений с магнитудой 5.0 от менее одного в двадцать лет до более трех за год. Показатель баланса магнитуд  $B$  сосредоточен в основном между 0.5 и 1.2, а фрактальная размерность эпицентров землетрясений  $C$  изменяется в основном в пределах от менее 0.8 до 1.4 и более. При этом ошибки определения коэффициентов по статистике 100-кратной рандомизации угла поворота квадрата не превышают 0.1 и демонстрируют практически по всему миру высокую степень согласия с данными мировых наблюдений.

Построены глобальные карты распределения коэффициентов  $A$ ,  $B$ , и  $C$  (Рис. 3-5). Выделены пространственные области наиболее заметных особенностей распределения коэффициентов ОЗПЗ. Наибольшие значения параметра сейсмической активности  $A$  относятся к районам Курильской и Алеутской дуг, Филиппинскому желобу, Соломоновым островам, желобам



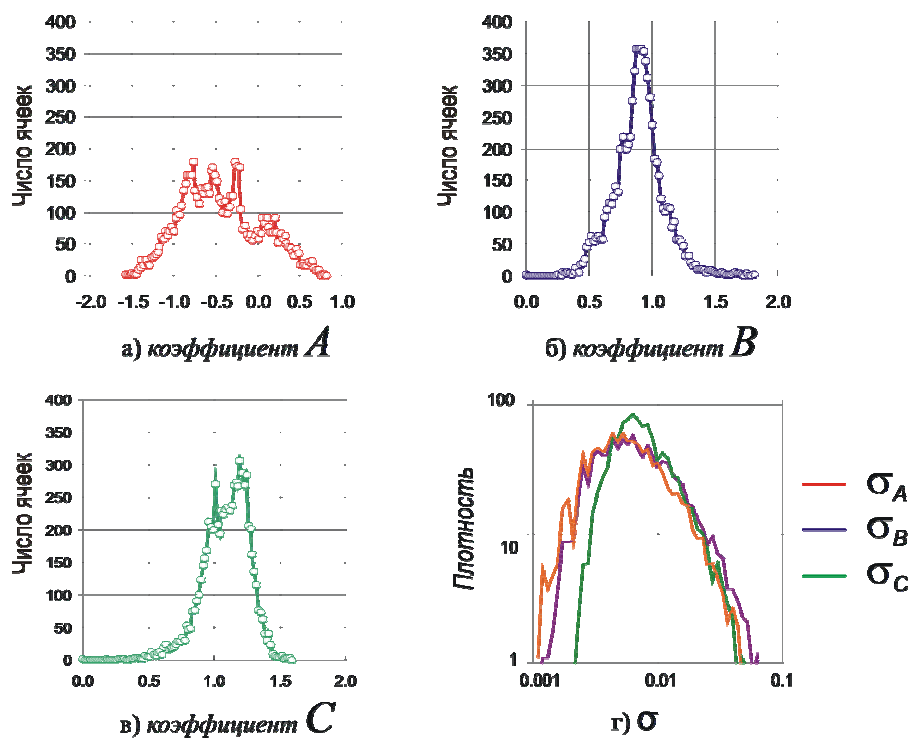
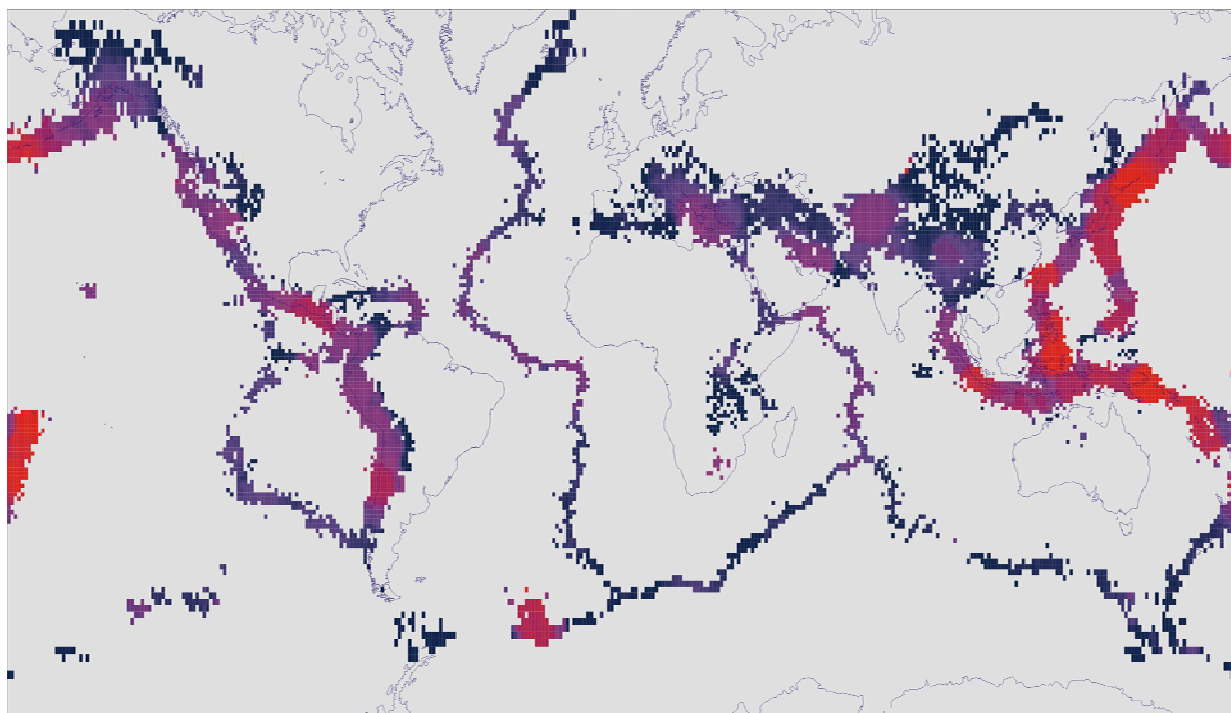
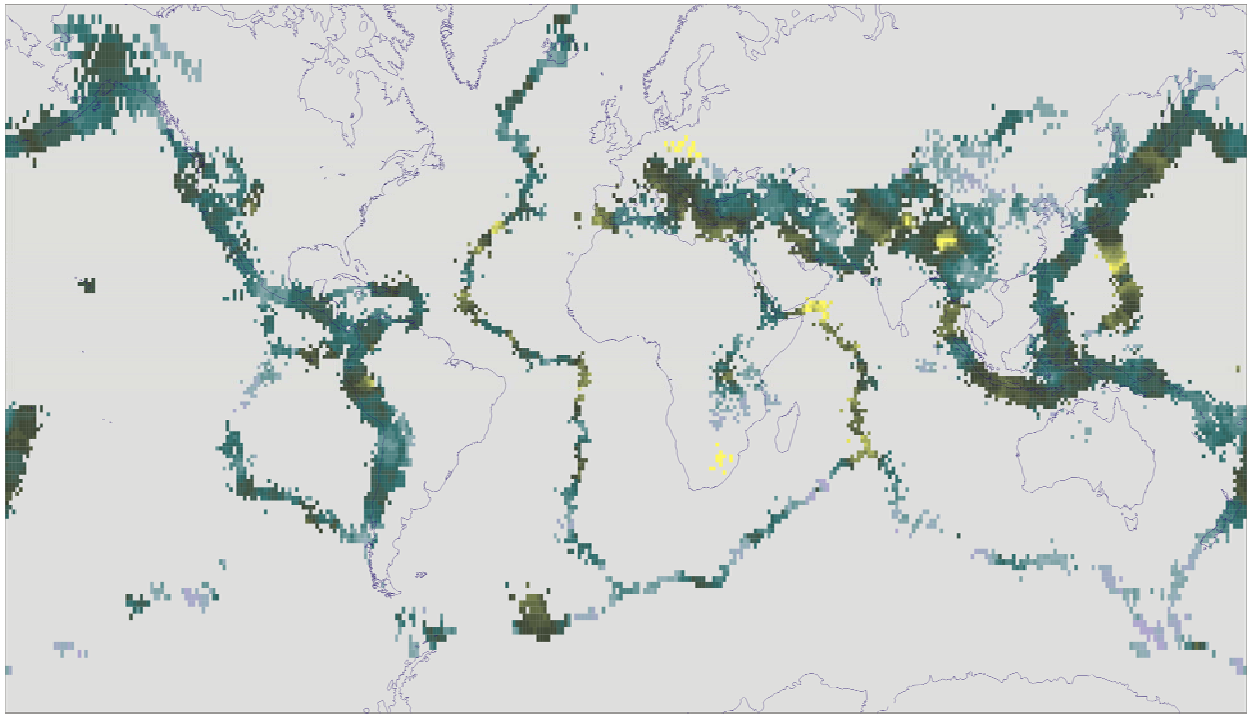


Рис. 2 Гистограммы глобального распределения коэффициентов ОЗПЗ и стандартных ошибок их определения  $\sigma_A$ ,  $\sigma_B$ ,  $\sigma_C$  (в логарифмическом масштабе).



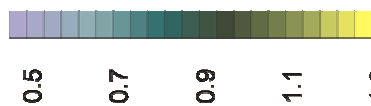
**Логарифмическая оценка сейсмической активности**  **$A$**  **в год**  
 -1.2 -0.7 -0.2 0.3 0.8

Рис. 3 Глобальное распределение логарифмической оценки сейсмической активности, коэффициент  $A$  Общего Закона подобия для землетрясений.



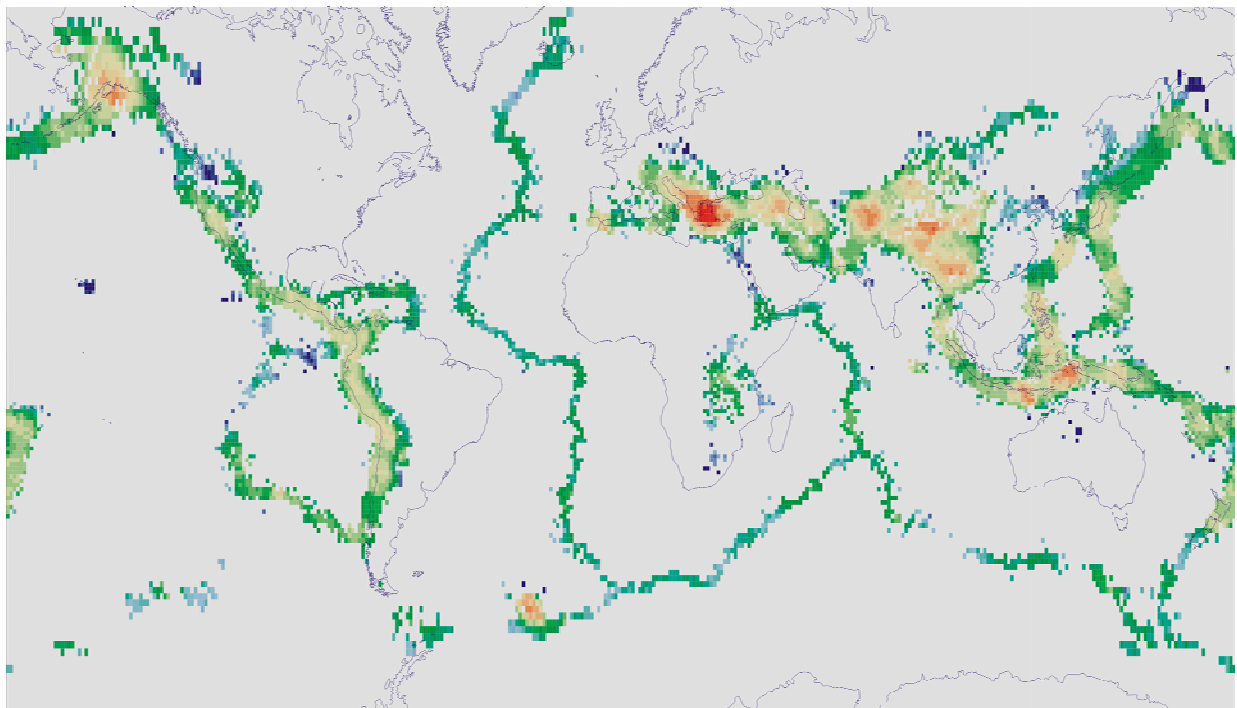
**Баланс между соседними  
магнитудными диапазонами**

**$B$**



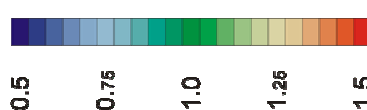
на единицу  
магнитуды

Рис. 4 Глобальное распределение показателя баланса магнитуд, коэффициент  $B$ , Общего Закона подобия для землетрясений.



**Фрактальная  
размерность**

**$C$**



на единицу  
расстояния в грд.

Рис. 5 Глобальное распределение фрактальной размерности множества сосредоточения эпицентров, коэффициент  $C$ , Общего Закона подобия для землетрясений.

Тонга и Кермадек и Южно-Сандвичевой дуге. Показатель баланса магнитуд  $B$  не имеет сильных вариаций, концентрируясь около четкого максимума распределения в точке 0.9. Его региональные вариации в основном имеют разброс от 0.8 до 1.2 и соответствуют приводимым независимыми исследователями оценкам наклона графика повторяемости сейсмических событий в сейсмически активных областях мира. Экстремальные оценки параметра  $B$  как правило связаны с академически единообразным применением алгоритма во всех сейсмически активных регионах мира, не предполагавшем дополнительного анализа данных в окрестности каждой отдельно взятой точки. Такой анализ возможен, а в ряде особо важных случаев практического применения ОЗПЗ (например, при оценке риска для мегаполиса) заведомо необходим.

Глобальное картирование показало, что распределение фрактальной размерности множества сосредоточения эпицентров землетрясений (коэффициент  $C$ ) может служить количественной характеристикой тектонических процессов, происходящих в областях масштабов плитовой тектоники. Глобальное распределение  $C$  лежит в пределах от 0.5 до 1.5 и имеет хорошо выделенный максимум в точке 1.2. Значения близкие к 1.0 характеризуют достаточно однородные, линейные зоны сейсмичности. Рифтовые зоны и зоны трансформных разломов почти полностью представлены именно такими значениями коэффициента  $C$ . Причем наиболее примечателен постоянством значений параметра  $C$  север Срединно-Атлантического хребта, а также крупный материковый рифт – озеро Байкал. Некоторые участки зон субдукции также характеризуются значениями  $C$  близкими к 1.0 (северо-запад Тихого океана, представлен сегментами с чередующимися значениями около 1.0 и 1.2).

Значения параметра  $C$  близкие 1.5 наблюдаются в зонах сильного сжатия, характерного для столкновения двух континентальных плит (Альпийско-Гималайский пояс сейсмичности объединяющий Памир, Гиндукуш, Гималаи, Бирму и более удаленные о районы вплоть до Алтая). Также значения фрактальной размерности множества сосредоточения эпицентров близкие к максимальным относятся к району Аляскинского хребта. Значения  $C$  близкие к 1.4 характерны для сейсмичности Перуанского сектора Анд, тогда как южнее для Чилийско-Аргентинского сектора фрактальная размерность множества сосредоточения эпицентров в целом ниже 1.2. Районы «точечной» сейсмичности, где оценка коэффициента  $C$  ниже 0.6, представлены редкими отдельными площадями по всему миру. Гавайские и Галапагосские острова являются примерами областей, где такие значения коэффициента  $C$  связаны с заведомо надежным определением параметров ОЗПЗ.

### **Глава 3. Оценки коэффициентов Общего закона подобия для землетрясений в отдельных сейсмически активных регионах мира**

В Главе рассмотрены оценки коэффициентов ОЗПЗ в отдельных сейсмически активных регионах мира. Выбор изучаемых территорий определен

наличием и доступностью локальных и региональных каталогов сейсмических событий, достаточно полных для надежной работы алгоритма. На территории Российской Федерации - это район современного рифтаобразования в окрестности озера Байкал, где был использован каталог 8378 землетрясений Прибайкалья за период 1962-1997 гг. с  $M \geq 2.78$ . На западе Тихого океана – это один из наиболее активных регионов, связанных с зоной субдукции в окрестности Японских островов, где использован каталог Японского Метеорологического Агентства с 1980 по 2002 годы, насчитывающий 135516 событий с  $M \geq 2$ . На востоке Тихого океана – это территория регистрации каталога Национальной сейсмологической службы США, сейсмичность которой в основном связана со сдвигом по системе разломов Сан-Андреас. Используются данные о 112353 событиях с 1984 по 2004 годы,  $M \geq 2$ . Тектонически более сложный район Центрального Средиземноморья и Альпийская горная система исследованы с использованием данных регионального каталога Италии, расширенного историческими данными и таким образом, покрывающим временной интервал с 1870 по 2005 год, содержащий 24695 событий с  $M \geq 3$ . Также использованы сейсмологические данные локального каталога Национального института океанографии и Экспериментальной Геофизики, содержащий данные о сейсмических событиях района Фриули-Венеция Джулия с 1977 по 2005 год, включающий 530 событий с  $M \geq 2.2$ . Для каждой из перечисленных выше территорий детальность исследования коэффициентов ОЗПЗ обуславливалась магнитудной, временной и пространственной представительностью каталогов сейсмических данных. В результате были исследованы энергетические диапазоны, начиная от магнитуды 2.0 и выше, пространственная иерархия от 6 до 400 км и временные интервалы от 130 до 4-6 лет в районах, качественно отличающихся как по характеру тектонических процессов, так и по уровню сейсмической активности.

*Прибайкалье:* Расчет коэффициентов  $A$ ,  $B$ , и  $C$  проводился для территории Прибайкалья в пределах от  $48^\circ$  до  $58^\circ$  с.ш. и от  $96^\circ$  до  $120^\circ$  в.д. для пространственных ячеек от  $8^\circ \times 8^\circ$  до  $1/2^\circ \times 1/2^\circ$  земного меридиана и неглубоких событий с магнитудами 2.78 и выше. Были использованы данные сейсмических событий Прибайкалья за период с 1962 по 1997 гг.. Содержательные оценки коэффициентов  $A$ ,  $B$ , и  $C$  получены в 650 ячейках, в окрестности которых зарегистрированных землетрясений оказалось достаточно для надежного использования алгоритма  $SCE$ . Заметную ошибку (от 0.02 и выше) имеют менее 1% от общего числа определений коэффициентов, что свидетельствует о высокой степени надежности картированных оценок.

Согласно приведенным картам коэффициент  $A$  имеет два характерных максимума: в области основного рифта (около  $-1.2$ , что соответствует шести событиям с магнитудой 5 и более за 100 лет) и район Восточных Саян, где повторяемость землетрясений втрое меньше. Коэффициент  $B$  изменяется в пределах изучаемой территории от 0.75 до 1.35. Основная доля значений  $B$  приходится на небольшой интервал от 0.8 до 0.95, при этом значение 0.9 является преобладающим в Прибайкалье. Фрактальная размерность плотности распределения эпицентров изменяется от 0.7 до 1.6. Отчетливо выделяется

центральная, глубоководная часть рифтовой зоны, представленная значениями коэффициента  $C$  порядка 1.2, которая разделяет область хребтов и долин, расположенную на северо-восток от озера Байкал, имеющую относительно более высокими значения  $C$  от 1.3 до 1.4, от обширной сейсмоактивной территории к югу от Восточного Саяна, где доминируют значения  $C$  порядка 1.4.

Полученные значительные вариации коэффициентов  $A$ ,  $B$  и  $C$  по пространству не соответствуют традиционной оценке повторяемости сейсмических событий, принятой сейчас в сейсмораионировании. В настоящее время новая редакция карты сейсмического районирования РФ относит всю ось Байкальского рифта в 10-бальную зону, а крупнейшие города Иркутск и Улан-Удэ включены в обрамляющую ее единую 9-бальную зону. Традиционная оценка повторяемости сильных землетрясений в 25-км окрестности этих городов может оказаться заниженной приблизительно в 10 и в 20 раз соответственно.

*Япония:* Для территории Японских островов получены оценки коэффициентов ОЗПЗ для трех пространственно-магнитудно-временных масштабов. Масштаб  $S1$  - для территории от  $28^\circ$  до  $46^\circ$  с.ш., и от  $122^\circ$  до  $146^\circ$  в.д., временного интервала с 1980 по 2002 год. Расчеты проведены для пространственных ячеек от  $2^\circ \times 2^\circ$  до  $1/4^\circ \times 1/4^\circ$  земного меридиана, для неглубоких событиях с магнитудами от 3 и выше. Масштаб  $S2$  - для восточной части острова Хонсю в пределах с  $32^\circ$  по  $42^\circ$  с.ш. и с  $136^\circ$  по  $144^\circ$  в.д., четырех неперекрывающихся интервалов времени 01/09/1980-31/08/1989, 01/09/1990-31/08/1994, 01/09/1994-31/08/1999, 01/09/1999-31/08/2002. Расчеты проведены для пространственных ячеек от  $2^\circ \times 2^\circ$  до  $1/4^\circ \times 1/4^\circ$  земного меридиана для неглубоких событий с магнитудами от 3 и выше. Масштаб  $S3$  - для восточной части острова Хонсю в пределах от  $32^\circ$  до  $42^\circ$  с.ш. и от  $136^\circ$  до  $144^\circ$  в.д., для двух неперекрывающихся интервалов времени (с 01/09/1996 по 31/08/1999 и с 01/09/1999 по 01/09/2002), пространственных ячеек от  $2^\circ \times 2^\circ$  до  $1/8^\circ \times 1/8^\circ$  земного меридиана и событий с магнитудами больше или равных 2.4.

Оценка коэффициентов  $A$ ,  $B$ , и  $C$  для масштаба  $S1$  и надежна в 1875 ячейках размера  $1/8^\circ \times 1/8^\circ$ , а ошибки определения по статистике рандомизации угла поворота для каждого из коэффициентов в основном лежат в пределах 0.002-0.02. Коэффициент  $A$  изменяется от -2.0 до выше +0.5, что соответствует более чем 300-кратному изменению сейсмической активности. Два характерных максимума распределения оценок коэффициента  $A$ : -0.8 и -0.3, отражают средние значения сейсмической активности, наблюдающиеся на острове Хонсю и в зонах субдукции соответственно. Значения  $B$  имеют разброс от 0.6 до 1.4, также с двумя выраженными максимумами в районе 0.8 и 1.16. Эмпирическая плотность распределения значения коэффициента  $C$  унимодально, то есть имеет один ярко выраженный максимум около 1.4, и в основном сосредоточено в пределах от 1 до 1.5. Пространственное распределение значений достаточно однородно за одним исключением –

восточнее острова Хонсю выделяется область пониженных значений коэффициента  $C$  приблизительно равных 0.6.

Оценки коэффициентов в масштабах  $S2$  и  $S3$  направлены на пространственную и временную локализацию выделенной аномалии значений коэффициента  $C$ . Сделан вывод об активизации с середины 1999 года сейсмических процессов у восточного побережья острова Хонсю. Не исключено, что эта активизация связана с «тихим землетрясением» в районе Токай, которое было зарегистрировано на границе области высоких значений коэффициента  $A$  и низких значений коэффициента  $C$  и магнитуда которого значительно превышает 7.

*Калифорния:* Оценки коэффициентов ОЗПЗ получены в пределах от  $31^\circ$  до  $40^\circ$  с.ш., и от  $-114^\circ$  до  $-123^\circ$  з.д., с магнитудами от 2 и более за период с 1984 по 2004 гг. и пространственных ячеек от  $2^\circ \times 2^\circ$  до  $1/8^\circ \times 1/8^\circ$  земного меридиана. Коэффициент  $A$  имеет три характерных максимума в плотности распределения. Максимальные значения коэффициента  $A = -0.1$  отмечены в районе Сан-Бернардино. Значения в интервале от -0.2 до -0.4 представлены в районах Сан-Хосе, Лос-Анджелес и Уолкер-Лэйк и Марипоза, районах находящихся на границе со штатом Невада. Для остальной территории Калифорнии характерны значения логарифма сейсмической активности от -0.6 до -1.2, что соответствует от 25 до 6 событий в 10 лет. Наиболее низкие (порядка -1.6) значения коэффициента  $A$  отмечены в районе Санта-Мария. Такое распределение параметра сейсмической активности сопровождается изменениями коэффициента  $B$  в пределах от 0.8 до 1.2. Для большей части рассмотренной территории баланс между последовательными интервалами магнитуд составляет от 0.8 до 1.0. Более высокие значения, в интервале от 1.0 до 1.2 относятся к северо-восточной области (граница с горной областью, штат Невада) и районам Лонг-Бич и Сан-Диего на юго-западе штата. Эмпирическая плотность распределения коэффициента  $C$  в основном относится к интервалу от 0.9 до 1.2. Более высокие значения  $C$  от 1.2 до 1.5, отмечаются в районе Сан-Бернардино, и согласуются с высокой концентрацией активных разломов в этой области. Прибрежная полоса от  $32^\circ$  до  $36^\circ$  с.ш. представлена чередованием повышенных значений  $C$  (порядка 1.4) и областями его пониженных значений (около 0.8).

*Центральное Средиземноморье и Альпийский горный регион:* Последовательно рассмотрено распределение коэффициентов ОЗПЗ для трех масштабов. Масштаб  $S1$  – Центральное Средиземноморье и Альпийская горная система в пределах от  $36^\circ$  до  $50^\circ$  с.ш. и от  $2^\circ$  до  $20^\circ$  в.д., для пространственных ячеек линейного размера от  $4^\circ \times 4^\circ$  до  $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ . Масштаб  $S2$  – северная часть Апеннинского полуострова и Альпийская горная система, составляющие около 1/3 от территории охваченной масштабом  $S1$ , в пределах от  $43.5^\circ$  до  $48.5^\circ$  с.ш. и от  $5^\circ$  до  $16^\circ$  в.д., для пространственных ячеек линейного размера от  $2^\circ \times 2^\circ$  до  $1/8^\circ \times 1/8^\circ$  земного меридиана. Масштаб  $S3$  – территория провинции Фриули-

Венеция Джулия в пределах района Толмецио-Джермона-Бовек с  $45.5^\circ$  по  $46.7^\circ$  с.ш. и с  $11.7^\circ$  по  $14^\circ$  в.д., для пространственных ячеек линейного размера от  $1^\circ \times 1^\circ$  до  $1/16^\circ \times 1/16^\circ$ .

Для масштаба  $S1$  использованы данные Пополненного каталога Италии для магнитуд 3 и более, дополненные историческими данными с 1870 г.. Долгосрочные (136-летние) оценки коэффициентов ОЗПЗ получены в 2352 ячейках размера  $1/4^\circ \times 1/4^\circ$  рассматриваемой территории. Стандартная ошибка оценок коэффициентов не превышает 0.08. Эмпирическая плотность распределения логарифма сейсмической активности лежит в пределах от -0.7 до -1.8, что соответствует повторяемости умеренных событий магнитуды 5 от одного события в пять лет, до одного события в 60 лет. Максимальные значения  $A$ , отмечены в Центральных Апеннинах, на территории Калабрии и Сицилии. Наиболее низкими значениями характеризуется территория Западных Альп. Показатель баланса магнитуд имеет максимум в районе значения 0.8. Повышенные значения (около 1.2) коэффициент  $B$  имеет на севере Сицилии и на границе Италии и Франции. На территории Швейцарских Альп значения  $B$  наиболее низкие (менее 0.7). Значения коэффициент  $C$  изменяются в широком диапазоне от 0.9 до 1.5. Наивысшие значения отмечены на территории Швейцарских Альп и Северных Апеннин, в то время как самые низкие значения получены для пространственных ячеек на территории Сицилии. Для этой территории рассмотрено влияние вулканических событий на оценки коэффициентов ОЗПЗ. Включение в оценки 1890 вулканических событий приводят к повышению значений коэффициента  $C$  в среднем на 0.2 или более.

Рассмотрены совместные комбинации параметров ОЗПЗ, распределение которых имеет ярко выраженную заведомо неоднородную структуру, свидетельствующую в пользу наличия многообразия различных корреляционных соотношений и/или нетривиального аттрактора в порождающей динамической системе.

Оценены среднесрочные значения коэффициенты ОЗПЗ для шестилетних последовательных временных интервалов. На Рисунке 6 представлены временные вариации коэффициентов ОЗПЗ осредненные по всем результативным ячейкам масштаба  $S1$ . Также рассмотрены вариации коэффициентов ОЗПЗ для значений коэффициентов группированных по восьми сейсмогенным зонам Италии (Восточные Альпы, Западные Альпы, Северные Апеннины, Центральные Апеннины, Южные Апеннины, Калабрия, Сицилия, вулканическая зона Этны). Надежность среднесрочных параметров изменяется во времени и пространстве и их интерпретация не всегда возможна. Основное внимание уделено произошедшим за период наблюдений на рассматриваемой территории (или вблизи нее) сильным событиям (магнитудный порог рассмотренных событий зависит от анализируемой территории) и их возможному влиянию на среднесрочные вариации коэффициентов  $ABC$ . Отмечено антикоррелированное поведение коэффициентов  $A$  и  $B$ , а именно устойчивый рост сейсмической активности и понижение значений показателя баланса магнитуд во временном интервале между двумя сильными событиями.

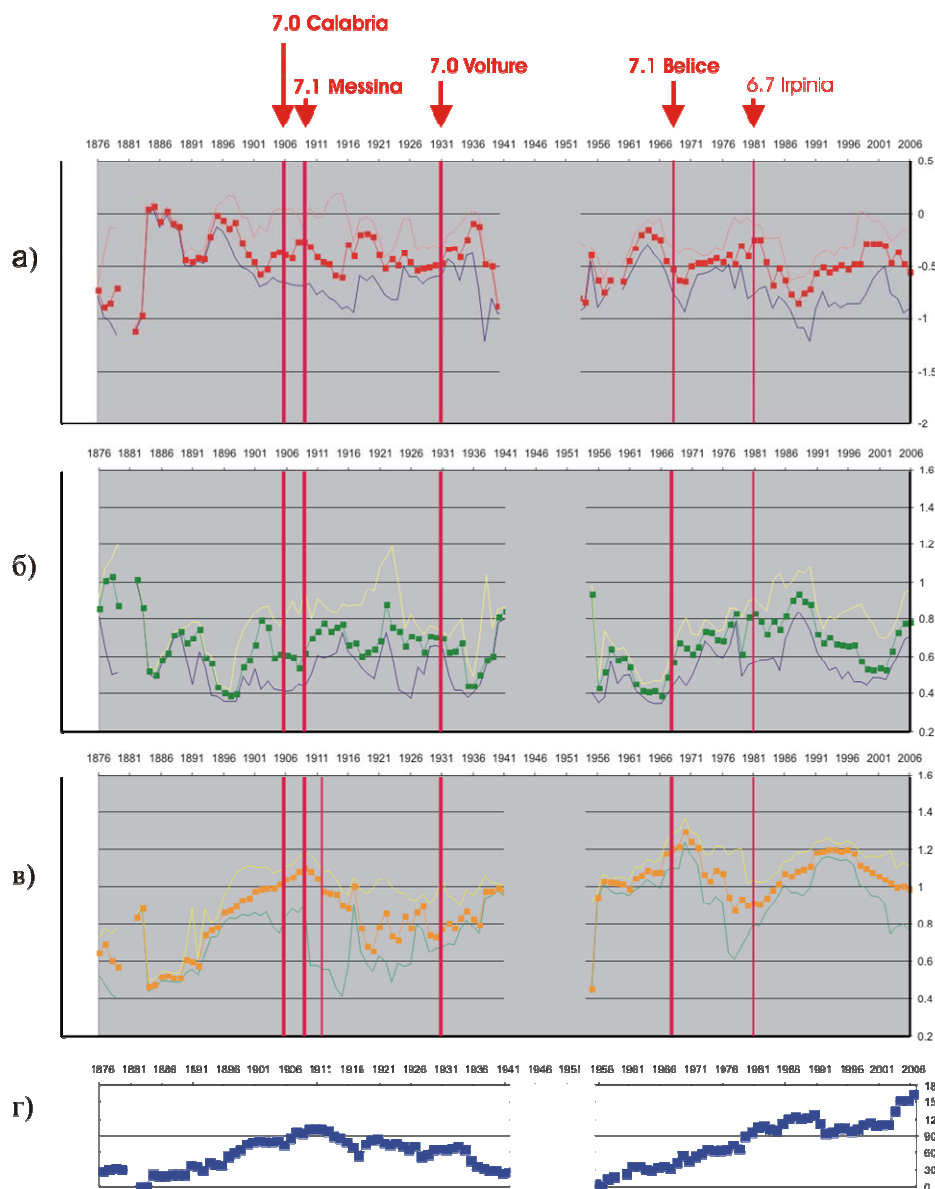


Рис. 6 Группированные шестилетние оценки коэффициентов ОЗПЗ для территории Центрального Средиземноморья и Альпийской горной системы (масштаб  $S1$ ): а) коэффициент  $A$ ; б) коэффициент  $B$ ; в) коэффициент  $C$ ; г) количество пространственных ячеек по которым проводилось осреднение. *Примечание:* Группированные средние оценки коэффициентов сопровождаются 75% и 25% квантилями, характеризующими разброс значений за интервал времени. Красной сплошной чертой указано время “значительных” (магнитуда более 7) событий, произошедших на рассматриваемой территории. Максимальная магнитуда и название событий указаны над верхним графиком. Разрыв графиков соответствует периоду с 1938 по 1954 годы, для которого оценки коэффициентов ОЗПЗ не проводились из-за очевидной неполноты используемых данных во время II-ой Мировой войны.

Для оценок коэффициентов ОЗПЗ в масштабе  $S2$  использованы данные Модернизированного каталога Италии с магнитудами от 2.6 и выше с 1974 по 2005 г.. Распределение значений коэффициента  $A$  в эти 32 года имеют четыре характерных максимума в точках -0.2, -0.7, -1.1, и -1.8. Эти значения наблюдаются, соответственно, в Центральных Апеннинах, на северо-восточной границе Италии и в Северных Апеннинах, в областях разделяющих эти районы,



и на северо-западной границе Италии, соответственно. Распределение значений коэффициента  $B$  также имеет четыре максимума около 1.3, 1.1, 0.95 и 0.8, однако, области, где эти значения встречаются, за исключением области, соответствующей наиболее низким значениям сейсмической активности на северо-западной границе Италии, значительно отличаются от упомянутых областей характерных значений  $A$ . Значения коэффициента  $C$  имеют скошенное распределение с 4%-ым максимумом в районе 1.4 и вырождающимся от 0.5% «хвостом» в интервале от 1.1 до 0.8 и ниже. Эти сравнительно пониженные значения коэффициента  $C$  очевидно вызваны сильным событием 1976 года во Фриули, которое доминирует в распределении сейсмической активности на 32-летнем интервале, и с которым связаны высокие значения коэффициента  $A$  на северо-восточной границе Италии. Следует отметить самые высокие значения коэффициента  $C$  на раздробленной горной территории, а именно в Северных Апеннинах и Швейцарских Альпах. Аналогично масштабу  $S1$  получены среднесрочные шестилетние оценки коэффициентов ОЗПЗ и рассмотрены временные вариации группируемых оценок коэффициентов для сейсмогенных зон Восточных Альп, Западных Альпы и Северных Апеннины.

Для масштаба  $S3$  долгосрочные оценки коэффициентов ОЗПЗ получены для пяти ступеней пространственной иерархии для данных локального каталога Национального института океанографии и Экспериментальной с 1977 по 2005 гг. и магнитуд 2.2 и более. Получено характерное значений параметра сейсмической активности  $A$  равное -1.5 и показателя баланса магнитуд  $B$  около 1.15, каждое из которых составляют 12% от общего определения. Значения коэффициента  $C$  изменяются от 1.4 до менее 0.8.

Описанные в третьей главе оценки коэффициентов ОЗПЗ с использованием более точных и представительных региональных каталогов, говорят о возможности раздвинуть границы применимости ОЗПЗ на более широкие диапазоны магнитуд и детализировать размеры области рассмотрения. Современные локальные и региональные каталоги позволяют применять алгоритм оценки коэффициентов подобия в энергетическом масштабе от магнитуд 2 и возможно менее, пространственное рассмотрение возможно в масштабах начиная от 6-10 км, а временной интервал начинается от 4-6 лет. Временные вариации значений  $A$ ,  $B$ , и  $C$ , обнаруженные в результате анализа региональной сейсмичности, указывают на изменчивость этих характеристик во времени и, по-видимому, обусловлены различной сейсмической динамикой в рассмотренные периоды. Мониторинг этих характеристик в реальном времени позволит заблаговременно выявить и локализовать аномалии динамики сейсмичности, а также уточнить их особенности в ходе последовательного анализа в разных приближениях.

## Глава 4. Использование коэффициентов ОЗПЗ при оценке сейсмической опасности и сейсмического риска

Глава посвящена использованию коэффициентов ОЗПЗ при оценках параметров сейсмического риска и сейсмической опасности.

Напомним, что оценки параметров сейсмического риска являются результатом свертки сейсмической опасности с параметрами объекта, который может подвергнуться сейсмическому воздействию:  $R(g)=H(g) \otimes O(g) \otimes V(O(g))$ , где  $R(g)$  – плотность риска в точке  $g$ ,  $H(g)$  – плотность сейсмической опасности в точке  $g$ ,  $O(g)$  – плотность объектов способных испытать сейсмическое воздействие в точке  $g$ , и  $V(O)$  – специальные собственные характеристики объекта риска. Плотность сейсмической опасности в точке  $g$ ,  $H(g)$ , обычно считается равномерно распределенной в объемлющей области и согласованной с соотношением Гутенберга-Рихтера для числа землетрясений разной силы,  $N(M)$ , что противоречит наблюдениям. В главе показано, что традиционное определение сейсмического риска для городов и промышленных агломераций, игнорирующее пространственную природу возникновения землетрясений, может привести к многократному недооцениванию опасности.

Пусть разрушительными событиями для конкретного города  $c$  являются землетрясения с магнитудой  $M$ . Определим меру сейсмического риска  $r_c$  как

$$r_c = N(M) = 10^A \times 10^{B \times (5-M)} \times S^{C/2},$$

где  $S$  - площадь города, а  $A$ ,  $B$ ,  $C$  - коэффициенты ОЗПЗ, рассчитанные для координат города. В этом случае объектом риска является город как таковой, и параметр риска определяет повторяемость разрушительных событий на его территории. Причем при сравнении значений риска для разных городов рассматривается тривиальный подход, при котором  $V(O(g))=1$ .

Если объектом риска является население города и параметр риска определяет ожидаемое число жителей города, которые могут испытать разрушительное землетрясение, отнесенное к одному году, то мера сейсмического риска будет:

$$r_p = N(M) \times P_c,$$

где  $N(M)=r_c$ , а  $P_c$  - число жителей города  $c$ .

Локальные оценки  $r_c$  и  $r_p$  получены для 833 городов мира с использованием глобальных оценок ОЗПЗ из Главы 2. Расчеты проведены для четырех групп сейсмических событий: «умеренных» (магнитуда 5 и более,  $M5+$ ), «сильных» ( $M6+$ ), «значительных» ( $M7+$ ) и «крупнейших» ( $M8+$ ). Города Японии (Токио, Кобе, Киото, Иокогама) и столица Тайваня (Тайпей) вошли в десятку с наивысшими значениями  $r_c$  для всех четырех типов событий. Значения  $r_p$  максимальны для городов Токио, Йокогама (Япония), Лос-Анджелес, Сан-Франциско (США), Сантьяго (Чили), Джакарта (Индонезия), Мехико (Мексика) и Лима (Перу) для всех четырех типов событий. Максимальные значения повторяемости «сильных» сейсмических событий приведены в Таблице 1:

Таблица 1

Максимальные значения повторяемости сейсмических событий  $M6+$

Город	Страна	Население, чел.	$A$	$B$	$C$	$r_c$
Токио	Япония	11,906,331	0.14	0.94	1.34	0.15663
Тайпей	Китай	1,769,568	0.22	0.80	1.15	0.08580
Джакарта	Индонезия	6,503,449	0.15	1.06	1.23	0.08349
Кобз	Япония	1,422,922	0.17	0.90	0.84	0.07368
Иокогама	Япония	3,049,782	0.15	0.95	1.32	0.06258
Киото	Япония	1,480,355	0.16	0.93	0.96	0.06177
Сантьяго	Чили	4,099,714	0.08	1.05	1.21	0.05579
Гуанджоу	Китай	403,180	0.39	0.95	0.96	0.05310
Лос-Анджелес	США	13,074,800	-0.34	0.95	1.19	0.05267
Каохсиунг	Китай	828,191	0.21	0.80	1.18	0.05165

С использованием региональных оценок ОЗПЗ из Главы 3, аналогично оценкам сейсмического риска, полученным по глобальным данным для крупнейших городов мира, алгоритм  $SCE$  был применен для определения параметров  $r_c$  и  $r_p$  для принципиальных городов Калифорнии. Оценки параметров сейсмического риска  $r_c$  и  $r_p$  получены для 28 городов. Наиболее сейсмически опасным является крупнейший город Калифорнии - Лос-Анджелес (повторяемость событий  $M5+$  оценивается примерно 1 в 6 лет), города Сан-Хосе (1 событие в 15 лет) и Сан-Франциско (1 событие в 22 года).

Также оценки сейсмического риска получены для отдельных городов Апеннинского полуострова.

Участвующие в оценках сейсмического риска глобальные и региональные коэффициенты ОЗПЗ получены по данным из почти не перекрывающимся энергетических диапазонов. Сравнение глобальных и региональных оценок риска ( $r_c$  и  $r_p$ ) показало хорошую согласованность оценок между собой.

### Заключение

Изложение завершается суммированием основных результатов и выводов, полученных в диссертационной работе:

Впервые проведено последовательно систематическое исследование коэффициентов ОЗПЗ, учитывающего фрактальную природу землетрясений. Оценка значений коэффициентов ОЗПЗ выполнена разработанным автором модифицированным алгоритмом  $SCE$ .

Продемонстрирована возможность применения алгоритма в широком пространственно-магнитудно-временном диапазоне, и отмечена высокая

согласованность оценок коэффициентов, полученных для масштабов разного уровня.

Географическое распределение оценки фрактальной размерности множества сосредоточения эпицентров наглядно показало, что коэффициент  $C$  отражает тектонические и морфоструктурные особенности изучаемых регионов.

Среднесрочные временные вариации значений коэффициентов  $A$ ,  $B$ , и  $C$ , указывают на изменчивость этих характеристик во времени. Мониторинг этих характеристик в реальном времени может позволить заблаговременно выявить и локализовать аномалии динамики сейсмичности, а также уточнить их особенности в ходе последовательного анализа в разных приближениях.

Исследовано применение коэффициентов ОЗПЗ в задачах оценки сейсмического риска. Впервые проведена единообразная систематическая оценка риска для крупнейших городов мира. Показано, что сейсмические данные представительные на временном интервале порядка столетия обеспечивают достаточно адекватные оценки параметров сейсмической опасности и сейсмического риска.

Сделан вывод об использовании при оценках риска данных по максимально доступному временному интервалу с привлечением исторических и даже палеосейсмических данных.

Показано, что традиционное игнорирование фрактального характера пространственного распределения землетрясений может приводить к многократному недооцениванию сейсмической опасности территории и, как следствие, сейсмического риска для городов и их населения.

#### **Список основных публикаций по теме диссертации:**

1. Молчан Г.М., Кронрод Т.Л., Дмитриева О.Е., Некрасова А.К. (1996), Многомасштабная модель сейсмичности в задачах сейсмического риска: Италия. // Современные проблемы сейсмичности и динамики Земли, М., Наука, с.193-224. (Вычисл. сейсмология, Вып.28).
2. Кронрод Т. Л., Некрасова А. К. (1996), Сейсмический риск крупнейших городов мира: проверка оценок. // Современные проблемы сейсмичности и динамики Земли, М., Наука, с.225-237. (Вычисл. Сейсмология, Вып.28).
3. Nekrasova, A., and Kossobokov V. (2002), Generalizing the Gutenberg-Richter scaling law. EOS Trans. AGU, 83 (47), Fall Meet. Suppl., Abstract NG62B-0958.
4. Kossobokov, V., and Nekrasova A. (2003), Generalized Gutenberg-Richter recurrence law. Geophysical Research Abstracts, 5, 2003. Abstracts of the Contributions of the EGS-AGU-EGU Joint Assembly, Nice, France, 06-11 April, (CD-ROM): EAE03-A-06597.
5. Nekrasova, A., and Kossobokov V. (2003), Generalized Gutenberg-Richter recurrence law: Global map of parameters. Geophysical Research Abstracts, 5, 2003. Abstracts of the Contributions of the EGS-AGU-EGU Joint Assembly, Nice, France, 06-11 April, (CD-ROM): EAE03-A-03801.

6. Nekrasova, A.K., and Kossobokov V. (2003), Global hazard maps based on unified scaling law for earthquakes. In IUGG2003, June 30 – July 11, Sapporo, Japan. Abstracts, Week A: A.148.
7. Kossobokov, V. G., D. L. Turcotte, and A. K. Nekrasova (2003), Unified Scaling Law for Earthquakes: Implications for Hazard Assessment. Eos Trans. AGU, 84 (46), Fall Meet. Suppl., Abstract NG41B-0062.
8. Кособоков В.Г., Некрасова А.К. (2004), Общий закон подобия для землетрясений: глобальная карта параметров // Анализ геодинамических и сейсмических процессов. М.: ГЕОС, с.160-175 (Вычисл. сейсмология. Вып. 35).
9. Некрасова А.К., Кособоков В.Г. (2005), Временные вариации параметров Общего закона подобия для землетрясений на востоке острова Хонсю (Япония). Доклады Академии наук, т. 405, № 4, с 529–532.
10. Nekrasova A., and V. Kossobokov (2005), Temporal variation of the seismic unified scaling law parameters. Geophysical Research Abstracts, 7, 2005. Abstracts of the Contributions of the EGU General Assembly 2005, Vienna, Austria, 24-29 April, (CD-ROM): EGU05-A-05840.
11. Nekrasova A., Kossobokov, V. (2005), Unified Scaling Law for Earthquakes: Mega-cities and urban agglomerations, Eos Trans. AGU, 86(52), Fall Meet. Suppl., Abstract S23A-0229.
12. Некрасова А.К., Кособоков В.Г. (2006), Общий закон подобия для землетрясений. Прибайкалье. Доклады Академии наук, т. 407, № 5, с 679–681.
13. Nekrasova A.K. (2007), Part 4: Earthquake Hazard in the Alps - 4.1 - Unified scaling law for earthquakes in the Alps: a multiscale application. In: Final report of the ALPS-GPSQuakenet project, Interreg III B Alpine Space programme, Muenchen, Bayerische Akademie der Wissenschaften, pp 63-85.
14. Kossobokov, V.G., Nekrasova, A.K. (2007) Unified Scaling Law for Earthquakes: Implications for seismic hazard and risk assessment. In IUGG2007, July 2-13, 2007, Perugia, Italy. Abstracts, SS002-65.