

**Опыт прогнозирования сейсмической опасности на Камчатке в 1995-1996 гг. (по материалам работы Межведомственного научно-технического экспертного совета при Камчатском центре мониторинга сейсмической и вулканической активности) / Сборник статей.: КОМСП ГС РАН. г. Петропавловск - Камчатский. 1999. 83 с.**

В сборнике публикуются статьи камчатских ученых, участвовавших в работе секции прогноза землетрясений Межведомственного научно-технического экспертного совета при Камчатском центре мониторинга сейсмической и вулканической активности в 1995-1996 гг. Исследования посвящены практическим аспектам приложения научных разработок в области сейсмологии и геофизики для прогнозирования сейсмической опасности в Камчатской области. Представлены результаты работы по прогнозу землетрясений с магнитудами порядка 7, произошедших на Камчатке в 1995-1996 гг.

Утверждено к печати Межведомственным научно-техническим экспертным советом при Камчатском центре мониторинга сейсмической и вулканической активности при Администрации Камчатской области.

Ответственный за выпуск: к.г.-м.н. Г.Н.Копылова

© КОМСП ГС РАН. 1999 г.

©1997 г. Гусев А. А., Абубакиров И. Р.  
Институт вулканической геологии  
и геохимии ДВО РАН

## **ОПЫТ И НЕКОТОРЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО КОДА-ВОЛНАМ НА КАМЧАТКЕ**

### **Введение**

Лаборатория сейсмологии ИВГиГ ДВО РАН ведет непрерывное слежение за параметрами кода-волн местных землетрясений Камчатки. Цель этой работы - выявление в оперативном порядке возможных предвестниковых аномалий и выдача среднесрочных прогнозов сильных землетрясений. В конце 1996 г. завершился четырнадцатый год такого непрерывного слежения. Методика этой работы заложена исследованиями А. А. Гусева и В. К. Лемзикова, обнаруживших в 1978-1981 гг. существование предвестниковых аномалий свойств коды (хвостовой части записи, рассеянного эхосигнала) слабых местных землетрясений [2, 3]. Конкретный использованный параметр

коды, обозначенный  $\alpha$ , характеризует скорость спада во времени текущей видимой амплитуды, или, иначе говоря, огибающей записи коды; в идеале он должен быть равен производной

$$\alpha = d/dt[\lg A(t) - \lg a(t)], \quad (1)$$

где  $A(t)$  - текущая амплитуда/огибающая коды;  $a(t)$  - реперная или опорная функция, представляющая среднюю региональную форму огибающей записи коды.

Вообще, форма огибающей спада коды довольно устойчива, и отклонения от нее (неслучайные индивидуальные особенности отдельных записей) визуально выражены слабо. Была разработана специальная методика обработки данных, которая позволила выделять такие отклонения с хорошей надежностью. При этой обработке параметр  $\alpha$  индивидуальной записи оценивался как коэффициент наклона в уравнении регрессии

$$\lg 2A(t_i) - \lg a(t_i) = \alpha * t_i + \beta, \quad (2)$$

где  $t_i$  - центры последовательных 10-секундных интервалов записи;  $2A(t_i)$  - обмеры двойной амплитуды в последовательных 10-секундных окнах;  $a(t_i)$  - значения средней региональной огибающей, взятые в моменты времен  $t_i$ .

Работами 1978-1982 гг. было обнаружено, что в 1963, 1971 и 1978 гг. выраженные бухтообразные отрицательные аномалии параметра  $\alpha$  предваряли три сильнейших ( $M$  около 8) землетрясения Камчатки и Курил, опережая их на 0,8-1,6 года (считая от начала аномалии). Основываясь на этом опыте, в конце 1982 г. было начато оперативное слежение и анализ данных в целях оперативного прогнозирования. Далее в Разделе 1 мы изложим некоторые результаты этих работ: традиционную и новую методику обработки, опыт практического прогнозирования событий 17.08.1983 г. и 16.07.1996 г. В Разделе 2 мы опишем исследование некоторых принципиальных вопросов обоснования методики прогноза по параметру  $\alpha$ .

## Раздел 1. Опыт среднесрочного прогнозирования по параметру $\alpha$ в 1982-1996 гг.: методика, ее развитие в последние годы, ее успехи и неудачи

### 1.1 Организация непрерывного слежения за вариациями $\alpha$

Оперативное слежение за параметром  $\alpha$  организовано следующим образом. Основная эпицентральная зона Камчатки разделена на три части, географически соответствующих районам: Авачинский залив (АВЗ); Кроноцкий залив (КРЗ); Камчатский пролив и Камчатский залив (КАМПЗ). В качестве границ, разделяющих районы, условно выбраны параллели  $53^\circ$  и  $54,5^\circ$  с.ш. Дополнительное условие - значение  $t_s - t_p$  не более 13 с - определяет остальные границы районов. Слабые землетрясения из этих трех районов обрабатывались отдельно.

Для слежения за АВЗ использовались фотозаписи региональных с/ст. Березовая (BRZ), Шипунский (SPN) и Петропавловск (PET). Для слежения за КРЗ использовались записи региональных с/ст. Шипунский и Кроноки (KRI); для КАМПЗ - Кроноки и Крутоберегово (KBG). После 1992 г. по ст. Петропавловск использовали записи радиотелеметрической с/ст. Петропавловск, полученные на тепловой бумаге с использованием интегратора и регистрируя РВЗ-3, что обеспечивало сквозную частотную характеристику, сопоставимую, но, по-видимому, не вполне идентичную характеристикам региональных с/ст. с гальванометрической регистрацией.

В апреле 1994 г. была выведена из эксплуатации с/ст. Березовая; с этого момента слежение за районом Авачинского залива стало проводиться по данным двух оставшихся

станций - Петропавловск и Шипунский. С марта 1995 г. прекращено воспроизведение на бумаге записей с/ст. Петропавловск и слежение за АВЗ с апреля 1995 г. стало проводиться по данным единственной с/ст Шипунский. В середине декабря 1995 г. ст. Шипунский была переведена на режим телеметрической регистрации, и слежение за АВЗ по ранее отработанной методике стало невозможным.

Дальнейшее оперативное слежение для АВЗ будет продолжено на основе данных цифрового накопления. С января 1996 г. в Камчатской ОМСП ГС РАН начал создаваться цифровой архив записей радиотелеметрических с/ст на CD-ROM. Поэтому, с 1996 г. начато слежение за АВЗ с использованием записей радиотелеметрических станций - Русская (RUS), Петропавловск и Шипунский. Также начато пробное слежение за КРЗ по записям ст. Карымский (KRY) и Шипунский. При этом, хотя и нет возможности убедиться в полной идентичности оценок по фотозаписи и по цифровой записи, однако ряд вариантов контроля не выявил заметных различий между ними, и оценки  $\alpha$  по "старой" и "новой" методикам можно считать вполне сопоставимыми.

## 1.2. Методика оценки $\alpha$ по данным цифрового накопления

Методика оценки  $\alpha$  по данным фотозаписей опубликована [2, 3]. Отработанный к настоящему времени вариант методики расчета параметра  $\alpha$  по цифровым записям моделирует обработку фотозаписей. Расчет проводится по следующей схеме:

- I. Преобразование исходных цифровых велосиграмм в записи смещений.
- II. Построение сглаженной огибающей кода-волн.
- III. Собственно расчет параметра  $\alpha$ .

Опишем подробнее каждый из этапов этой схемы. Для осуществления I-го этапа использовалось приближенное моделирование записей на выходе канала, имеющего частотную характеристику региональной станции с гальванометрической регистрацией. Для этого выполнялось интегрирование исходной записи велосиграфа и затем фильтрация ВЧ фильтром первого порядка с частотой среза 0,83 Гц. Это обеспечивало плоскую характеристику в диапазоне 1-10 Гц и рост по кубу частоты ниже 0,5 Гц, в соответствии со свойствами гальванометрического регионального канала.

Для построения огибающих кода-волн по цифровым записям используется следующий алгоритм:

1. На экране воспроизводится трехкомпонентная запись и снимаются времена  $t_P$ ,  $t_S$  вступлений P- и S-волн, оценивается время в очаге  $t_o$ .

2. На каждом из трех каналов NS, EW, Z в отдельности оценивается уровень шума  $n_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) по следующей схеме:

а) из исходной записи под визуальным контролем вырезается участок шума  $n(t)$  перед вступлением P-волны, длительностью 40-60 с;

б) определяется огибающая  $n(t)$  выделенного участка шума, на основе формулы:  $n(t) = (x(t)^2 + H(x(t))^2)^{0.5}$ , где  $H(x(t))$  - преобразование Гильберта от  $x(t)$ ;

в) оценивается уровень шума, как среднее значение квадрата огибающей в пределах ранее заданного в диалоге участка.

3. Для каждого из трех каналов в отдельности рассчитывается огибающая  $e_i(t)$  ( $i=1, 2, 3$ ) полной записи, которая затем осредняется с шагом 5 с. Параллельно вычисляется квадрат максимальной амплитуды, также в окне 5 с.

4. Рассчитывается время  $t_{c1}$  начала коды в соответствии с формулой  $t_{c1} = t_o + 1,8(t_S - t_o)$ . Если к моменту  $t_{c1}$  запись еще искажена за счет нелинейного ограничения ("клипирования"), имеющего место в силу ограниченного динамического диапазона

системы телеметрии, значение  $t_{c1}$  автоматически увеличивается до более позднего момента, когда амплитуды уже не искажены.

5. Рассчитывается время  $t_{c2}$  конца коды. Для этого для каждого канала ищется самый ранний после  $t_{c1}$  момент времени, в который оценка функции "чистой" мощности сигнала  $d_i(t)=e_i(t)-n_i(t)$  в первый раз близка к нулю. Такая оценка считается предварительной и затем корректируется в диалоге.

Набор полученных в интервале  $[t_{c1}, t_{c2}]$  с шагом 5 с значений слаженных огибающих коды для каждого канала используется для расчета оценок параметра  $\alpha$  стандартным методом наименьших квадратов по уравнению (2). Минимальная длительность интервала  $(t_{c1}, t_{c2})$  выбрана в 60 секунд. Этот интервал может располагаться в любом месте большего временного интервала  $t_{c1-2}=40-190$  с.

На двух рисунках иллюстрируются методические аспекты работы. Рис.1.1 слева показывает 17 записей коды компоненты Z ст. РЕТ, которые выбраны в качестве приемлемых для анализа за период январь-сентябрь 1996 г. Приведены логарифмы средних квадратов амплитуд в 0,5 с интервалах, начиная от момента времени в очаге (где виден уровень микросейсм) и до выхода на уровень микросейсм снова. Каждая запись отображена одной штриховой линией. Вступления P и S видны в виде ступеней. Участок записи, принятый в качестве рабочего участка коды, изображен сплошной линией. Те же участки с осреднением по окнам длиной 2,5 с приведены на правом графике.

На рис.1.2 приведена средняя огибающая коды компоненты Z ст. Петропавловск за январь-сентябрь 1996 г., полученная по 17 записям. Приведен вариант осреднения по окнам в 5 с (штрих-пунктир) и 15 с (сплошная волнистая кривая). Для сопоставления дана средняя камчатская региональная огибающая по Гусеву и Лемзикову [2]. Видно хорошее согласие осредненной группы данных со средним по региональной аппаратуре. Линия внизу графика дает характеристику относительной точности осредненной кривой спада амплитуд коды: более высокая точность обеспечена в центре графика в интервале 80-150 с; вне этого интервала точность падает.

На рис.1.3 иллюстрируются результаты цифровой обработки на примере горизонтальных каналов станции ПТР. Приведены два графика: верхний - при расчете  $\alpha$  по пиковым амплитудам, традиционным путем; нижний - аналогичный расчет по среднеквадратическим амплитудам, то есть по текущей мощности сигнала. "Усы" на графиках - это +/- стандартное уклонение индивидуальной оценки  $\alpha$ .

### 1.3. Прогноз события 17.08.1983 г.

Вскоре после начала слежения за параметром  $\alpha$  в феврале 1983 г. были обнаружены отрицательные аномалии на станциях К-Б и КРН, которые были интерпретированы как предвестник сильного землетрясения в районе залива Камчатский. 28 февраля 1983 г. А. А. Гусев с участием В. К. Лемзикова подготовил документ "Записка об оценке сейсмической обстановки на Камчатке на 20 февраля 1983 г.". На рис 1.4 и 1.5 приведены два графика из Записки... от 20.02.1983 г. - схема района прогноза и график вариаций  $\alpha$ . Было сделано следующее заключение:

"...Грубая оценка вероятности сильного ( $M=7,5-8$ ) землетрясения - 40% ...  
Район прогноза - Камчатский пролив, Камчатский залив и п-ов Кроноцкий от траверза мыса Сивучий до траверза мыса Козлова. Опасный период - февраль - сентябрь 1983 г., период наибольшей опасности - середина марта - середина июля."  
Материалы "Записки..." от 28.02.1983 г. были направлены в МССС при Президиуме АН СССР и были вскоре размножены в рассыляемом МССС "Бюллетене прогноза землетрясений".

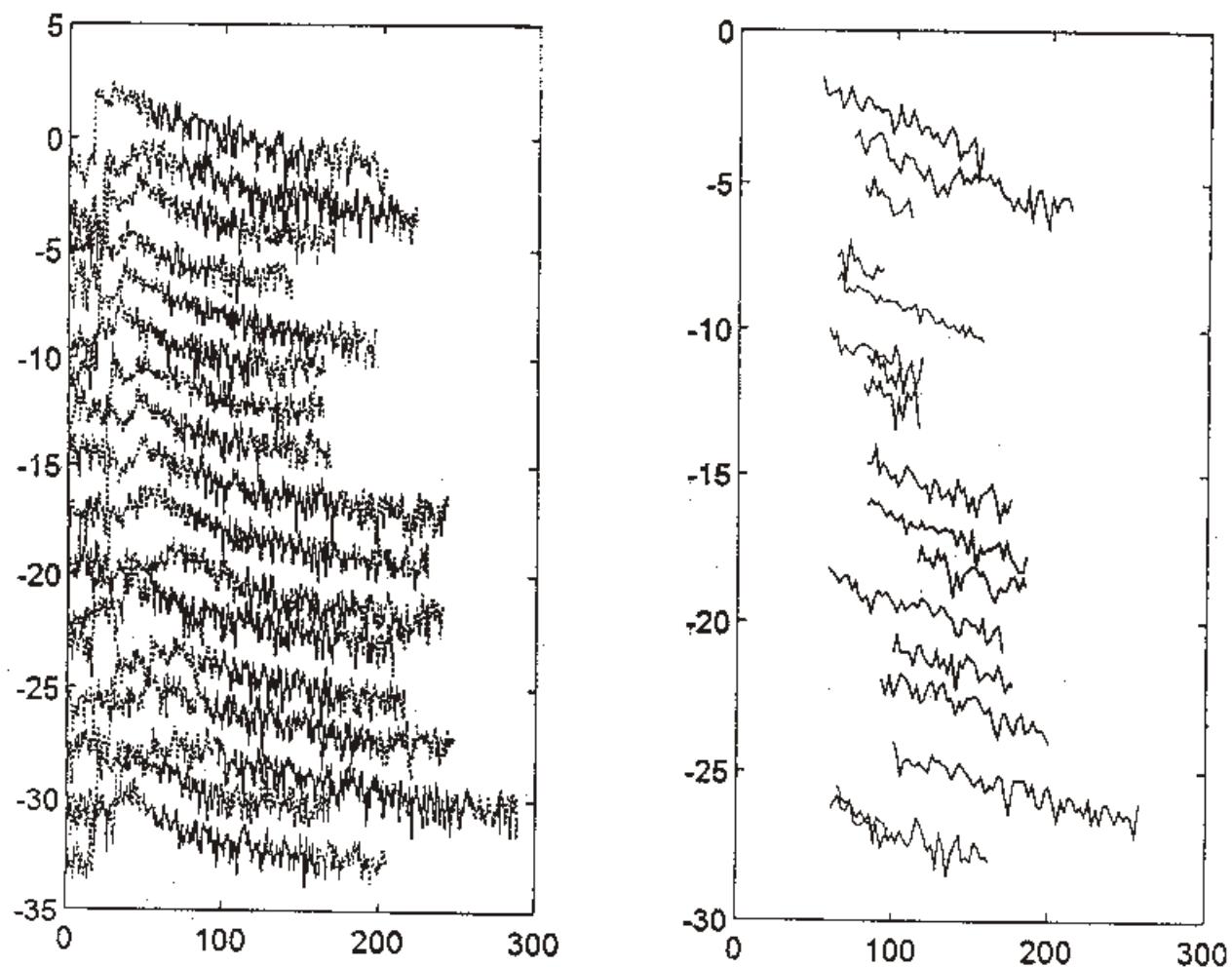


Рис.1.1. Огибающие коды периода I-IX 1996 г. ст. PET канал Z по данным цифровой обработки

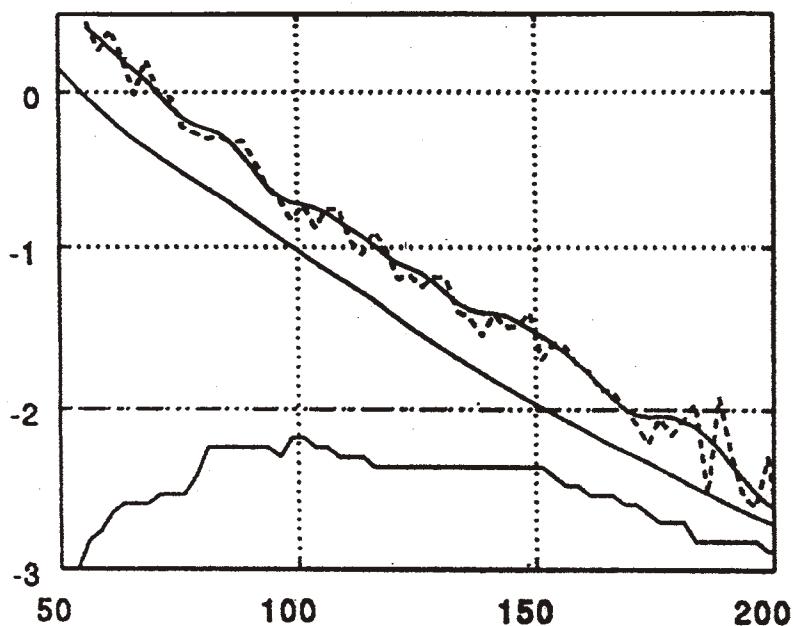


Рис.1.2. Средняя форма огибающей коды по данным рис.1.1 (две ломаные - два варианта сглаживания) и стандартная огибающая 1980 г. (гладкая кривая)

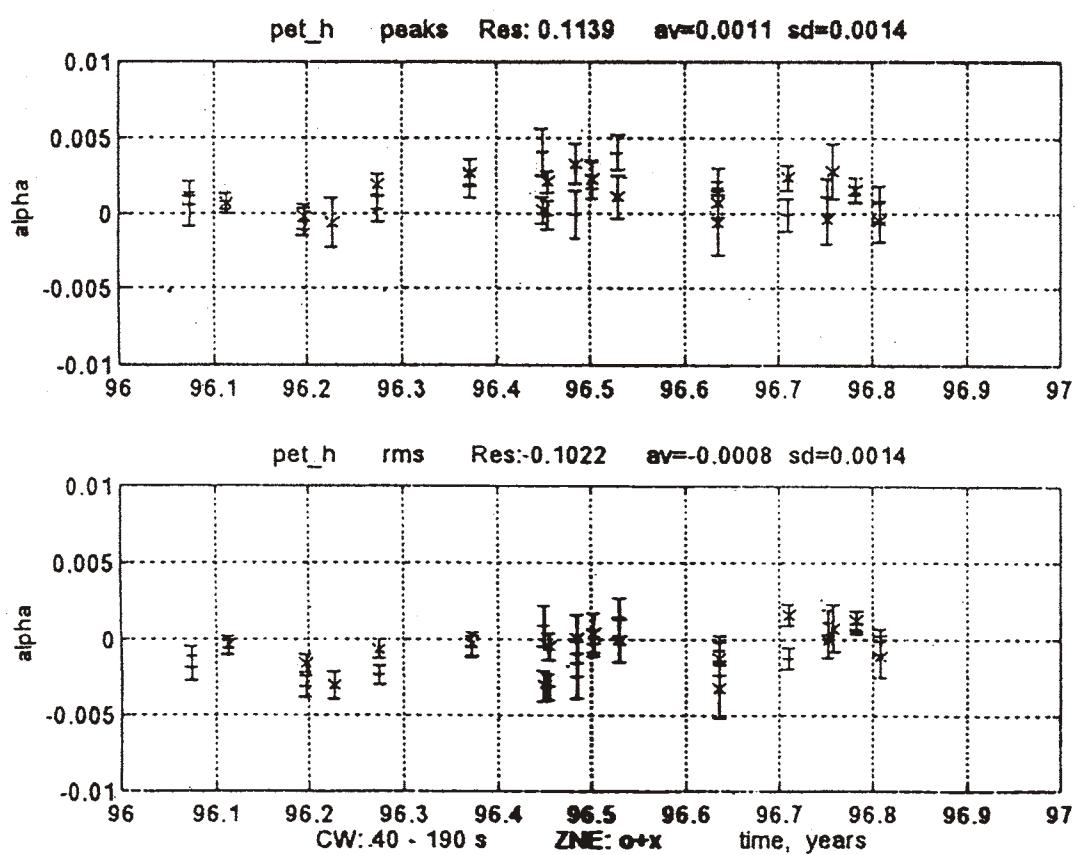
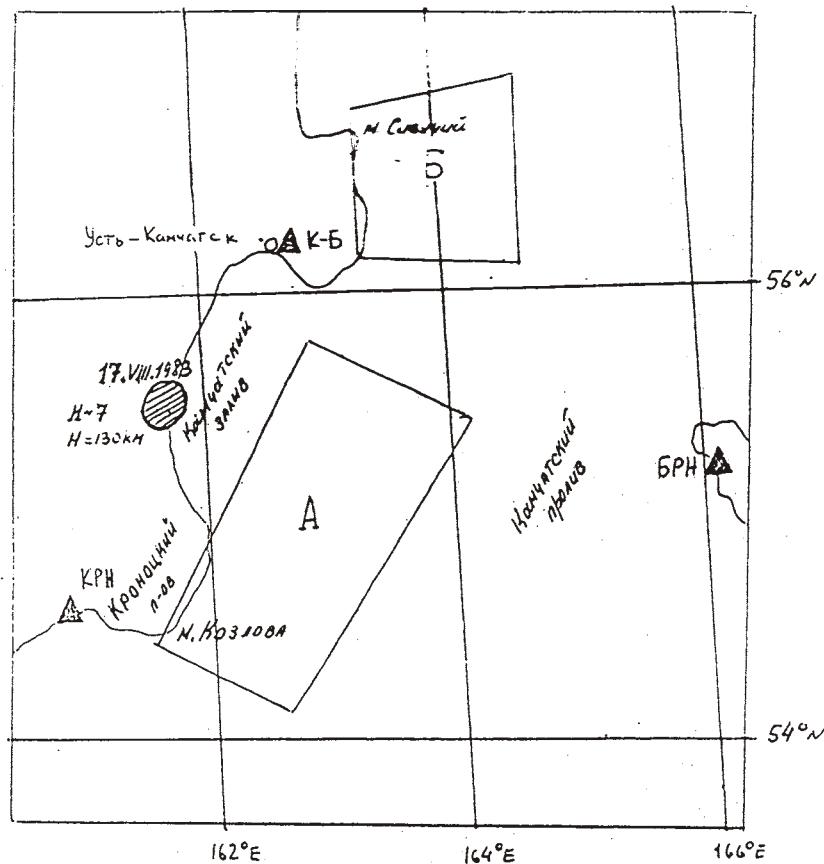
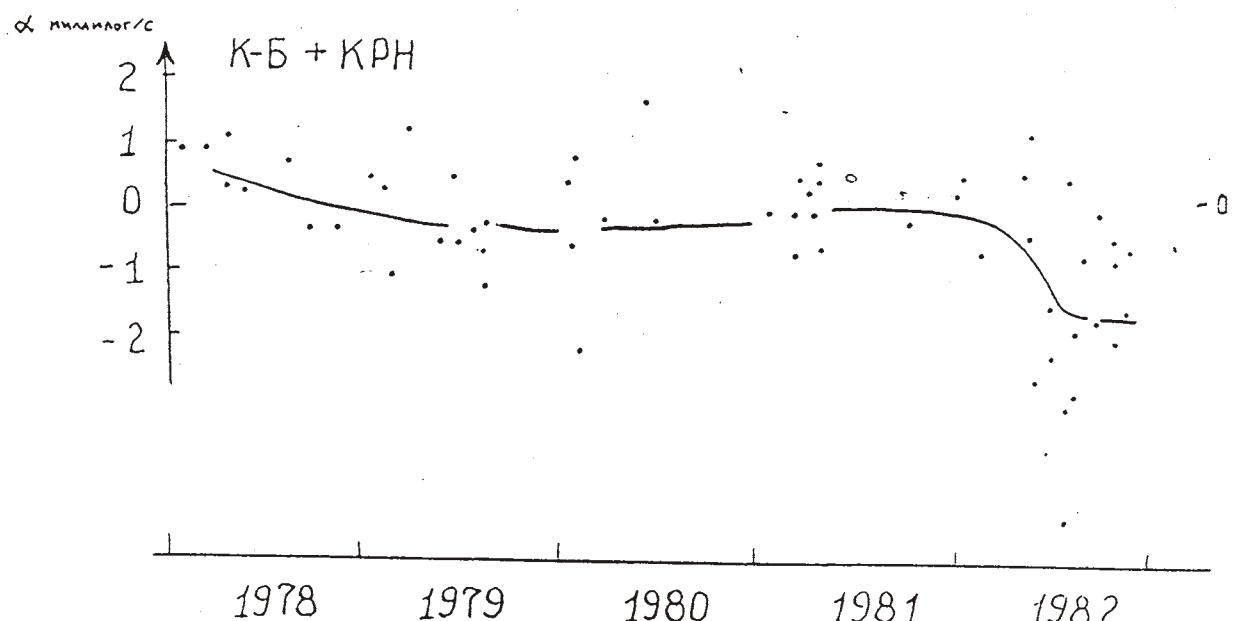


Рис.1.3. Значения  $\alpha$  за I-IX 1996, горизонтальные каналы ст. РЕТ. Верхний график - традиционная обработка по пикам, нижний график - обработка среднеквадратичных значений.



**Рис.1.4.** Карта-схема из “Записки...” от 28 февраля 1983 г. Указаны географические пункты, упомянутые в прогнозе. А и Б -зоны, оцененные как наиболее опасные в пределах всего района прогноза (мыс Козлова- мыс Сивучий). На схему из “Записки...” нанесен очаг толчка 17 августа 1983 г. В опасной зоне Б произошло землетрясение с  $M_w=6,7$ ,  $M_{LH}=7,5$  28 декабря 1984 г. Треугольники- сейсмические станции.



**Рис.1.5.** График значений  $\alpha$ , осредненных по всем шести каналам станций К-Б и КРН из “Записки...” от 20 февраля 1983 г.

25 апреля 1983 г. в "Записке №2..." прогноз был подтвержден. 20 июня в "Записке №3 ..." прогноз был уточнен в отношении временного окна и вероятности, в следующих выражениях:

"...возможный период для сильного землетрясения в районе Камчатского залива - июнь-октябрь 1983 г.; наиболее вероятный - июль-сентябрь. Оценка вероятности ... - 50% или более".

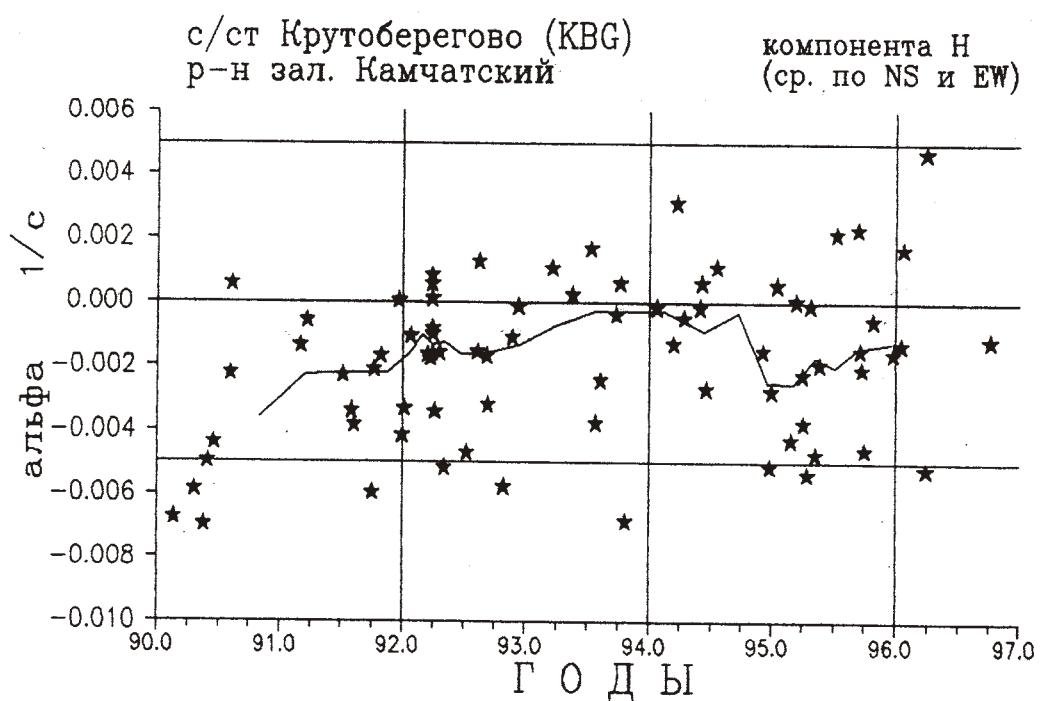
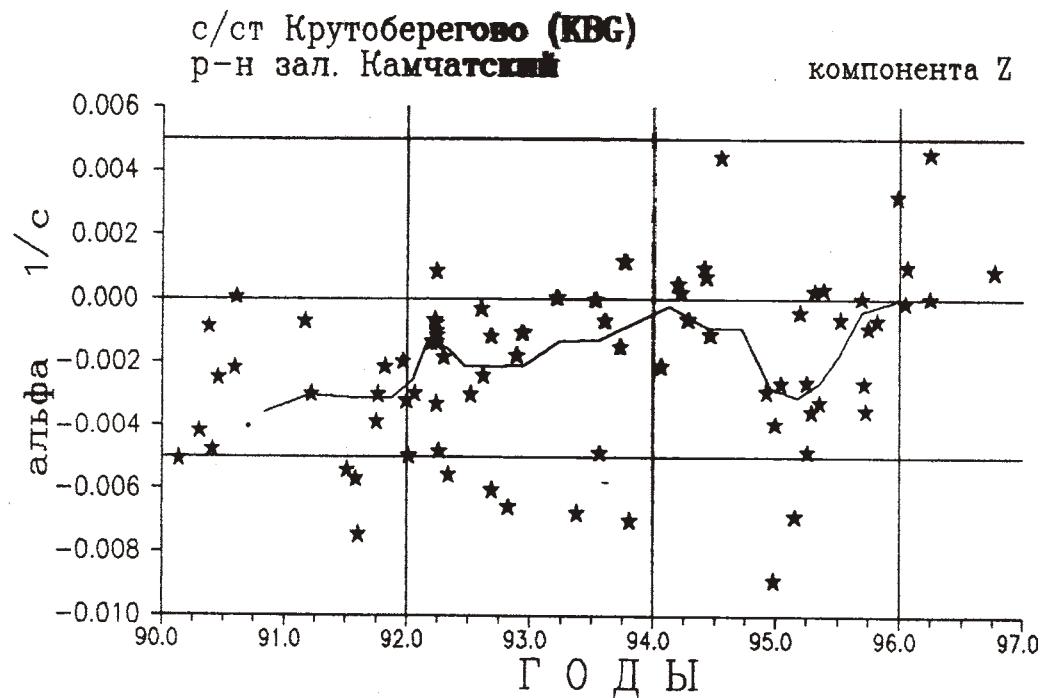
В мае-июле 1983 г. Камчатская ОМСП развернула сеть временных сейсмических станций в районе зал. Камчатский для наблюдений сейсмической подготовки ожидаемого события, включая возможные форшоки; но фактически форшоковой активизации не произошло [1]. В июле 1983 г. в район реки Сторож на побережье зал. Камчатский была направлена группа геодезистов Института вулканологии, которая разбила сеть реперов и начала светодальномерные и нивелирные наблюдения за возможными краткосрочными предвестниками деформациями земной поверхности. В течение нескольких дней перед готовившимся землетрясением такие деформации были зарегистрированы [6, 7], но эти наблюдения не были сочтены основанием для оперативного краткосрочного прогноза. В ночь на 17 августа группа геодезистов была разбужена ревом нескольких напуганных медведей, живущих на реке Сторож, и одновременно первыми колебаниями сильного землетрясения. Лагерь геодезистов оказался практически в эпицентре землетрясения, и сила колебаний здесь достигла 7 баллов MSK. Событие с моментной магнитудой  $M_w=7$ , произошло на глубине 80 км. В шкале сейсмического момента это было сильнейшее землетрясение Камчатки периода 1972-1992 гг. Однако, судя формально, прогноз не был успешным, так как фактическая магнитуда была на 0,5 ниже предсказанной.

После описанного события опасный период для толчков с  $M>7$  в том же районе был продлен до июня 1984 г. Сильных событий в этот период не было. Однако 28.12.1984 г. на Камчатке произошло сильное землетрясение, локализованное в ранее прогнозированном районе, а в пределах этого района - на ранее выделенном особо опасном участке "Б" по рис.1.4. Землетрясению 28.12.1984 г. с глубиной 12 км была приписана магнитуда  $M_{LH}=7,5$ . Моментная магнитуда составила  $M_w=6,7$  и размер очага - около 60 км, что приемлемо соответствует друг другу и плохо согласуется со значением  $M_{LH}$ . Поэтому оценку  $M_{LH}$  следует уверенно считать завышенной.

Выраженные отрицательные аномалии параметра  $\alpha$  были снова обнаружены в 1985 г. и были основанием для нового прогноза, для Камчатского и для Авачинского заливов. Но эта тревога оказалась ложной. С тех пор до 1996 г. прогнозы не выдавались, так как выраженных синхронных вариаций на парах станций не наблюдалось. Однако следует упомянуть несинхронные, умеренно выраженные, отрицательные аномалии по данным ст. ПТР и ШПН перед толчками с  $M=7,3-7,4$  в 1993-1994 гг. в районе Авачинского залива.

#### 1.4. Прогноз сильного землетрясения в Камчатском проливе в 1996 г.

Как видно из рис 1.6, по данным ст. К-Б с апреля 1995 г. заметна бухтообразная аномалия  $\alpha$ . Эта аномалия могла быть указанием на подготовку сильного землетрясения в районе вокруг этой станции в период конец 1995-1996 г. Отсутствие аномалий на ст. КРН делает маловероятным толчок вблизи этой станции (п-ов Кроноцкий и вокруг). Следует отметить, что интерпретация аномалий параметра  $\alpha$  и выдача прогнозов не формализована и делается на основе экспертной оценки. Одна из причин в том, что, по опыту предыдущих лет, использование текущего среднего значения в качестве репрезентативного параметра заведомо не оптимально. Однако как ориентир для масштаба можно считать существенными отрицательные (относительно фона) аномалии  $\alpha$  порядка 0,002-0,004. Наличие подобной вариации только на одной станции было интерпретировано как указание на невысокую вероятность реальности ожидаемого



**Рис.1.6.** Ход значений  $\alpha$  ст. К-Б в 1994-1996 г. (канал Н). Видна бухтообразная аномалия

события. Таким образом, степень уверенности в прогнозе невелика. Тем не менее прогноз интересен хотя бы в научном отношении. 10 апреля 1996 г. в КЦМСиВА было подано официальное заключение со следующей формулировкой:

*...аномалия [α] может сигнализировать о подготовке землетрясения с  $M>7,5$  в районе п-ов Камчатского Мыса - пролив Камчатский - Командорские о-ва в период апрель-декабрь 1996 г...вероятность землетрясения ... 15-30%.*

Для уточнения ситуации к обработке дополнительно были привлечены данные с/ст. Беринг, контролирующей район Командорские о-ва - Камчатский пролив. Какие-либо аномалии по данным этой станции за период 1995-1996 г. не обнаружены, и надежность сделанного прогноза не увеличилась от расширения объема исходных данных.

В течение указанного периода, 16 июля 1996 г. в указанном районе ( $55,8^{\circ}\text{с.ш.}$ ,  $164,7^{\circ}\text{в.д.}$ ) произошло землетрясение с  $M=7$ . Это землетрясение имеет магнитуду на 0,5 ниже ожидаемой, а в остальном укладывается в прогнозную схему от 10 апреля 1996 г. Таким образом, постфактум становится ясным, что выраженная "бухта" аномалии  $\alpha$  на одиночной станции вполне может иметь прогнозное значение, но она скорее связана с подготовкой событий с магнитудой около 7. Это - важный методический вывод для дальнейшей работы.

### 1.5. Обсуждение и выводы по разделу 1.

1. В течение четырнадцати лет (с 1982 г.) на Камчатке непрерывно велась и продолжается оперативная обработка сейсмических данных для расчета параметра  $\alpha$ , характеризующего скорость спада огибающих кода-волн. В основном  $\alpha$  определяли по записям региональной аппаратуры, а в настоящее время успешно идет процесс перевода обработки на цифровые методы по данным радиотелеметрических станций с цифровым накоплением.

2. По текущим данным об  $\alpha$  не реже 1 раза в квартал вырабатывалась оперативная оценка сейсмической обстановки с целью среднесрочного прогноза толчков с  $M>7,5$  в трех районах восточного побережья Камчатки. За указанный период не произошло ни одного землетрясения указанной силы. (Землетрясение 28.12.1984 г. имело  $M_{LH}=7,5$  при  $M_w=6,7$  и размере очага около 60 км, его оценка  $M_{LH}$  явно завышена.) Было выдано 4 прогноза: три по району Камчатского залива-Камчатского пролива в 1983, 1985 и 1996 гг. и один по району Авачинского залива в 1985 г. Все они формально являются ложными тревогами. Приписанные каждому из этих прогнозов вероятности события (соответственно: 50%, 50%, 50% и 15-30%) следует считать в совокупности завышенными.

3. Для содержательной оценки результативности принятой методики все упомянутые четыре тревоги можно условно отнести к толчкам с  $M=7$  и более. Представляет интерес оценить, насколько удачен переформулированный таким образом прогноз. Определим значение эффективности прогноза как отношение частоты опасных событий в прогнозируемые периоды в прогнозируемых районах к средней частоте таких же событий в тех же районах. Иными словами, эффективность - это кратность выигрыша в частоте событий в сравнении с результатами угадывания вслепую. В нашем случае, в каждый из периодов тревог 1983 и 1996 гг. произошло по одному землетрясению с  $M$  около 7, при полном числе толчков с  $M=7-7,4$  - 6-7 за 14 лет. Временное окно прогноза составило 16 месяцев в первом и 9 месяцев во втором случае. Ложные тревоги в 1985 г. имели длительности 11 мес. (апрель 1985 г. - февраль 1986 г. для зал. Камчатский) и 7 мес. (июль 1985 г. - февраль 1986 г. для зал. Авачинский). Рассчитанное по этим данным значение эффективности составляет около трех. При оценке этого достаточно скромного результата следует иметь в виду, что методика вообще не была нацелена на события с

$M=7-7,4$ , и даже ее полный неуспех в отношении таких событий был бы вполне оправдан. В этих условиях, имевший место “незапланированный” успешный прогноз двух толчков с  $M$  около 7 можно рассматривать как подтверждение обоснованности общих принципов описанной методики прогнозирования. В то же время ясна необходимость дальнейшего усовершенствования методики.

## **Раздел 2. Изучение искажающих эффектов для вариаций крутизны спада огибающей коды: влияние пространственного положения эпицентра и его компенсация.**

### **2.1. Задачи работы**

В ряде последних исследований кода-волн, основанных на анализе дублетов (событий с повторяющимися волновыми формами) [8, 9, 12] было продемонстрировано отсутствие выраженных временных вариаций формы огибающей коды, а также установлена высокая чувствительность формы огибающей к ориентировке нодальных плоскостей, эффекту направленности излучения источника и его глубине. Подобная чувствительность, в комбинации с временными вариациями указанных параметров очага, может в принципе приводить к возникновению существенных фиктивных аномалий крутизны спада огибающей коды. Тем самым создается возможность выявления фиктивных предвестников и объявления неоправданных ложных тревог. Поэтому была поставлена задача детального систематического исследования возможных искажений, которые могли бы налагаться на истинные временные вариации спада коды. Попутно было целесообразно продемонстрировать статистическую значимость самих этих вариаций.

Список возможных причин, ответственных за формирование фиктивных аномалий можно составить, следуя работе [13], в которой группа экспертов МАСФЗН рассмотрела вопрос об эффективности использования вариаций крутизны спада огибающей коды в качестве информативного предвестникового признака. Этот список можно сформулировать следующим образом:

1. Чисто случайные флуктуации с низкой статистической значимостью (шум).
2. Зависимость формы огибающей коды от пространственного положения эпицентра в комбинации с временными вариациями положения эпицентра в пределах выбранной зоны.
3. Зависимость формы огибающей от магнитуды в комбинации с вариациями во времени средней магнитуды.
4. Зависимость формы огибающей от интервала времени запаздывания в комбинации с вариациями во времени используемого окна обмера.
5. Зависимость формы огибающей коды от спектра очагового излучения в комбинации с временными вариациями очагового спектра.
6. Зависимость формы огибающей коды от ориентации нодальных плоскостей и диаграммы направленности излучения источника в комбинации с вариациями во времени этих характеристик очага.

К этому списку можно добавить по крайней мере еще два пункта:

7. Ошибки калибровки и дрейф периода маятника.
8. Ошибки измерения, допущенные при обработке сейсмограмм (субъективные ошибки).

Ввиду столь обширной и существенной критики, используемая в ИВГиГ методика оперативного слежения за вариациями крутизны спада огибающей коды нуждается в дополнительном анализе, а, возможно, в некоторой доработке. Прежде всего необходимо выяснить, является ли существенным влияние каждого из перечисленных

факторов. При утвердительном ответе возникает задача такой модификации методики, которая позволила бы подавить влияние существенных источников ошибок.

В данной работе в качестве параметра, специфицирующего крутизну спада огибающей кода-волн выбран параметр  $\alpha$ , общее определение и методика оценки которого приведены в предыдущем разделе.

Многие из перечисленных источников возможных фиктивных вариаций, применительно к параметру  $\alpha$ , обсуждались ранее [2-5, 10]. Так например, было обнаружено, что эффект зависимости параметра  $\alpha$  от энергетического класса отчетливо проявляется лишь для событий, класс которых ниже критического значения 9,5. Это значение было определено эмпирически, и затем было использовано в качестве нижнего энергетического порога при отборе данных. Была также установлена независимость  $\alpha$  от глубины в интервале 0-120 км, и успешно проверена независимость оценок  $\alpha$  от компоненты прибора.

Проверка вариаций спектра очагового излучения, как вероятной причины нестабильности оценок  $\alpha$ , неявно проводилась Гусевым и Лемзиковым, [3, 10] в связи с яркой аномалией 1971 г. на ст. Кругоберегово. Было показано, что на этой станции средняя годовая частота кода-волн (усредненная по индивидуальным значениям) имела минимум в 1971 г., отражая, по-видимому, вариации среднего очагового спектра. Обычно, чем ниже характерная частота источника, тем ниже затухание, поэтому в 1971 г. можно было бы ожидать более пологой (длинной) коды и положительной аномалии  $\alpha$ . Однако, реальная аномалия имеет противоположный знак. Таким образом, вариации спектра источника едва ли могут являться причиной значимой нестабильности оценок  $\alpha$ , и, следовательно, фиктивных временных аномалий.

Ошибки калибровки и их возможное влияние на стабильность оценок  $\alpha$  обсуждалось в определенной степени в [2, 3, 10]. Из этого обсуждения можно сделать вывод о том, что данный эффект не может быть существенным. Заметим, что ошибки увеличения не влияют на оценки  $\alpha$ , и что дрейф периода маятника должен обнаруживаться в кажущихся вариациях спектрального состава коды. Такие вариации были изучены в [2, 3, 10]. Они выражены незначительно. Единственный ясный случай, описанный в предыдущем параграфе, явно противоречит идею фиктивных временных вариаций инструментальной природы. Однако, проверка зависимости оценок  $\alpha$  от положения гипоцентра и от используемого окна времени запаздывания не была включена в программу ни одного из прежних исследований. Восполнению этого пробела и посвящена настоящая работа.

## 2.2. Исходные данные и их обработка

Были использованы сейсмограммы четырех станций Камчатской региональной сети: Кругоберегово (KBG), Кроноки (KRI), Шипунский (SPN) и Петропавловск (PET), объединенные в две пары (KBG-KRI, SPN-PET). Для каждой пары, расстояние между станциями не превышает 150 км. Можно ожидать, что истинные аномалии коды проявятся на обеих соседних станциях. Для того, чтобы получить временные ряды на каждой из станций, которые потом можно было бы уверенно сопоставлять, для каждой из пар станций была отобрана компактная группа эпицентров. Размер этой зоны дополнительно ограничивался условием  $t_S - t_P < 17$  с, чтобы окно коды начиналось при  $t=40$  с. На рис.2.1 приведено реальное распределение эпицентров для каждой из пар станций. Интервал выбора энергетических классов составлял  $K_S = 9,6-12,5$ , интервал глубин: 0-100 км.

Изученный период времен начинается с 1967 г. для ст. SPN, PET и KRI; и с 1968 г. - для KBG, когда станция была введена в эксплуатацию. Последний

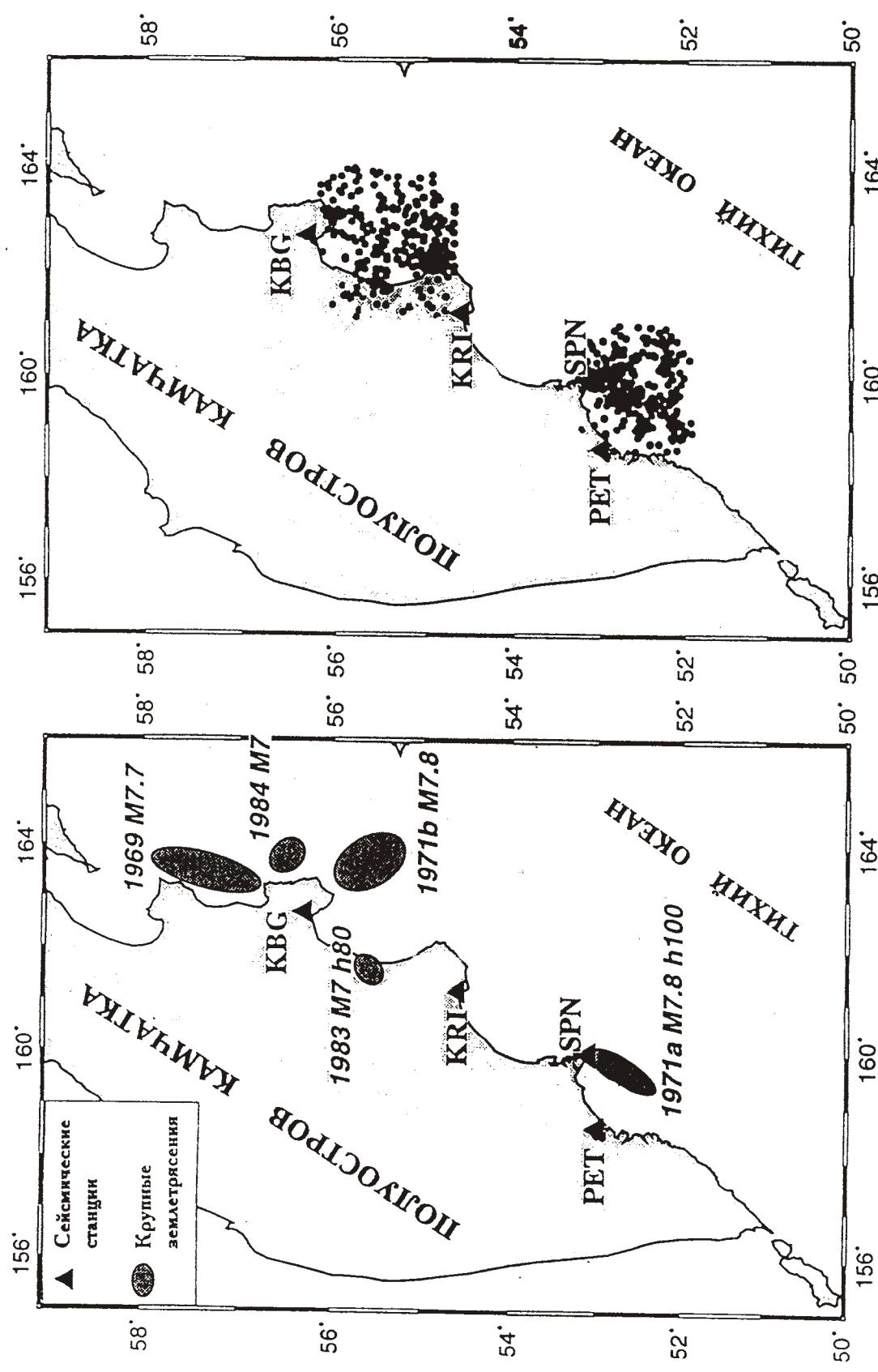


Рис.2.1. Регион исследования. Слева: сейсмологические станции, данные которых были использованы, и сильные землетрясения. Справа: Две группы эпицентров показывают землетрясения 1967-1990 гг., используемых на парах станций: KRI и KBG - северная группа; PET и SPN - южная группа.

анализируемый год - 1990. События в роях намеренно прореживались, чтобы исключить большой вес событий с близким положением эпицентров.

Важным аспектом используемой в данном исследовании методики является выбор фиксированного временного окна запаздывания. Было использовано два фиксированных окна: 45-135 с и 135-205 с. Эти окна содержат по 10 и 9 точек соответственно. Наблюдения с 8 или 7 точками, соответственно, включались в множество входных данных; так, например, данные для окон 45-125 с или 65-135 с включались в исходное множество данных для окна 45-135 с.

Общая картина обмеренных значений  $\alpha$  в календарном времени (окно 45-135 с) показана на рис.2.2 (число данных см. в табл.1). Вместе с данными вертикальной компоненты ( $Z$ ) приведены средние значения  $\alpha$  для двух горизонтальных компонент; эти данные обозначены как "Н" компонента. Сплошной линией на этом и последующих графиках показаны медианы групп из 8 точек с 50% перекрытием (шаг в четыре точки). Можно отметить четко выраженную корреляцию между компонентами, а также наличие выраженных временных вариаций. Коэффициенты корреляций для пар значений  $\alpha$  на двух разных компонентах для одного и того же землетрясения почти всегда лежат в диапазоне 0,65-0,75.

### 2.3. Анализ влияния глубины, магнитуды и эпицентра на значения $\alpha$

Как уже было отмечено в 2.1, систематические ошибки, связанные с положением эпицентра, являются возможными источниками фиктивных аномалий параметра  $\alpha$ . Ранее изучалась лишь зависимость  $\alpha$  от энергетического класса  $K$  и глубины  $H$  очага. В [2, 3, 5, 10] установлено отсутствие систематических вариаций, обусловленных этими эффектами. Для дополнительной проверки были построены распределения  $\alpha(K)$  и  $\alpha(H)$  (Рис. 2.3). Сплошной линией на графиках показана кривая параболической регрессии. Можно видеть, что линейный тренд для  $\alpha(K)$  отсутствует, а для  $\alpha(H)$  лишь слабо выражен. Систематический временной тренд отсутствует также и в самих значениях  $K$  и  $H$ . Это означает, что даже если бы зависимость  $\alpha$  от  $K$  и  $H$  реально и имела место, она не была бы способна сформировать фиктивные временные аномалии  $\alpha$ . На рис.2.3 приведены данные лишь для пары станций KBG-KRI; для пары SPN-PET результаты похожи. Таким образом, энергетический класс и глубина достаточно уверенно могут быть исключены из списка возможных источников фиктивных аномалий.

Иная ситуация с аномалиями, обусловленными положением эпицентра. На рис.2.4 показаны в виде рельефной карты сглаженные значения  $\alpha$  в функции широты и долготы эпицентра. Для сглаживания исходных данных использовалась процедура взвешенного усреднения. Усреднение проводилось по 40 ближайшим эпицентрам с весами, равными обратному квадрату эпицентрального расстояния. На рис.2.4 видны выраженные пространственные вариации параметра  $\alpha$ , в принципе способные создать фиктивные аномальные эффекты.

Для того, чтобы подавить этот источник фиктивных временных вариаций, построенная рельефная карта была применена в качестве таблицы поправок за положение эпицентра. Скорректированные подобным образом значения  $\alpha(t)$  вместе с "сырыми" данными для окна 45-135 с приведены на рис. 2.5. Интервалы ошибок ( $\pm \sigma$  для среднего) показывают среднеквадратическую ошибку для групп данных из 8 точек. Значение  $\sigma$  для каждой из групп оценивалось по межквартильному размаху. Виден некоторый параллельный сдвиг между скорректированными и "сырыми" данными; это не более чем кажущийся эффект, который отражает небольшое различие между использованной при расчетах параметра  $\alpha$  усредненной по сети опорной формой огибающей коды и "истинной" средней формой огибающей коды для заданной

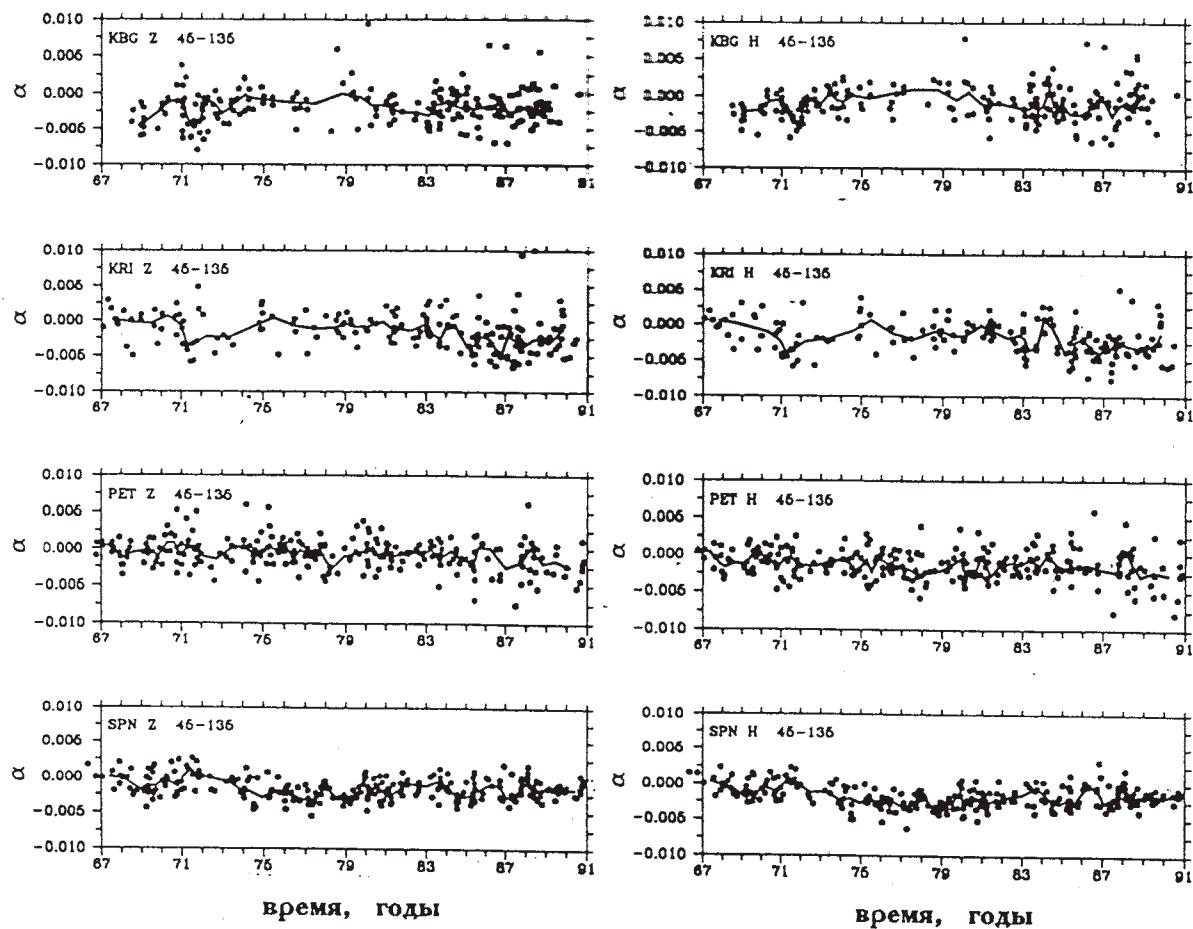


Рис.2.2. Индивидуальные нескорректированные значения  $\alpha$  для окна 45-135 с в функции времени. Левый столбец: для Z компоненты для 4 станций; правый столбец: тоже самое для H-компоненты.

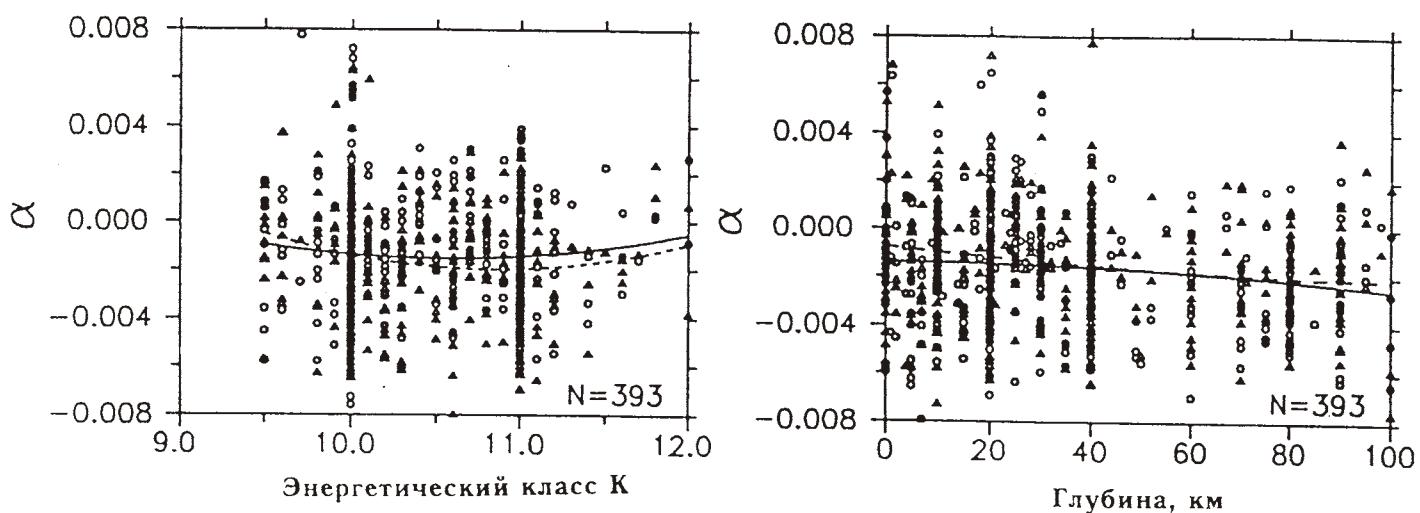
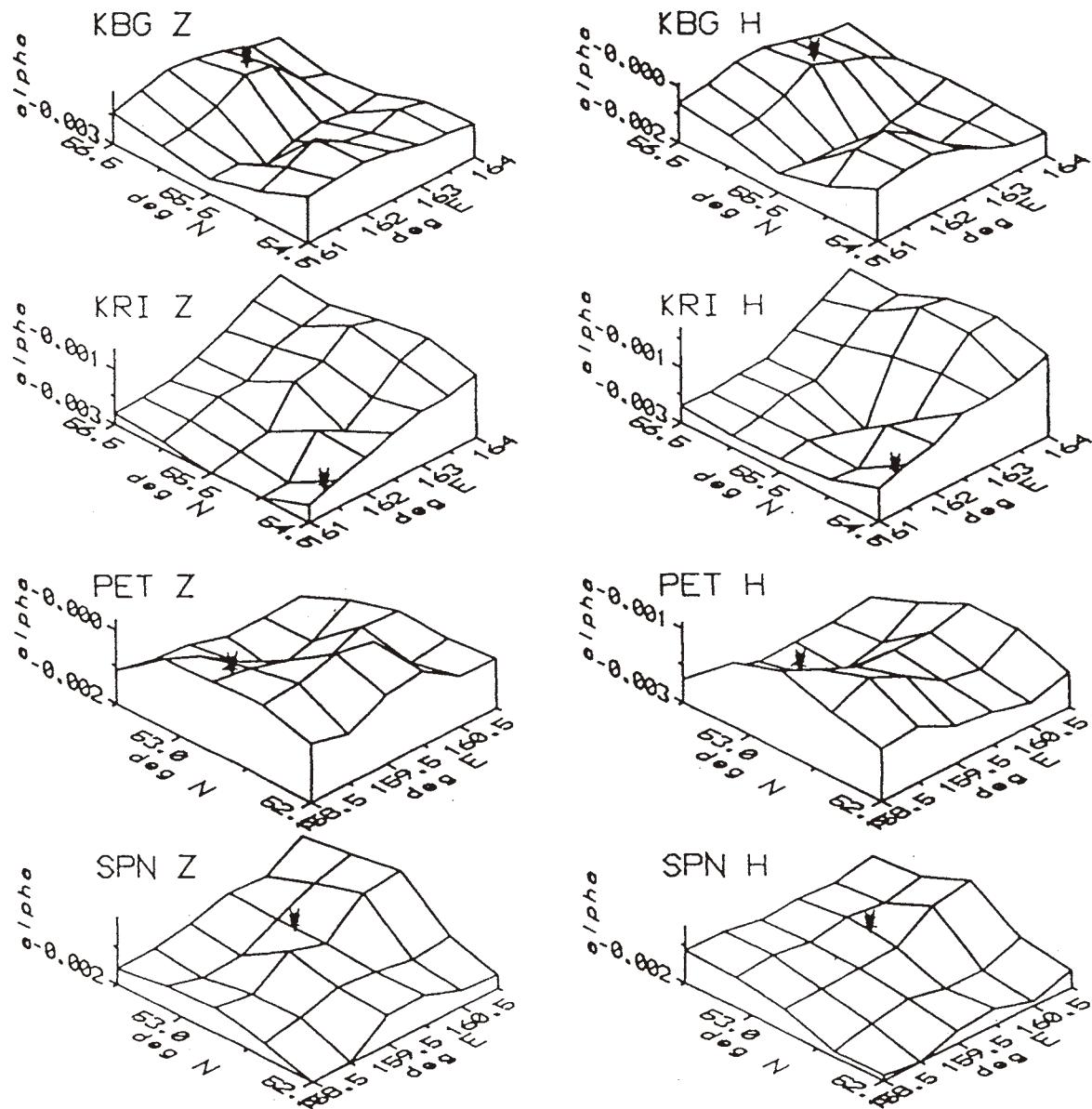
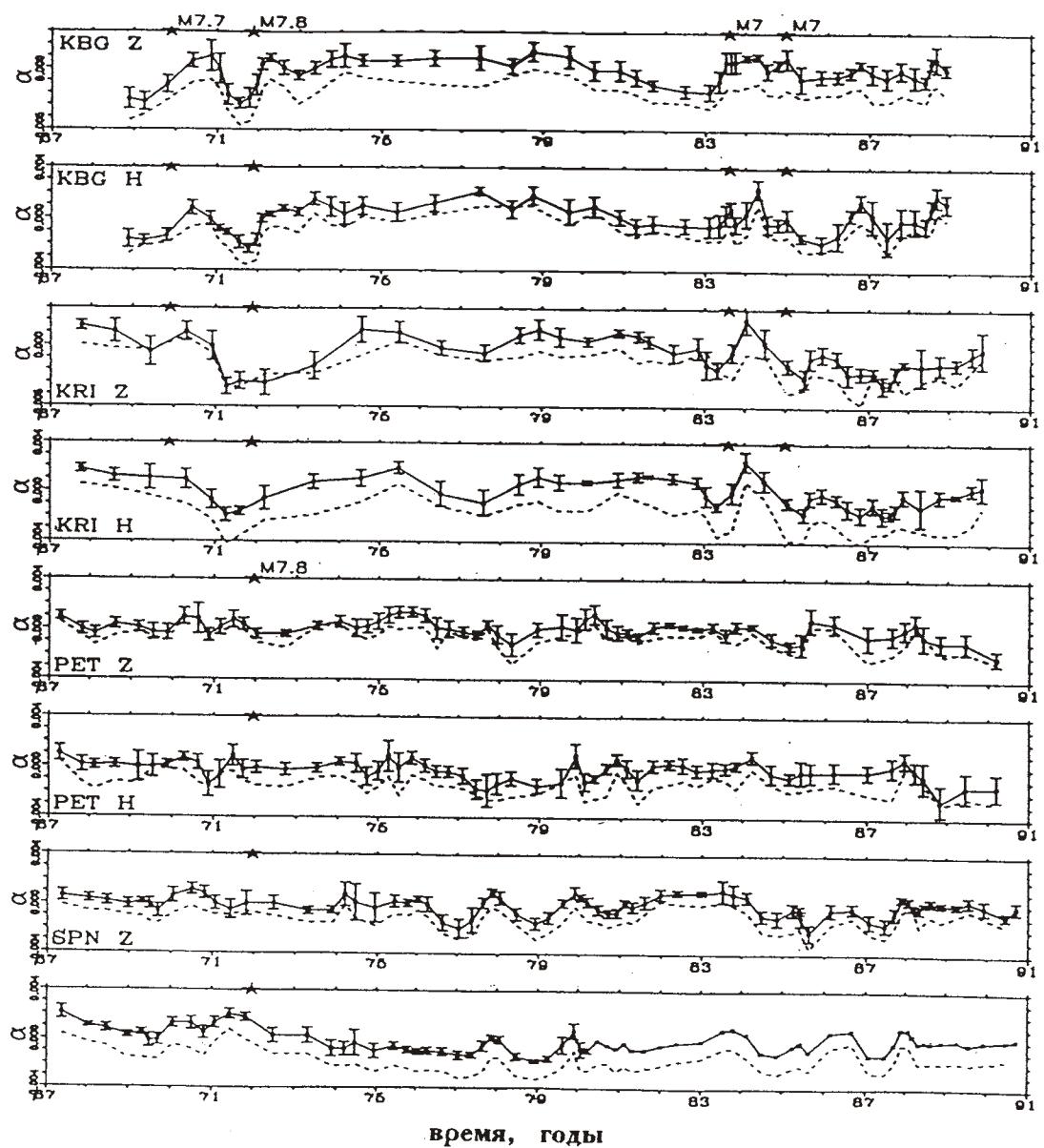


Рис.2.3. Значения  $\alpha$  в функции энергетического класса (слева) и глубины (справа). Треугольники и кружки - индивидуальные значения  $\alpha$  (окно 45-135с) для Z и H-компоненты, соответственно; сплошная (Z) и штриховая (H) линии показывают параболическую регрессию этих данных. Сгруппированы данные станций KBG и KRI.



**Рис.2.4.** Карта рельефа сглаженных значений  $\alpha$  в перспективной проекции с юго-западной стороны. Левый столбец: для Z компоненты на четырех станциях; правый столбец: то же самое для H компоненты. Каждое значение  $\alpha$  является взвешенным средним ближайших 40 точек (см. Рис.2.1), с весами, убывающими с удалением от эпицентра.



**Рис.2.5.** Сглаженные скорректированные за положение эпицентра значения  $\alpha$  в функции времени (окно 45-135 с). Приведены четыре группы из двух графиков, по 1 группе для каждой из станций. Каждая группа состоит из графика для Z-компоненты (верхний) и для H-компоненты (нижний). Показано скользящее среднее для групп из 8 точек (для скорректированных данных (сплошная линия) и, для сравнения, для "сырых" данных (штриховая линия). Для данных, приведены интервалы ошибок ( $\pm\sigma(\alpha)$ ) для средних по 8 точкам. Звездочками на этом и следующем графике показаны моменты сильных землетрясений вблизи каждой из станций (Ср. с Рис.2.1).

комбинации “станция-компоненты”. Коррекция за положение эпицентра попутно компенсирует этот постоянный сдвиг, делая среднее скорректированных данных более близким к нулю. Если отвлечься от этого сдвига, то коррекция за положение эпицентра приводит лишь к незначительным изменениям для пары станций KBG-KRI. Что касается SPN и PET, то изменения, вызванные коррекцией, здесь вовсе не видны. Скорректированная линия для KBG и KRI показывает некоторое уменьшение амплитуд временных вариаций, но это уменьшение едва заметно.

Та же самая процедура была применена к интервалу 135-200 с, для которого объем исходных данных существенно ниже (только сильные события дают столь длинную коду). На рис.2.6 приведены “сырые” данные, усредненные по трем компонентам. В этом случае коррекция за положение эпицентра дает минимальный эффект; однако поправки все же были введены. На рис.2.7 приведены средние скорректированные данные вместе с интервалами ошибок. Здесь временные вариации намного меньше, чем в первом окне коды. Этот факт имеет определенные технические следствия: так как процедура оценивания была полностью идентичной в обоих случаях (или даже оба окна были обмерены при обработке одной и той же записи), можно рассматривать возможность появления фиктивных вариаций за счет неаккуратности оператора или дрейфа инструмента, как относительно низкую.

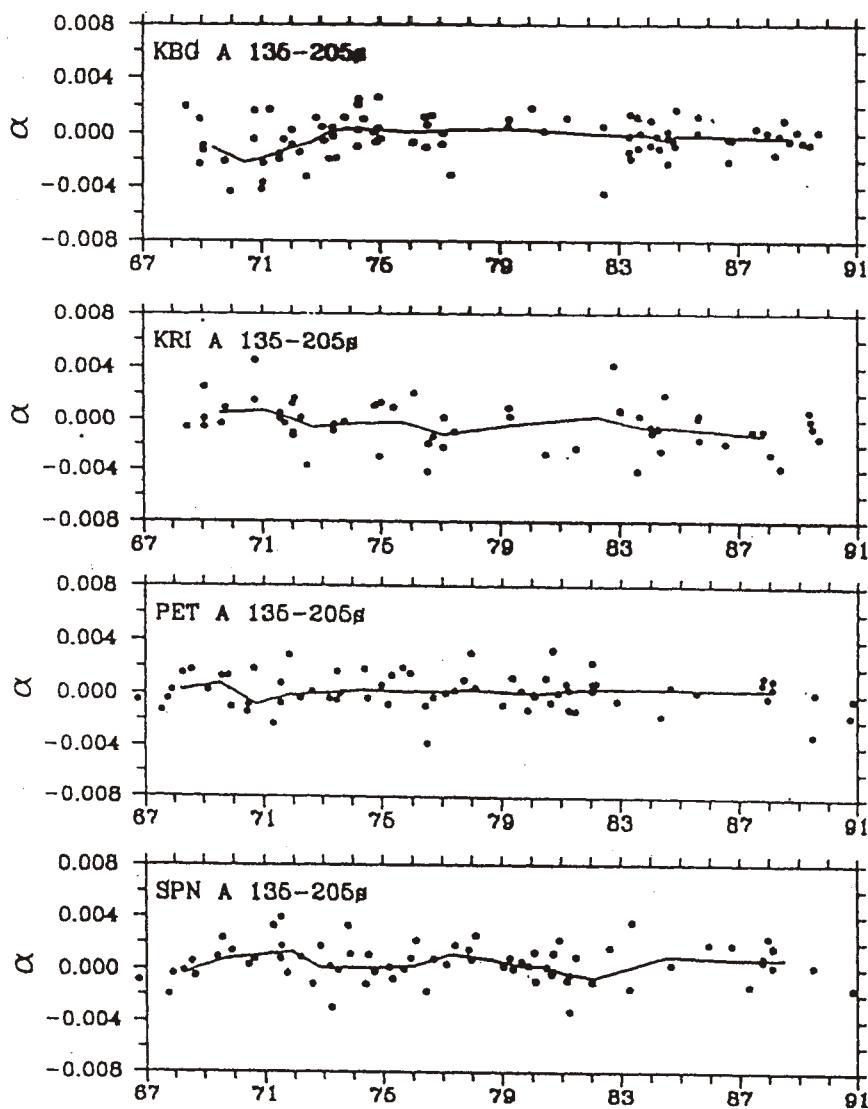
Причина слабого влияния коррекции за эпицентр на временной ход  $\alpha$  видится в следующем. Распределение эпицентров в пространстве в зоне Беньофа островной дуги относительно высоко устойчиво, нет какого-либо заметного “блуждания” среднего эпицентра. Поэтому искажения индивидуальных оценок  $\alpha$  за счет вариаций эпицентра эффективно осредняются даже в пределах выборок объема 8, и не дают выраженного эффекта на наших графиках.

## 2.4. Статистическая проверка реальности временных вариаций

Чтобы с уверенностью говорить о реальности и характере предвестниковых временных вариаций коды, нужно сначала показать наличие каких-либо выраженных временных вариаций вообще. Для того, чтобы сделать это, необходимо переформулировать проблему существования вариаций как статистическую. Заранее ясно, что характер данных исключает выявление короткопериодных аномалий (с длительностью, сопоставимой с интервалом времени между двумя, следующими друг за другом, землетрясениями), поскольку они неотличимы от шума.

Поэтому мы ограничились лишь достаточно медленными вариациями, способными проявить себя в усредненных по группам данных. Для того, чтобы продемонстрировать существование такого рода вариаций был применен стандартный дисперсионный анализ, то есть проведено сравнение внутригрупповых и межгрупповых дисперсий величин  $\alpha$ . Если временные вариации подходящей длительности и амплитуды существуют, они должны проявиться в виде роста межгруппового разброса; значимость таких вариаций может быть проверена с помощью  $F$ -статистики Фишера. При планировании такого анализа объем группы не должен быть слишком малым, т.к. подавление шума при усреднении будет слишком слабым; с другой стороны, использование групп слишком большого объема приведет к подавлению всех вариаций, кроме тех, которые имеют очень большую длительность. Во время анализа объем группы был зафиксирован на уровне 12.

Результаты этого теста для скорректированных данных, примененного ко всем станциям и компонентам, приведены в табл.1. Каждая строка в табл.1 соответствует временному ряду, состоящему из  $M$  следующих друг за другом точек. Такие временные ряды разбивались на  $m+1$  последовательных групп данных объемом по 12 точек; затем находились две оценки дисперсии, основанные на внутригрупповых и межгрупповых



ВРЕМЯ, ГОДЫ

Рис.2.6. Индивидуальные нескорректированные значения  $\alpha$  для окна 135-205 с в зависимости от времени, для четырех сейсмических станций.

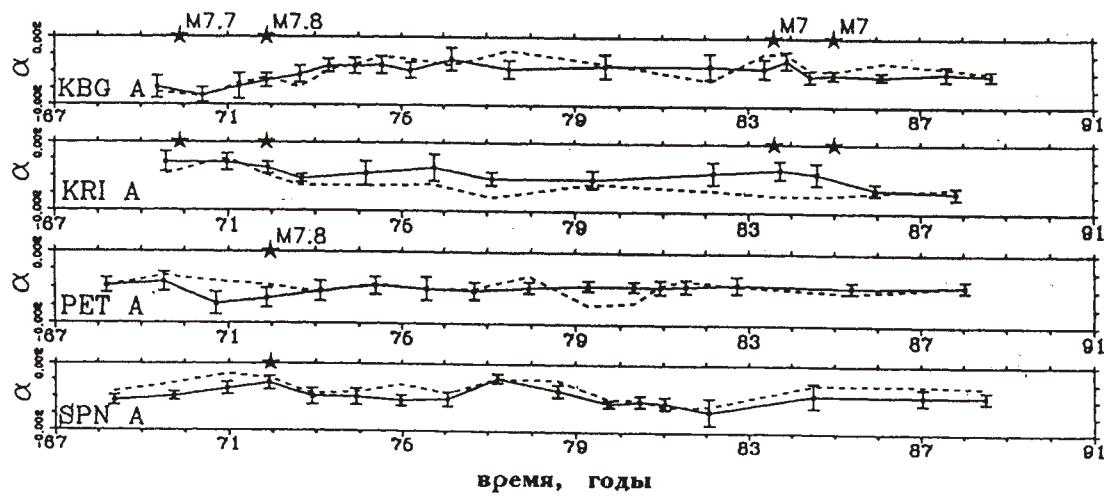


Рис.2.7. Сглаженные данные, скорректированные за положение эпицентра, в зависимости от времени (окно 135-205с), усредненные по 3 компонентам. Приведены 4 графика, по одному для каждой из станций. Остальные детали такие же, как и на рис.2.5.

вариациях, а также их отношения (статистика  $F$  критерия Фишера). При нулевой гипотезе: "среднее значение в пределах групп одно и то же", обе дисперсии, в среднем, равны. Для того, чтобы выяснить значимость отклонений от нулевой гипотезы, необходимо сравнить значение статистик  $F$ -критерия, вычисленное по данным (столбец  $F$ ) с теоретическим 99% квантилем  $F$ -распределения с  $m$  и  $n$  степенями свободы (где  $n=M-m-1$ ), обозначенного через  $F_t$  ( $m$ ,  $n$ , 99%). Ситуация, когда  $F>F_t$  ( $m$ ,  $n$ , 99%) может возникать за счет чисто случайных причин лишь в 1% случаев, если нулевая гипотеза верна, так что наблюдаемые реализации этого неравенства свидетельствуют о значимых (на 1% уровне) отклонениях от нулевой гипотезы. Случай значимых отклонений в табл.1 обозначены символом "\*"; в этих случаях групповые средние значения отличаются друг от друга, и, следовательно, существуют временные вариации. Для окна 45-135 с значимые вариации найдены для пяти из восьми случаев. Для окна 135-205 с такие вариации обнаружены лишь в одном из 8 случаев. Общее число случаев значимых вариаций составляет шесть из шестнадцати возможных, при значении вероятности в каждой из "попыток", равной 0,01 при справедливости нулевой гипотезы. Биноминальная вероятность для такого случая меньше чем  $10^{-8}$ ; это общий уровень значимости для 16-ти временных рядов в целом. Таким образом, статистическую значимость представленных на рис.2.4, 2.6 аномалий можно считать установленной.

Таблица 1

**Значения F-статистики Фишера, использованные для демонстрации реальности временных вариаций параметра  $\alpha$ , и критические значения F-распределения. Значимые отклонения обозначены символом \*\*. Детали см. в тексте.**

Станция, компонент	$N$	$F$	$m$	$n$	$F_t(m, n, 99\%)$
<i>Окно 45 - 135 с</i>					
KBG Z	204	2,50*	16	187	2,09
KBG H		3,00*			
KRI Z	180	3,53*	14	165	2,18
KRI H		3,29*			
PET Z	240	1,11	19	220	1,96
PET H		0,94			
SPN Z	276	1,62	22	253	1,92
SPN H		5,29*			
<i>Окно 135 - 205 с</i>					
KBG Z	84	0,61	6	77	3,05
KBG H	1,29				
KRI Z	48	2,10	3	44	4,26
KRI H	4,88*				
PET Z	84	0,61	6	77	3,05
PET H		1,29			
SPN Z	72	1,07	5	66	3,31
SPN H		0,31			

Этот достаточно убедительный результат нельзя, однако считать полным доказательством того, что наблюдаемые вариации представляют собой истинные временные вариации. Существуют два серьезных и пока непроверенных источника ошибок, а именно: вариации механизма очага и вариации диаграммы направленности излучения источника. Проверка этих источников ошибок является предметом

дальнейших исследований. Если отвлечься от указанных источников ошибок, то, суммируя накопленный к настоящему времени опыт, можно сделать следующий предварительный вывод: ни одна из возможных причин фиктивных временных аномалий не в состоянии объяснить все множество имеющихся наблюдений. С учетом сделанной оговорки, временные вариации параметра  $\alpha$ , приведенные на рис.2.4 и 2.6, можно рассматривать как реальные.

### Выводы по Разделу 2.

1. Данные крутизны спада огибающей коды слабых землетрясений за 24 года для двух пар станций показывают ясные, статистически высоко значимые видимые временные вариации.
2. Выявлена существенная зависимость спада индивидуальных огибающих от положения эпицентра. Однако, после внесения соответствующих поправок во временные ряды, ранее выявленные временные вариации, включая вероятные предвестники, практически остаются неизменными.
3. Исследован ряд иных потенциальных источников фиктивных временных вариаций параметра  $\alpha$ ; эффект каждого из них невелик. Таким образом, есть серьезные основания считать наблюденные временные вариации скорости спада огибающих кода-волн истинными. Для полной ясности необходимо дальнейшее исследование эффекта искажений  $\alpha$  за счет вариаций механизма очага.

### Литература

1. Гордеев Е. И., Мельников Ю. Ю., Чебров В. Н. Форшок-афтершоковый процесс Камчатского землетрясения 17.VII.1983.// Вулканология и сейсмология. 1987. № 3. С. 81-96.
2. Гусев А. А., Лемзиков В. К. Предварительные результаты изучения вариаций огибающих коды близких землетрясений перед Усть-Камчатским землетрясением 1971 г. // Вулканология и сейсмология. 1980. № 6. С.82-93.
3. Гусев А. А., Лемзиков В. К. Аномалии характеристик кода-волн слабых землетрясений перед сильными землетрясениями Курило-Камчатской зоны // Вулканология и сейсмология. 1984. № 4. С.76-90.
4. Лемзиков В. К. Разработка методов использования кода-волн для прогноза сильных землетрясений. Диссертация на соискание уч. степени канд. физ.-мат. наук. Петропавловск-Камчатский. 1987.
5. Лемзиков В. К., Гусев А. А. Энергетическая классификация близких камчатских землетрясений по уровню кода-волн. // Вулканология и сейсмология. 1989. № 4. С.83-96.
6. Энман В. Б., Попов О. Е., Иванов К. В., Самойлов А. А., Евсеенко С. В., Тишин Г. Ю., Александрова С. Г. Колебательные явления в процессе деформирования земной коры. // Симпозиум КАПГ по изучению современных движений земной коры. Тезисы докладов. Дагомыс - Воронеж. 1988. С. 295-296.
7. Fedotov S. A., Magus'kin M. A., Kirienko A. P. and Zharinov N. A. Vertical ground movements on the coast of the Kamchatka Gulf: their specific features in the epicentral zone of the August 17, 1983, earthquake M=6.9, before and after. // Tectonophysics, 202 (1992), pp.157-162.
8. Got J. L., Frechet J. Origin of amplitude variations in seismic doublets: source or attenuation process? // Geophys. J. Int., V.144, pp.325-340, 1993.
9. Got J. L., Poupinet G., Frechet J., Changes in Source and site effects compared to coda Q<sup>-1</sup> temporal variations using microearthquakes doublets in California // Pure Appl. Geophys., V.134, pp.195-228. 1990

10. Gusev A. A., Lemzikov V. K., Properties of scattered elastic waves in the lithosphere of Kamchatka: parameters and temporal variations // Tectonophys., V.112, pp.137-153, 1985.
11. Gusev A. A. Precursory Variations of Coda Parameters on Kamchatka: 10 Years of Monitoring and Study // Abstracts / Wadati Conf. on Great Subduction earthquakes, Fairbanks, Alaska, 1992, pp.120-122.
12. Hellweg M., Spudich P., Fletcher J. B., Backer L. M., Stability of coda Q in the region of Parkfield, California: view from the U.S. Geological Survey Parkfield Dense Seismograph Array // J.Geophys.Res., V.100, pp.2089-2102, 1995.
13. Wyss M. (Ed.) Evaluation of proposed earthquake precursors // Amer.Geophys. Union, Washington, 1991.