

**МОНИТОРИНГ ПРОГНОСТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА τ ПО ДАННЫМ
СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ КАМЧАТКИ
(ОПЫТ И АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ЗА ДЛИТЕЛЬНЫЙ ПЕРИОД ВРЕМЕНИ)**

Славина¹ Л.Б., Левина² В.И., Бахтиярова² Г.М., Дрознина² С.Я.

¹ *Институт физики Земли РАН РФ, Москва, 123995, slavina@ifz.ru*

² *Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский*

Введение

Предпосылкой кинематического метода долго-, средне- и краткосрочного прогноза сильных землетрясений (извержений вулканов) являются представления о направленных изменениях физических параметров среды, происходящих в период подготовки сильного землетрясения. Под воздействием роста поля напряжений, на последней стадии подготовки землетрясения среда теряет устойчивость, и это отражается в увеличении разброса значений параметров различных геофизических полей. В том числе и в поле времен пробега сейсмических Р- и S- волн от слабых близких землетрясений. Наблюдая вариации времен пробега Р- и S - волн и их отношений - T_s/T_p (параметра τ - τ - TAU) в пространстве и времени и проводя анализ флуктуаций относительно долговременного среднего, можно выявить временной интервал, где значения флуктуаций максимальны, и оконтурить область их локализации. Впервые, разработанный алгоритм был применен на Камчатке и использовался при Пробном Оперативном Прогнозе Камчатских землетрясений с 1971 г. в Тихоокеанской сейсмической экспедиции ИФЗ РАН под руководством С.А. Федотова.

Методические особенности разработанного алгоритма

Расчеты прогностического параметра производятся не с использованием графика Вадати, усредняющего данные о Р и S-Р по группе станций, как это делалось другими авторами [1], а аналитически, по нижеприведенной формуле, для Р и S-Р зарегистрированных на каждой станции в отдельности. Расчеты осуществляются на основе сейсмологических наблюдений сети сейсмических станций региона. Условием работы метода является непрерывная регистрация местных землетрясений и оперативная, близкая к реальному времени, обработка данных для проведения расчетов. Расчет единичных значений параметра производится по формуле:

$$\tau = (T_s - T_p) / (T_p - T_0) + 1,$$

где $T_s - T_p$ – разность прихода Р и S волн на станции регистрации, T_p время прихода Р волны, T_0 время в очаге, определенное по группе станций при оперативной обработке параметров слабых землетрясений.

Наблюдая параметр τ и его дисперсию в пространстве и времени и проводя анализ флуктуаций относительно долговременного среднего, можно выявить временной интервал, где значения флуктуаций максимальны (краткосрочный предвестник), и, проводя картирование параметра по площади оконтурить аномальную зону (долгосрочный предвестник).

Значение τ_{cp} для большинства исследованных нами сейсмоактивных регионов и станций оказалось близким к 1.730 при среднеквадратичной ошибке единичного измерения, равной 0.03 - 0.046.

Для выявления краткосрочного предвестника рассчитывается прогностическая кривая с использованием функционала $\chi = F(\tau)$, который определяется выражением:

$$\chi = F(\sum \Delta\tau_{min}) + F(\sum \Delta\tau_{max}), \text{ где}$$

$$\Delta\tau = \tau_i - \tau_{cp}$$

$$\Delta\tau_{max} = \tau_{max} - \tau_{cp}; \Delta\tau_{min} = \tau_{min} - \tau_{cp}$$

τ_{min} и τ_{max} – минимальное и максимальное значение параметра τ за сутки, или при почасовом опросе за 6, 12 часов, или другой временной интервал.

τ_{cp} – среднее долговременное значение τ для j- ой станции. Далее проводится суммирование отклонений $\Delta\tau$ в выбранном, движущемся временном окне.

Для уменьшения веса отдельных случайных выбросов было принято следующее ограничение: $F(x) = 1000 \cdot x^4$ при $x < \sigma$; $F(x) = 1000 \cdot \sigma^2 \cdot x^2$ при $x > \sigma$, где σ - среднеквадратичная ошибка, рассчитанная за длительное время.

Из ретроспективного анализа, проведенного по сейсмическим данным в различных сейсмоактивных регионах от Камчатки до Туркмении и Кавказа, установлено, что кинематический предвестник в краткосрочном варианте предвещает сильное событие в интервале времени от 1 суток до 15 – 45 дней. Сравнивая фоновые отклонения на кривой с аномальными значениями, можно выделить тревожный интервал времени. По сопоставлению аномалий на прогностических кривых на ряде сейсмических станций оценить возможный район возникновения землетрясения. Учитывая ретроспективные результаты прогнозирования можно указать вероятный в той или иной степени диапазон магнитуд.

Результаты

В результате длительных наблюдений за краткосрочным предвестником на Камчатке удалось установить уровень фона (шума) и его дисперсии и уровень аномалий и дисперсии для станций Камчатской сети. Результаты приведены в таблице.

Таблица. Средние станционные аномальные и фоновые значения прогностического параметра $\chi = F(\tau)$ и их длительность за 1998-2003 гг. по станциям Камчатки.

Станция	Аномальные значения			Фоновые значения			Суммарная длительность 1998-2003 гг. (дни)	
	Аср	σ	Δt	Аср	σ	Δt	Аномальные значения	Фоновые значения
Карымский	607	168	16	278	77	109	250	1740
Ганалы	259	134	26	73	33	108	396	1595
Крутоберегово	1020	549	43	466	175	71	550	862
Ключи	836	387	21	154	90	200	185	1800
Авача	479	193	42	241	66	76	707	1222
Горелый	556	285	28	197	82	99	416	1381
Мыс Козлова	1323	379	40	618	145	45	927	1037
Налычево	816	256	33	459	142	125	498	1494
Петропавловск	449	241	60	185	66	148	540	1038
Русская	638	290	49	319	99	73	784	1027
Шипунский	1118	430	61	554	149	95	796	1130

Примечание: Аср – среднее станционное значение амплитуды аномалии (фона); σ - среднеквадратичное отклонение; Δt - среднее значение длительности аномалии (фона)

Из таблицы видно, что амплитуды аномалий и их дисперсия в несколько раз для отдельных станций превышают амплитуды и дисперсию фона. При этом можно выделить шумящие станции, где уровень фона выше.

Предвестник выявлен при подготовке событий разного масштабного уровня: от горного удара в шахтах, извержений вулкана до сильного землетрясения [2-4]. Ниже приведены результаты расчетов прогностических кривых в периоды подготовки и реализации сильных землетрясений на Камчатке (рис. 1).

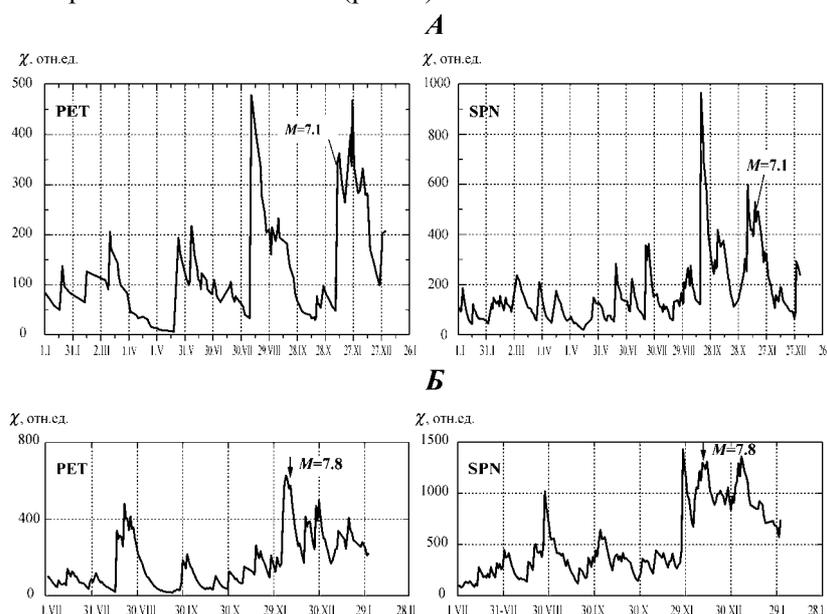


Рис. 1 Примеры прогностических кривых параметра χ в период подготовки и реализации двух сильных землетрясений на Камчатке. А – Петропавловское 24.11.1971 г., $M = 7.1$ Б – Кроноцкое 5.12.1997 г., $M = 7.8$

В течение последних пяти лет проводился мониторинг в оперативном режиме с передачей результатов расчетов и заключений в Камчатское отделение ФЦПЗ. Накопленный длинный ряд наблюдений и опыт прогнозирования в режиме близком к реальному времени позволяет выявить особенности появления предвестника, определить чувствительность отдельных станций. Результаты выявления и реализации аномалий в оперативном режиме достаточно обнадеживающие, что вселяет оптимизм (рис. 2).

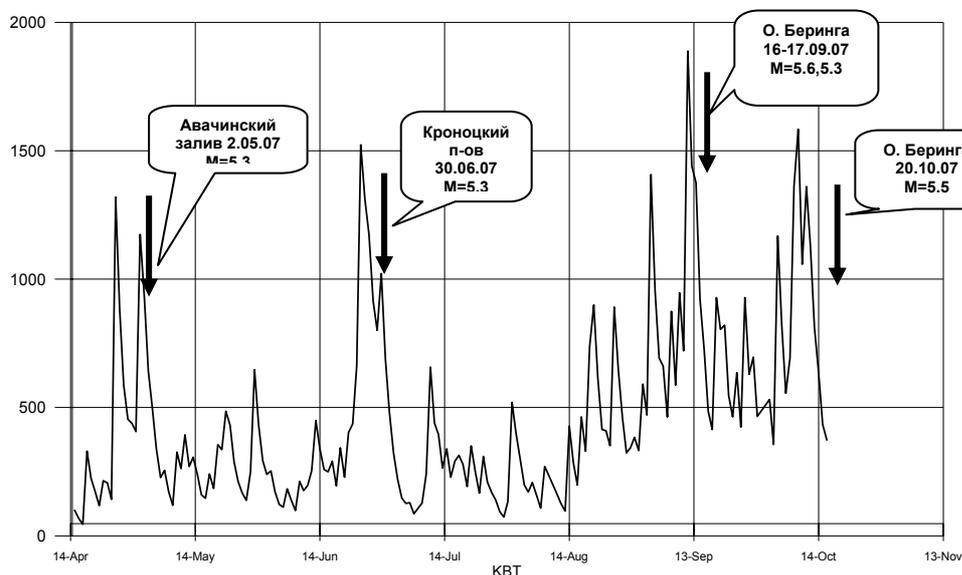


Рис. 2 Прогностическая кривая параметра χ по станции КВТ за период 15.04.07-22.10.07, (оперативная обработка данных землетрясений)

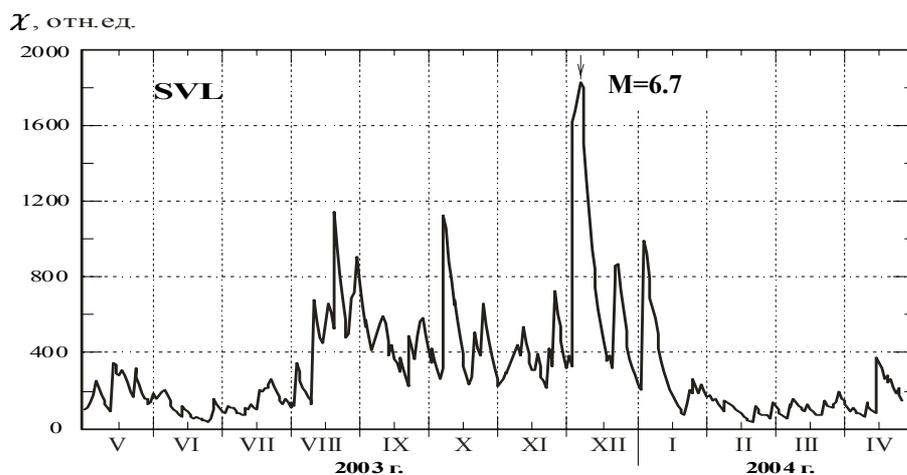


Рис. 3 Прогностическая кривая параметра χ по станции SVL (стрелкой отмечено сильное событие в Камчатском проливе)

Краткосрочный предвестник не указывает однозначно область подготовки сильного землетрясения. В долгосрочном аспекте важно выявить и очертить аномальные области и следить за их развитием во времени. Для выявления аномальных областей разработана программа картирования параметра TAU по площади. Картирование параметров производится на равномерной сетке. Размер ячеек, шаг по площади и времени устанавливается экспериментально. Картируются следующие параметры: сумма n - числа землетрясений в ячейке; сумма $\Delta\tau$, сумма $\Delta\tau/n$ и параметр $\xi\tau = (\tau\Delta\Sigma/n) \cdot (\sqrt{n}/\sigma\tau)$

Параметр $\xi\tau$ отражает изменения флуктуаций параметра τ в единицах σ .

Анализ последовательного ряда карт долгосрочного предвестника позволяет выявить и очертить зону аномалии и проследить ее развитие во времени. Долгосрочный предвестник формирует аномальную зону за время от нескольких месяцев до 5-10 лет, в зависимости от тектонического строения региона и энергии готовящегося события. Это позволяет развернуть систему наблюдений за краткосрочными предвестниками.

Для иллюстрации результатов расчета долгосрочного предвестника приведена серия карт суммирования параметра $\xi\tau$ по нескольким Камчатским станциям за интервал времени 2005-2007 гг. (рис. 4).

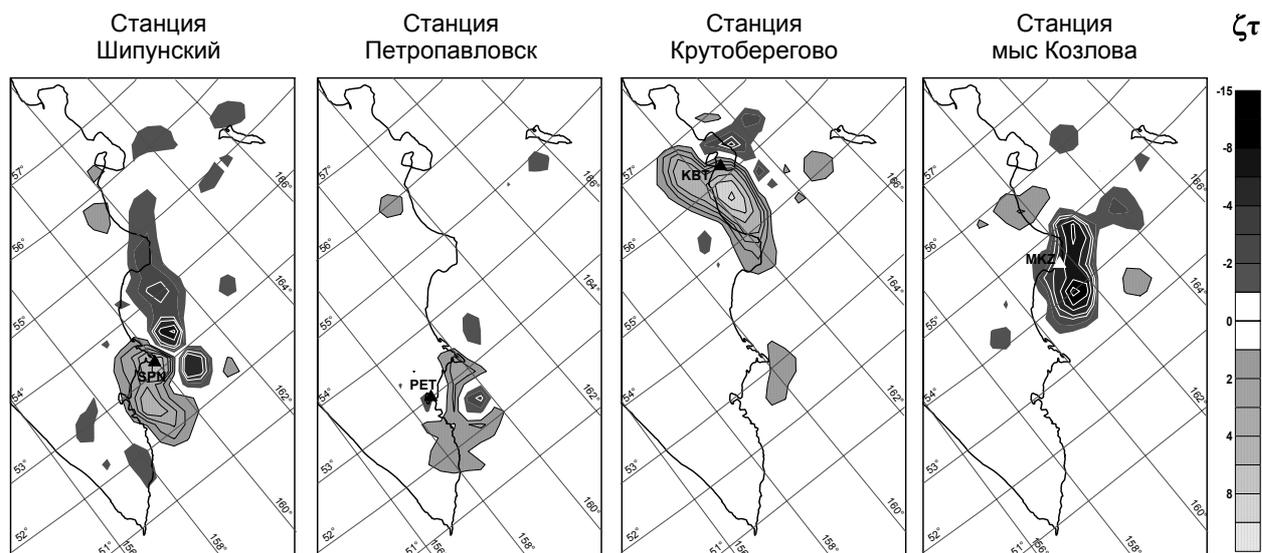


Рис. 4. Карты аномалий параметра $\zeta\tau$ по данным оперативного каталога КФ ГС РАН за 2005–2007 гг.

На рис. 4 обращает внимание значительная аномалия по станции мыс Козлова.

Важно установить стадию развития во времени долгосрочной аномалии. Из ретроспективного анализа поведения параметра в период подготовки сильного землетрясения нам удалось установить образ долгосрочного предвестника. Это синусоидальная бухта, дважды пересекающая нулевую линию (от положительных значений параметра к отрицательным, и снова в плюс). Сильное событие, как правило, приурочено к области минимума или к градиентной области выхода кривой в область положительных значений [4].

Выявленный образ долгосрочного предвестника позволил разработать программу RING, для установления стадии подготовки развивающейся аномалии. Программа позволяет рассчитать и построить временные зависимости изменения суммы параметра $\zeta\tau$ по concentрическим областям при удалении от выбранной точки внутри аномалии. Предпосылкой разработанной программы было предположение, подтвержденное экспериментально о том, что процесс подготовки землетрясения охватывает большие площади, и начинается в краевых зонах, в то время как "центр" (область очага) молчит. Установлено, что как в краткосрочном, так и в долгосрочном варианте аномальные изменения поля параметра τ появляются раньше на некотором (около 50-100 км) удалении от очага, будущего землетрясения.

В качестве примера приведены результаты расчета по программе RING графиков изменения во времени параметра $\zeta\tau$ в период подготовки Кроноцкого землетрясения 1997 г. (рис. 5). Из графика видно, что землетрясение произошло на минимуме кривой (момент землетрясения указан стрелкой). Аналогичные расчеты были проведены для аномальных зон, показанных на рис. 4.

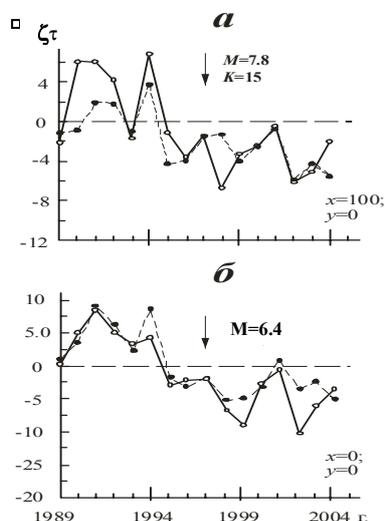


Рис. 5. Результаты расчета $\zeta\tau$ по программе RING в период подготовки и развития Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 г.

а – область главного толчка, станция SPN;
 б – центральная часть очаговой области, станция ПЕТ;
 в – центральная часть очаговой области, станция SPN.
 Пунктирными линиями обозначены результаты расчетов для 4-го кольца. Сплошными линиями – для 5-го кольца.

