

УДК 550.34

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПРЕДВЕСТНИКОВ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПОЛЯ ДЛЯ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА КАМЧАТКЕ

Л. Б. Славина¹, В. В. Мячкин¹, В. И. Левина²

¹*Институт физики Земли РАН, г. Москва*

²*Камчатская Опытно-методическая сейсмологическая партия ГС РАН,
г. Петропавловск-Камчатский*

Аннотация. Рассматриваются методические особенности и результаты применения разработанных алгоритмов и программ кинематического метода средне- и краткосрочного прогноза сильных землетрясений (извержений вулканов). Предпосылкой метода являются представления о направленных изменениях физических параметров происходящих в среде в период подготовки сильного землетрясения. Под воздействием поля напряжений среда на последней стадии подготовки землетрясений 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 ТАУ) в пространстве и времени, и проводя анализ флуктуаций относительно долговременного среднего, (в конкретном сейсмоактивном регионе), можно выявить временной интервал, где значения флуктуаций максимальны. Регистрация и локализация слабых землетрясений осуществляется сетью сейсмических станций региона. Установка дополнительной дорогостоящей аппаратуры для наблюдений за предвестником и вычисления прогностического параметра не требуется. Единственным условием работы метода является непрерывная регистрация сейсмическими станциями местных землетрясений и оперативная (близкая к реальному времени) обработка и передача данных наблюдений для осуществления расчетов. В данной работе приводятся результаты применения прогностического параметра в Камчатской сейсмоактивной зоне в ретроспективном варианте и в оперативном режиме (близком к реальному времени). Из ретроспективного анализа, проводившегося для ряда сильных землетрясений Камчатки, также как и для других сейсмоактивных зон, установлено, что кинематический предвестник в средне- и краткосрочном варианте предвещает сильное событие в интервале времени от 1 суток до 15–25 дней.

EXPERIENCE OF APPLICATION OF KINEMATIC PRECURSORS OF THE SEISMIC FIELD FOR THE PREDICTION OF EARTHQUAKES IN KAMCHATKA

L. B. Slavina¹, V. V. Myachkin¹, V. I. Levina²

¹*Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow*

²*Kamchatkan Methodical Seismological Department, Geophysical Service, RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky*

Abstract. Methodical features and results of application of the developed algorithms and programs of a kinematics method of medium- and short-term prediction of strong

earthquakes (eruptions of volcanoes). The basis of the method is the idea about the directed alterations of physical parameters occurring in the media in the period of preparation of a strong earthquake. Under influence of the stress field the medium at the last stage of preparation of earthquakes loses stability, and it is reflected in increase of dispersion of values of parameters of various geophysical fields, including the field of travel times of seismic P-and S-waves from weak, regional earthquakes. Observing variations of travel times of P-and S - waves and their ratio - T_s/T_p (parameter TAU) in space and time, and carrying out the analysis of fluctuations concerning long-term average (in concrete seismoactive region), it is possible to reveal a time interval where values of fluctuations are maximal. A network of seismic stations of the region carries out registration and localization of weak earthquakes. Installation the additional expensive equipment for observation of the precursor and calculation of the prognostic parameter is not required. The only stipulation of work of the method is continuous registration of local earthquakes by seismic stations and operative (close to real time) processing and transmission of the observation data for realization of calculations. In this work the results of application of the prognostic parameter in Kamchatka seismoactive zone in retrospective variant and in operative mode (close to real time) are represented. From the retrospective analysis which is carried out for several of strong earthquakes of Kamchatka, as well as for others seismoactive zones, it is established that kinematics precursor in medium- and a short-term variants anticipates a strong event in an interval of time from 1 day till 15 - 25 days.

Введение

Кинематический метод прогноза сильных землетрясений, извержений вулканов и горных ударов основан на наблюдениях за временами пробега продольных P- и поперечных S – волн от локальных землетрясений, зарегистрированных региональной сетью сейсмических станций исследуемого региона.

Физической основой методики являются представления о направленности процесса подготовки сильного землетрясения, отражающегося в закономерных изменениях механических и физических характеристик среды, в том числе, и в кинематических параметрах сейсмического поля. Согласно модели ЛНТ, [2] под воздействием поля напряжений происходит структурная перестройка среды. Хаотическое образование трещин сменяется упорядоченным процессом роста трещин. Направленное развитие процесса образования трещин в области подготовки будущего сильного землетрясения приводит к направленным изменениям физических и механических параметров среды, что находит свое отражение в параметрах сейсмического поля, в том числе, и в изменениях скоростей и времен пробега, и отношений времен пробега объемных P- и S - волн.

Исследование флуктуаций времен распространения продольных P- и поперечных S-волн и их отношений проводились в очаговых зонах сильных землетрясений, в районах активного вулканизма, в шахтах и горных выработках, и в лабораторных условиях - на образцах. По нашим наблюдениям имели место аномальные вариации во времени отношений T_s/T_p до и после события (сильного землетрясения, извержения вулкана, горного удара) [7, 13]. За определенный промежуток времени до события происходило уменьшение значений T_s/T_p , затем возрастание величины отношения выше нормального уровня, на фоне которого и происходило сильное событие. Следует отметить, что в литературе в основном исследуется отношение V_p/V_s , которое близко по своим значениям к отношению T_s/T_p , но, по нашему мнению, имеет другой физический смысл.

Сопоставление данных сейсмологических наблюдений и лабораторных опытов показало, что на изменения скоростей могут влиять ориентация и тип тектонических движений, геометрия источника и станции наблюдения. Сейсмические предвестники разрушения исследовались в лабораторных работах по просвечиванию упругими волнами области подготовки трещины скола. Зарегистрированные в опытах изменения

скоростей носили закономерный характер. Причем, было получено сходство результатов лабораторных и полевых наблюдений. Ряд теоретических исследований показал, что в результате изменений характеристик геофизической среды может происходить кажущееся изменение V_p/V_s . Меняются не интегральные скорости в среде, а пути пробега волн, за счет локальных изменений скоростного строения, связанных с открытием или закрытием трещин [4]. Последнее обстоятельство возможно и приводит к изменениям времен пробега T_s и T_p . Исследования V_p/V_s в сейсмоактивных регионах были начаты в Гарме под руководством И.Л. Нерсесова [3]. Исследовались V_p/V_s получаемые путем осреднения данных о временах пробега Р- и S- волн от слабых местных землетрясений по графику Вадати. Нами предложен другой, аналитический способ расчета T_s/T_p , названный нами параметром ТАУ- τ .

Методика исследований

Как указывалось выше, в основе развиваемой методики лежит предположение (подтверждающееся экспериментально) о том, что в период подготовки магистрального разрыва, сильного землетрясения, на последних стадиях, среда теряет устойчивость, что отражается в увеличении разброса значений исследуемого параметра и его дисперсии относительно долговременных характеристик. Зная долговременные значения параметров, присущих конкретному локальному району, и их текущие значения, можно определить величины отклонений текущих значений от их долговременных средних значений. Методика предусматривает поиск интервалов времени, где наблюдаются максимальные отклонения от долговременного среднего, в области как отрицательных, так и положительных значений, и выявление их в пространстве и времени. Для расчета единичных значений используются времена пробега Р- и S - волн от конкретного землетрясения до каждой станции в отдельности. Станции находятся в непосредственной близости от исследуемой фокальной зоны землетрясений и отслеживают изменения во времени и по площади, которые в исследуемой области происходят.

Единичные значения τ на рассматриваемой станции регистрации для конкретного землетрясения определяется выражением:

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

где T_s -, T_p - времена вступлений S- и Р- волн на станции регистрации, T_0 - время в очаге землетрясения. Для вычисления параметра τ необходимо предварительное определение координат гипоцентра и T_0 по сети сейсмических станций региона. Обычно отношение T_s/T_p определялось по наклону графика Вадати, связывающего времена вступлений Р- и S-Р -волн, зарегистрированных на группе сейсмических станций. При построении графика Вадати используются данные станций, расположенных в различных геолого-тектонических условиях, на разных эпицентральных расстояниях от готовящегося землетрясения. При осреднении предполагается, что среда в рассматриваемой области является однородной и изотропной в скоростном отношении. В то же время известно о сложной структуре Камчатской сейсмоактивной зоны, о наличии вертикальных и горизонтальных скоростных неоднородностей в ней. Все это не позволило для оценки отношения T_s/T_p - усреднять данные многих станций, как того требует метод V_p/V_s , основанный на графике Вадати [3].

Область наблюдения за вариациями параметра τ для каждой рассматриваемой станции выбирается экспериментально. Она постоянна и ограничена радиусом ~ 250 км от станции регистрации. Такое ограничение, связано с необходимостью, исключить влияние смены прямых волн Р- и S- на головные, от поверхности Мохо. Зависимость параметра τ от глубины и эпицентрального расстояния исследуется в каждом районе. На основании этого анализа и выбирается “рабочая” область расстояний, где параметр

не имеет этой зависимости. Для расчетов единичных значений t используются времена пробега P- и S - волн от землетрясений из выбранной ограниченной области наблюдения. Следует заметить, что использование единичных значений по данным одной станции может содержать ошибки. Величина ошибки зависит от точности определения времен вступления P - и S - волн и точности определения времени в очаге по сети станций. Единичные значения τ от координат источников, а значит, и от их миграции, не зависят. Используя данные одной станции, строго ограниченный по площади район, мы можем предполагать, что ошибки, связанные с определением координат очагов в этой зоне, однотипны, малы и не меняются от одного интервала времени к другому.

Вся методика построена на изучении флуктуаций дисперсии параметра τ в пространстве и времени, выявлении экстремальных отклонений параметра относительно средней величины, характерной для данной станции и сейсмоактивной зоны в “спокойные” интервалы времени. Особо важным условием является длительность и непрерывность ряда наблюдений, что позволяет оценить фоновые характеристики для каждой станции и следить за последовательными изменениями параметра τ во времени и по площади. Можно полагать, что если на данной площади имеются неоднородности в строении коры и мантии Земли, то они остаются неизменными во времени, а флуктуации поля параметра τ во времени и по площади связаны не с ними, а с изменением тонкой структуры среды под воздействием поля напряжений [1].

Способ расчета по формуле для единичной станции имеет ряд преимуществ. Выбор ограниченной зоны регистрации для каждой станции позволяет не учитывать, как сказано выше, сложное скоростное строение фокальной зоны, наличие горизонтальных неоднородностей, как на пути распространения волн, так и под станцией. Использование отдельно станций из разных азимутов позволяет выявить анизотропию поля параметра τ и оценить параметры поля напряжений [14].

Недостатком аналитического способа расчета является необходимость применения статистических способов осреднения.

Для каждого региона и станции оценивается среднее долговременное значение параметра τ за длительный, спокойный промежуток времени, среднеквадратичная ошибка среднего и единичного значений. Среднее для большинства исследованных нами сейсмоактивных регионов и станций оказалось близким к 1.730 при среднеквадратичной ошибке единичного измерения, равной 0.03 - 0.046.

Другой отличительной особенностью методики является примененный нами принцип накопления, суммирования данных для усиления слабых флуктуаций параметра $\Delta\tau = \tau_i - \tau_{cp}$ и выявления их относительно фоновых характеристик поля. Этот принцип основан на предположении о том, что в фокальной зоне имеются области, в которых при подготовке землетрясений изменения физических и механических параметров среды имеют один знак. Об упорядочении в расположении, (открытии и закрытии) трещин говорят модельные исследования, проведенные на образцах горных пород. Известно, что перед сильным землетрясением происходит перестройка и упорядочение механизмов очагов слабых землетрясений [5]. Направленность процесса для параметра τ должна выразиться в накоплении за определенный интервал времени отклонений от среднего значения $\Delta\tau$ одного знака, приуроченных к определенной площади. Параметр τ исследовался в лабораторных экспериментах, по результатам работ с образцами пород на Большом прессе. В районе активного вулканизма [7], фокальных зонах землетрясений, на Северо-Уральском руднике при подготовке горного удара [11].

В качестве краткосрочного предвестника использовался параметр $\chi = F(T)$ - в виде прогностической кривой [12]. Задачей разработанного алгоритма являлось, при непрерывном мониторинге во времени параметра τ , выявление временного интервала, в который отмечается увеличение разброса параметра $\Delta\tau$ и его дисперсии относительно долговременных средних значений. Проводилось суммирование отклонений $\Delta\tau$. в

выбранном, движущемся временном окне. Окно осреднения и долговременные средние значения определялись экспериментально.

Вычисления производятся по следующему алгоритму. Из потока реальных данных выбираются τ_{\min} и τ_{\max} за сутки и вычисляются $\Delta\tau_{\max} = \tau_{\max} - \tau_{\text{срд}}$;

$\Delta\tau_{\min} = \tau_{\text{срд}} - \tau_{\min}$, где $\tau_{\text{срд}}$ - среднее долговременное значение для выбранной станции и региона. Далее вычисляется параметр $\chi = F(\Delta\tau_{\min}) + F(\Delta\tau_{\max})$. Причем, для уменьшения веса отдельных случайных выбросов было принято следующее ограничение: $F(\Delta\tau) = (\Delta\tau)^4$ при $\Delta\tau < \sigma$; $F(\Delta\tau) = (\sigma)^2 * (\Delta\tau)^2$ при $\Delta\tau > \sigma$, где σ - среднеквадратичная ошибка среднего, рассчитанного за длительное время.

Нами установлено, что $\sigma = 0.04$. Определенный таким образом параметр χ сильно флуктуирует, для сглаживания флуктуаций мы применяли цифровой фильтр.

Аномальными считаются отклонения кривой, превышающие в три и более раз фоновый уровень, последний оценивается экспериментально и зависит от региона и станции наблюдения. Есть шумящие станции, есть станции с низким фоновым уровнем.

В настоящее время разработана программа, которая имеет почасовой опрос исходных данных для отслеживания предвестника в непосредственной близости от готовящегося события.

Обсуждение результатов применения краткосрочного предвестника параметра ТАУ на Камчатке

Разработанные нами алгоритмы и программы расчета прогностической кривой в достаточной степени универсальны и проверены ретроспективно на наблюдениях в различных сейсмоактивных регионах в спокойные периоды и в периоды подготовки сильных землетрясений, в зонах вулканической активизации на Камчатке, на Уральском бокситовом руднике при подготовке горного удара, в лабораторных условиях на образцах. При всех исследованиях сильные события предварялись значимыми аномалиями в три-шесть раз превышающими уровень фона. Аномальные значения на кривых параметра $\chi(\tau)$ появлялись за время от нескольких суток до 15 – 45 дней, в зависимости от расстояния станции до готовящегося события. Ниже приведены прогностические кривые, рассчитанные по наблюдениям в период подготовки различных, сильных сейсмических и вулканических событий на Камчатке. Так, значительные аномалии наблюдались в 1971 г. по станциям SPN, PЕТ, предварявшие Петропавловское землетрясение 24.11.71 $M=7.1$. (Расчеты проводились ретроспективно). Амплитуда аномальных значений превышала фоновые значения в 5-6 раз. Аномалия по форме была двойная. По станции PЕТ первый аномальный пик появился в середине августа 1971г., второй – в первой декаде ноября. В конце сентября и в октябре кривая упала до фоновых значений (рис. 1).

По станции SPN первый пик появился в середине сентября, в октябре достиг фонового уровня и вновь, в конце октября начался подъем кривой. Двойные аномалии отмечались нами и перед другими сильными землетрясениями в других регионах.

Значительные аномалии наблюдались на кривых в период подготовки и развития Толбачинского трещинного извержения в 1975г. (рис. 2).

Также, аномалии наблюдались в период развития извержений вулкана Карымский и вулкана в кальдере Академии Наук в 1996г., сильного землетрясения $M=7.0$ предварявшего их (Рис. 3). В период подготовки Кроноцкого землетрясения $M=7.8$ в 1997 г. в Камчатской фокальной зоне (Рис. 4) [9]. На кривых видны значительные аномалии, предварявшие выше перечисленные события. Длительность аномалий, время их появления зависит от расстояния наблюдающей сети до готовящегося землетрясения, его энергии и индивидуальных характеристик.

Было обнаружено, что время появления аномалии зависит от расстояния от пункта наблюдения до готовящегося события. Принципиально важным для выбора информа-

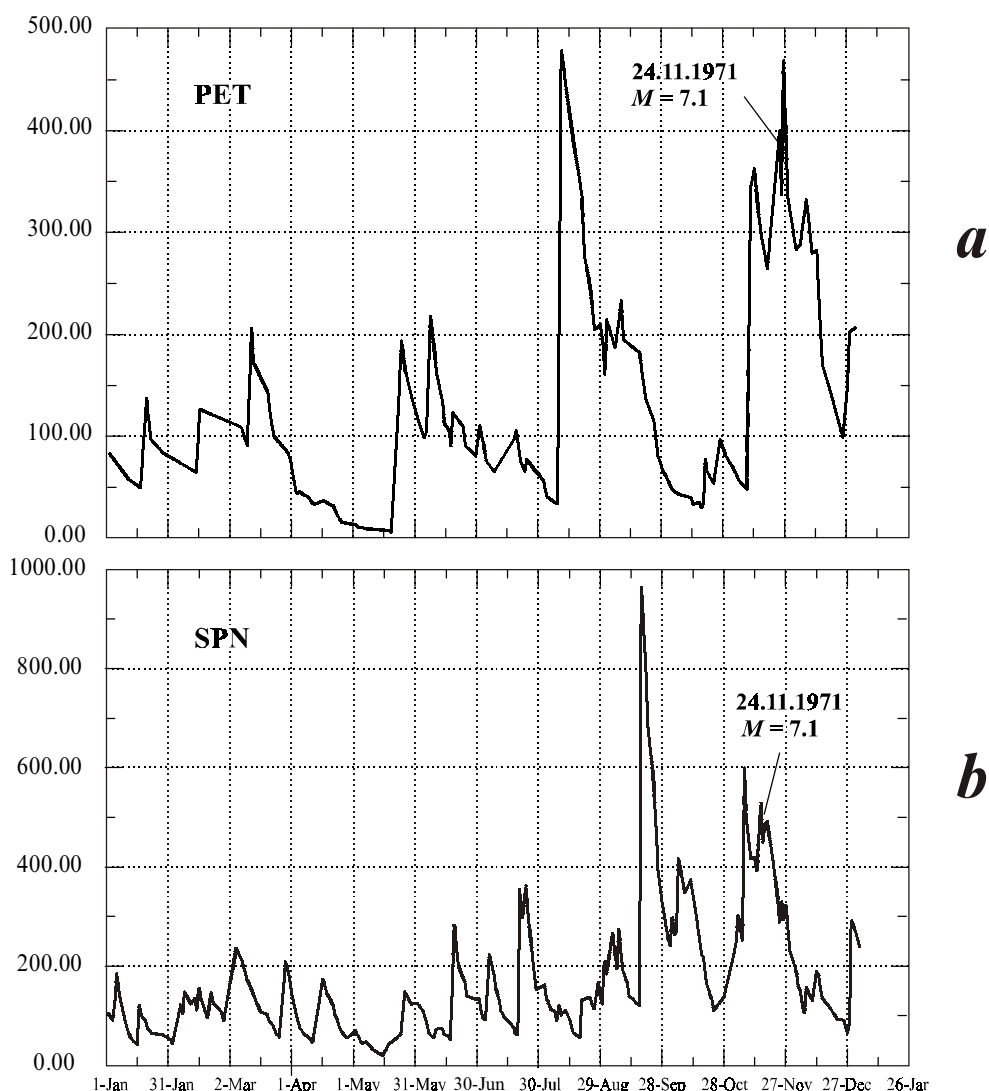


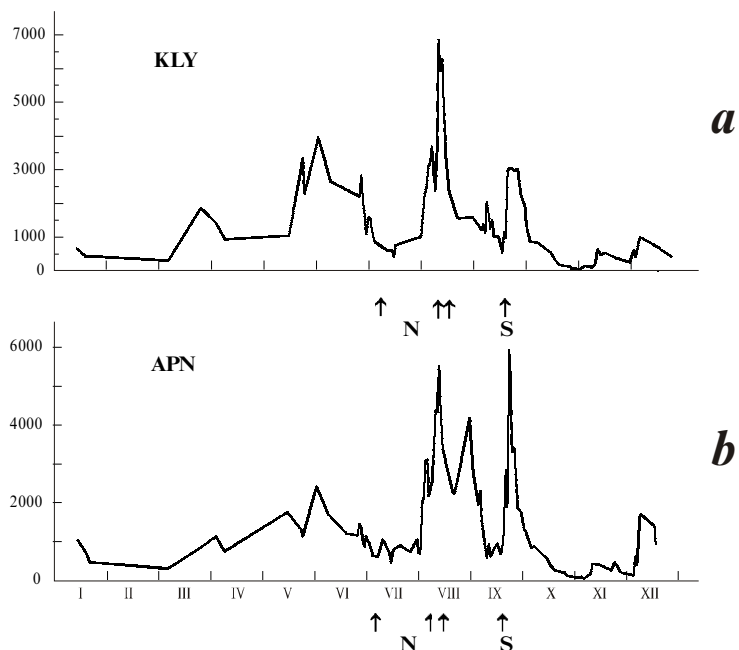
Рис. 1 Прогностическая кривая параметра TAU в период подготовки землетрясения 24.11.1971 г. $M=7.1$ по станциям: а) PET б) SPN. Стрелками показаны моменты землетрясения.

Fig. 1. Prognostic curves of the parameter TAU during the period of preparation of the earthquake 24.11.1971 $M=7.1$ on stations: a) PET b) SPN. Arrows show the moment of the earthquake.

тивных станций наблюдений за краткосрочными предвестниками является вопрос, где раньше появляется предвестник: вблизи или вдали от готовящегося землетрясения. Исследуя подготовку ряда землетрясений Кавказа и отражение этого процесса в поведении параметра τ , мы обнаружили, что чем ближе станция наблюдения к очагу готовящегося землетрясения, тем позже по времени она реагирует на его подготовку, т.е. тем короче длительность предвестника на прогностической кривой. Этот вывод важен как для понимания процесса подготовки события, так и для выбора наблюдательной сети. В качестве примера на рис. 5 приведены прогностические кривые, наблюдавшиеся нами в период подготовки Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 г. $M=6.8$ на станциях Дагестана (расстояние от эпицентра 350 км), на станции Бакуриани (100 км), и на станции Степанован (5-10 км). Последняя станция находилась в непосредственной близости от очага. Длительность аномалии по станциям Дагестана составила 30-45 дней. Аномалия по амплитуде весьма значительна. На станции Бакуриани предвестник был коротким, резкий всплеск произошел 30 ноября, то есть за 7 суток до землетрясения. На станции Степанован предвестник нами обнаружен за сутки. Для сравнения, и

Рис. 2. Прогностические кривые параметра TAU в период подготовки и развития Трещинного Толбачинского извержения в 1975 г. по станциям: APC и KLY.

Fig. 2. Prognostic curves of the parameter TAU during the period of preparation and development of Large Tolbachik Fissure Eruption in 1975 on stations APC and KLY.



исключения варианта плохой чувствительности сейсмической станции, приведены кривые за весь 1988 г. Видно, что все три группы станций дали четкие аномалии на турецкие и дагестанские землетрясения в апреле - мае 1988 г. Указанный выше эффект зависимости времени появления предвестника от расстояния отмечен нами и при исследовании Кроноцкого землетрясения 1997 г. [9].

Краткосрочный предвестник удается выделить за время от нескольких суток до 45 дней, в зависимости от расстояния регистрирующей станции до готовящегося землетрясения и его энергии.

В течение длительного времени (с 1998 г. по настоящее время) проводится непрерывный мониторинг (в режиме, близком к реальному времени) кинематических параметров сейсмического поля совместно с анализом сейсмического режима для Камчатки. Аналогичные наблюдения и расчеты производятся также для Сахалина и Курильских островов, и Дагестана. В результате анализа длинных рядов прогностического параметра τ определены уровни фона в "спокойные" периоды, величины и длительность аномалий в период предшествующий сильным землетрясениям. Качественно оценены величины превышения аномальных значений относительно фона. Опасными, судя по ретроспективному анализу, можно считать аномалии превышающие уровень фоновых значений в три раза и более. Длительность аномалии зависит от величины энергии (магнитуды) готовящегося землетрясения и расстояния до него наблюдающей станции. Результаты анализа для Камчатки приведены в таб-

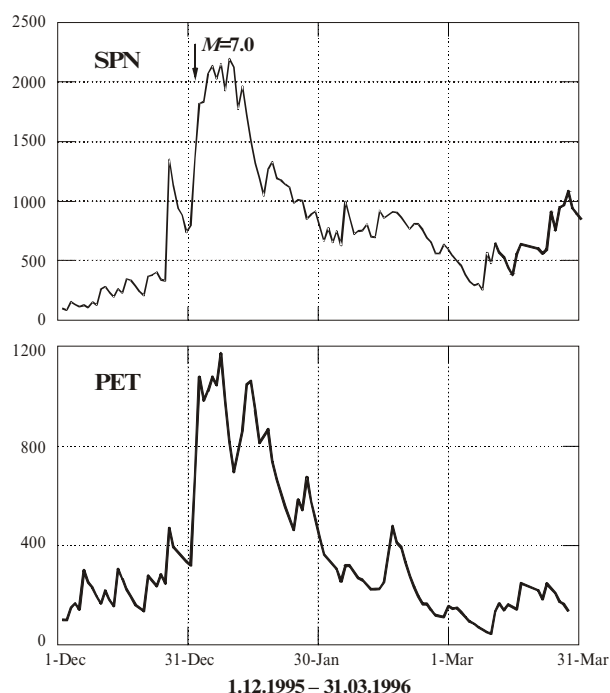


Рис. 3. Прогностические кривые параметра TAU в период подготовки и развития тектонического землетрясения в районе Карымского вулкана 01.01.1996 г., извержений вулкана Карымский и образования кратера в кальдере Академии наук.

Fig. 3. Prognostic curves of the parameter TAU during the period of preparation and development of a tectonic earthquake in the area of Karymsky volcano 01.01. 1996, the eruptions of the volcano Karymsky and the formation of the crater and the caldera of Academy of Sciences.

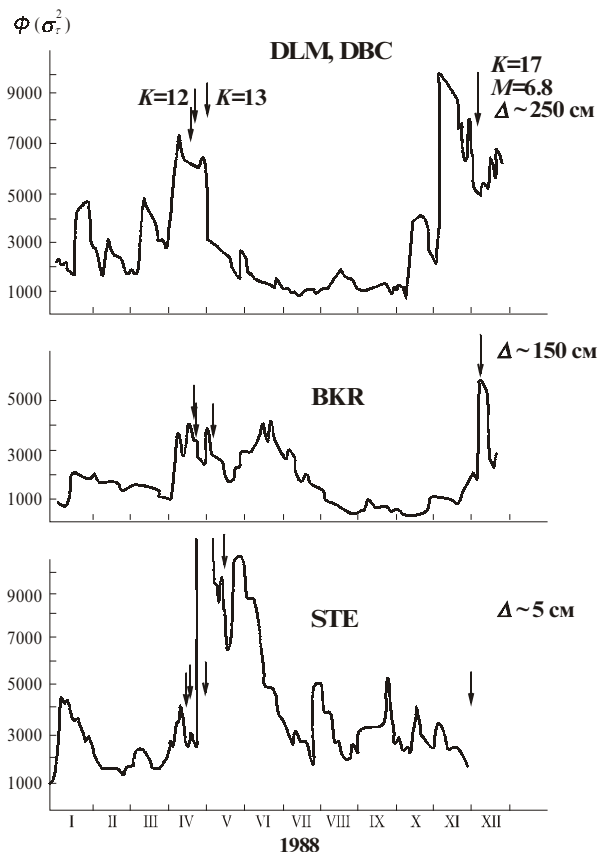
Рис. 4. Прогностические кривые параметра TAU в период подготовки Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г. $M=7.8$.

Fig. 4. Prognostic curves of the parameter TAU during the period of preparation of Kronotsky earthquake 05.12.1997 $M=7.8$.

лице 1. Из таблицы 1 можно видеть, что суммарная длительность аномальных периодов за 5.5 лет составляет для наиболее информативных станций с низким уровнем шума 10-12% (KLY, KRY, GNL, GRL). Для станций с высоким уровнем шума – 30-50% (SPN, MKZ, RUS). Амплитуды значительных параметра в аномальные периоды и фоновые, спокойные периоды резко отличаются по величине и среднему квадратическому отклонению. В аномальные периоды величина среднего квадратического отклонения в 3-5 раз выше, чем в спокойные периоды. Из анализа таблицы можно выявить станции с низким уровнем фона, т. е. мало шумящие, а значит и более информативные.

Накоплен опыт прогнозирования сильных событий в режиме близком к реальному времени. Прогностические заключения и кривые вариаций параметра $\chi(\tau)$ во времени

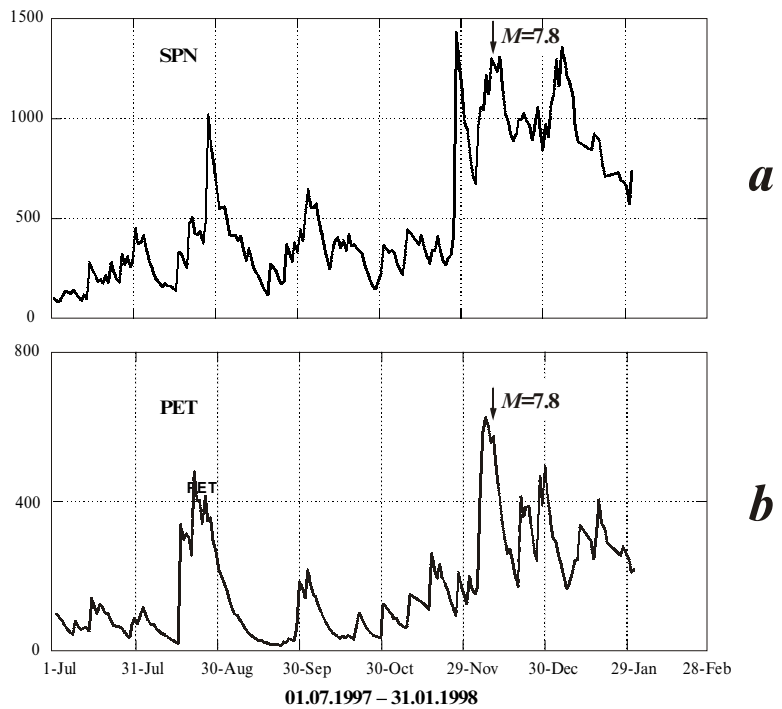
своевременно передавались (и передаются) по электронной почте в Камо ФЦПЗ. Был осуществлен успешный прогноз ряда сильных землетрясений. Например, прогностическое заключение о вероятности возникновения сильного события на Сахалине было передано в МЧС и на Сахалин 12 и 19 июля и подтверждено 26 июля. А 4 августа 2000 года произошло



а Заключение о вероятности возникновения сильного события на Сахалине было передано в МЧС и на Сахалин 12 и 19 июля и подтверждено 26 июля. А 4 августа 2000 года произошло

б **Рис. 5.** Прогностические кривые параметра TAU за 1988г. в период подготовки и реализации Спитакского землетрясения в Армении 07.12.1988 г. $M=6.8$ по станциям: а) Дагестана, б) Бакуриани, в) Степанована. Стрелками показаны моменты землетрясений, с указанием расстояния до эпицентра.

в **Fig. 5.** Prognostic curves of the parameter TAU during the period of preparation and realisation of the Spitak earthquake in Armenia 07.12.1988 $M=6.8$ on stations: а) Daghestan, б) Bakuriani, в) Stepanovan. Arrows show the moment of the earthquake.



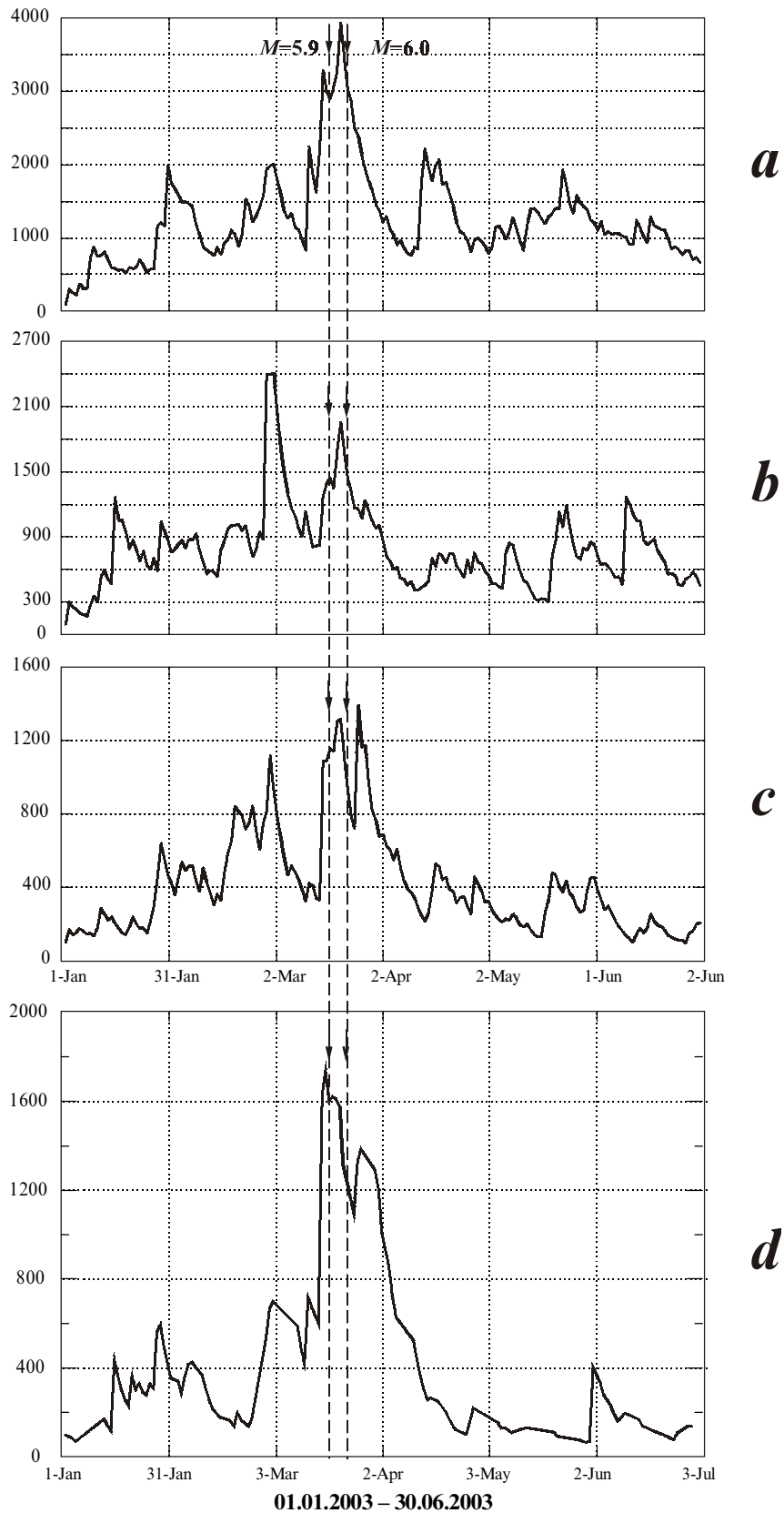


Рис. 6. Прогностические кривые параметра TAU в период подготовки и развития роя землетрясений в марте 2003 г. по станциям: а) SPN, б) PET, в) RUS, г) SDL.

Fig. 6. Prognostic curves of the parameter TAU during the period of preparation and development of the swarm of earthquakes in March 2003 on stations: a) SPN, b) PET, c) RUS, d) SDL.

Таблица 1. Средние станционные аномальные и фоновые значения прогностического параметра TAU и их длительность за 1998 – 2003 (июнь) гг. по станциям Камчатки.

Table 1. Average anomalous and background values of the parameter TAU and their duration in 1998 – 2003 (June) on the stations of Kamchatka.

Станция	Аномальные значения			Фоновые значения			Суммарная длительность 1998-2003 (дни)	
	A ср	σ	Δt	A ср	σ	Δt	Аномальные значения	Фоновые значения
KRY	607	168	16	278	77	109	250	1740
GNL	259	134	26	73	33	108	396	1595
KBT	102	549	43	466	175	71	550	862
KLY	836	387	21	154	90	200	185	1800
AVH	479	193	42	241	66	76	707	1222
GRL	556	285	28	197	82	99	416	1381
MKZ	1323	379	40	618	145	45	927	1037
NLC	816	256	33	459	142	125	498	1494
PET	449	241	60	185	66	148	540	1038
RUS	638	290	49	319	99	73	784	1027
SPN	1118	430	61	554	149	95	796	1130

A ср – среднее станционное значение амплитуды аномалии (фона);

σ – среднеквадратичное отклонение;

Δt – среднее значение длительности аномалии (фона).

A ср – average value of the anomaly (background) at the station;

σ – middle-square deviation;

Δt – average value of duration of the anomaly (background)

сильное землетрясение с $M=7,1$. Прогностические заключения передавались так же перед землетрясениями на Южных Курилах 15 августа 2000 года ($M=5,8$); вблизи Хоккайдо 28 января 2000 года ($M=6,9$); в Дагестане 31 января ($M=5,6$) и 21 февраля 1999 года ($M=5,1$).

Анализ результативности объявления «тревоги» по прогностическим кривым параметра TAU, направляемым в Камо ФЦПЗ, за 2002-2003 гг. показал, что имеется ряд успешных прогнозов. Так объявленная тревога в апреле 2002 г. реализовалась в виде землетрясения 26.04.02 $M=6.0$. В мае 2002 г. реализовалась событиями 08.05.02 $M=6.0$, 5.8. На прогностических кривых наблюдаются значительные аномалии, предвещающие рои землетрясений в Авачинском заливе в декабре 2002 г., в марте 2003 г. (Рис. 6).

Однако имели место и ряд пропусков «цели».

Перед землетрясением 16.06.03 с $M=6.6$ ($K=14.7$), $H=190$ км. Отмечалась аномалия с 10-15 мая, основной максимум – 25 мая по станции KLY. Тревога не объявлялась т.к. не было подтверждений по другим станциям. Перед землетрясением 05.12.03 $M=6.4$ в районе о. Беринга с 04.12.03 наблюдалась аномалия по станции KBT в 3.5 раза выше фона. На станции SVL (Рис. 7), на фоне аномалии наблюдавшейся с 10.08.03 и связанной с активизацией вулкана Шивелуч, 04.12.03 наблюдался резкий подъем аномалии до уровня в 8 раз выше фона. Мы связываем этот подъем с землетрясением в районе о. Беринга. Тревога не объявлялась. Перед землетрясением 14.04.04 $M=6.1$ аномалия в 4 раза выше фона наблюдалась по станции KLY с конца февраля. Тревога не объявлялась. Накопленный опыт краткосрочного прогнозирования вселяет оптимизм, однако, нет сомнений, что для надежности объявления тревоги требуется взаимный обмен данными по комплексу параметров. К сожалению, такая информация не доступна, нет оперативной обратной связи с участниками КамоФЦПЗ.

В краткосрочном варианте по предвестнику параметра τ 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. Для оконтуривания и выявления опасной зоны можно использовать долгосрочный вариант предвестника τ в виде картирования в пространстве и анализа во времени последовательного ряда

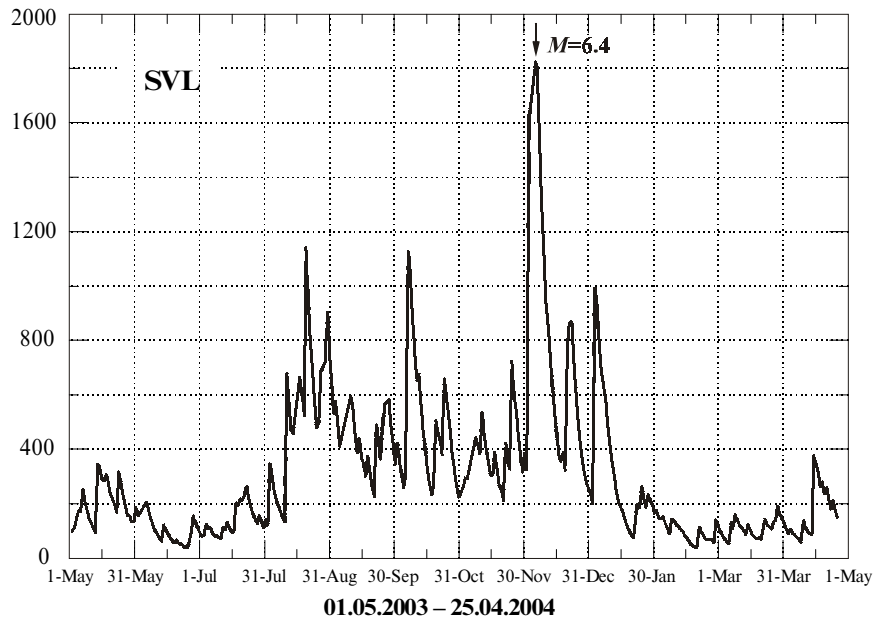


Рис. 7. Прогностические кривые параметра TAU в период активизации вулкана Шивелуч и землетрясения в районе о. Беринга 05.12.2003 M=6.4.

Fig. 7. Prognostic curves of the parameter TAU during the period of activation of Shiveluch volcano and the earthquake in the area of Bering island 05.12. 2003 M=6.4.

карт. Для выявления аномальной зоны и установления стадии ее развития разработаны ряд алгоритмов и программ [13].

Литература

1. Гарагаш И.А. Анализ изменений напряженного состояния земной коры при подготовке Кроноцкого землетрясения // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 года: предвестники, особенности, последствия. - Петропавловск-Камчатский, 1998. С. 106-111.
2. Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г. Основы физики очага и предвестники землетрясений // Физика очага землетрясения. М., Наука, 1975. С. 6-29.
3. Нерсесов И.Л., Семенов А.Н., Симбирева И.Г. Пространственно-временное распределение отношений времен пробега поперечных и продольных волн в Гармском районе // Сб. «Экспериментальная сейсмология». - М., Наука, 1979. - С. 334-345.
4. Салганик Р.Л. Механика тел с большим числом трещин // Изв. АН СССР. Механика твердого тела № 4, 1974. С. 149-158.
5. Симбирева И.Г., Чепкунас А.С. Механизмы очагов землетрясений определенные с учетом регионального строения земной коры и мантии Камчатки // Вулканология и сейсмология, № 2, 1986. С. 85-96.
6. Славина Л.Б. Пространственно-временные изменения поля V_p/V_s перед сильными землетрясениями у берегов Камчатки // Вулканология и сейсмология, 1982, №4, С. 84-95.
7. Славина Л.Б., Горельчик В.И. Отражение физических процессов подготовки землетрясений и извержений вулканов в поле времен пробега сейсмических волн // Сб. "Экспериментальные и численные методы в физике очага землетрясений". М. "Наука", 1989. С. 44-53.
8. Славина Л.Б., Кузьмина Т.А., Мячкин В.В. К вопросу о времени и месте возникновения кинематических предвестников сильных землетрясений // Сб.

- “Модельные и натурные исследования очагов землетрясений”. М. “Наука”, 1991. С. 71-78.
9. Славина Л.Б., Соловьев Н.В., Левина В.И. Краткосрочный кинематический предвестник в период подготовки Кроноцкого землетрясения // Сб. Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 года, предвестники, особенности, последствия. Петропавловск-Камчатский. 1998. С. 121-133.
 10. Славина Л.Б., Мячкин В.В., Михайлов Д.Н., Левина В.И. Результаты многолетних наблюдений за кинематическими предвестниками для долго-, средне- и краткосрочного прогноза сильных землетрясений на Камчатке // Проблемы сейсмичности Дальнего Востока. Петропавловск-Камчатский, 2000. С. 155-164.
 11. Славина Л.Б., Мячкин В.В. К вопросу о времени и месте возникновения кинематических предвестников сильных землетрясений // Модельные и натурные исследования очагов землетрясений. М., 1991. С. 71-78.
 12. Славина Л.Б., Мячкин В.В., Белянкин Г.А. Закономерности проявления во времени и пространстве кинематических предвестников землетрясений // Построение моделей развития сейсмического процесса и предвестников землетрясений. - М., 1993. № 1, С. 131-138.
 13. Славина Л.Б., Гарагаш И.А., Мячкин В.В., Горельчик В.И., Соловьев Н.В. Изменение напряженно-деформированного состояния и кинематических параметров среды во время Большого трещинного Толбачинского извержения // Вулканология и сейсмология, 1999. № 1. С. 79-86.