

Г 2011
8154

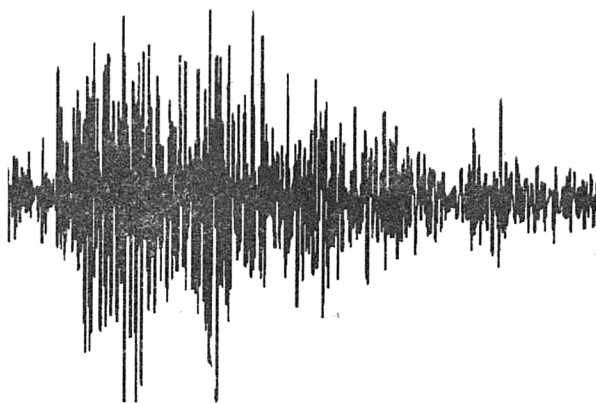
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта



Г. А. СОБОЛЕВ

**КОНЦЕПЦИЯ ПРЕДСКАЗУЕМОСТИ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ОСНОВЕ
ДИНАМИКИ СЕЙСМИЧНОСТИ
ПРИ ТРИГГЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**



Москва

2011

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта**



Г.А. Соболев

**Концепция предсказуемости
землетрясений на основе динамики
сейсмичности при триггерном
воздействии**

**Москва
2011**

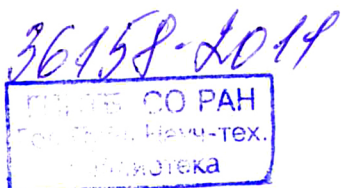
Г 2011
8154

УДК.550.34

Соболев Г.А. Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии. – М.: ИФЗ РАН, 2011. – 56 с.

Динамика сейсмичности зависит от многих факторов, таких как неоднородность прочности и напряженного состояния геологической среды, иерархическая структура разломов, воздействие источников разной физической природы. Сейсмический процесс представляет собой один из типов нелинейных диссипативных систем, проявляющих свойства как упорядоченности, так и хаоса. Переходы от устойчивого к неустойчивому равновесию и локальная неустойчивость возникают при поступлении энергии; обратная тенденция проявляется при диссипации накопленной средой энергии. Ряд метастабильных областей разного размера существует в сейсмоактивном регионе. Некоторые землетрясения предваряются предвестниками различного временного и пространственного масштаба. Сейсмические предвестники включают долговременную активизацию, затишье, форшоки в широком и узком смысле, скрытые периодические колебания, эффекты синхронизации и другие. Появление предвестников свидетельствует о движении сейсмической системы к катастрофе. В настоящей работе продемонстрирован ряд среднесрочных и краткосрочных предвестников. Однако все известные до сих пор предвестники не надежны: высок процент пропуска цели и ложных тревог. Небольшие по амплитуде флуктуации напряжений и прочности играют значительную роль накануне землетрясения и время возникновения последнего зависит от коллективного воздействия разных факторов. Главные проблемы состоят в совершенствовании способов выявления метастабильных областей, оценки влияния триггеров на очаг готовящегося землетрясения.

C



КПЗ-

ВВЕДЕНИЕ

Выполненные за последние 20 лет измерения перемещений поверхности Земли методами космической геодезии выявили места несогласных по величине и направлению движений. Наиболее отчетливо они проявляются по побережью Тихого океана, юго-восточному краю Индийского океана и поясу широтного направления от Гималаев до Средиземного моря. Эти регионы характеризуются и самой интенсивной сейсмичностью. Все это оставляет мало сомнений в том, что большинство землетрясений вызвано деформационным процессом, а именно, накоплением механических напряжений в результате несовместности деформаций. Такие землетрясения принято называть тектоническими. Автор излагает свое понимание сейсмического процесса и возможности прогноза землетрясений, сложившееся в результате его 40-летнего опыта исследований в этой проблеме. Не исключено, что интерпретация некоторых экспериментальных результатов может найти и другое объяснение, поскольку мы имеем дело с чрезвычайно малоизученной областью естественных наук. Статья написана по материалам доклада, сделанного автором на Ученом совете Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта 13 апреля 2010 г.

Возникновение вызывающего землетрясение разрыва в массиве горных пород есть явление, главным образом, механическое. Массив локально переходит от не разрушенного состояния к разрушенному, т.е. к новому качественному состоянию, и этот переход можно назвать катастрофой. То, что разрыв занимает небольшую область в окружающем объеме пород, а после землетрясения среда восстанавливает свою сплошность, не меняет явление по существу. В такой постановке мы не можем уйти от положений механики разрушения твердых тел.

Рассмотрим реологическую диаграмму (рис. 1). Макроразрушение деформируемого тела в условиях трехосного неравномерного сжатия наступает после того, как главное напряжение превосходит предел длительной прочности. Это установлено многочисленными экспериментами, в том числе и на горных

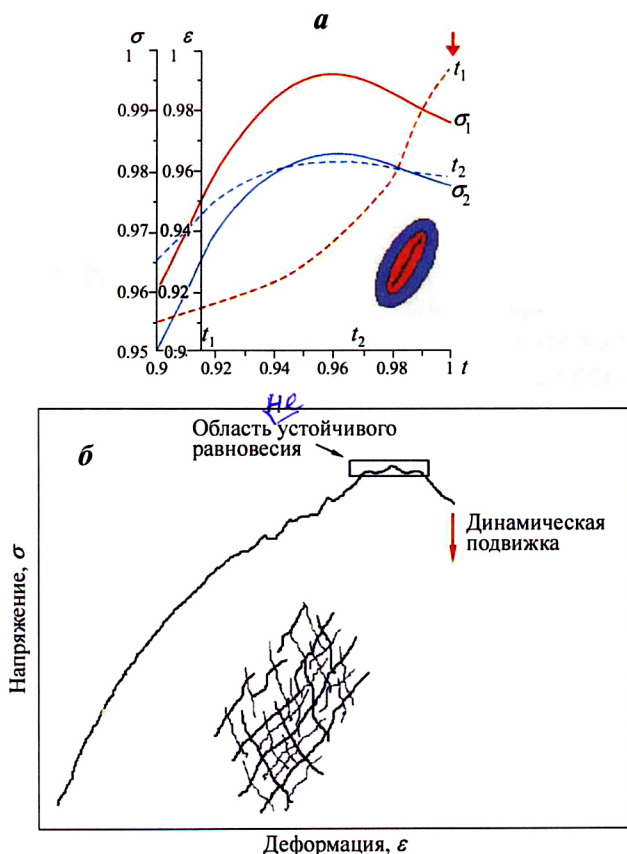


Рис. 1. Развитие механической неустойчивости

a – схема разделения материала на области неустойчивой и устойчивой деформации; *б* – реологическая кривая и схема блокового строения сейсмоактивного района

породах. Назовем участок реологической кривой σ – ε вблизи предела прочности областью неустойчивого равновесия и образование макроразрыва – динамической подвижкой. Применительно к настоящей работе, динамическая подвижка есть акт землетрясения. Среда долго может находиться в области неустойчивого равновесия, испытывая при этом небольшие флуктуации прочности и напряженного состояния. В лабораторном

эксперименте эта фаза легко определяется, так как график σ - ε идет параллельно оси абсцисс. В глубине земной коры мы не можем прямо измерить ни напряжение, ни деформацию; приходится полагаться на косвенные методы.

Крутизна спада графика σ - ε и интервал времени от максимума графика до динамической подвижки зависят от жесткости нагружающей машины. Под жесткостью k в этом контексте понимается отношение величины уменьшения приведенной к неустойчивости силы ΔF к величине деформации в процессе развития неустойчивости D : $k=\Delta F/D$. Если это отношение велико, то нагрузка на среду (и величина накопленной потенциальной энергии) падает по мере развития неустойчивой деформации, так что макроразрушения может не произойти. Это продемонстрировано в серии опытов на прессах с сервоконтролем, когда обеспечивается постоянная скорость деформации [Ставрогин, Протосеня, 1985]. В “мягкой” машине процесс протекает взрывообразно в течение короткого интервала времени после достижения предела прочности. Уровень жесткости естественной нагружающей машины (движение плит) не известен. Если участок падающей прочности (до землетрясения) занимает конечный интервал времени, то существует возможность следить за развитием сейсмического процесса вплоть до динамической подвижки с целью ее прогноза.

На рис. 1, *а* показана схема развития процесса на участке падающей прочности, а на рис. 1, *б* – схема блокового строения земной коры. Пусть напряжения σ_1 в блоке 1 в некоторый момент времени t_1 достигли уровня 96% от максимально возможных. При дальнейшем росте напряжений они в момент времени t_2 достигают уровня, достаточного для развития неустойчивой деформации, что сопровождается ростом скорости деформации ε_1 в приразрывной области и одновременным падением уровня напряжений σ_1 . Ускорение деформации при условии хрупкого разрушения пород проявляется и в усилении сейсмической активности. Предположим также, что в соседнем блоке 2 уровень напряжений σ_2 в момент t_1 составлял 95%. Их возрастание к моменту времени t_2 недостаточно для развития неустойчивости в этом блоке. Трата накопленной энергии для поддержания

процесса неустойчивой деформации в приразрывной области блока 1 и соответствующее падение напряжений σ_1 приведут к некоторому падению напряжений в соседних блоках. Там будет понижаться скорость деформации ε_2 и уменьшаться сейсмическая активность. Таким образом, при развитии неустойчивой деформации во времени массив разделяется на две области, в которых деформационные (и сейсмические) процессы протекают по-разному. Можно ожидать, что внутри блока 1 будет развиваться сейсмическая активизация, в то время как в окружающем пространстве – сейсмическое затишье. Это было продемонстрировано в лабораторном эксперименте и естественных условиях [Соболев, 2003а,б; Соболев, Пономарев, 2003].

ФАЗЫ ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Земная кора состоит из боков разного размера различной прочности, разделенных разломами. По-видимому, распределение размеров блоков и разломов подчиняется фрактальному и даже мультифрактальному законам [Садовский, Писаренко, 1991; Стаховский, 2007]. Нельзя исключить, что структура прочности и напряженного состояния обладает такими же закономерностями, хотя экспериментально это не доказано. Из такого представления вытекает важное следствие, имеющее отношение к возможности прогнозирования землетрясений. Разрыв малого размера остановится на границе участка высокой прочности или неблагоприятной структуры напряжений, что предотвращает большое землетрясение. Это обстоятельство не учитывалось в модных моделях самоорганизованной сейсмичности [Bak, Tang, 1989], почерпнутых из учения о динамике диссипативных систем, развитой для относительно однородных сред. Для того чтобы маленький разрыв распространился на большое расстояние, нужны дополнительные условия, о которых речь пойдет ниже. В данной работе под термином “большое” (large) землетрясение будем понимать событие, прогноз которого желателен для предотвращения ущерба; в основном, это землетрясения с магнитудой $M > 6.5$, длина разрыва которых превышает 10 км.

В качестве одного из примеров будут использованы итоги изучения Кроноцкого землетрясения, происшедшего на Камчатке 05.12.1997 г. ($M=7.8$). Оно было самым сильным на территории Камчатской сейсмоактивной зоны за время инструментального каталога с 01.01.1962 г. Каталог составлен Камчатской опытной сейсмической партией и представлен с минимального энергетического класса $K_s \geq 8.5$ ($M > 2.6$) [Федотов, 1972].

На рис. 2 зеленой линией схематически показана проекция разрыва протяженностью более 100 км при главном толчке землетрясения; крестиками – афтершоки, длившиеся 1.3 года; зелеными кружками – землетрясения в радиусе 100 км за 1997 г., т.е. за 12 месяцев до этого события; красными кружками – форшоковая активность за трое суток до главного

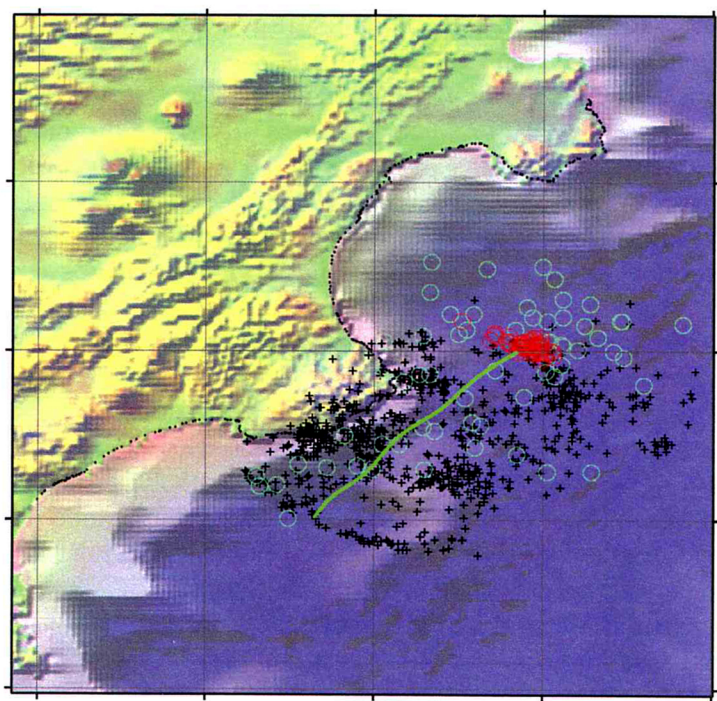


Рис. 2. Схема Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г. ($M=7.8$). Пояснения см. в тексте

толчка. Последняя локализована в узкой зоне у северо-восточного края разрыва. Здесь и далее для обнаружения афтершоков использованы алгоритм из работы [Молчан, Дмитриева, 1991] и программа В.Б. Смирнова [1997].

На рис. 3, б приведены сглаженные графики числа землетрясений с $K \geq 9$ в последовательные 10 сут в радиусе 100 км от эпицентра Кроноцкого землетрясения (54.64° с.ш., 162.55° в.д.); на рис. 3, а – графики выделившейся сейсмической энергии. В первом приближении, обе характеристики держались на постоянном уровне в течение предшествующих землетрясению 35 лет. Сопоставляя этот факт с видом реологической кривой

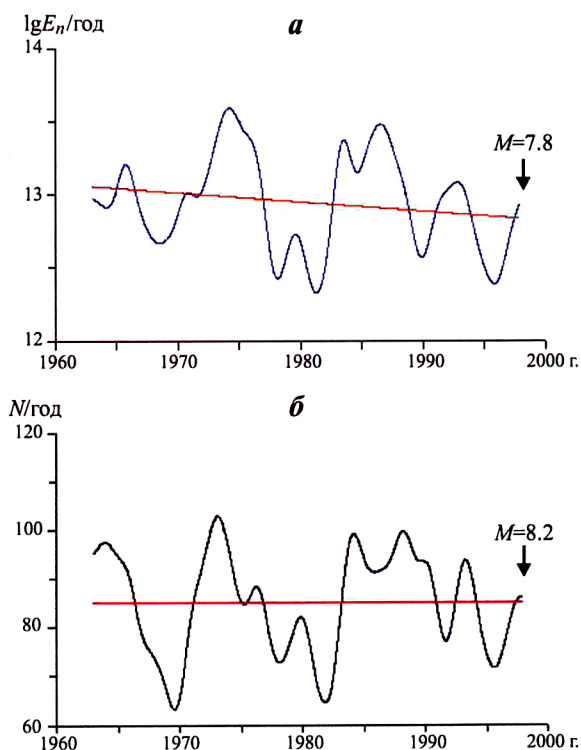


Рис. 3. Изменение сейсмической энергии E_n (а) и числа землетрясений N (б) с $K \geq 9$ перед Кроноцким землетрясением

на рис. 1, можно предположить, что среда в районе землетрясения находилась в области неустойчивого равновесия при малых флуктуациях напряжений.

Более тонкий анализ с учетом как количества, так и энергии сейсмических событий с применением метода *RTL* [Соболев, Тюпкин, 1996, 1998] позволил выделить перед Кроноцким землетрясением область сейсмического затишья. Параметр *RTL* представляет собой произведение функций $RTL = R \cdot T \cdot L$, где

$$\begin{aligned} R(x, y, z, t) &= \left[\sum \exp(-r_i/r_o) \right] - R_{lir}; \\ T(x, y, z, t) &= \left[\sum \exp(-(t-t_i)/t_o) \right] - T_{lir}, \\ L(x, y, z, t) &= \left[\sum (l_i/r_i)^p \right] - L_{lir}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь x, y, z, t – координаты и время анализируемого сильного землетрясения; r_i, t_i – эпицентральные расстояния и времена текущих землетрясений энергетических классов $9 \leq K \leq 13$ относительно эпицентра и времени сильного землетрясения; l_i – размер очага текущего землетрясения, вычисляемый по формуле $\lg l_i = 0.244 \lg K_i - 2.266$ [Ризниченко, 1976]; r_o – коэффициент, характеризующий функцию влияния произошедшего текущего землетрясения в зависимости от его удаленности от эпицентра сильного землетрясения; t_o – коэффициент, характеризующий функцию влияния произошедшего текущего землетрясения в зависимости от его удаленности по времени от момента сильного землетрясения; p – коэффициент влияния величины текущего землетрясения; $R_{lir}, T_{lir}, L_{lir}$ – параметры устранившихся линейных трендов.

На рис. 4, а показано развитие затишья в интервале 1994–1995 гг., когда график *RTL* находился ниже уровня многолетнего фона. Стрелка указывает время, когда на основании этого графика и карты сейсмического затишья (рис. 5) в Экспертный совет по прогнозу землетрясений при МЧС России было направлено сообщение о возможности землетрясения с $M \sim 7$. Аналогичный пример сейсмического затишья перед Симуширским землетрясением 15.11.2006 г. ($46^\circ 7'$ с.ш., $153^\circ 2'$ в.д., $M=8.2$)

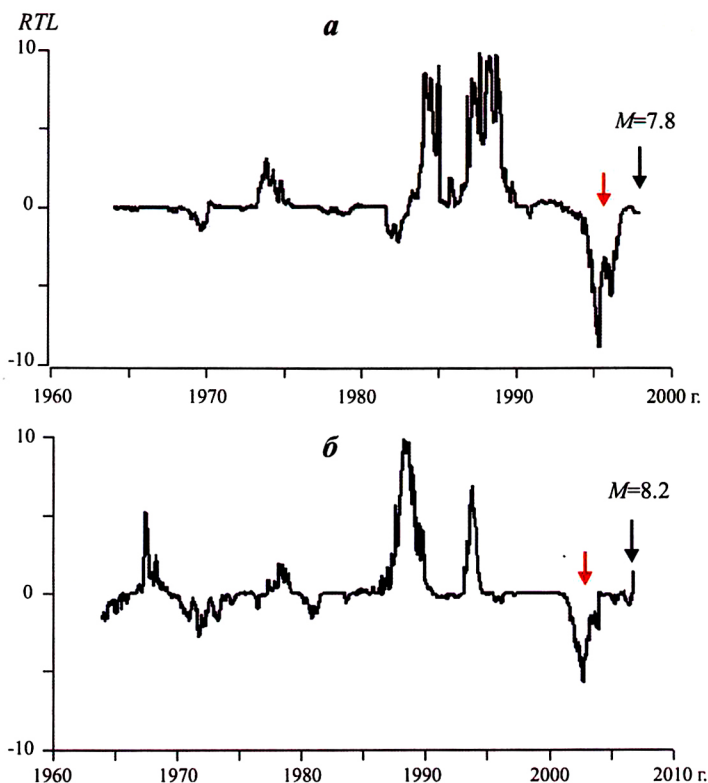


Рис. 4. Графики *RTL* перед Кроноцким (*а*) и Симуширским (*б*) землетрясениями. Понижение графика относительно уровня многолетнего фона указывает на стадию сейсмического затишья, возвращение графика к уровню многолетнего фона – форшоковая активизация в широком смысле, рост графика выше уровня многолетнего фона – критическое ускорение сейсмичности

показан на рис. 4, *б*, аномальная область – на рис. 6. Здесь также ожидалось землетрясение с $M \sim 7$. Из двух приведенных примеров следует, что прогнозируемость большого землетрясения в среднесрочном аспекте (за несколько лет или месяцев) возможна, но в обоих случаях магнитуда ожидаемых землетрясений оказалась меньше реальных событий. Кроме того, существовали области затишья, не закончившиеся большими землетрясениями. Особенно четко это видно на рис. 6,

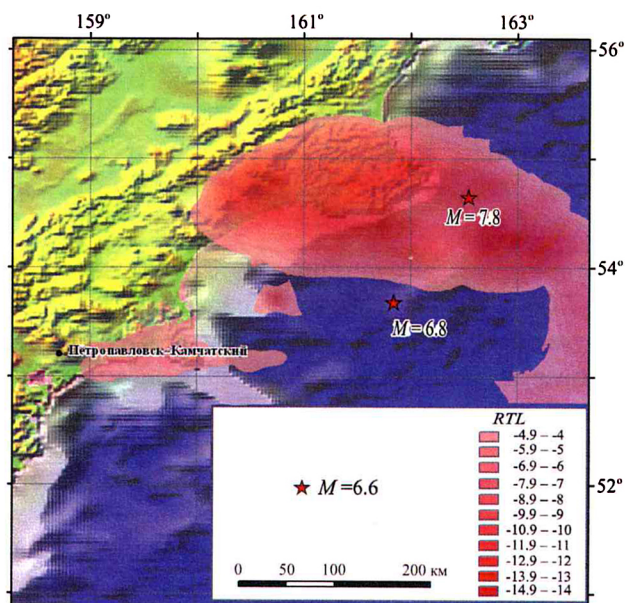


Рис. 5. Области сейсмического затишья перед Кроноцким землетрясением ($M=7.8$) и повторным толчком ($M=6.6$). На рисунках звездочками показаны землетрясения

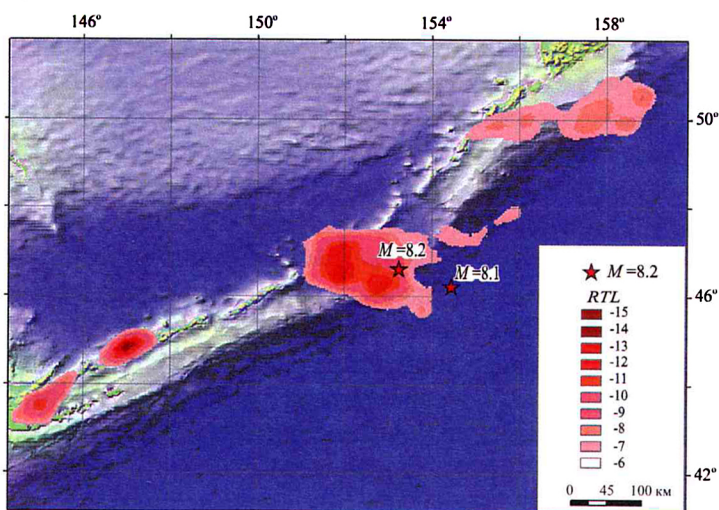


Рис. 6. Области сейсмического затишья перед Симуширским землетрясением ($M=8.2$) и повторным толчком ($M=8.1$)

где кроме самой большой аномалии в области Симуширского землетрясения ($M=8.2$) выявлены аномалии и в других частях Курильской гряды. Наши оценки, а также независимая проверка [Кроноцкое..., 1998] свидетельствуют о том, что рассматриваемый предвестник возникает не перед всеми землетрясениями с $M > 6$.

Существует ряд гипотез о природе сейсмического затишья [Wyss *et al.*, 2004]. Перечислим их с краткими пояснениями.

А) Локализация неустойчивой деформации. Как схематически было представлено на рис. 1, если при развитии зоны неустойчивой деформации напряжения в этой зоне падают, то в окружающей зоне они также уменьшаются и следствием может быть понижение сейсмической активности, выражающееся в сейсмическом затишье.

Б) Зацепление блоков. Блоки земной коры перемещаются в результате силового воздействия от движущихся плит, что убедительно демонстрируется результатами GPS-наблюдений. При взаимном перемещении блоков один из них может остановиться в результате зацепления (участка повышенного трения) с соседними блоками. Тогда в блоках, расположенных относительно остановившегося блока в противоположном от источника движущей силы направлении, напряжения будут уменьшаться, что приведет к сейсмическому затишью.

В) Крип по разлому. Движение по существующему геологическому разлому может ускориться в результате крипа. Это приведет к изменению тензора напряжений в прилегающей к разлому зоне [Кузнецова и др., 1991]. При такой ситуации существующие в данной зоне сейсмоактивные разрывы перестанут развиваться, следствием чего будет сейсмическое затишье. Под сейсмоактивными разрывами (или разломами) будем понимать те, которые отвечают движениями берегов изменением напряженного состояния и в случае динамических подвижек (в отличие от крипа) генерируют сейсмические колебания.

Г) Уменьшение внутрипорового давления P_i жидкости в горной породе. Это приводит к возрастанию эффективных нормальных напряжений на границах пор и повышению прочности пород к разрушению на сдвиг σ в соответствии с модифицированным законом Кулона – Мора

$$\sigma = \sigma_0 + K(\sigma_i - P_i), \quad (2)$$

где σ_i – литостатическое давление в земле и K – коэффициент внутреннего трения.

В дилатантно-диффузной (ДД) модели землетрясений [Scholz et al., 1973] предполагалось, что осушение возникает при массовом образовании отрывных микротрещин. Трудно допустить, что в неоднородной по прочности и напряженному состоянию земной коре появление таких микротрещин возможно в районах размером в несколько десятков или сотен километров. Однако могут быть и другие причины частичного осушения массивов пород, например за счет уменьшающегося потока жидкости из земных глубин к поверхности. Тогда повышение прочности приведет к сейсмическому затишью.

Д) Влияние космических факторов. Скорость нарастания напряжений может уменьшиться при снижении скорости движения плиты, обеспечивающей накопление упругой энергии в сейсмоактивном регионе. Эффект релаксации напряжений за счет пластического движения и расходования накопленной энергии в результате сейсмической эмиссии будет приводить к затуханию сейсмической активности.

Е) Артефакты. При выявлении сейсмического затишья первостепенное значение имеет однородность каталога. Неучтенные изменения представительного энергетического класса (магнитуды) в результате смены методик обработки сейсмической информации или вариаций структуры сети наблюдений приведут к ложным выводам о появлении сейсмического затишья, что было подчеркнуто в работе [Wyss, Habermann, 1988].

Возвращаясь к рис. 4, отметим, что в обоих рассматриваемых случаях после минимума графика RTL наблюдалась стадия его восстановления до уровня многолетнего фона. Назовем ее стадией форшоковой активизации в широком смыс-

ле; она длилась 1.5 года перед Кроноцким и Симуширским землетрясениями. Местоположение зон активизации, возникших на интервалах между минимумами графиков RTL до их нулевого значения показано на рис. 7 и 8. Для построения карт форшоковой активизации вычислялся параметр S [Sobolev, 2001]. Соответствующий алгоритм состоит в следующем. Вычисляется разница S между накопленной площадью сейсмогенных разрывов за выбранный интервал времени и средним многолетним значением по площадкам географической сетки. Площади разрывов оцениваются по формуле

$$S = \sum 10^{2/3(K_i - K_0)}, \quad (3)$$

где K_i – энергетический класс текущих событий; K_0 – выбранное для удобства счета референсное значение.

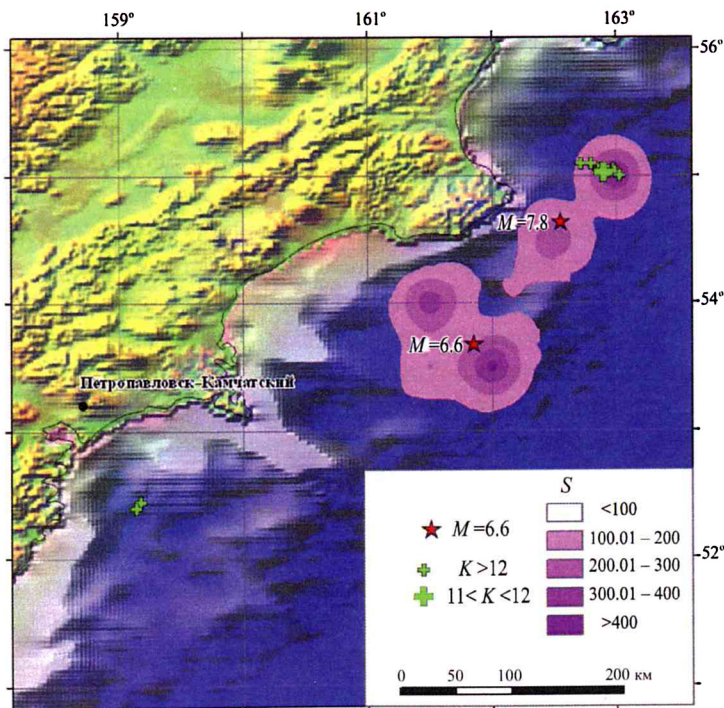


Рис. 7. Области форшоковой активизации перед Кроноцким землетрясением; крестики – кластеры сейсмических событий

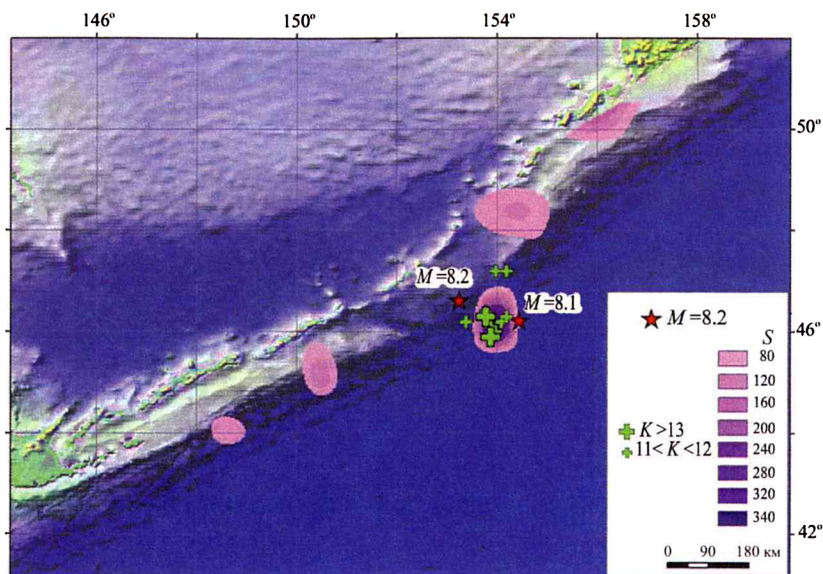


Рис. 8. Области форшоковой активизации перед Симуширским землетрясением; крестики – кластеры сейсмических событий

Перед Кроноцким землетрясением все зоны активизации располагались в области будущего разрыва (рис. 7). Перед Симуширским событием, кроме самой большой по величине зоны вблизи главного толчка и его сильнейшего афтершока, выделены и другие зоны активизации в ряде районов Курильской дуги (рис. 8). Предвестник этого типа не однозначен, поскольку в 4-х из обнаруженных в интервале 2003–2004 гг. зон форшоковой активизации больших землетрясений ($M > 7$) не произошло в течение более 5 последующих лет. Наши оценки, выполненные при анализе сейсмических каталогов Камчатки, Курил, Сахалина, Японии, Китая, Греции, Казахстана, говорят о том, что количество зон активизации, наблюдавшихся после сейсмического затишья, но не приведших в течение 5 лет к большим землетрясениям ($M > 6$) в несколько раз превышает число “оправдавшихся” аномалий.

О физической природе форшоковой активизации в широком смысле также существует ряд гипотез.

А) Локализация неустойчивой деформации. В модели ЛНТ (лавино-неустойчивого трещинообразования) предполагается [Мячкин и др., 1975], что прогрессивно растущая скорость роста сейсмических событий возникает вследствие взаимодействия напряжений от уже накопленных активных разрывов.

Б) Зацепление блоков. Это тот же механизм, что и при сейсмическом затишье (Б). Напряжения будут возрастать на границе остановившегося в своем движении блока из-за давления со стороны продолжающей свое движение плиты. Рост напряжений приведет к сейсмической активизации.

В) Рост внутривертевого давления жидкости в горной породе. Если внутривертевое давление в области будущего очага будет расти, например, вследствие увеличения потока жидкости из глубин литосферы, то в соответствии с упомянутым выше обобщенным законом Кулона – Мора нормальные напряжения на границах существующих разломов будут уменьшаться. Вследствие этого произойдет понижение прочности на сдвиг и возрастание вероятности динамических подвижек сдвигового типа, к которым относится большинство землетрясений. Возможно, к такому же эффекту приведет и возрастание содержания в породе газа, но этот механизм мало изучен.

Г) Влияние космических факторов. Скорость нарастания напряжений может возрасти при увеличении скорости движения плиты, обеспечивающей накопление упругой энергии в сейсмоактивном регионе, следствием чего будет увеличение сейсмической активности.

Д) Артефакты. Отраженные в сейсмическом каталоге неучтенные изменения представительного энергетического класса (магнитуды) в результате смены методик обработки сейсмической информации или сгущения сети наблюдений приведут к ложным выводам о появлении форшоковой активизации.

Рассмотрим динамику изменения сейсмической обстановки в окрестности эпицентров Кроноцкого и Симуширского землетрясений за последние годы до этих событий [Соболев,

2008]. В работе [Varnes, 1989] была предложена практически удобная формула описания возможного ускорения сейсмического процесса перед землетрясением:

$$Q(t) = A - B(t_f - t_i)^m, \quad (4)$$

где $Q(t)$ – деформация по Беньоффу; t_f – время сильного землетрясения; t_i – текущее время; A, B, m – свободные параметры. При $t_f = t_i$ величина $Q(t)$ принимает постоянное значение, что дает возможность оценить энергию будущего землетрясения.

Автором совместно с Ю.С.Тюпкиным [Соболев, Тюпкин, 2000] была установлена возможность оценки времени и энергии ожидаемых землетрясений Камчатки на основе уравнения (4). При этом значение одного из ключевых свободных параметров – степенного коэффициента $m = 0.12$ было определено по данным лабораторных экспериментов. Ко времени t_n последнего из n вошедших в расчеты событий величина $Q(t) = Q_n$ – накопленная деформация (корень квадратный из энергии) – известная величина. В момент t_f прогнозируемого землетрясения $Q(t) = Q_f$. Деформация, высвобожденная в результате прогнозируемого землетрясения, определяется разностью значений Q_f и Q_n . Его энергетический класс рассчитывается по соотношению

$$K_f = \lg(Q_f - Q_n)^2 + 11. \quad (5)$$

Переход к оценке магнитуды может быть сделан по известным эмпирическим соотношениям между энергетическими классами и магнитудой [Землетрясения..., 2006].

Сбор информации для Кроноцкого землетрясения проведен с 1994 г. в радиусе $R=50$ км от эпицентра. На рис. 9, а видно, что на протяжении 3.5 лет сумма накопленной деформации перед Кроноцким землетрясением следовала примерно линейному закону; ускорение произошло за трое суток перед главным толчком. Оно вызвано той цепочкой землетрясений, которая показана на рис. 2 красным цветом. Время прогноза t_f по модели (4) для Кроноцкого землетрясения указывало на дату 25.02.1998 г., что на 2.7 месяца позже реального события. Расчет энергетического класса по уравнению (5) дал величину

$K_f = 14.83$ (использовались классы K_s С.А.Федотова). В региональном каталоге Камчатки ГС РАН энергетический класс этого землетрясения $K=15.5$, т.е. энергия по модели недооценена на 0.7 класса.

Сбор информации для Симуширского землетрясения проведен с 2001 г. также в радиусе $R=50$ км от эпицентра. Из рис. 9, б следует, что на протяжении 5.5 лет накопление деформации шло почти по линейному закону; ускорение произошло за 1.5 месяца до толчка. Время прогноза t_f по модели (4) для Симуширского землетрясения соответствовало 12 ноября 2006 г., что только на двое суток отличалось от реального.

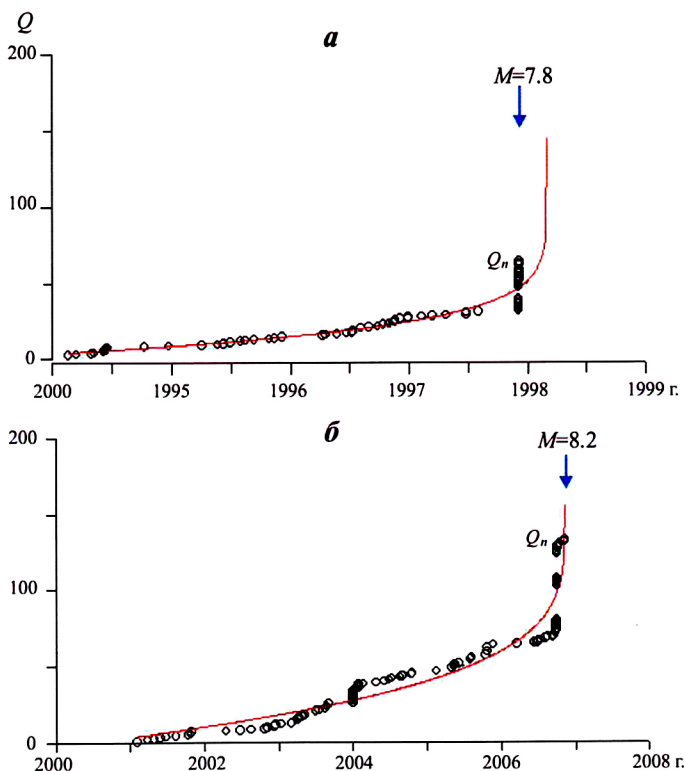


Рис. 9. Графики накопления деформации Бенъоффа перед Кроноцким (а) и Симуширским (б) землетрясениями. Красная линия – теоретическая кривая, рассчитанная по формуле (4)

Расчет энергетического класса по уравнению (5) дал величину $K_f = 13.74$ (использовались классы K_c [Соловьев, Соловьева, 1967]). В каталоге Курило-Охотского региона не приводится данных об энергетическом классе этого землетрясения. Если воспользоваться для грубой оценки магнитуды уравнением из работы [Землетрясения..., 2006]:

$$M = \frac{K_c - 5.2}{1.269}, \quad (6)$$

то получаем $M = 6.7$, что на 1.3 меньше реальной.

Из рис. 9 следует, что Кроноцкое и Симуширское землетрясения предварялись краткосрочной активизацией сейсмичности вблизи их эпицентров. Проанализируем, насколько уникальны такие явления и могут ли они рассматриваться в качестве надежных прогностических признаков. Построим фазовый портрет сейсмичности в радиусе 100 км от эпицентра Кроноцкого землетрясения за период от начала однородного инструментального каталога Камчатки 01.01.1962 г. и до момента этого землетрясения 05.12.1997 г. (рис. 10). По оси абсцисс отложены сглаженное число землетрясений N (рис. 10, б) и энергетический класс K (рис. 10, а) за последовательные 10 сут; по оси ординат – скорость изменения этих параметров (dN или dK), т.е. разница между последующим и предыдущим значением величины, представленной на оси абсцисс. Движение вдоль кривой по часовой стрелке соответствует возрастанию времени.

Как видно на рис. 10, б, ситуация перед Кроноцким землетрясением была уникальной в том смысле, что ни разу за 35-летний период кривая $dN = f(N)$ не вышла за пределы аттрактора, который можно характеризовать в первом приближении термином “квазипериодический” [Ott, 2002]. Такого рода аттракторы возникают при противоположном действии двух процессов: потери неустойчивого равновесия под действием притока энергии и торможении неустойчивости при диссипации энергии или воздействия некоторого внешнего фактора. Под аттрактором понимается совокупность сближенных в фазовом пространстве орбит.

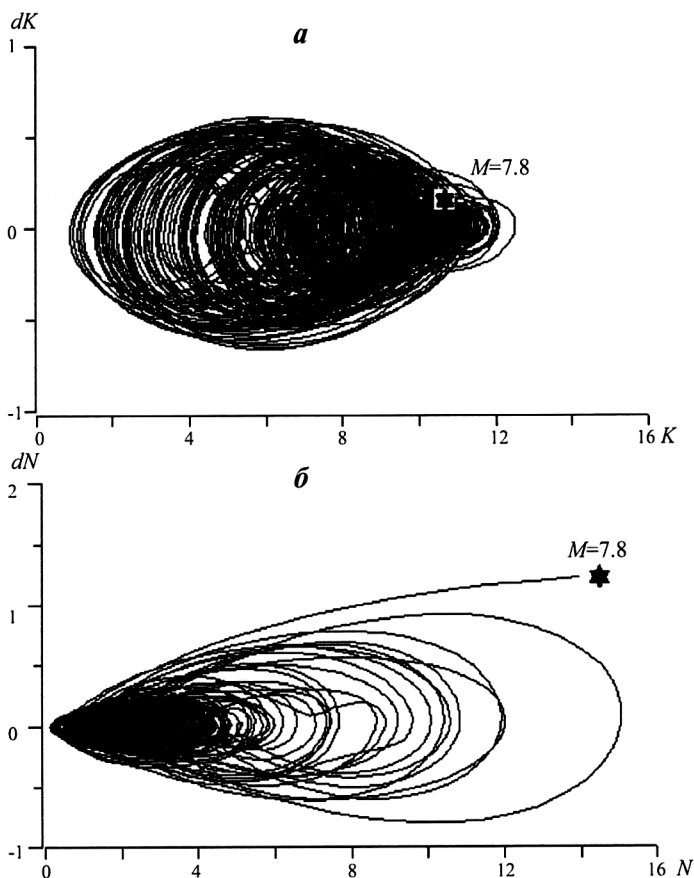


Рис. 10. Фазовый портрет Кроноцкого землетрясения за период 01.01.1962 – 05.12.1997 гг. по сейсмической энергии K (а) и числу землетрясений N (б) за последовательные 10 сут

В качестве примера очень упрощенного аналога такого типа аттрактора можно привести уравнение линейного осциллятора с отрицательным трением и ударами, гасящими возникающую неустойчивость [Наймарк, Ланда, 2009]:

$$\frac{d^2x}{dt^2} - \frac{2\delta dx}{dt} + \omega_0^2 x = -\sum p\delta(t-t_s), \quad (7)$$

где t_s – последовательные моменты времени; ω_0 , δ , p – положительные параметры с некоторыми ограничениями их вели-

чины. Фазовый портрет такого аттрактора в двумерном пространстве $dx = f(x)$ представляет раскручивающуюся спираль с последовательным возвращением к нулевым значениям в результате ударов. В нашем случае возрастание величины dN означает развитие неустойчивости сейсмического процесса; ее последующее уменьшение обусловлено потерей накопленной упругой энергии при возникновении относительно небольших землетрясений или уменьшением напряжений под воздействием неизвестного фактора.

Такого рода процессы повторялись в рассматриваемой области Кроноцкого землетрясения на протяжении многих лет (рис. 10). Аномальный выход кривой $dN = f(N)$ за область многолетнего аттрактора обусловлен серией толчков, возникших за трое суток до рассматриваемого землетрясения и обозначенных на рис. 2 красным цветом. Если исключить при построении фазового портрета эти толчки, то кривая останется внутри аттрактора. Интересно, что фазовый портрет, построенный по данным высвобожденной энергии $dK=f(K)$ не показывает предвестника, выраженного в форме выхода кривой за область многолетнего аттрактора, что отчетливо видно на рис. 10, *а*; звездочка, обозначающая время землетрясения, находится внутри аттрактора. Особенности фазовых портретов перед Кроноцким землетрясением более четко просматриваются, если представить их заключительные части $dN=f(N)$ и $dK=f(K)$ на интервале от 01.01.1997 г. до 05.12.1997 г. (рис. 11).

Ситуация перед Симуширским землетрясением 15.11.2006 г. была несколько иной. Используемый каталог составлен Сахалинской ОМСП и представлен с минимального энергетического класса $K_c \geq 10$ ($M > 3.8$) [Соловьев, Соловьева, 1967]. На рис. 12 крестиками показаны афтершоки этого землетрясения; зелеными кружками – землетрясения за 2006 г. в радиусе 100 км вокруг эпицентра, красными кружками – землетрясения форшоковой активизации за 45 суток до главного толчка. Форшоки развивались двумя сериями: 29–30 сентября и 8–9 ноября.

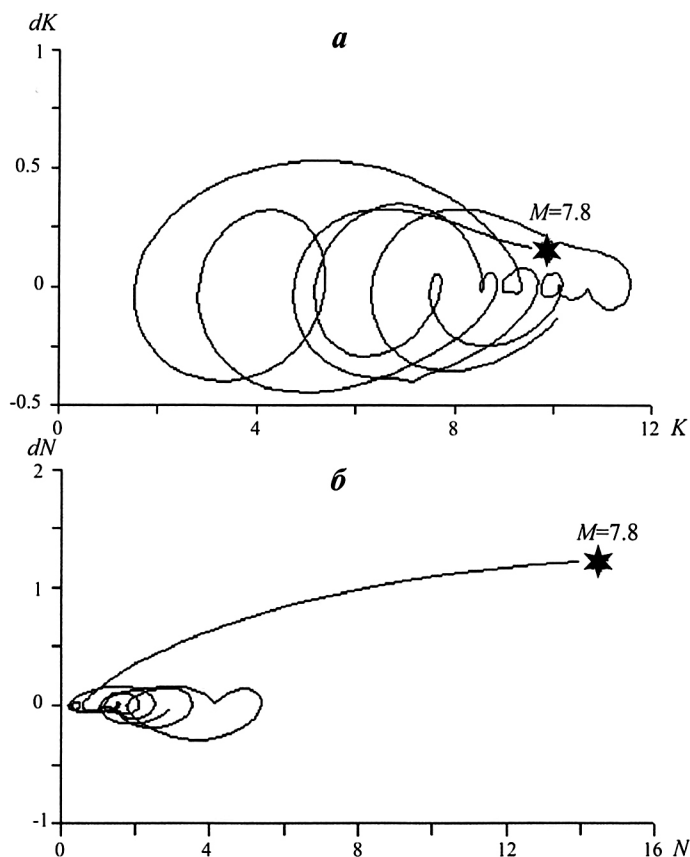


Рис. 11. Фазовый портрет Кроноцкого землетрясения за период 01.01.1997 – 05.12.1997 гг. по сейсмической энергии K (а) и числу землетрясений N (б) за последовательные 10 сут

Первая серия возникла в области между главным толчком и его сильнейшим афтершоком. Вторая серия располагалась северо-восточнее. Как при Кроноцком (см. рис. 2), так и при Симуширском землетрясениях прослеживается направление цепочек в форшоковых сериях перпендикулярно простиранию сейсмофокальных зон.

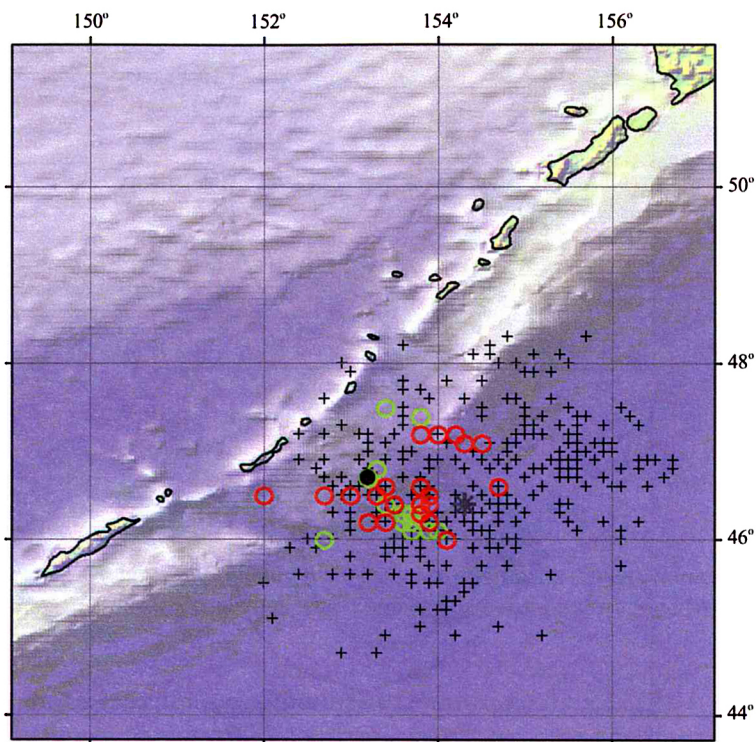


Рис. 12. Схема Симуширского землетрясения 15 ноября 2006 г. с $M=8.2$. Пояснения см. в тексте

На рис. 13 продемонстрированы кривые $dN = f(N)$ с 01.01.1962 г. до 15.11.2006 г. (нижний график) и заключительной части – с 01.01.2006 г. по 15.11.2006 г. Кривая $dN = f(N)$ вышла за пределы многолетнего аттрактора после первой группы форшоков (29–30 сентября). Можно было ожидать большого землетрясения в этот период. Однако 1 октября произошло землетрясение умеренной силы $K = 13.4$ ($M=5.2$). После этого кривая $dN = f(N)$ сделала до Симуширского землетрясения один виток, что видно на рис. 13, а). Из фазового портрета за весь период наблюдений (рис. 13, б) следует, что аномальные выходы $dN = f(N)$ за область многолетнего аттрактора наблюдались неоднократно, когда в радиусе 100 км от

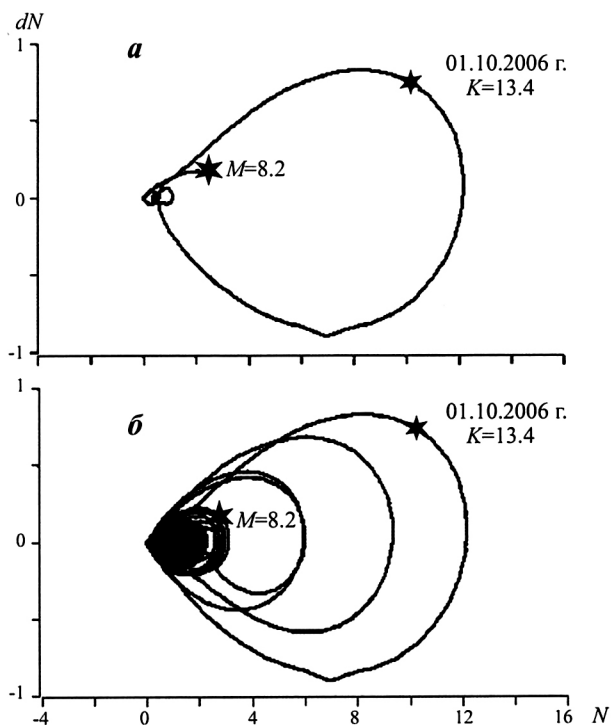


Рис. 13. Фазовый портрет Симуширского землетрясения за период 01.01.2006 – 15.11.2006 г. (а) и 01.01.1962 – 15.11.2006 гг. (б)

эпицентра Симуширского землетрясения происходили группы землетрясений с $K=10-11$. Аномальных отклонений от много-летнего аттрактора в динамике кривой $dK=f(K)$ не обнаружено.

Хайченгское землетрясение 04.02.1975 г. ($40^{\circ}70'$ с.ш., $122^{\circ}70'$ в.д., $M=7.4$) в Китае стоит особняком в ряду разрушительных землетрясений мира, поскольку это событие было предсказано в краткосрочном аспекте и даже проведена эвакуация населения. Рассмотрим его особенности. Использован сейсмический каталог Северо-Восточного Китая, переданный китайскими коллегами. По нашим оценкам он представлен с магнитуды $M>3$, начиная с 1970 г. На рис. 14 показана динамика накопления деформации Беньюффа в радиусе 100 км от эпицентра этого землетрясения. Количество толчков измерялось

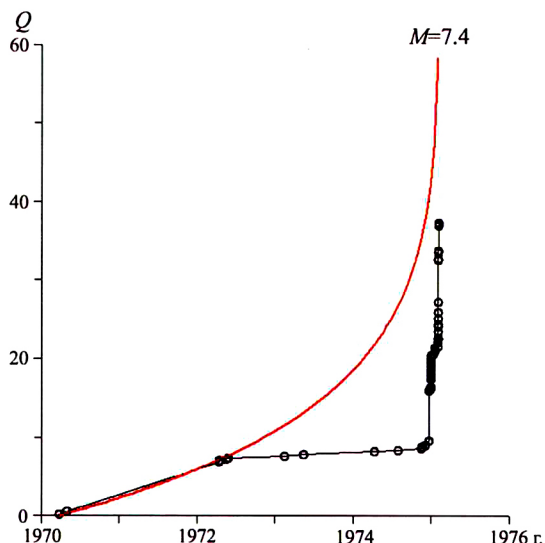


Рис. 14. График накопления деформации Беньоффа перед Хайченгским землетрясением. Теоретическая кривая (красная линия) рассчитана по формуле (4)

на протяжении 5 лет единицами, вплоть до 22.12.1974 г., когда произошла серия из 20 событий, наиболее сильное из которых имело $M=5.2$. Повторная активизация случилась за двое суток до Хайченгского землетрясения. Она состояла из 15 событий, наиболее сильное из которых имело $M=5.1$. Фазовый портрет (рис. 15) напоминает ситуацию перед Симуширским землетрясением. Аномальное отклонение $dN=f(N)$ от 5-летнего аттрактора произошло перед землетрясением $M=5.2$, т.е. за 1.5 месяца до Хайченгского события. Кривая затем сделала один виток, и аномальное поведение продолжалось до главного толчка. Автор проанализировал также фазовый портрет следующего катастрофического землетрясения в Китае — Таншаньского 28.07.1976 г. ($39^{\circ}63'$ с.ш., $118^{\circ}18'$ в.д., $M=7.9$) и не нашел аномальных особенностей, которые указывали бы на приближение этого события. Заметим, что данное землетрясение не было предсказано, хотя ретроспективно было установлено [Соболев, Пономарев, 2003], что за несколько месяцев

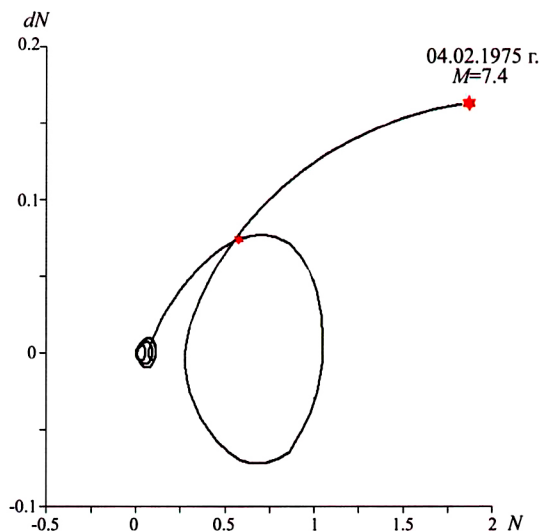


Рис. 15. Фазовый портрет Хайченгского землетрясения за период 01.01.1970 – 04.02.1975 гг.

в области эпицентра появились многочисленные геофизические предвестники.

Заключая этот раздел, подчеркнем, что использование фазового портрета $dN = f(N)$ в качестве прогностического признака может, по-видимому, принести успех только в случае возникновения серии форшоков. Более того, аномальные выбросы за уровень многолетнего аттрактора наблюдаются (по нашим данным) перед роями землетрясений, главные события которых характеризуются $M < 6$, т.е. не представляют существенной опасности в смысле практического использования прогнозной информации.

На рис. 7, 8 показаны большие по энергии сейсмические события, которые были распознаны как кластеры. Для обнаружения кластеров использовался простой, но физически понятный алгоритм [Соболев, 1993]. Считалось, что кластер – это появление двух или более землетрясений, если местоположение их гипоцентров, разница во времени появления и энергия удовлетворяют следующим условиям.

1. Расстояние между гипоцентрами должно быть меньше критического, вычисляемого по формуле

$$R_{cr} = 3L + C. \quad (8)$$

Здесь L представляет собой размер трещины, вычисляемый по эмпирической формуле [Ризниченко, 1976]. Коэффициент 3 соответствует концентрационному критерию разрушения [Куксенко, 1986], который указывает на то, что перед макроразрушением твердого тела в его объеме накапливается критическая плотность разрывов, расположенных на утроенном расстоянии их размеров. Добавка C введена с целью учета неточности определения гипоцентров; для Камчатского каталога она принималась равной 10 км и для Курило-Охотского – 20 км. Понятие концентрационного критерия применялось при сейсмологических исследованиях [Соболев, Завьялов, 1980; Завьялов, 2006].

2. Время между двумя событиями должно быть меньше критического, вычисляемого по формуле

$$T_{cr} = \alpha 10^{\beta(K_i - K_o)}. \quad (9)$$

Коэффициент β был выбран равным 0.5, что соответствовало относительному уменьшению числа землетрясений более высоких энергий в соответствии с законом повторяемости. Коэффициент α подбирался эмпирически и был равен 0.065.

На рис. 16 представлено число событий за последовательные 10 сут в радиусе 50 км от эпицентров Кроноцкого и Симуширского землетрясений. Учитывались только те события с $K_s \geq 8.5$ (рис. 16, а) и $K_c \geq 10$ (рис. 16, б), с которых начинался соответствующий кластер. Из графиков следует, что всплески кластеров наблюдались и ранее, но интенсивность их возникновения на последнем этапе подготовки обсуждаемых землетрясений была выше. Из сопоставления графиков на рис. 4 и 16 можно заключить, что локальные максимумы параметра RTL за 11–17 лет до Кроноцкого и Симуширского землетрясений обусловлены в какой-то степени повышением уровня кластеризации сейсмических событий. Следовательно, появление кластеров – один из возможных, но не однозначный краткосрочный прогностический признак.

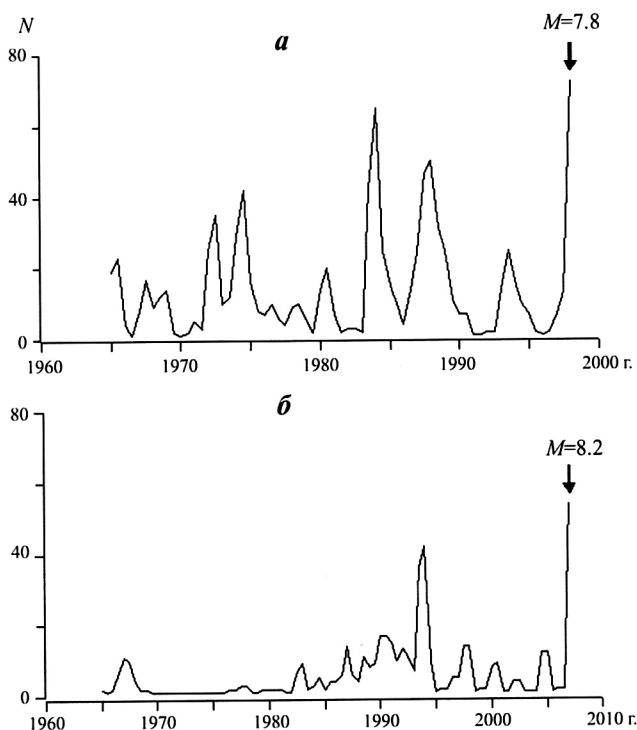


Рис. 16. Количество кластеров в круге радиусом 100 км перед Кроноцким (а) и Симуширским (б) землетрясениями

ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ

Описанные выше эффекты аномальных сейсмических явлений (сейсмическое затишье, форшоковая активизация в широком смысле, форшоки) – кластеры – могут быть схематически представлены на диаграмме (рис. 17). Рассмотрим некоторые другие эффекты, которые проявляются на разных стадиях развития очага землетрясения, отражая состояние метастабильности. При этом автор исходит из следующих основополагающих определений.

- Сейсмический процесс представляет собой разновидность нелинейных диссипативных систем, проявляющих противоположные тенденции стремления к порядку и к хаосу.

- Переходы от состояния равновесия к неустойчивому равновесию и локальной динамической неустойчивости возникают при условии притока энергии и обратные переходы – при условии диссипации энергии.

- Проявлениями фаз неустойчивого равновесия выступают такие явления как стохастические колебания и их синхронизация, фликкер-шум, взрывные импульсы шума и др.

Некоторые из них условно показаны на рис. 17 в интервале времени стадии задержки. Однако они могут проявляться и на других стадиях. В работе [Соболев, 2003б] был обнаружен эффект появления скрытых периодических колебаний перед четырьмя землетрясениями Камчатки с $M \geq 7$: 02.03.1992 г., 08.06.1993 г., 13.11.1993 г. и 05.12.1997 гг. Применялась

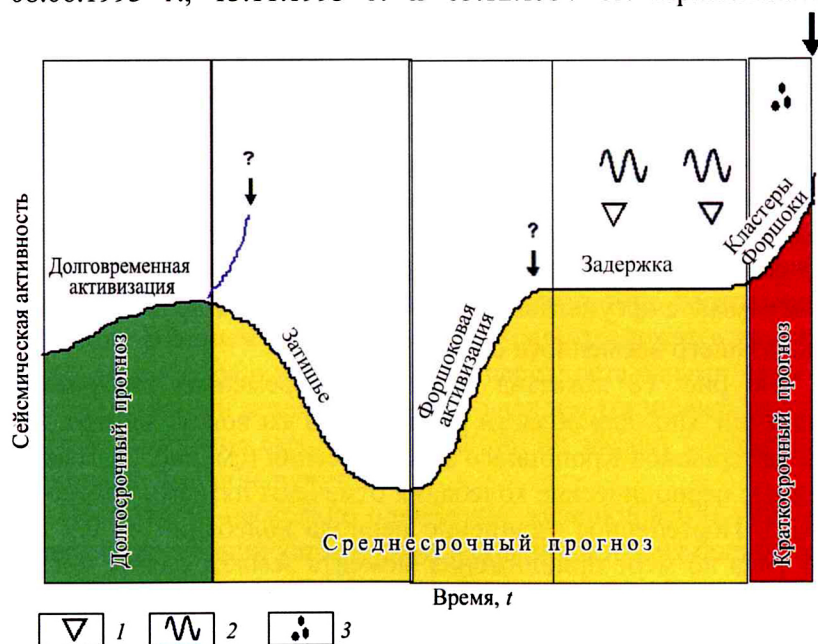


Рис. 17. Схема последовательности ряда сейсмологических прогностических признаков землетрясения

1 – эффекты синхронизации; 2 – периодические колебания; 3 – кластеры сейсмических событий. Стрелка – момент сильного землетрясения

методика выявления скрытых периодов в точечном процессе, к которому относится поток землетрясений [Любушин и др., 1998]. Рассматривалась модель интенсивности последовательности событий в текущем времени t , предположительно содержащая гармоническую компоненту ω :

$$\lambda(t) = \mu(1 + a \cos(\omega t + \varphi)), \quad (10)$$

где амплитуда a ($0 \leq a \leq 1$), фазовый угол φ ($\varphi \in [0, 2\pi]$) и множитель $\mu \geq 0$ (описывающий пуассоновскую часть интенсивности) – параметры модели. Приращение логарифмической функции правдоподобия точечного процесса с гармонической компонентой заданной частоты ω равно:

$$\Delta \ln L(a, \varphi | \omega) = \sum_{t_i} \ln(1 + a \cos(\omega t_i + \varphi)) + N \ln(\omega T / [\omega T + a(\sin(\omega T + \varphi) - \sin(\varphi))]), \quad (11)$$

где t_i – последовательность моментов времени выделенных локальных максимумов сигнала внутри окна; N – их число; T – длина временного окна. Максимальные значения функции в выражении (11) являются индикаторами присутствия в сейсмическом потоке скрытых периодичностей. Результаты вычисления визуализировались в виде спектрально-временной диаграммы с аргументами (ω, τ) , где τ – время правого конца скользящего временного окна.

На рис. 18 показана спектрально-временная диаграмма значений $\Delta \ln L$ для области радиусом 50 км вокруг центра зоны афтершоков Кроноцкого землетрясения (см. рис. 2). Выявленные периодические колебания отмечены пятнами красного цвета. Постепенное удлинение периода колебаний от 0.9 до 1.8 года по мере приближения момента землетрясения могло бы интерпретироваться как проявление фликкер шума, одним из признаков которого является тенденция к линейной в двойном логарифмическом масштабе зависимости мощности спектра от частоты. Проверить эту зависимость на базе

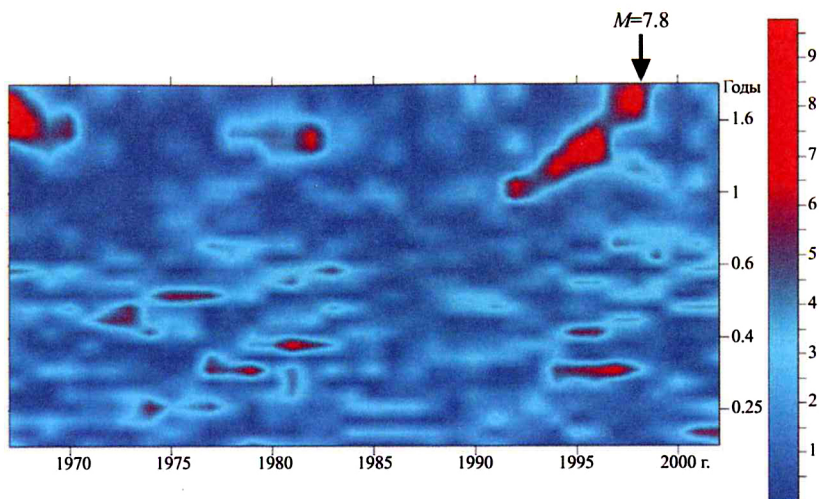


Рис. 18. Спектрально-временная диаграмма с демонстрацией периодических колебаний (красные пятна), возникших перед Кроноцким землетрясением 05.12.1997 г. ($M = 7.8$). Период (годы) и амплитуда колебаний указаны на шкалах справа

сейсмического каталога сложно. Для количественной оценки крутизны спада спектра в сторону высоких частот (больших периодов) нужно иметь набор частот в диапазоне нескольких порядков. В нашем случае изменения спектра лежат в диапазоне одного порядка. Кроме того, перед остальными тремя вышеперечисленными землетрясениями удалось установить только факт появления скрытых колебаний, но эффект удлинения периода не был обнаружен.

Посмотрим, насколько однозначно возникновение периодических колебаний характеризует стадию развития большого землетрясения. Каталог Камчатки был разделен на 6 не перекрывающихся районов, показанных на рис. 19; каждый из них имел длину вдоль и поперек фокальной зоны размером 100 км, и учитывались землетрясения с глубиной гипоцентра до 100 км.

На рис. 20 показана спектрально-временная диаграмма по данным сейсмической активности района 5, соседнего с тем,

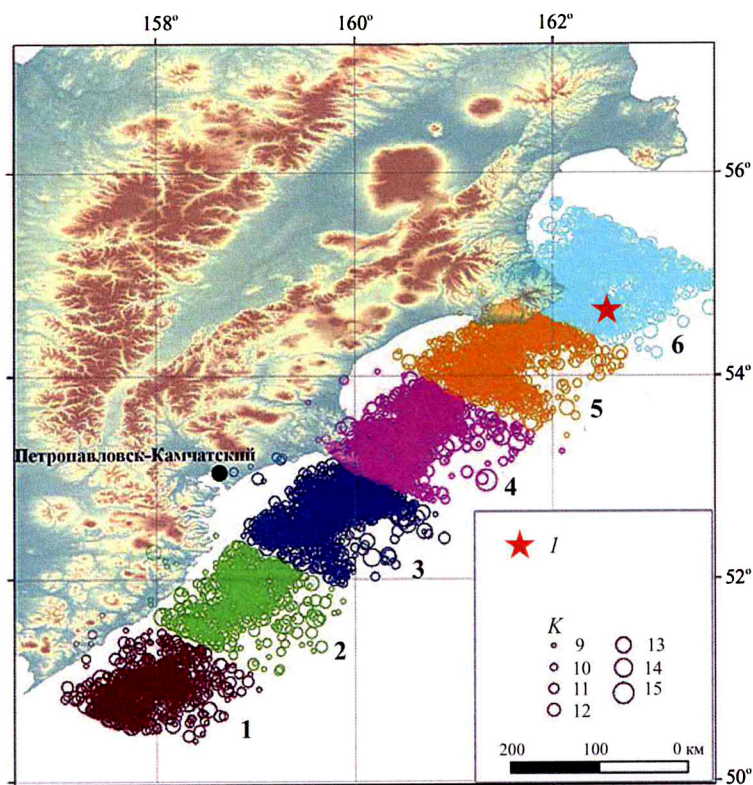


Рис. 19. Шесть районов сейсмичности Камчатки, в которых исследовался эффект возникновения скрытых колебаний. 1 – Кроноцкое землетрясение 05.12.1997 г. ($M=7.8$)

где произошло Кроноцкое землетрясение 1997 г. Видно, что в периоды до и после Кроноцкого события в этом районе также появились периодические колебания в нескольких полосах периодов от 0.2 до 1.2 года.

Однако более примечательно, что колебания выявлены также сразу после Симуширского землетрясения 2006 г., удаленного от района 5 на расстояние 1000 км. Обнаружено, что в это же время периодические колебания проявились в районе 1, но их не удалось выделить в районах 2–4, т.е. эффект был избирательным.

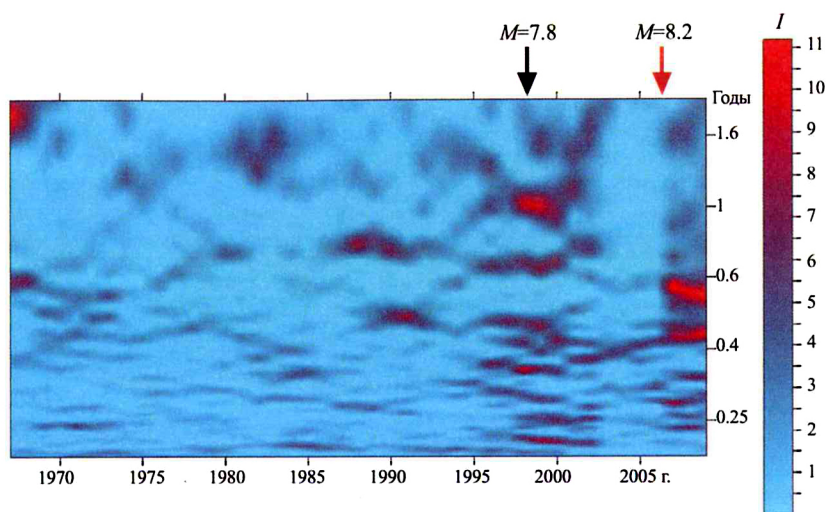


Рис. 20. Спектрально-временная диаграмма с демонстрацией периодических колебаний (красные пятна), возникших в период Кроноцкого землетрясения ($M=7.8$) и после Симуширского землетрясения ($M=8.2$) в районе 5 (см. рис. 19). Период (годы) и амплитуда колебаний указаны на шкалах справа

Приведенные примеры относились к появлению периодических колебаний за несколько лет до сильного землетрясения, а сами периоды имели длительность порядка года. Сейсмологические каталоги, в которых статистика землетрясений насчитывается десятками или даже сотнями событий в год, не позволяют исследовать этот эффект за короткий интервал времени непосредственно перед сильным землетрясением, что представляет практический интерес для краткосрочного прогноза. Для подхода к этой проблеме кажется перспективным изучение сейсмического шума. В работах [Соболев, 2004; Соболев и др., 2005; Соболев, Любушин, 2007] исследована динамика микросейсмических колебаний в минутном диапазоне периодов перед несколькими большими землетрясениями мира. На рис. 21 дано расположение станций IRIS, записи которых проанализированы в течение месяца до Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г. Ближайшая к эпицентру землетрясения станция

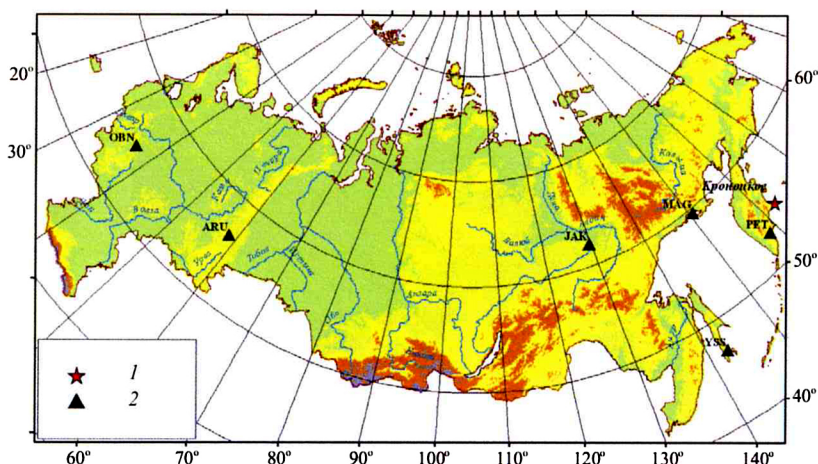


Рис. 21. Расположение станций IRIS, записи которых изучались перед Кроноцким землетрясением. 1 – землетрясение; 2 – сейсмические станции

Петропавловск (PET) находилась от него на расстоянии 350 км, а самая удаленная – Обнинск (OBN) – на расстоянии 6800 км. В интервале времени за трое суток до землетрясения с помощью вышеописанного подхода (формулы 10, 11) были выявлены колебания с периодами в десятки минут. Они показаны на рис. 22 зеленым и красным цветом, причем красный цвет означает периоды с наибольшими амплитудами.

За 3 ч до главного толчка яркая аномалия (периоды в диапазоне 30–60 мин) отмечена на ближайшей к эпицентру станции PET; менее четко в этот период выделялись колебания на следующей по удаленности от эпицентра станции MAG. Начало этой аномалии совпадает со временем наиболее сильного форшока. На записях других станций периодических колебаний в это время не было, но они возникали в предшествующее время, например, за двое суток и 15 ч до Кроноцкого землетрясения, причем на станциях, удаленных на расстояния более 1000 км друг от друга. Какова может быть причина их появления? Нами проверены два возможных фактора планетарного масштаба: источник электромагнитного излучения или возмущение в атмосфере.

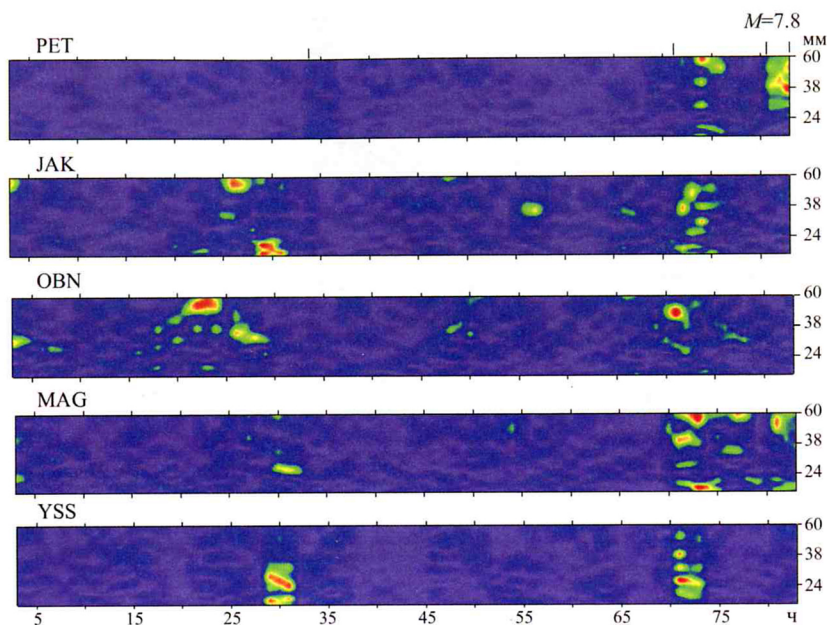


Рис. 22. Спектрально-временные диаграммы микросейсмических шумов на пяти станциях IRIS перед Кроноцким землетрясением. Цветные пятна указывают интервалы возникновения периодических колебаний в диапазоне периодов 20–60 мин

Выяснилось, что магнитная обстановка в период 2–5 декабря 1997 г. была спокойной (не было магнитных бурь с $K_p > 3$). Однако 2 декабря на западе Тихого океана возник тайфун высшей категории 5. Его след представлен на рис. 23. Скорость ветра достигала 160 миль/ч. Нельзя исключить, что это природное явление вызвало периодические колебания, зарегистрированные сейсмическими станциями. Остается вопрос, послужило ли оно также толчком к началу серии форшоков Кроноцкого землетрясения?

Выявление “вспышек” периодических колебаний по записям одной станции не всегда возможно из-за шумов различного происхождения. В таких случаях полезно применять программы поиска интервалов синхронизации записей на нескольких станциях [Любушин, 2007].

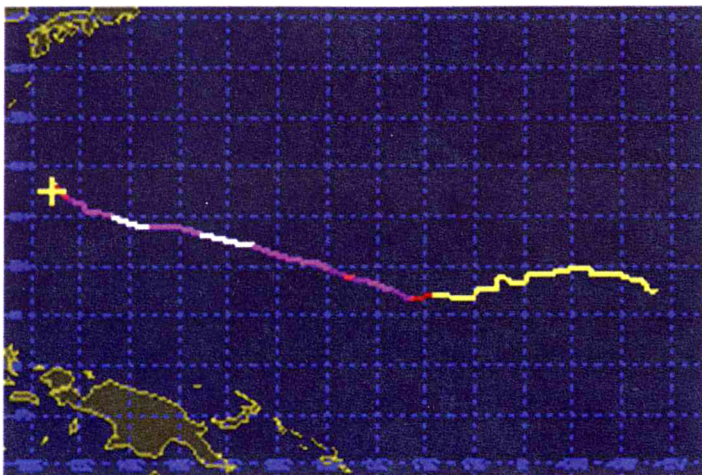


Рис. 23. Схема тайфуна высшей категории 5 со скоростью ветра 160 миль/ч, возникшего в Тихом океане за трое суток до Кроноцкого землетрясения

На рис. 24 показаны станции IRIS, записи которых были использованы для анализа эффектов синхронизации микро-сейсмических шумов перед землетрясением на Хоккайдо (25.09.2003 г., $M=8.3$). Для выделения когерентных элементов поведения, которые могут иметь фазовый сдвиг и наблюдаться сразу для нескольких станций, был применен метод, использующий оценку канонических когерентностей в скользящем временном окне, разработанный в работе [Любушин, 1998]. Спектральная мера когерентности $\lambda(\tau, \omega)$ строится как модуль произведения покомпонентных канонических когерентностей:

$$\lambda(\tau, \omega) = \prod_{j=1}^q |v_j(\tau, \omega)|. \quad (12)$$

Здесь q – общее число совместно анализируемых временных рядов (размерность многомерного временного ряда); ω – частота; τ – временная координата правого конца скользящего временного окна, состоящего из определенного числа смежных отсчетов; $v_j(\tau, \omega)$ – каноническая когерентность j -го скалярного

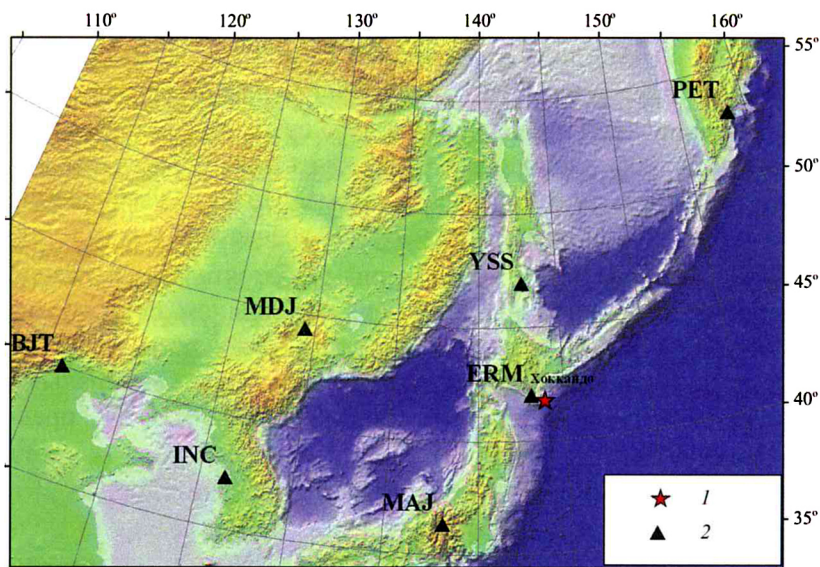


Рис. 24. Расположение станций IRIS, записи которых изучались перед землетрясением Хоккайдо 25.09.2003 г. ($M = 8.3$). 1 – землетрясение; 2 – станции

временного ряда, которая описывает силу связанности этого ряда со всеми прочими рядами. Величина $|v_j(\tau, \omega)|^2$ является обобщением обычного квадратичного спектра когерентности между двумя сигналами на случай, когда второй сигнал не скалярный, а векторный. Выполняется неравенство $0 \leq |v_j(\tau, \omega)| \leq 1$.

Чем ближе значение $|v_j(\tau, \omega)|$ к единице, тем сильнее линейно связаны вариации на частоте ω j -го ряда с аналогичными вариациями во всех прочих рядах. Соответственно, величина $0 \leq \lambda(\tau, \omega) \leq 1$ в силу своего построения описывает эффект совокупного когерентного (синхронного, коллективного) поведения всех сигналов.

При анализе ситуации перед землетрясением на Хоккайдо наибольший набор участвовавших в расчетах станций состоял из 6, а именно: YSS, MDJ, INC, BJT, PET, MAJ (см. рис. 24).

Записи станций ERM и MAJ не удалось использовать, так как первая не работала в последние 4 сут до землетрясения, а вторая – в течение 7 сут за 2 недели до него. Было установлено, что синхронизация проявилась за двое суток до землетрясения (интервал 33000–35000 мин). Она охватывала периоды от 3 ч (частота 0.005 1/мин) до более длинных. По мере уменьшения количества станций амплитуда $\lambda(\tau, \omega)$ возрастала в соответствии с формулой (12). Существенным обстоятельством было, однако, что наиболее яркий эффект при полном переборе из трех станций наблюдался для станций, ближе всего расположенных к эпицентру землетрясения Хоккайдо. Спектрально-временная диаграмма для таких станций – YSS, MDJ, INC представлена на рис. 25. Синхронизация с периодом ~ 3 ч (частота ~ 0.005 1/мин) началась за 9 сут до землетрясения (23000 мин). Наиболее ярко и в широком диапазоне периодов она проявилась за 2 сут до землетрясения (33000–35000 мин), после того как 21 и 22 сентября произошли два удаленных сильных землетрясения (показаны стрелками) с координатами $19^{\circ}72'$ с.ш.,

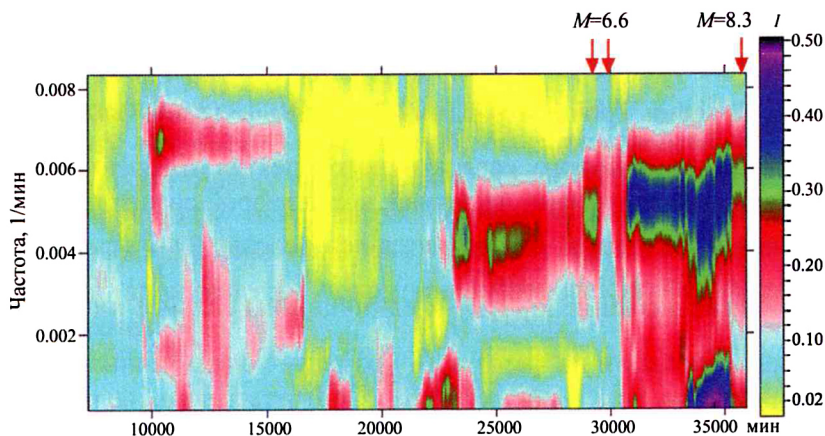


Рис. 25. Спектрально-временная диаграмма с демонстрацией периодических колебаний (цветные пятна), синхронно возникших перед землетрясением Хоккайдо на ряде станций. Частота колебаний указана на шкале слева, амплитуды – на шкале справа. Две стрелки указывают на два удаленных землетрясения с $M = 6.6$

95°46' в.д. и 21°16' с.ш., 71°67' з.д.; оба характеризовались магнитудой $M=6.6$.

Аналогичная методика была применена при анализе микросейсмических шумов ряда станций IRIS (рис. 26) перед катастрофическим землетрясением на о. Суматра 26.12.2004 г. (3°32' ю.ш., 95°85' в.д., $M=9.2$). Необычным обстоятельством было то, что за 2.5 сут до землетрясения на о. Суматре в южном полушарии случилось другое сильное землетрясение с $M=7.9$, эпицентр которого с координатами (49°31' ю.ш., 161°35' в.д.) находился к юго-западу от Новой Зеландии (в районе хребта Маккуори). Колебания от этого землетрясения

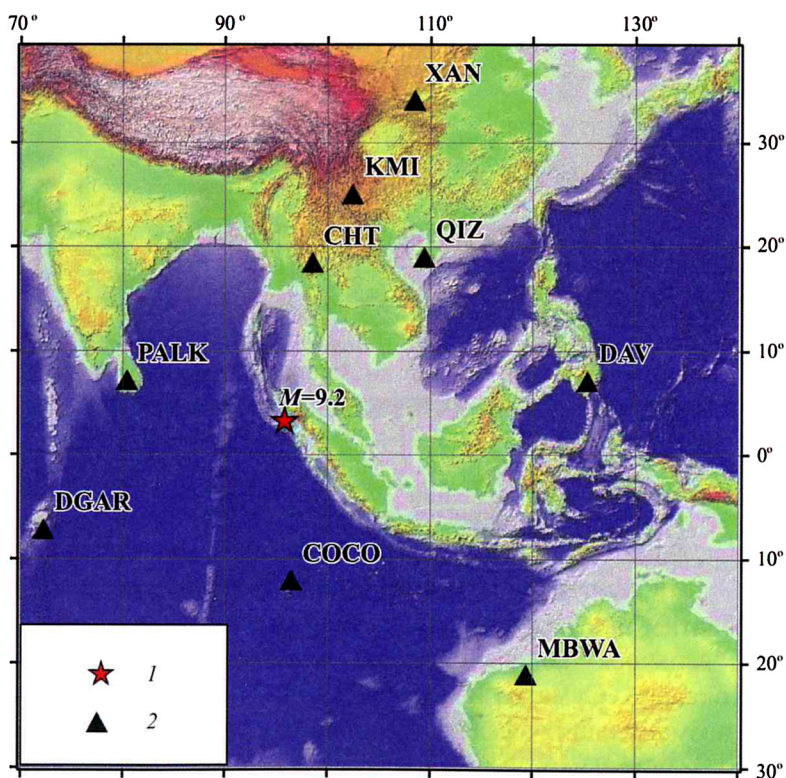


Рис. 26. Расположение станций IRIS, записи которых изучались перед землетрясением Суматра 26.12.2004 г. ($M = 9.2$). 1 – землетрясение Суматра; 2 – сейсмические станции

в сотни раз превосходили уровень микросейсм на вышеуказанных станциях, а поверхностные волны с периодами 300–500 с несколько раз обогнули земной шар. На рис. 27 представлена частотно-временная диаграмма $\lambda(\tau, \omega)$, полученная после обработки записей близкорасположенных к эпицентру землетрясения на о. Суматре станций СНТО, КМИ, ХАН, СОСО. После землетрясения на хребте Маккуори происходит нарастание меры когерентности с постепенным удлинением преобладающих периодов колебаний от нескольких до десятков минут.

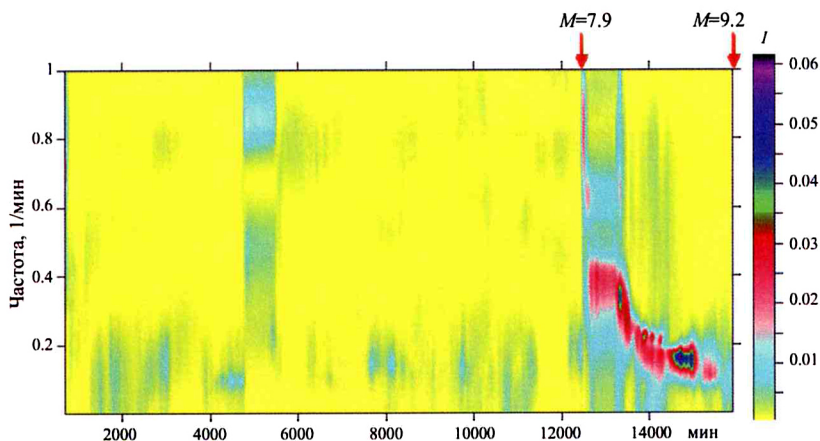


Рис. 27. Спектрально-временная диаграмма с демонстрацией периодических колебаний (цветная полоса), синхронно возникших перед землетрясением, происшедшим на о. Суматра, на ряде станций. Стрелки указывают время землетрясений Маккуори ($M = 7.9$) и Суматра ($M = 9.2$). Частота колебаний указана на шкале слева; их амплитуда – на шкале справа

Обратим внимание на следующие особенности возникновения “вспышек” колебаний перед землетрясениями Кроноцкое, Хоккайло, Суматра (см. рис. 22, 25, 27). Они проявились после возмущающих эффектов; в первом случае – это мощный тайфун, в остальных – сильные землетрясения. Такие случаи нами наблюдались и перед другими землетрясениями. Предположим, что появление “вспышки” периодических колебаний есть проявление неустойчивости в сейсмоактивной зоне,

как это условно изображено на диаграмме рис. 17. Если они проявляются на регулярной основе, то это может означать, что сейсмоактивная зона перманентно находится в метастабильном состоянии и использование данного явления в прогностических целях проблематично. Если они появляются только перед землетрясениями, то это может служить предвестником перехода к динамической неустойчивости потенциального очага. Во всяком случае, имеющийся опыт говорит о том, что “вспышки” неоднократно возникают и исчезают перед одним и тем же землетрясением, т.е. предвестник этого типа обладает свойством неоднозначности. В связи с приведенными выше примерами возникновения периодических возмущений на Камчатке после Симуширского землетрясения (см. рис. 20) отметим, что они проявились только в двух из шести районов (см. рис. 19) сейсмоактивной зоны. Это может свидетельствовать о не одинаковой чувствительности разных районов к внешнему воздействию.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Возникает вопрос, какова природа возникновения периодических колебаний и их синхронизации? Обсудим возможные варианты, основываясь на физике неравновесных систем. Допустим, что участки сейсмоактивной зоны находятся перед сильным землетрясением в метастабильном состоянии, когда тензочувствительность к внешним воздействиям возрастает. Пусть уравнения (13) и (14) описывают вариации во времени параметров динамических хаотических систем в литосфере и во внешней оболочке Земли (океане, атмосфере и др.):

$$\frac{dx}{dt} = F(x) + K(x, y); \quad (13)$$

$$\frac{dy}{dt} = G(y) + L(y, x). \quad (14)$$

Переменные x и y являются векторами равной или не равной размерности, а функции K и L характеризуют связи между параметрами систем. При $K \neq 0$ динамические изменения во внешней оболочке будут влиять на процессы, происходящие

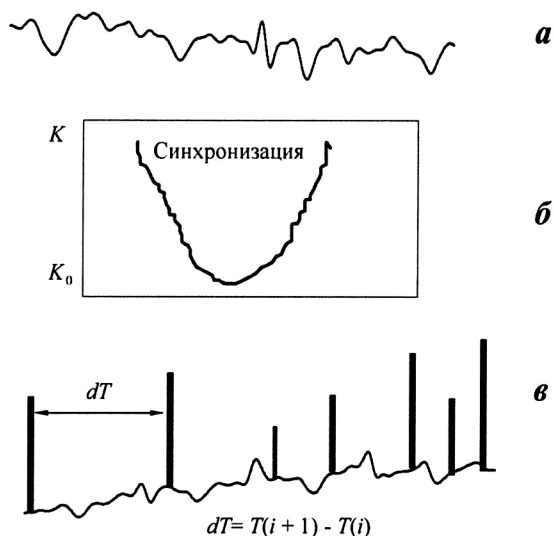


Рис. 28. Схема фазовой синхронизации и возникновения импульсов колебаний в динамических системах, содержащих хаотические и периодические компоненты

в литосфере. Известны хаотические системы, амплитуда колебаний в которых, оставаясь конечной, незакономерно меняется во времени от минимума к максимуму, а аттракторы представлены циклическими орбитами [Rossler, 1976]. В таких системах проявляются эффекты *фазовой синхронизации*. Исследованные нами низкочастотные колебания, по-видимому, принадлежат к данному типу; характерная кривая изменения амплитуды от времени представлена на рис. 28, а.

Уравнение (15) есть частный случай уравнения (13), где второй член в правой части указывает на присутствие периодических колебаний:

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = F(\mathbf{x}) + KP(\omega t). \quad (15)$$

Продолжая аналогию с системами (13) и (14), предположим, что мы имеем дело с колебаниями в литосфере, а коэффициент K указывает на степень влияния на них некоторых периодических возмущений во внешней оболочке. Область синхронизации в полосе частот ω (см. рис. 28, б) характеризуется

следующими важными свойствами [Отт, 2002]: она не проявляется при значениях коэффициента связи K меньше некоторого порога K_0 и расширяется при возрастании K . Можно предположить, что по мере приближения к землетрясению чувствительность метастабильного участка литосферы (величина K) к воздействию внешнего источника возрастает. В таких условиях импульсы диссипации накопленной в литосфере упругой энергии будут возникать с некоторой периодичностью. В связи с этим нужно упомянуть эффекты возникновения фазовой синхронизации высокочастотных сейсмических шумов (30 Гц) и приливов [Салтыков и др., 1997; Тюпкин, 2002]. При широкой области фазовой синхронизации по частоте ω (большая величина K) возможно обнаружение синхронизации на нескольких частотах. Нельзя исключить и механизм зарождения обсуждаемых колебаний чисто литосферного происхождения. Возникновение ритмов – распространенное явление эволюции неравновесных систем [Николис, Пригожин, 1979]. Отмечались также импульсы микросейсмических колебаний [Соболев, Любушин, 2006], возникавшие перед большими землетрясениями как с одной и той же временной задержкой ΔT между ними, так и хаотически; такой эффект показан на рис. 28, в.

Подводя итоги имеющихся у нас данных и знаний о динамике сейсмического процесса и прогнозируемости землетрясений, рассмотрим несколько модифицированную схему (рис. 29), уже приводившуюся на рис. 1. В пределах сейсмоактивной области всегда существуют несколько участков, находящихся в состоянии неустойчивого равновесия (оконтурыны красными линиями) вследствие повышенных напряжений (например, у концов активных разломов) или пониженной прочности. Возникновение динамической неустойчивости в одном из участков под влиянием внешних воздействий (в том числе, малых флуктуаций) или триггерных эффектов внутреннего происхождения (например, понижение прочности при возрастании внутривещного давления жидкости) приведет к возникновению небольшого землетрясения. В условиях фрактальной структуры участков разной прочности

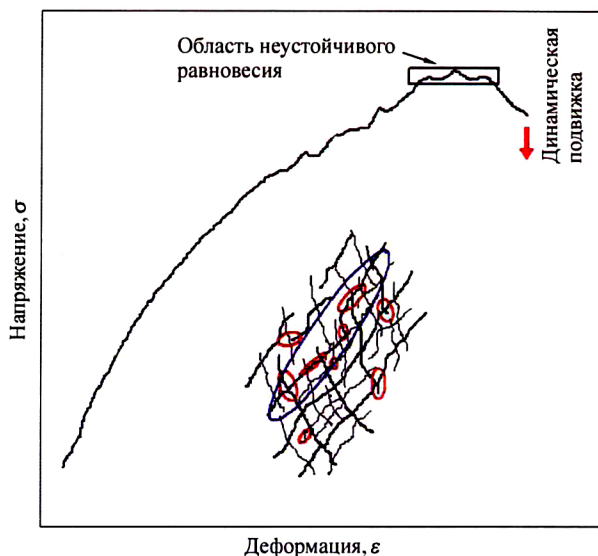


Рис. 29. Реологическая кривая и схема блокового строения сейсмоактивного района с указанием областей метастабильности перед большим землетрясением

и напряженного состояния динамический разрыв может продолжаться в том случае, если он последовательно встречает соседние участки неустойчивого равновесия. Это, соответственно, ведет к увеличению энергии (магнитуды) развивающегося землетрясения (эффект домино). Заметим, что возникновение неустойчивой подвижки на каждом участке может быть названо в терминах теории неравновесных динамических систем бифуркацией (катастрофой). Из нее следует [Наймарк, Ланда, 2009, с. 163]: “Бифуркации не независимы, так что серии бифуркаций можно рассматривать как сложную бифуркацию (систему бифуркаций). Нарастание неустойчивости связано с проявлением положительной обратной связи. Стремление к равновесию связано с проявлением отрицательной обратной связи”. Об этом уже говорилось выше при описании фазовых портретов сейсмической активности.

Как следует из рис. 29 для прогноза сильного землетрясения исследователю желательно знать: 1 – строение сейсмоак-

тивной области с учетом прочности разномасштабных блоков и разломов; 2 – структуру существующих к данному времени участков неустойчивого равновесия; 3 – объем области относительно-однородных тектонических напряжений, который определит возможную максимальную длину развивающегося разрыва. Задача пункта 1 может решаться геофизическими и сейсмологическими методами; пункта 2 – анализом информации о слабой сейсмичности за продолжительный интервал времени; пункта 3 – изучением механизмов очагов. Эти сведения известны весьма приближенно. Кроме того, время перехода к динамической неустойчивости первого из участков неустойчивого равновесия зависит от многих факторов внутреннего и внешнего происхождения. Без большого преувеличения можно сказать: *время возникновения всех землетрясений определяется триггерным воздействием*. Заметим, что, как продемонстрировано экспериментами [Соболев и др., 2006], эффективным триггером неустойчивости горных пород является изменение влажности. Соответственно, в обозримом будущем, мы можем ожидать осуществления прогнозов с весьма невысоким уровнем вероятности успеха в определении всех трех компонент: места, времени и магнитуды.

Возможно ли в принципе рассчитывать на такую величину вероятности прогноза, которая позволит проводить мероприятия с целью уменьшения будущих потерь? Продemonстрируем результаты лабораторных экспериментов [Sobolev et al., 1993; Соболев, Пономарев, 2003], которые были выполнены на моделях из двух блоков, находящихся в условиях двухосного сжатия (рис. 30). Угол наклона контакта между блоками к направлению вертикальной нагрузки F составлял 25° .

Опыты проводились в следующей последовательности. Задавалось боковое сжимающее напряжение G и постепенно увеличивалась вертикальная нагрузка F . На разных уровнях F по поверхности модели наносился удар, в результате чего в зависимости от силы удара и величины F возникала динамическая подвижка (смещение берегов модели – типа “stick-slip”), сопровождавшаяся частичным сбросом F . Затем на-

грузка F доводилась до следующего уровня и процедура повторялась. Для ударов использовались молотки из тефлона, натуральной кости и металла, а также выстрелы из пневматического пистолета или бросание шариков заданной массы на верхнюю поверхность. Уровень F , величина относительного перемещения блоков и сейсмограммы от ударов и возникавших подвижек (микроземлетрясений) регистрировались на ЭВМ. В результате было установлено, что вероятность возникновения подвижки пропорциональна уровню тангенциальных напряжений σ на контакте и силе удара f . В первом приближении она описывается формулой

$$p \sim \sigma + f^n, \quad (16)$$

где значения σ и f в правой части нормированы на величину разрушающего напряжения, $|\sigma + f| \leq 1$, и коэффициент n зависит от плохо известных особенностей эксперимента.

При низком уровне σ и небольшой величине f вероятность вызвать динамическую подвижку близка к нулю. По мере приближения к состоянию неустойчивости (субгоризонтальный участок реологической кривой на рис. 30) вероятность подвижки возрастает и приближается к 1. Таким образом, знание σ позволяет оценить вероятность микроземлетрясения в зависимости от силы воздействия. Отдаленное сходство с естественной ситуацией в сейсмоактивном районе очевидно. Вероятность успешного прогноза землетрясения будет возрастать по мере улучшения наших знаний о напряженном состоянии активных разломов и силы влияния на них, по крайней мере, внешних факторов. Это же указывает на принципиальную возможность инициирования землетрясений в результате искусственного воздействия.

В результате опытов типа показанного на рис. 30 было установлено [Соболев, Пономарев, 2003], что динамическая подвижка возникает с временной задержкой Δt по отношению к моменту удара, в соответствии с формулой

$$\Delta t \sim 1/f^c, \quad (17)$$

где $c \approx 0.6$.

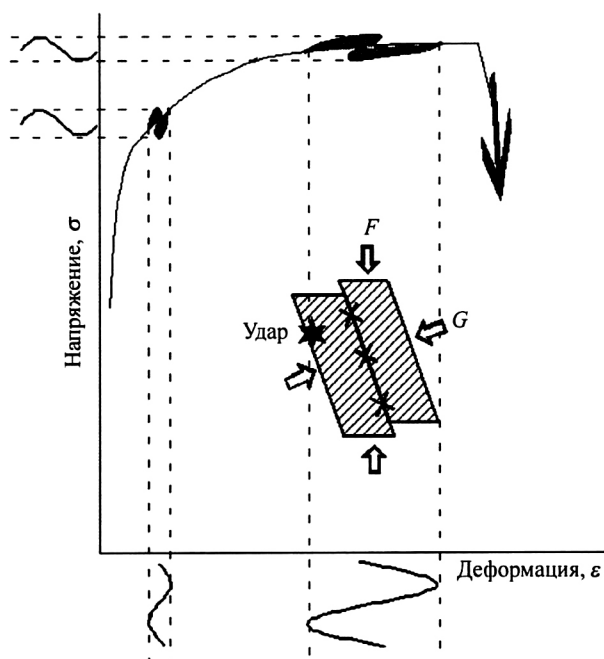


Рис. 30. Схема лабораторного эксперимента, в котором динамические подвижки на контакте двух блоков создавались воздействием ударов разной интенсивности и на разном уровне приложенных к модели напряжений

Можно предположить две причины задержки. Первая вытекает из кинетической концепции прочности твердых тел [Журков, 1968]. Время жизни образца τ обратно экспоненциально зависит от уровня приложенных напряжений σ с учетом структурно-чувствительного параметра γ :

$$\tau \propto \exp(-\gamma\sigma). \quad (18)$$

Однако эта зависимость установлена и проверена только для случаев медленно меняющихся внешних напряжений [Томашевская, Хамидуллин, 1971; Ставрогин, Протосеня, 1985]. Не ясно, насколько это справедливо для кратковременного превышения внешнего напряжения вследствие прохождения по контакту упругой волны от инициирующего импуль-

са. Вторая причина может быть связана с тем, что зарождение неустойчивой подвижки в одном из зацеплений контакта вследствие его разрушения вызывает медленно движущийся вдоль контакта крип. Его скорость зависит от неровностей на контакте, но она много меньше скорости упругих волн. В работах [Dieterich, 1978; Ohnaka et al., 1986] и других было показано, что явление “stick-slip” происходит после того, как такая волна пройдет по всей контактирующей поверхности. Если такое явление существует в природных условиях, то это еще больше осложняет проблему определения времени будущего землетрясения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практическое осуществление прогнозов землетрясений

После разрушительного землетрясения 6 апреля 2009 г. в L'Aquila по просьбе и поддержке Правительства Италии была создана Международная комиссия в составе 10 экспертов из разных стран (Россию представлял автор настоящей статьи). Комиссия работала с мая по октябрь 2009 г. над двумя задачами: 1) изучить современное состояние краткосрочного прогноза землетрясений; 2) дать рекомендации для практического использования прогнозов с учетом невысокой вероятности их оправдываемости. Полный текст отчета комиссии на английском языке будет доступен после его опубликования. Основные рекомендации комиссии, согласованные со всеми членами, были представлены на итоговой пресс конференции и представляют интерес для российских организаций и исследователей, занимающихся проблемами уменьшения сейсмической опасности [Operational]. Они представлены ниже.

1. Нужно развивать вероятностный прогноз землетрясений и создать структуру и экспертизу для практического использования информации, представляемой в вероятностной форме.

Рекомендация 1 основана на мнении комиссии, что из-за сложности самого процесса подготовки землетрясения и недостаточности наших знаний об этом процессе высоконадежный прогноз (будет землетрясение или не будет) в обозримом времени не достижим. Заметим, что задачей комиссии было дать рекомендации по практическому использованию прогнозов (operational forecasting); поэтому рекомендации касаются главным образом (но не только) краткосрочных прогнозов.

2. Нужна координация работ различных организаций, чтобы иметь все имеющиеся данные, в особенности сейсмические и геодезические, для более надежного прогноза.

3. Особые усилия должны быть направлены на сбор и анализ сейсмических данных в реальном времени и оперативное составление сейсмических каталогов и карт скоростей деформаций.

В рекомендациях 2 и 3 учтено, что до настоящего времени большинство прогнозов основывается на сейсмологических данных. Деформации земной коры отражают в какой-то мере уровень напряженного состояния сейсмоактивного региона, влияющего на подготовку землетрясений. Физика связей других геофизических полей с сейсмичностью требует прояснения.

4. Фундаментальные программы исследования землетрясений и их предсказуемости должны быть частью сбалансированной национальной программы для прогресса в практическом использовании прогнозов.

Смысл рекомендации 4 состоит в том, что без улучшения наших знаний о физике землетрясений и физическом механизме предвестников вряд ли возможно добиться существенного прогресса в практических аспектах прогноза.

5. Следует развивать модели и совершенствовать карты сейсмической опасности.

Необходимо совершенствовать методы, позволяющие дополнять обычные карты сейсмической опасности, оценивающие вероятность землетрясений в интервале сотен лет (главным образом, на основе повторяемости землетрясений) картами опасности на ближайшие десятки лет с учетом изменения

скорости сейсмической активности, деформаций, выявления активных разломов и другой информации.

6. Нужно совершенствовать методы прогноза афтершоков.

Комиссия считает, что высоконадежный прогноз афтершоков исключительно важен для обеспечения безопасности населения, и на этом пути можно добиться существенного прогресса.

7. Методы прогноза, предназначенные для практического использования, должны быть протестированы на степень их надежности и эффективности, как ретроспективно, так и в реальном времени.

Под надежностью понимается, как часто возникают при использовании данного метода “ложные тревоги”; эффективность обозначает – насколько данный метод лучше случайного угадывания.

8. Методы прогноза могут быть протестированы в создающихся международных центрах в Европе, США, Японии, Новой Зеландии.

9. Должны быть созданы независимые национальные экспертные советы для оценки методов прогноза и их результатов. Решения таких советов должны напрямую направляться руководителю органа, ответственного за безопасность населения.

10. Количественные и понятные протоколы должны быть выработаны для принимающих решения административных органов с указанием, какие меры должны быть осуществлены при уровне вероятности прогноза, превышающем определенный порог.

Степень предпринимаемых при получении прогноза превентивных действий на федеральном или региональном уровне (от создания запасов медицинских препаратов, воды, продовольствия до эвакуации населения) зависит, с одной стороны, от надежности прогноза, с другой стороны, от социальной обстановки, экономических возможностей государства и других обстоятельств. Протоколы должны вырабатываться со-

вместно представителями администрации, специалистами в области прогноза землетрясений и социальных наук.

11. Должна осуществляться политика информирования населения сейсмоопасных районов о сейсмической обстановке.

Не имеются в виду сообщения о конкретных прогнозах в средствах массовой информации, что при невысокой надежности прогнозов может привести к панике и другим негативным последствиям. Гораздо важнее регулярно информировать население о происходящих в соответствующем районе землетрясениях, научных знаниях об этих явлениях природы, возможностях их прогнозирования и необходимых мерах безопасности при ухудшении сейсмической обстановки.

Объективные условия при осуществлении прогноза землетрясения

Все выявленные к настоящему времени предвестники не однозначны: высок процент пропуска цели и “ложных” тревог.

Эта неоднозначность обусловлена:

– “внутренней” причиной – случайностью наступления катастрофы на фоне малых флуктуаций параметров гетерогенной диссипативной системы литосферы;

– “внешней” причиной – недостаточностью наших знаний о свойствах этой системы.

Пути улучшения прогнозов землетрясений

1. Определение объема области неустойчивости (системы локальных областей неустойчивости разного масштаба), находящейся в квазиродном напряженном состоянии.

2. Слежение за ‘триггерными’ эффектами и оценка их влияния на область неустойчивости.

3. Оценка вероятности времени и магнитуды землетрясения с учетом факторов 1 и 2.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН “Оценка и пути снижения негативных последствий экстремальных природных явлений и техногенных катастроф, включая проблемы ускоренного развития атомной энергетики”.

P.S. После сдачи в печать настоящей работы произошло катастрофическое землетрясение в Японии 11 марта 2011 года. При этом выяснилось, что метод анализа синхронизации низкочастотных микросейсм может быть полезен для среднесрочного прогноза (см. [Любушин, 2009]). Кроме того, структура краткосрочной форшоковой активизации перед этим землетрясением аналогична примерам, приведенным на рис. 9–15.

ЛИТЕРАТУРА

- Журков С.Н. Кинетическая концепция прочности // Вестн. АН СССР. 1968. Вып. 3. С.46–52.
- Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений. М.: Наука, 2006. 255 с.
- Землетрясения России в 2003 году. Обнинск: ГС РАН, 2006. 112 с.
- Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 года. Петропавловск-Камчатский: Изд-во Камчат. государственной академии рыбопромыслового флота, 1998. 294 с.
- Кузнецова К.И., Осокина Д.Н., Багманова Н.Х. О возможности выявления перемещений по разлому путем изучения строений полей напряжений и деформаций вблизи него // Модельные и натурные исследования очагов землетрясений. М.: Наука, 1991. С.16–23.
- Куксенко В.С. Модель перехода от микро- к макроразрушению твердых тел // Сб. докл. 1-й Всесоюз. школы-семинара “Физика прочности и пластичности”. Л.: Наука, 1986. С.36–41.
- Любушин А.А. Анализ канонических когерентностей в задачах геофизического мониторинга // Физика Земли. 1998. № 1. С.59–66.
- Любушин А.А. Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука, 2007. 228 с.
- Любушин А.А. Тренды и ритмы синхронизации мультифрактальных параметров низкочастотных микросейсм // Физика Земли. 2009. № 5. С.15–28.

- Любушин А.А., Писаренко В.Ф., Ружич В.В., Буддо В.Ю. Выделение периодичностей в сейсмическом режиме // Вулканология и сейсмология. 1998. № 1. С.62–76.
- Молчан Г.М., Дмитриева О.Е. Идентификация афтершоков: обзор и новые подходы // Вычислит. сейсмология. 1991. Вып. 24. С.19–50.
- 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.
- Наймарк Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания. М., 2009. 424 с.
- Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1979. 512 с.
- Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. С.9–27.
- Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука, 1991. 96 с.
- Салтыков В.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н. Изучение высокочастотного сейсмического шума по данным режимных наблюдений на Камчатке // Физика Земли. 1997. № 3. С. 39–47.
- Смирнов В.Б. Опыт оценки представительности каталогов землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1997. № 4. С.93–105.
- Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.
- Соболев Г.А. Сейсмические свойства внутренней и внешней зоны очага землетрясения // Вулканология и сейсмология. 2003а. № 2. С.3–12.
- Соболев Г.А. Эволюция периодических колебаний сейсмической интенсивности перед сильными землетрясениями // Физика Земли. 2003б. № 11. С.3–15.
- Соболев Г.А. Вариации микросейсм перед сильным землетрясением // Физика Земли. 2004. № 6. С.3–13.
- Соболев Г.А. Сейсмологические особенности подготовки двух сильных землетрясений // Физика Земли. 2008. № 11. С.20–30.
- Соболев Г.А., Завьялов А.Д. О концентрационном критерии сейсмогенных разрывов // Докл. АН СССР. 1980. Т. 252, № 1. С.69–71.
- Соболев Г.А., Любушин А.А. Микросейсмические импульсы как предвестники землетрясений // Физика Земли. 2006. № 9. С.5–17.
- Соболев Г.А., Любушин А.А. Микросейсмические аномалии перед землетрясением 26 декабря 2004 г. на Суматре // Физика Земли. 2007. № 5. С.3–16.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.

- Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С.* Аномалии в режиме слабой сейсмичности перед сильными землетрясениями Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1996. № 4. С.64–74.
- Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С.* Стадии подготовки, сейсмологические предвестники и прогноз землетрясений Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1998. № 6. С.17–26.
- Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С.* Анализ процесса выделения энергии при формировании магистрального разрыва в лабораторных исследованиях по разрушению горных пород и перед сильными землетрясениями. Аномалии в режиме слабой сейсмичности перед сильными землетрясениями Камчатки // Физика Земли. 2000. № 2. С.44–55.
- Соболев Г.А., Любушин А.А., Закржевская Н.А.* Синхронизация микро-сейсмических колебаний в минутном диапазоне периодов // Физика Земли. 2005. № 8. С.3–27.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В., Кольцов А.В., Круглов А.А., Луцкий В.А., Цывинская Ю.В.* Влияние инъекции воды на акустическую эмиссию при долговременном эксперименте // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. С.608–621.
- Соловьев С.Л., Соловьева О.Н.* Соотношение между энергетическим классом и магнитудой Курильских землетрясений // Физика Земли. 1967. № 2. С.13–22.
- Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г.* Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. М.: Недра, 1985. 272 с.
- Стаховский И.Р.* Самоподобная, сейсмогенерирующая структура земной коры: обзор проблемы и математическая модель // Физика Земли. 2007. № 12. С.35–47.
- Томашевская И.С., Хамидуллин Я.Н.* Возможность применения кинетической концепции прочности к горным породам при трехосном сжатии // Физические свойства горных пород при высоких термодинамических параметрах. Киев: Наук. думка, 1971. С.208–211.
- Тюпкин Ю.С.* Модулирование слабой сейсмичности приливными деформациями перед сильными землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2002. № 3. С.3–10.
- Федотов С.А.* Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 117 с.
- Bak P., Tang C.* Earthquakes as self-organized critical phenomena // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. P.15635–15637.
- Chelidze T.* Percolation and fracture // Phys. Earth Planet. Inter. 1982. V. 28. P.93–101.
- Dieterich J.H.* Preseismic fault slip and earthquake prediction // J. Geophys. Res. B. 1978. V. 83, N 8. P.3940–3948.

- Ohnaka M., Kuwahara Y., Yamamoto K., Hirose T.* Dynamic breakdown processes and the generating mechanism for high-frequency elastic radiation during stick-slip instability // *Geophys. Monogr. Amer. Geophys. Union.* 1986. V. 37. P.13–24.
- Operational Earthquake Forecasting: State of Knowledge and Guidelines for Utilization.*
http://www.iaspei.org/downloads/Ex_Sum_v5_THJ9_A4format.pdf
- Ott E.* Chaos in dynamic systems. Cambridge University Press, 2002. P.478.
- Rossler O.E.* An equation for continuous chaos // *Phys. Lett.* 1976. A 57. P.397–399.
- Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwal Y.P.* Earthquake prediction: A physical basis // *Science.* 1973. V. 181. P.803–810.
- Sobolev G.* The examples of earthquake preparation in Kamchatka and Japan // *Tectonophysics. Special.* 2001. V. 338, N 3/4. P.17–28.
- Sobolev G., Spetzler H., Koltsov A., Chelidze T.* An experimental study of triggered stick-slip // *Pageoph.* 1993. V. 140, N 1. P.79–94.
- Varnes D.J.* Predicting earthquakes by analyzing accelerating precursory seismic activity // *Pageoph.* 1989. V. 130, N 4. P.661–686.
- Wyss M., Habermann R.E.* Precursory seismic quiescence // *Pageoph.* 1988. V. 126. P.319–332.
- Wyss M., Sobolev G., Clippard J.D.* Seismic quiescence precursors to two M7 earthquakes on Sakhalin Island, measured by two methods // *Earth Planets Space.* 2004. V. 56. P.725–740.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Фазы подготовки землетрясения	6
Триггерные эффекты	28
Обсуждение результатов	41
Заключение	48
Литература	52

Научное издание

Геннадий Александрович Соболев

КОНЦЕПЦИЯ ПРЕДСКАЗУЕМОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ОСНОВЕ ДИНАМИКИ СЕЙСМИЧНОСТИ ПРИ ТРИГГЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Утверждено к печати

Ученым советом Института физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН

Усл. печ. л. 3.5 Тираж 100 экз.

11-36158

2581

Цена 200 <u>11</u>	30 =
ГПНТЬ 3 11 11	

0

28