

УДК 550.341

ДИНАМИКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ДО И ПОСЛЕ СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ МИРА, 1985-2000

Л.Л. Ромашкова, В.Г. Кособоков

Международный институт теории прогноза землетрясений
и математической геофизики Российской академии наук, Москва, Россия

Систематический сравнительный анализ сейсмической обстановки до и после всех 11 сильнейших землетрясений мира (с магнитудой 8.0 и выше) с 1985 г. до настоящего времени показывает, что восходящие предвестниковые каскады сейсмической активности к сильнейшему землетрясению допускают заблаговременную идентификацию воспроизводимыми алгоритмами прогноза. Класс присущих сейсмичности нисходящих афтершоковых каскадов далеко не исчерпывается последовательностями, подчиняющимися степенному закону Омори.

SEISMICITY DYNAMICS PRIOR TO AND AFTER THE LARGEST EARTHQUAKES WORLDWIDE, 1985-2000

L.L. Romashkova, V.G. Kossobokov

International Institute of Earthquake Prediction Theory
and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

A systematic analysis of seismic dynamics approaching and following all the eleven largest, magnitude 8.0 or greater, earthquakes worldwide since 1985 to the present evidence the inverse cascade of activity to the main event, which can be identified in advance by reproducible prediction algorithms. The class of evident seismic direct cascades, i.e. aftershock sequences, is much more diverse than a power-law (Omori) series.

Введение

Литосфера Земли представляет собой самоорганизующуюся иерархическую систему объемов, размеры которых меняются от 10^7 м — для основных тектонических плит, до 10^{-4} м — для песчинок горных пород [1]. Наиболее крупные относительные движения внутри этой системы, захватывающие большие территории, реализуются через землетрясения. Характер этих движений определяется геометрией участвующих в них блоков и разнообразием геофизических процессов, сконцентрированных в сравнительно тонких пограничных зонах между ними. Каждая пограничная зона, в свою очередь, представляет собой иерархическую систему, состоящую из меньших объемов, разделенных меньшими пограничными зонами, и т.д. Тем самым можно рассматривать литосферу Земли как большую нелинейную систему с признаками неустойчивости и искать адекватное теоретическое описание в рамках теории детерминистского хаоса. При таком подходе естественно предположить наличие интегральных эмпирических закономерностей в широком диапазоне подобия, коллективного поведения и, как следствие, возможность научного прогноза землетрясений.

За исключением некоторых, детально исследуемых территорий, таких как, например, Парк-филд в Калифорнии, землетрясения остаются пока единственными наблюдаемыми проявлениями поведения нелинейной динамической системы, которые систематически регистрируются по всей территории Земли в течение длительного промежутка времени. Каждый год отмечается более миллиона землетрясений с магнитудой, превышающей 2.0; около двух тысяч сильнейших из них регистрируются надежно и попадают в мировой каталог землетрясений [2], создаваемый в Национальном центре информации о землетрясениях США (NEIC). Порядка ста землетрясений ежегодно являются достаточно сильными, чтобы вызвать значительные разрушения. Сильнейшие землетрясения случаются примерно раз в год и, к счастью, обычно вдали от густонаселенных территорий. Однако раз в одно или два десятилетия происходят выдающиеся по силе катастрофические землетрясения. Недавние события, повлекшие наибольшие жертвы среди населения (Турецкие землетрясения 1999 года, более 23 тыс. человек) и наибольшие экономические потери (землетрясение 1995 года в Кобэ, Япония, ущерб около 100 млрд долларов США), были на один-два порядка слабее сильнейших землетрясений мира.

Каждое конкретное землетрясение не может рассматриваться изолированно от сложных динамических процессов, происходящих в литосфере и демонстрирующих очевидные признаки группируемости во времени и пространстве. Иерархическая природа литосферы предполагает взаимодействие событий, находящихся на соседних уровнях энергии, пространства и времени. Действительно, большие землетрясения обычно сопровождаются многочисленными афтершоками, которые каскадом перераспределяют энергию от главного толчка вниз по иерархии. И наоборот, форшоки больших событий, когда они случаются, есть проявление обратного каскада энергии от сейсмического фона вверх к основному толчку на последнем этапе его подготовки. Активизация сейсмичности, предшествующая сильному землетрясению, рассматриваемая в разных временных шкалах, является одним из наиболее характерных, хорошо наблюдаемых сейсмических явлений и уже давно отмечалась многими исследователями [3, 4]. Так, после землетрясения 1989 года в Лома Приета (Калифорния) Буфе и Варнес [5] предложили концепцию степенного возрастания количества высвобожденной энергии упругих деформаций перед сильным землетрясением. В рамках концепции иерархической активизации сейсмичности естественно рассматривать прогноз землетрясений как последовательное, шаг за шагом осуществляемое сокращение пространственно-временной области ожидания сильнейшего землетрясения.

В этой работе проводится систематический анализ сейсмической обстановки до и после всех 11 сильнейших землетрясений мира, произошедших с начала 1985 г. до середины 2000 г., они приведены в табл. 1. Обсуждаются закономерности, присущие этим событиям, а также индивидуальные особенности каждого из них.

ТАБЛИЦА 1. Землетрясения с магнитудой 8.0 и выше, 1985–2000 гг.

N п/п	Дата	Время в очаге	Регион	Координаты		Глубина, км	Магнитуда
				широта, град	долгота, град		
1	19.09.1985	13:17	Мексика	18.19°N	102.53°W	27	8.1
2	20.10.1986	06:46	О-ва Кермадек	28.12°S	176.37°W	29	8.3
3	23.05.1989	10:54	О. Маккуори	52.34°S	160.57°E	10	8.2
4	08.08.1993	08:34	О. Гуам	12.98°N	144.80°E	59	8.2
5	09.06.1994	00:33	Боливия	13.84°S	67.55°W	631	8.2
6	04.10.1994	13:22	О. Шикотан	43.77°N	147.32°E	14	8.3
7	07.04.1995	22:06	О-ва Самоа	15.20°S	173.53°W	21	8.1
8	03.12.1995	18:01	О. Итуруп	44.66°N	149.30°E	33	8.0
9	17.02.1996	05:59	Новая Гвинея	0.89°S	136.95°E	33	8.2
10	25.03.1998	03:12	Море Баллени	62.88°S	149.53°E	10	8.3
11	04.06.2000	16:28	О. Суматра	4.77°S	102.05°E	33	8.0

ТАБЛИЦА 2. Результаты анализа сейсмичности до и после сильнейших землетрясений мира, 1985–2000 гг.

Дата	M8	MSc	Подготовка	Число афтершоков за 100 дней	Число афтершоков за 3 года	Наилучшее приближение за 100 дней	Наилучшее приближение за 3 года	Время релаксации
1	2	3	4	5	6	7	8	9
19.09.1985	Да	Да ¹	Затишье, активизация	29	65	Омори; $p = 1$	Модиф.Омори; $p_1 = 1.04$, $t_2 = 87.55$, $p_2 = 0.7$, $t_3 = 222.74$, $p_3 = 0.81$	284 дня
20.10.1986	Да	Да	Активизация, рой за 4 мес. до основного толчка	151	205	Модиф.Омори; $p_1 = 1.37$, $t_2 = 18.54$, $p_2 = 0.66$, $t_3 = 42.2$, $p_3 = 0.75$	Модиф.Омори; $p_1 = 1.39$, $t_2 = 18.54$, $p_2 = 0.69$, $t_3 = 42.2$, $p_3 = 0.80$	100 дней, 1.5 года
23.05.1989	Да ²	–	Землетрясение за 2 нед. до основного толчка	36	54	Омори; $p = 1$	Модиф.Омори; $p_1 = 1.19$, $t_2 = 482$, $p_2 = 0.27$	16 мес, > в 3 раза
08.08.1993	Да	Да	Активизация, землетрясе- ние за 2 мес. до основного толчка	121	247	Модиф.Омори; $p_1 = 1.59$, $t_2 = 7.83$, $p_2 = 0.78$	Модиф.Омори; $p_1 = 1.49$, $t_2 = 7.83$, $p_2 = 0.91$, $t_3 = 120$, $p_3 = 0$	65 дней, > в 1.5 раза
09.06.1994	–	–	Землетрясение за 5 мес.	5	5	–	–	–
04.10.1994	Да	Да	Активизация, рой за 5 нед. до основного толчка	515	919	Модиф.Омори; $p_1 = 0.91$, $t_2 = 4.77$, $p_2 = 1.69$	Модиф.Омори; $p_1 = 0.86$, $t_2 = 4.77$, $p_2 = 2.68$, $t_3 = 206.13$, $p_3 = 0.79$	2 года, > в 2.5 раза
07.04.1995	Да	Да	Рой за 3 мес. до основного толчка	52	302	Модиф.Омори; $p_1 = 8.33$, $t_2 = 13.42$, $p_2 = 0.44$	Модиф.Омори+фон; $p_1 = 12.61$, $t_2 = 13.42$, $p_2 = 0.89$	2 недели, > в 2 раза
03.12.1995	Да	Да	Активизация, рой за 1 ч до основного толчка	311	483	Модиф.Омори; $p_1 = 0.97$, $t_2 = 7.18$, $p_2 = 2.07$	Модиф.Омори; $p_1 = 0.99$, $t_2 = 7.18$, $p_2 = 1.95$, $t_3 = 66.15$, $p_3 = 0.73$	1 год
17.02.1996	Да	Нет	Активизация, рой за 11 мес.?	357	427	Модиф.Омори; $p = 1.32$	Модиф.Омори; $p_1 = 1.47$, $t_2 = 7.41$, $p_2 = 0.54$	2 года, > в 2.5 раза
25.03.1998	Да ²	–	Активизация? Землетря- сение за 4 мес.?	38	46 ³	Омори; $p = 1$	Модиф.Омори; $p_1 = 1.27$, $t_2 = 711.87$, $p_2 = 1.58$	140 дней, больше ⁴
04.06.2000	Да	Да	Активизация, затишье+группирование, землетрясение за 1 день	278	278 ³	Модиф.Омори; $p_1 = 1.24$, $t_2 = 3.3$, $p_2 = 0.87$	–	–

¹В районе Мексиканского землетрясения применялся модифицированный алгоритм MSc.²Использована версия алгоритма M8 для регионов низкой сейсмичности.³Подсчет числа афтершоков выполнен по неполному трехлетнему интервалу времени.⁴В районе моря Баллени до возникновения землетрясения 1998 года сейсмичность не была отмечена.

Табл. 2 суммирует результаты нашего анализа. В столбце 1 таблицы приведены даты исследуемых землетрясений; в столбцах 2 и 3 представлены результаты их прогноза по алгоритмам M8 и MSc, соответственно; в столбце 4 перечислены явления, наблюдавшиеся в период подготовки сильнейших землетрясений; в столбцах 5 и 6 приведено число афтершоков, зарегистрированных, соответственно, в первые 100 дней и три года после основного толчка, а в столбцах 7 и 8 даны законы убывания числа афтершоков во времени для этих двух периодов; в столбце 9 приведено время возвращения системы на стационарный режим.

1. Глобальная сейсмичность с 1985 года до настоящего времени

Этот период знаменателен резким, скачкообразным изменением скорости высвобождения глобальной сейсмической энергии, которая со стабильного уровня в 2.4×10^{28} эрг/год в 1980–1993 гг. увеличилась до 7.7×10^{28} эрг/год в 1993–1996 гг. (рис. 1). Это повышение сейсмичности лишь немногим меньше знаменитой активизации “смены столетия” с уровнем в 7.9×10^{28} эрг/год, наблюдавшейся, по крайней мере, в течение двух десятилетий до 1907 г. В середине 1996 г. произошло падение скорости высвобождения сейсмической энергии до 4.6×10^{28} эрг/год, т.е. до уровня, в среднем наблюдавшегося в 1907–1960 гг.

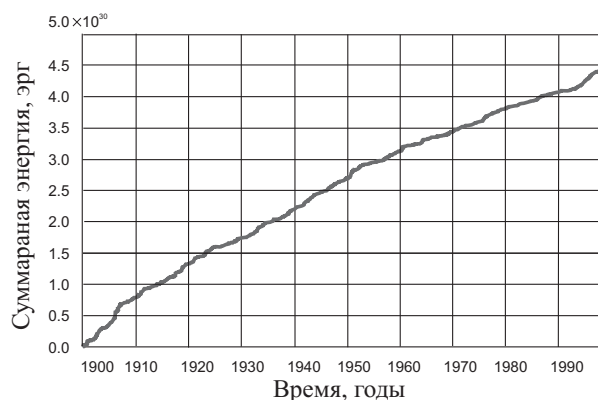


Рис. 1. Суммарная энергия землетрясений мира, как функция времени с 1900 г. по 2000 г. по глобальному каталогу NEIC

Примерно одна третья часть глобальной сейсмической энергии высвободилась в 1985–2000 гг. посредством 11 сильнейших землетрясений мира (табл. 1). Восемь из них произошли в регионах с высокой сейсмической активностью, где перед 1985 г. среднегодовое число землетрясений с магнитудой 4.0 и выше было не ниже 0.4×10^{-4} событий на 1 км^2 . Отметим, что такого уровня активности достаточно для применения стандартных версий алгоритмов среднесрочного прогноза землетрясений M8 и MSc [6, 7] для магнитуды 8.0 и выше. Другие три землетрясения — на о. Маккуори 1989 г., Глубокое Боливийское 1994 г. и в море Баллени 1998 г. — произошли в сейсмически малоактивных регионах. Так в круге радиуса 667 км, используемом в алгоритме M8 для прогноза землетрясений с магнитудой 8.0 и выше, с центром в эпицентре землетрясения Маккуори, в период с 1963 г. по 1989 г. регистрировалось всего лишь 4.5 событий в год с магнитудой 4.0 и выше. В 200-километровой окрестности Глубокого Боливийского землетрясения за десять предшествующих ему лет не было ни одного землетрясения с магнитудой 4.0 и выше, и только пять таких землетрясений было зарегистрировано с 1963 г. по 1994 г. Но наиболее удивительным из всех перечисленных событий является землетрясение 25.03.1998 г., произошедшее на абсолютно асейсмичной территории в 500 км от побережья Антарктиды, в 200-километровой окрестности эпицентра которого с 1963 г. не было зарегистрировано ни одного землетрясения. (Данные приводятся по каталогу NEIC.) Каждое из этих трех событий стало сюрпризом для большинства сейсмологов [8, 9], подтверждающим тот факт, что наше представление о местах возможного возникновения сильнейших землетрясений мира далеко не абсолютно. Одновременно, исследования этих землетрясений позволили существенно продвинуться в понимании процессов, происходящих в Земле.

2. Алгоритмы M8 и MSc и результаты их применения для прогноза землетрясений с магнитудой 8.0 и выше

Алгоритмы M8 и MSc разработаны [6, 7, 10, 11] для диагностики периодов повышенной вероятности сильнейших землетрясений мира и опираются на гипотезу об аномальной активизации сейсмического потока перед сильным землетрясением. Они неоднократно описаны в литературе, так что здесь мы только напомним их основные черты.

Алгоритм M8 рассматривает комплекс сейсмологических функционалов, вычисляемых в кругах, радиус которых однозначно определяется линейным размером очага ожидаемого землетрясения. При прогнозе землетрясений с магнитудой 8.0 и выше этот радиус составляет 667 км. Используя каталог основных толчков, алгоритм вычисляет семь функций, которые характеризуют сейсмическую активность (N_1 и N_2), изменение долговременного тренда сейсмической активности (L_1 и L_2), концентрацию очагов (Z_1 и Z_2) и группирование землетрясений (B). Тревога – период повышенной вероятности (ППВ) возникновения сильного землетрясения – объявляется на пять лет в момент, когда большинство функций принимают свои аномально большие значения в пределах предшествующих трех лет. После того, как повышение вероятности возникновения сильного землетрясения диагностировано на определенной территории, проводится дополнительный детальный анализ предшествующей сейсмичности этой территории с помощью алгоритма MSc. Такой анализ во многих случаях позволяет существенно сократить область тревоги. При этом сильное землетрясение ожидается в той ее узкой части, которая демонстрирует кратковременное (1–2 мес.) затишье сейсмичности на фоне устойчиво высокой активности.

На протяжении многих лет мы систематически использовали алгоритм M8 и его вторую аппроксимацию MSc для прогноза сильнейших землетрясений мира. Из перекрывающихся кругов радиуса 667 км, равномерно расставленных вдоль осей всех глобальных сейсмических поясов Земли, были выбраны 262 круга, сейсмической активности внутри которых оказалось достаточно для применения стандартной версии алгоритма M8. Результаты работы алгоритмов M8 и MSc на Тихоокеанском сейсмическом поясе были представлены ранее в работах [12, 13]. Тревогами M8 в каждый конкретный момент времени в среднем охвачено 31% длины сейсмического пояса. Алгоритм MSc сокращает эту территорию до 9%. Все семь землетрясений с магнитудой 8.0 и выше, которые произошли до 1999 г. в регионах с высокой сейсмической активностью, предсказаны алгоритмом M8 (столбец 2 табл. 2), и только одно из них – в Новой Гвинее (1996 г.) – пропущено алгоритмом MSc во втором приближении (столбец 3 табл. 2).

Недавнее землетрясение 04.06.2000 г. на юге Суматры предсказано обоими алгоритмами. Хотя параметры этого землетрясения, в частности его магнитуда, могут уточняться, протяженность зоны афтершоков – более 250 км, – позволяет уже сейчас отнести это событие к разряду сильнейших. Дополнительным косвенным подтверждением этой классификации может служить необычное по расположению землетрясение 18.06.2000 г. с магнитудой 7.8, произошедшее на юго-востоке Индийского океана в 500 км от эпицентра землетрясения 04.06.2000 г. Такое расстояние соизмеримо с размерами очага и дает основание предположить определенную зависимость этих событий.

Повышение активности, предшествующее землетрясениям на о. Маккуори (1989 г.) и в море Баллени (1998 г.), которые произошли вне зон, где возможно применение стандартной версии M8, может быть распознано модифицированной версией алгоритма. Эта версия, применяемая в регионах с невысокой сейсмической активностью, отличается от стандартной лишь пониженной частотой событий, используемых при вычислении функционалов алгоритма. Так, в случае землетрясения на о. Маккуори, стандартный порог 20 основных толчков в год снижен до четырех, а в случае землетрясения в море Баллени – до восьми толчков в год. Глубокое Боливийское землетрясение 1994 года произошло в стороне от оси сейсмического пояса в наиболее заглубленной части зоны субдукции на расстоянии 80 км от области тревоги, объявленной по стандартной версии алгоритма M8. Имеющиеся данные не позволяют с полной уверенностью говорить о взаимосвязи землетрясения и тревоги, хотя такая возможность и не исключена.

3. Пространственно-временное распределение сейсмичности в преддверии сильного события

Активизация или сейсмическое затишье? Какое из этих двух явлений наиболее характерно для периода подготовки сильного землетрясения? Попробуем ответить на этот вопрос, проанализировав наблюдаемую сейсмичность перед 11 сильнейшими землетрясениями мира последнего времени. На рис. 2–12 наглядно представлены результаты прогноза всех этих 11 землетрясений последнего времени. На каждом из рисунков слева приводится карта прогноза и эпицентры сильнейшего землетрясения и его первых афтершоков. Область тревог первого приближения, диагностированная алгоритмом M8, подсвечена соответствующими кругами. Область тревог второго приближения, диагностированная алгоритмом MSc, подсвечена прямоугольниками. Черная стрелка указывает на эпицентр основного толчка. Ромбом отмечены места характерных одиночных событий и роев, предшествующих сильному землетрясению. На каждом рисунке справа вверху приведены пространственно-временные диаграммы сейсмичности в кругах радиуса 667 км, в которых алгоритмом M8 была объявлена тревога, а затем произошли сильные землетрясения. На каждой пространственно-временной диаграмме точками изображены землетрясения, начиная с магнитуды, используемой в алгоритме M8 для оценки активности. Вертикальная ось соответствует проекции на ось сейсмического пояса, расстояние дано в километрах от центра круга. Горизонтальная ось соответствует времени в годах. На каждом рисунке справа внизу показано поведение функций алгоритма M8 в круге, где объявлена тревога. Аномально большие значения функций выделены. Напомним, что тревога (серый прямоугольник) объявляется на пять лет в момент, когда в пределах предшествующих трех лет (светло-серый прямоугольник) большинство функций принимают свои аномально большие значения. Момент сильного землетрясения отмечен вертикальной чертой. В табл. 2 (столбец 4) перечислены явления, наблюдавшиеся в период подготовки сильнейших землетрясений.

Кратко опишем каждое из 11 рассмотренных землетрясений и результаты их прогноза по алгоритмам M8 и MSc. Землетрясения нумеруются согласно табл. 1.

1. Землетрясение 19.09.1985 г., Мексика, магнитуда 8.1

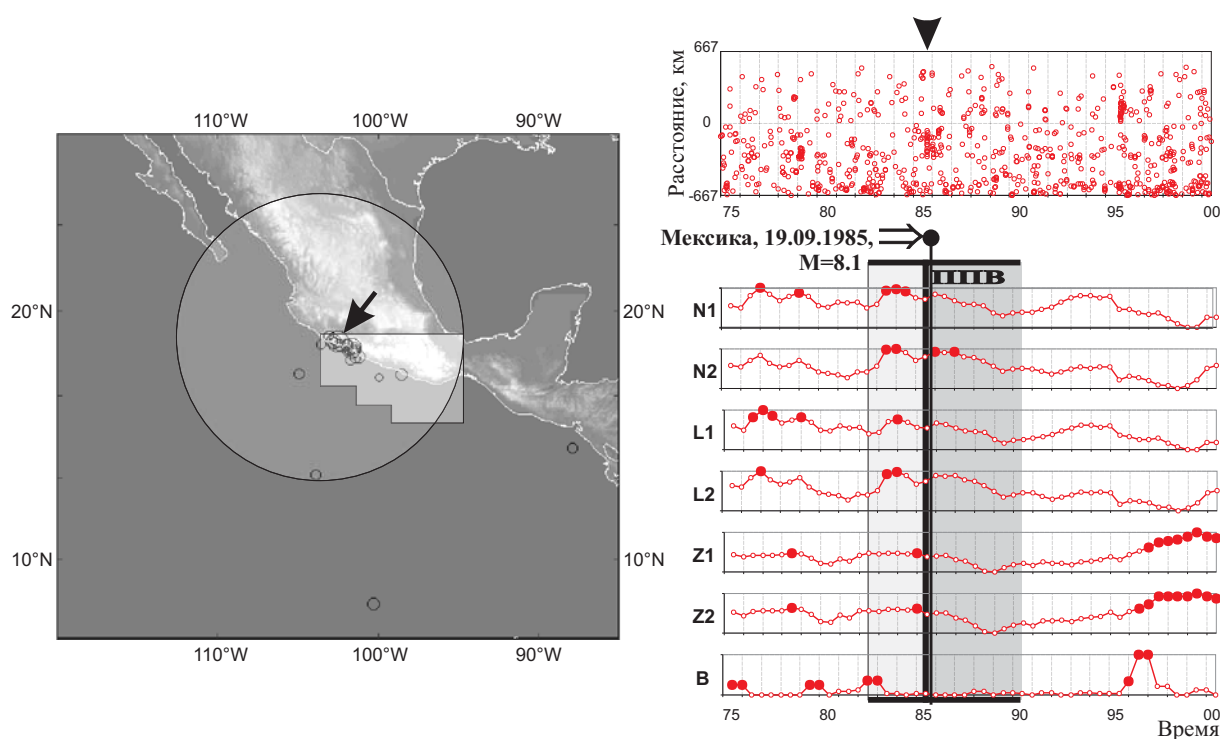


Рис. 2. Землетрясение 19.09.1985 г., Мексика, $M = 8.1$

На пространственно-временной диаграмме (рис.2), относящейся к Мексиканскому землетрясению 19 сентября 1985 года (землетрясение Мичоакан), можно отметить долговременное, но локальное, 200-километровое по пространству затишье в окрестности эпицентра надвигающегося сильного толчка. Это затишье началось в середине 1979 г., прерывалось кратковременно землетрясением 1981 г. с $M_w = 7.4$ и одним более слабым событием в конце 1983 г. Начиная с конца 1984 г., наблюдается резкое возрастание сейсмической активности вблизи эпицентра будущего сильного события. Эта локальная активизация была столь значительна, что внесла существенный вклад в возрастание функций алгоритма M8 до уровня, необходимого для объявления тревоги, хотя эти функции и вычисляются на гораздо большей территории. Макнелли и др. в своей работе [14] утверждают, что подобное сочетание затишья и активизации типично для сильных мексиканских событий и наблюдалось перед шестью большими землетрясениями с магнитудой от 7.0 до 8.1 по всему Центрально-Американскому желобу.

2. Землетрясение 20.10.1986 г., о-ва Кермадек, магнитуда 8.3

Землетрясение 20 октября 1986 года на о-вах Кермадек произошло на фоне общего повышения активности в регионе, наблюдавшегося с середины 1984 г. после продолжительного относительно спокойного периода. Эти изменения активности имеют интегральный характер и относятся ко всему кругу радиуса 667 км, а не непосредственно к зоне очага готовящегося землетрясения. За 4 мес. до сильного события в 150 км западнее его эпицентра наблюдался рой из 24 землетрясений, 11 из которых имеют магнитуду 5.0 и выше (рис.3).

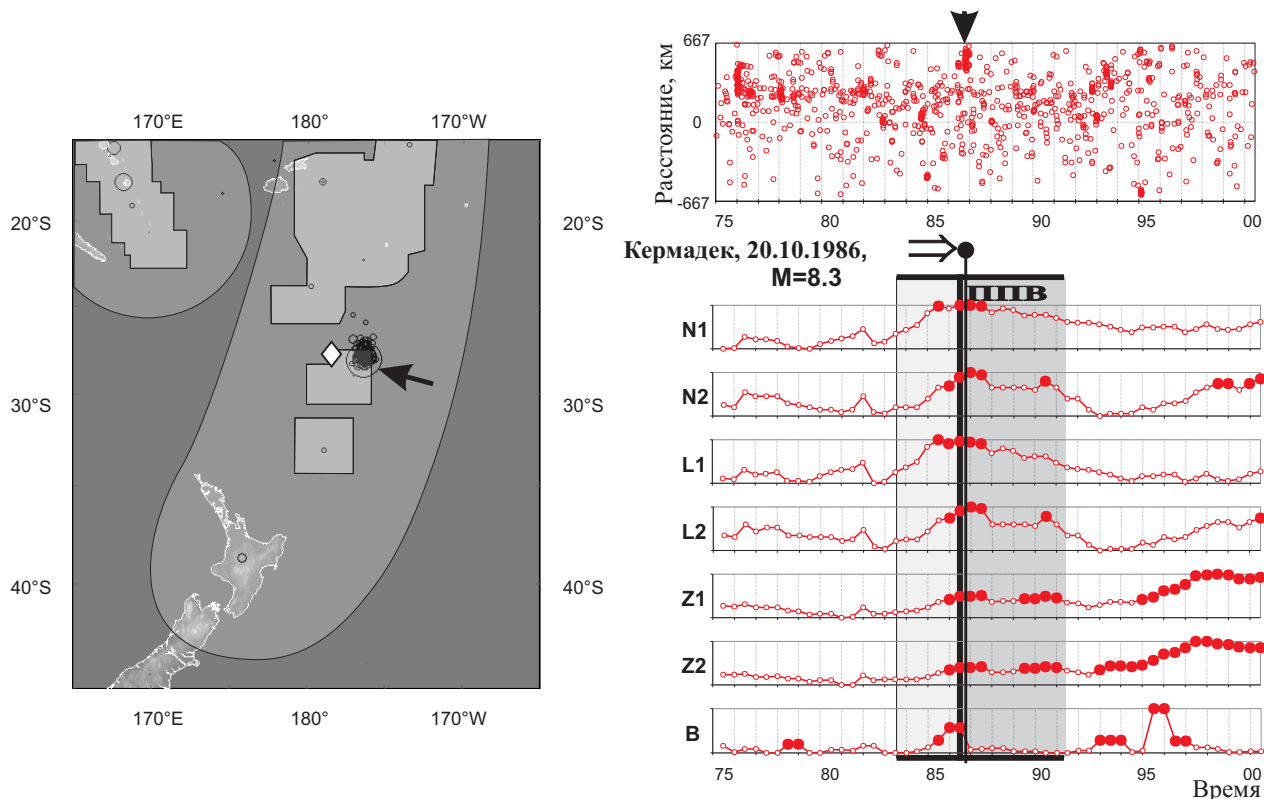


Рис. 3. Землетрясение 20.10.1986 г., о-ва Кермадек, $M = 8.3$

3. Землетрясение 23.05.1989 г., о. Маккуори, магнитуда 8.2

Как уже упоминалось, землетрясение 23 мая 1989 года вблизи о.Маккуори произошло в регионе с очень малой сейсмической активностью, в среднем около 4.5 событий с магнитудой 4.0 и выше в год в исследуемом круге. Эта активность не претерпела каких-либо существенных изменений в преддверии сильного события. Можно только отметить землетрясение с магни-

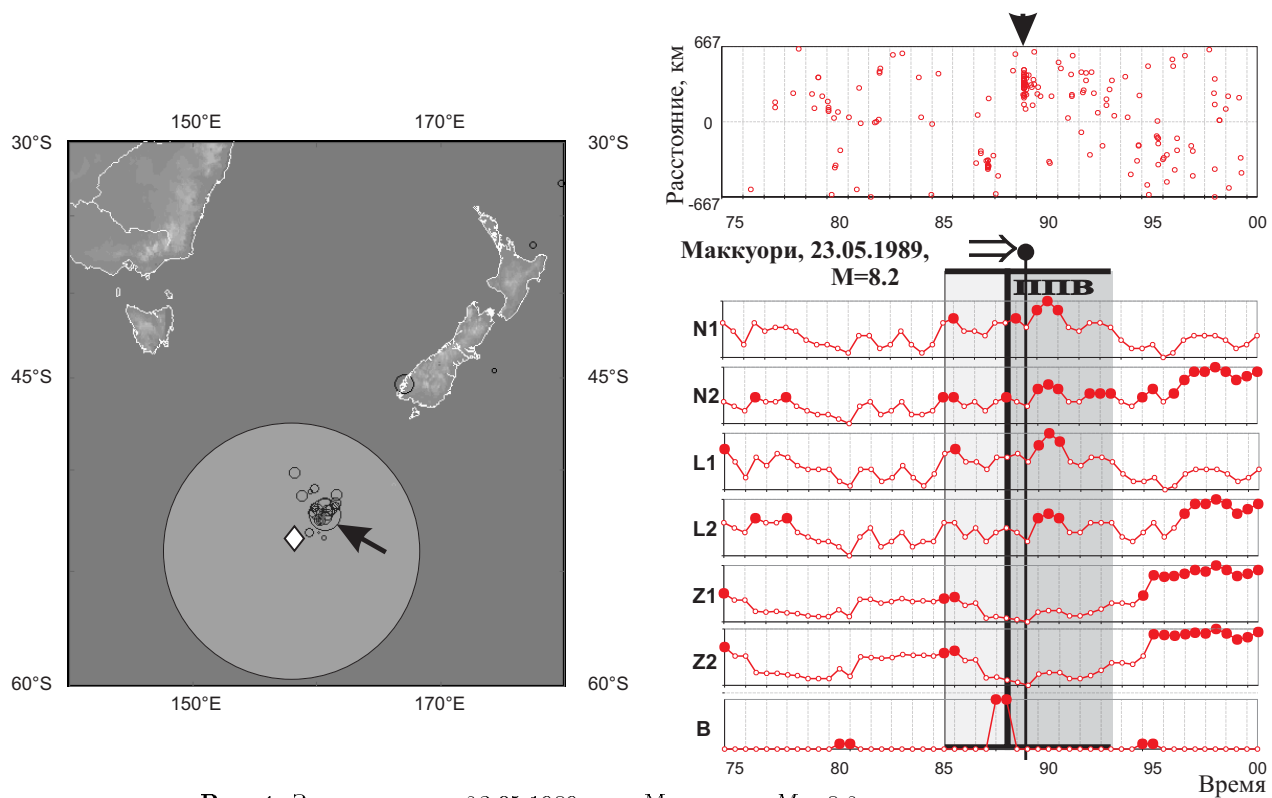


Рис. 4. Землетрясение 23.05.1989 г., о. Маккуори, $M = 8.2$

тудой 5.3, произошедшее за 2 нед. до главного толчка в 100 км юго-западнее его эпицентра. Такие землетрясения довольно редки для данной территории, и предыдущее землетрясение с магнитудой, превышающей 5.0, регистрировалась в исследуемом круге только в 1987 г. (рис. 4).

4. Землетрясение 08.08.1993 г., о. Гуам, магнитуда 8.2

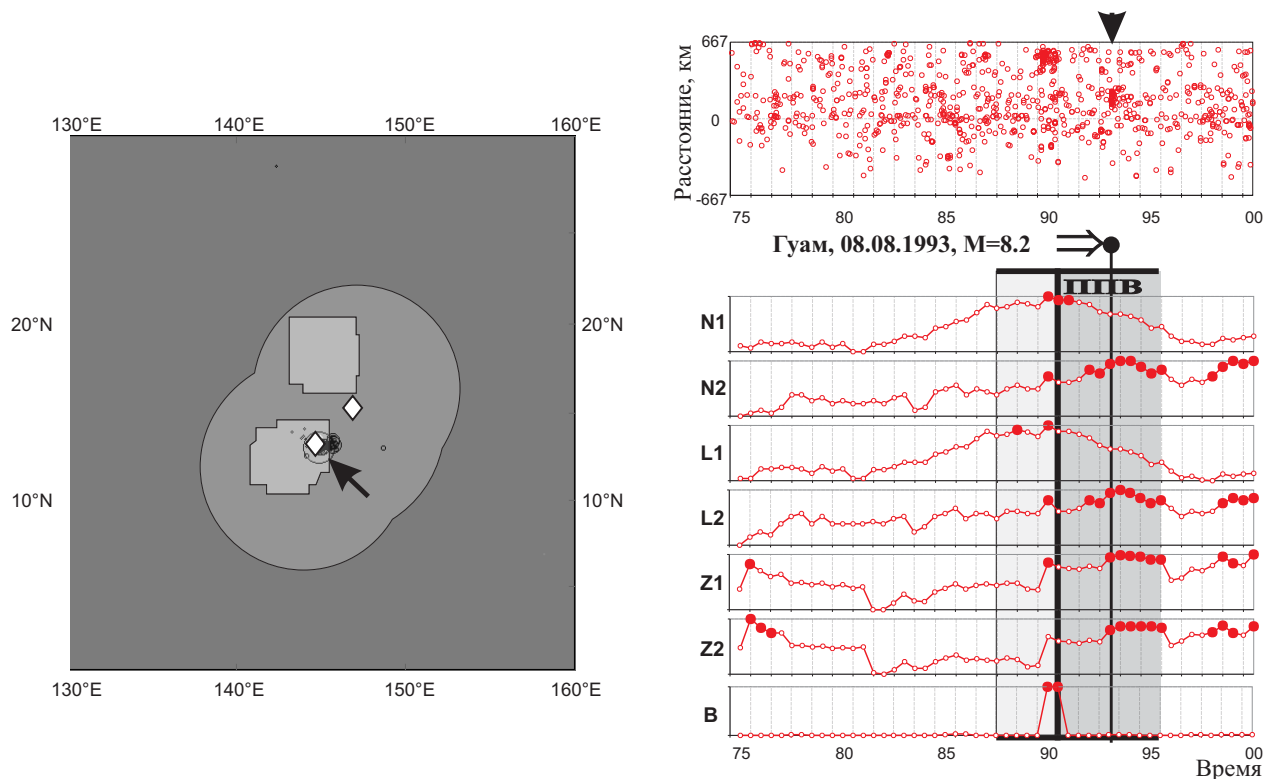


Рис. 5. Землетрясение 08.08.1993 г., о. Гуам, $M = 8.2$

Участок Бонин-Марианского желоба, на котором произошло землетрясение 8 августа 1993 года вблизи о. Гуам, находился в состоянии повышенной активности начиная с 1985 г. В 1990 г. эта активизация усилилась после события с магнитудой 7.5, сопровождавшегося большим количеством афтершоков, в 300 км северо-восточнее будущего сильнейшего землетрясения. Недалеко от этой афтершоковой зоны за 2 мес. до события 1993 г. произошло землетрясение с магнитудой 6.6, что является редкостью для данного региона, а за пять дней до основного толчка непосредственно в будущей эпицентральной зоне – землетрясение с магнитудой 5.1 (рис.5).

5. Землетрясение 09.06.1994 г., Боливия, магнитуда 8.2

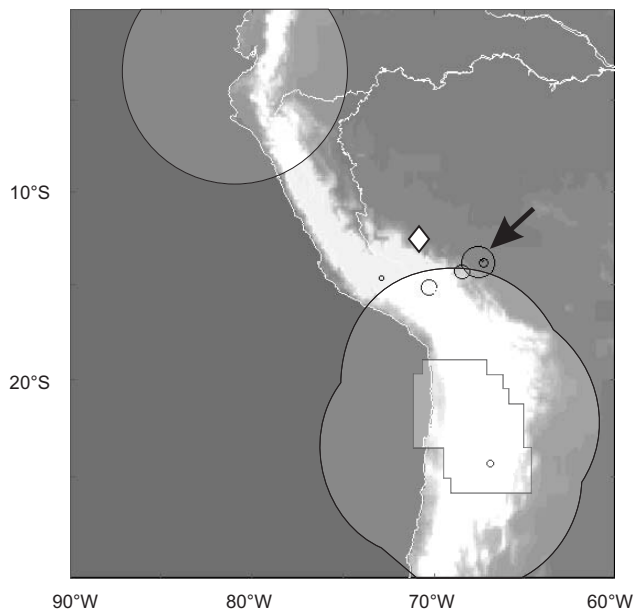


Рис. 6. Землетрясение 09.06.1994 г., Боливия, $M = 8.2$

Глубокое Боливийское землетрясение 9 июня 1994 года произошло под равнинной практически асейсмичной территорией в 600 км к востоку от тихоокеанского побережья Южной Америки, на продолжении зоны субдукции океанической плиты Наска вглубь под Южноамериканский континент, в том месте, где эта зона делает резкий поворот с юго-восточного на южное направление. Такие глубокие землетрясения вообще случаются крайне редко. Боливийское землетрясение, кроме того, стало самым сильным из глубоких когда-либо зарегистрированных сейсмологами и позволило исследовать недоступные до этого моды свободных колебаний Земли. Незадолго до него, 10.01.1994 г., на расстоянии 250 км от будущего эпицентра произошло землетрясение с магнитудой 6.9 на глубине 595 км. Предыдущее землетрясение такой силы наблюдалось в этом месте лишь в 1963 г. (рис.6).

6. Землетрясение 04.10.1994 г., о. Шикотан, магнитуда 8.3

На пространственно-временной диаграмме Шикотанского землетрясения 4 октября 1994 года распределение сейсмичности в окрестности его очага за несколько предшествующих лет довольно равномерно (рис.7). Можно отметить лишь сейсмическое затишье в 1993 г. на 400-километровом сегменте Курильского сейсмического пояса в окрестности эпицентра надвигающегося Шикотанского землетрясения, которое закончилось за полгода до его возникновения. Однако, как видно из рис.7, такого рода затишья не являются выдающимися для этого региона и периодически просматриваются на данной диаграмме за исследуемый период времени (например, широкие области затишья в 1977 г. и 1980 г.). Известно, что Курильская зона субдукции генерирует большое количество землетрясений и что периоды высокой сейсмической активности чередуются здесь с периодами относительного спокойствия. Начиная с конца 70-х гг. этот регион находился в устойчивом, относительно спокойном сейсмическом состоянии, характеризующимся стабильным потоком землетрясений. С 90-х гг. началось общее повышение активности в регионе. В 1991 г. двухнедельный рой землетрясений, семь из которых имели магнитуду 6.0 и выше, произошел в северной части региона недалеко от о. Уруп и завершился землетрясением магнитуды 7.4. В августе 1994 года за пять недель до надвигающегося Шикотанского землетрясения и примерно в 200 км к северо-востоку от его эпицентра около о. Итуруп произошел аналогичный рой землетрясений, семь из которых имели магнитуду, превышающую 6.0. Непосредственно за этим роєм последовало более глубокое (76 км) землетрясение

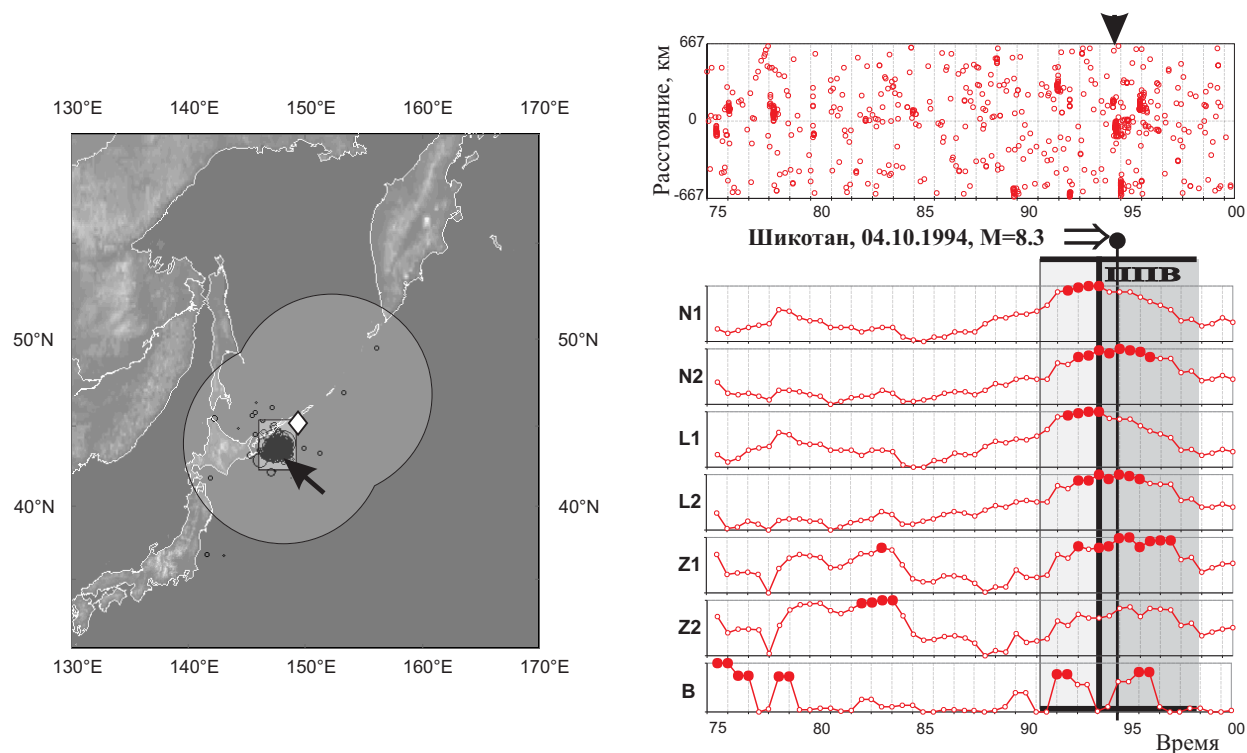


Рис. 7. Землетрясение 04.10.1994 г., о. Шикотан, $M = 8.3$

с магнитудой 6.2 у южной оконечности о.Кунашир, наметившее юго-западную границу зоны, которая разорвалась во время Шикотанского землетрясения 1994 года. Отметим, что рой в августе 1994 г. уже практически точно указал зону будущего очага Итурупского землетрясения 1995 года, произошедшего 16 мес. спустя.

7. Землетрясение 07.04.1995 г., о-ва Самоа, магнитуда 8.1

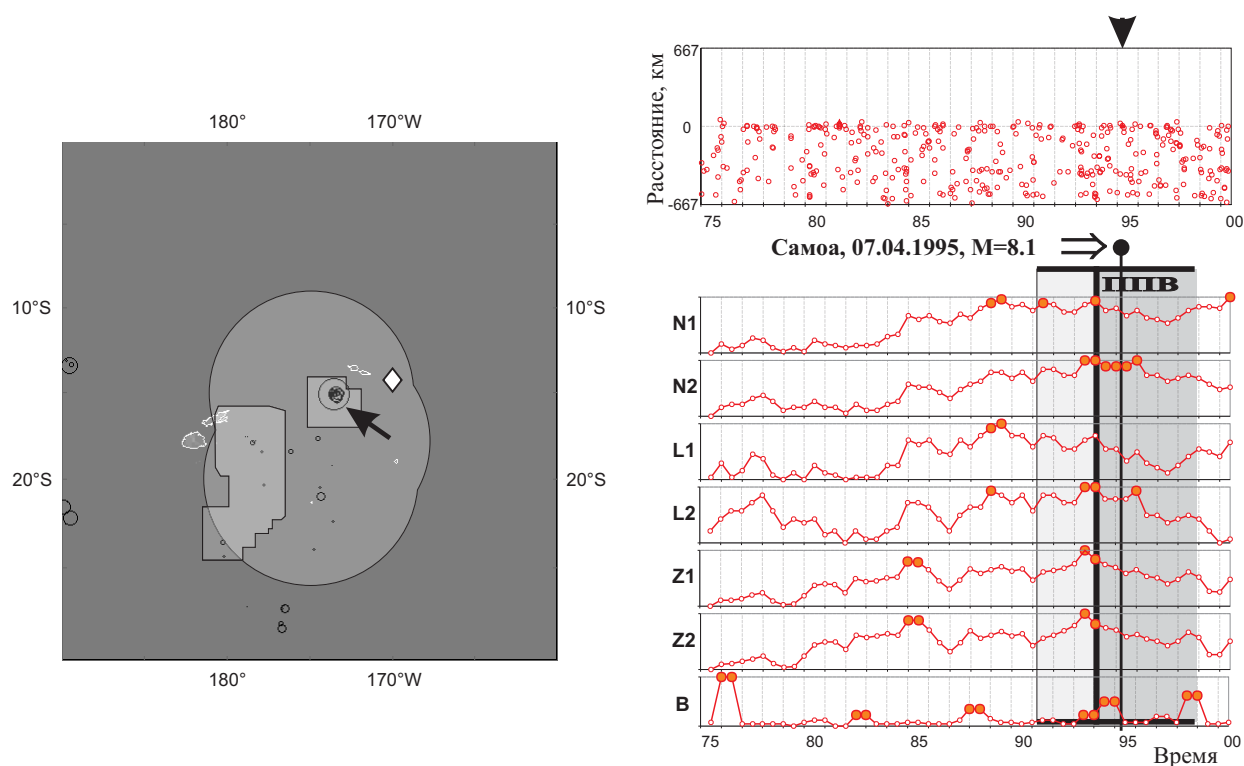


Рис. 8. Землетрясение 07.04.1995 г., о-ва Самоа, $M = 8.1$

Землетрясение 7 апреля 1995 года в районе архипелага Самоа по некоторым статистическим характеристикам сильно отличается от остальных сильнейших землетрясений мира последнего времени. Оно практически не выделяется на пространственно-временной диаграмме рис. 8. Несмотря на очень большую магнитуду, это событие и его афтершоки почти не повлияли на и без того высокую сейсмическую активность в исследуемом круге. Эта особенность – стабильная концентрация землетрясений во времени и в пространстве – свойственна всему данному региону. Например, события с магнитудами, превышающими 7.5, которые произошли в 1975, 1977, 1981 и 1994 гг., тоже не выделяются на пространственно-временной диаграмме. Однако алгоритм M8 обнаруживает повышение сейсмической активности в регионе, начавшееся в 1985 г. ростом числа больших землетрясений (функция N1 на рис. 8) и продолжившееся в 90-х гг. в диапазоне малых событий (функция N2 на рис. 8). За 3 мес. до сильнейшего землетрясения на о-вах Самоа в 250 км северо-восточнее его эпицентра наблюдался рой из 31 землетрясения. Хотя лишь два из них имели магнитуду 5.0 и выше, такой рой – событие весьма редкое для данного региона.

8. Землетрясение 03.12.1995 г., о. Итуруп, магнитуда 8.0

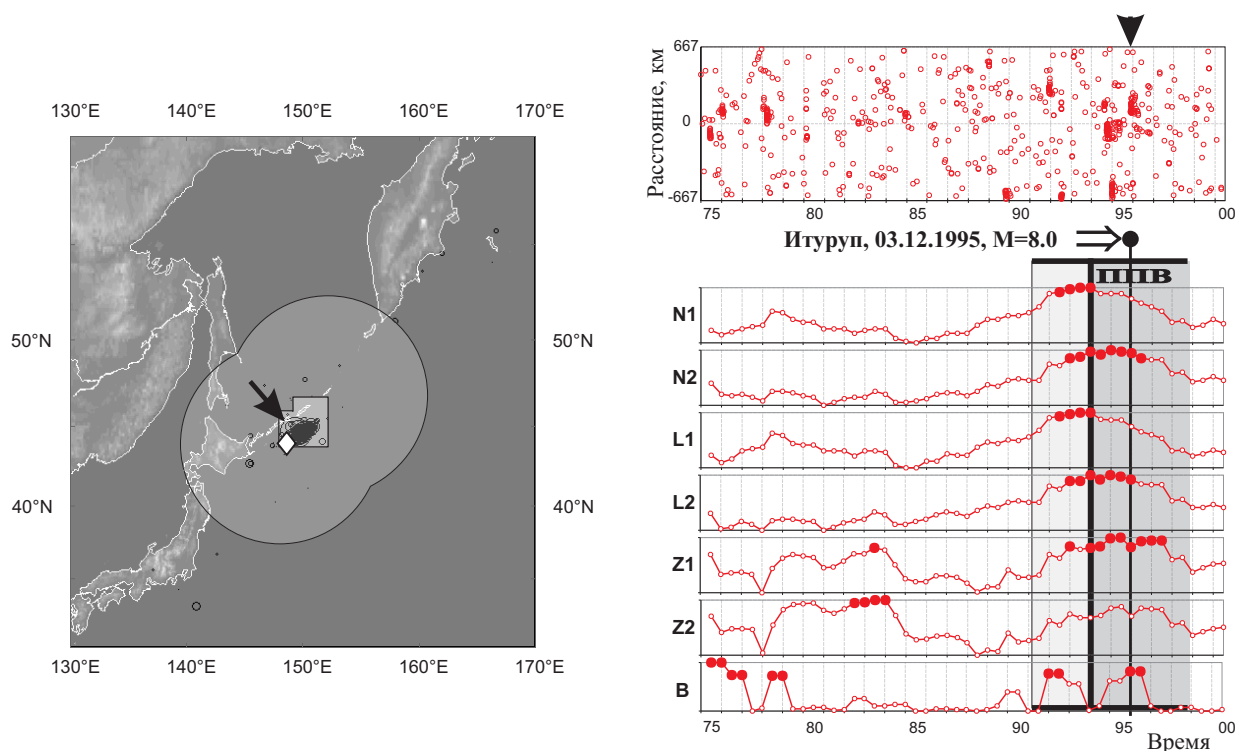
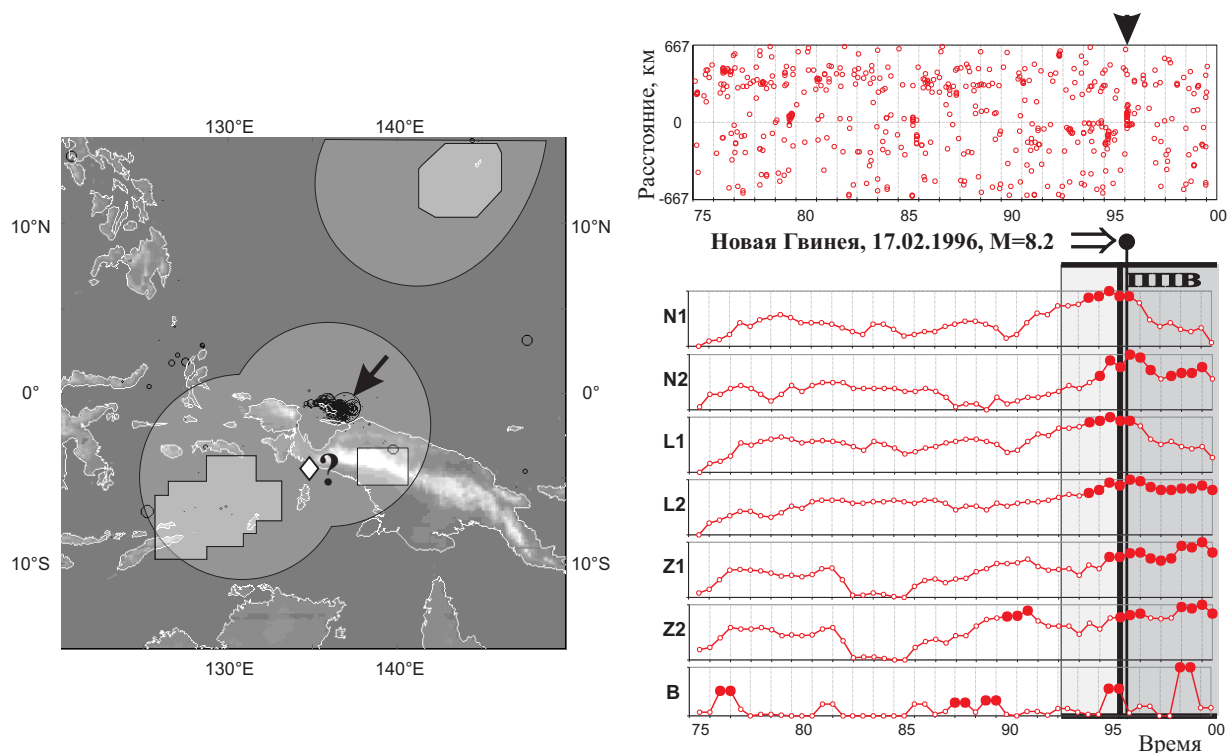


Рис. 9. Землетрясение 03.12.1995 г., о. Итуруп, $M=8.0$

Итурупское землетрясение 3 декабря 1995 года произошло на фоне общего повышения сейсмической активности в Курильской зоне субдукции, в 200 км северо-восточнее предыдущего Шикотанского землетрясения, в период, когда еще продолжалась его афтершоковая последовательность. Это событие уникально наличием большого количества форшоков, начавшихся 24 ноября землетрясением с магнитудой 6.6 и продолжавшихся вплоть до самого начала основного толчка. Форшоковый рой содержал 64 землетрясения с магнитудой 4.0 и выше, причем 19 из них имели магнитуду, превышающую 5.0, и 4 – магнитуду 6.0 и более (рис. 9).

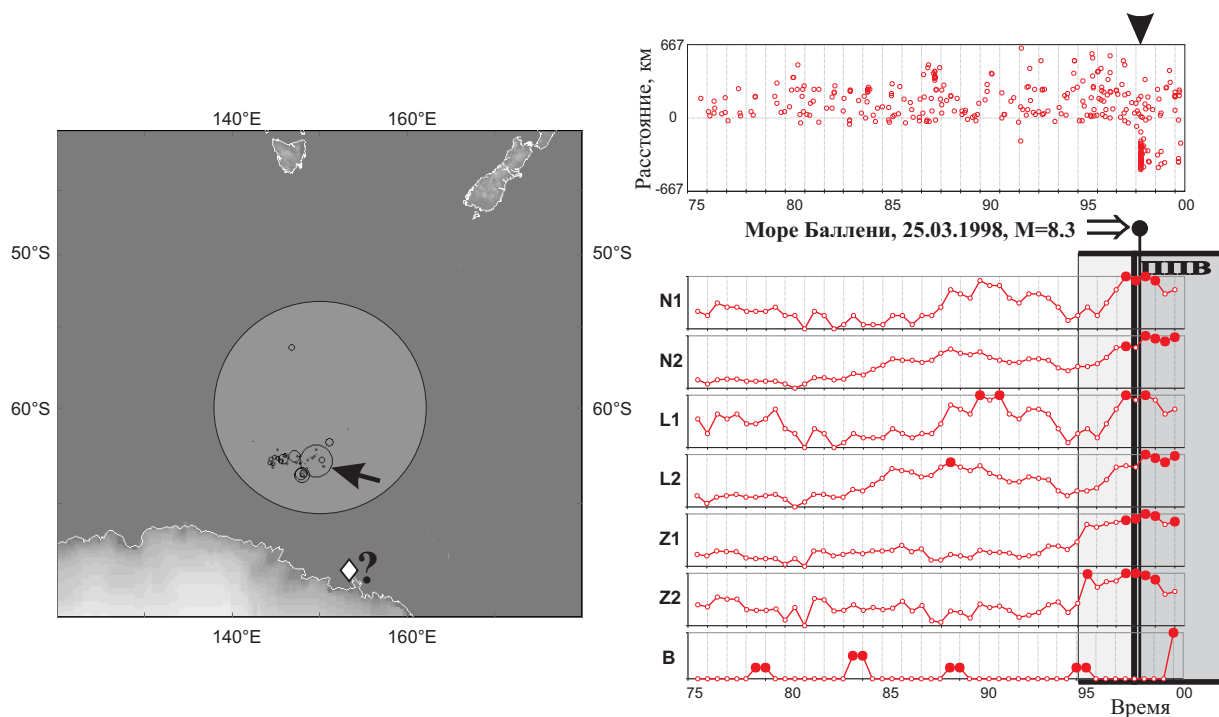
9. Землетрясение 17.02.1996 г., Новая Гвинея, магнитуда 8.2

На пространственно-временной диаграмме землетрясения 17 февраля 1996 года в Новой Гвинее (рис. 10) можно выделить сейсмическую активизацию 1994 г. в окрестности очага надвигающегося сильного события, завершившуюся в марте 1995 г. группой из 24 землетрясений, два из которых имели магнитуды 6.1 и 7.1. Эти землетрясения произошли в 400 км южнее

Рис. 10. Землетрясение 17.02.1996 г., Новая Гвинея, $M = 8.2$

эпицентра события 17.02.1996 г., так, что нельзя с уверенностью утверждать, что они имели непосредственное отношение к процессу его подготовки.

10. Землетрясение 25.03.1998 г., море Баллени, магнитуда 8.3

Рис. 11. Землетрясение 25.03.1998 г., море Баллени, $M = 8.3$

Землетрясение 25 марта 1998 года в море Баллени произошло в удивительном с точки зрения сейсмологии месте, в стороне от основных сейсмогенных поясов Земли, в 250 км от срединно-

океанического хребта, разделяющего Австралийскую и Антарктическую плиты. Кроме того, никогда еще землетрясения такой силы не регистрировались в столь низких широтах. В непосредственной окрестности очага этого землетрясения не наблюдалось никакой предвестниковой активизации. Однако версия алгоритма M8, модифицированная для регионов с низкой сейсмической активностью, обнаруживает активизацию сейсмичности в области Индийского океанического хребта, примыкающей к очагу будущего сильного землетрясения, и объявляет тревогу в круге 667 км, внутрь которого попадает эпицентр землетрясения в море Баллени. За 4 мес. до основного толчка в 500 км к югу от его эпицентра произошло одно из четырех землетрясений с магнитудой от 4.0 и выше, когда-либо зарегистрированных на этом сегменте границы Антарктической плиты. Столь низкий уровень сейсмической активности региона не позволяет утверждать взаимосвязь возникновения довольно слабого землетрясения на границе Антарктической плиты и сильнейшего землетрясения в море Баллени (рис. 11).

11. Землетрясение 04.06.2000 г., о. Суматра, магнитуда 8.0

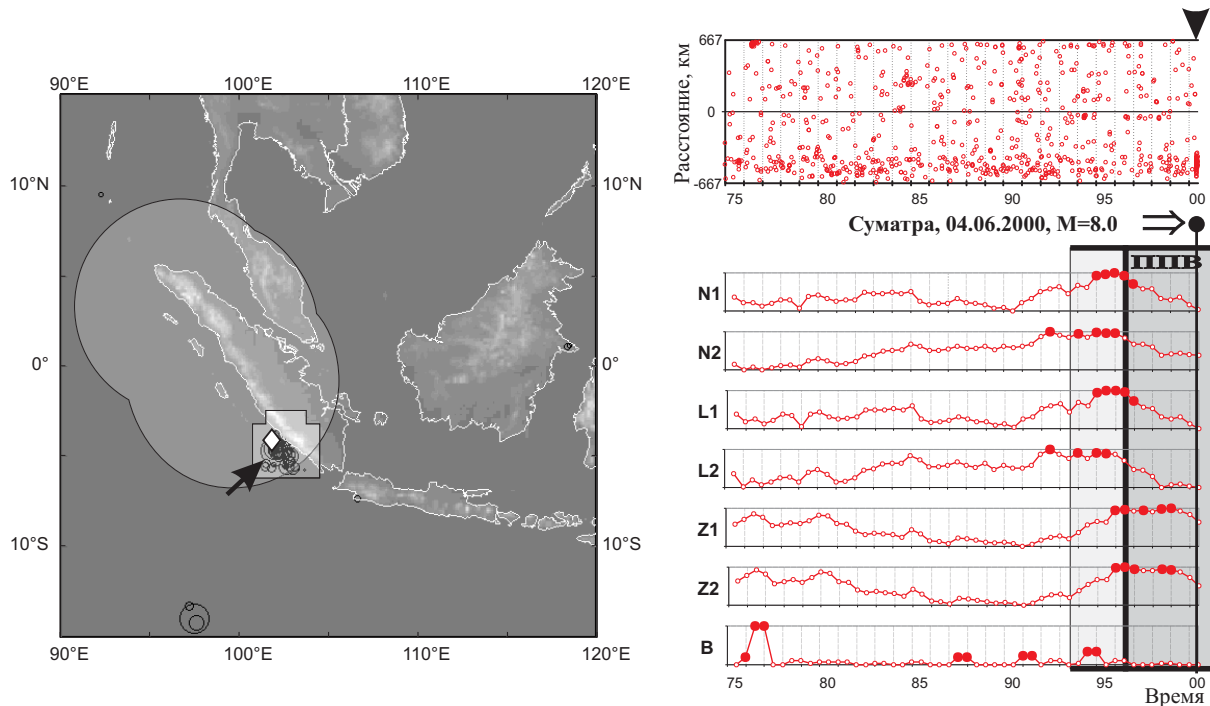


Рис. 12. Землетрясение 04.06.2000 г., о. Суматра, $M = 8.0$

Землетрясение 4 июня 2000 года на Суматре произошло в сейсмически высокоактивном регионе Зондского желоба. В непосредственной окрестности его очага в 1996–1997 гг. наблюдался относительный спад числа землетрясений, хорошо различимый на пространственно-временной диаграмме, и дальнейший его рост в последующие два года. Во всем же исследуемом регионе мы наблюдаем необычную сейсмическую обстановку, отличающуюся от ситуаций, сложившихся перед остальными исследуемыми нами сильными землетрясениями. Функции алгоритма M8, отвечающие за активность (N1, N2, L1, L2), достигли максимума в середине 1995 г., объявив таким образом тревогу на ближайшие пять лет, и затем постепенно пошли на спад, достигнув к моменту землетрясения на Суматре своих минимальных за предшествующие 25 лет значений (рис. 12). Концентрация же очагов землетрясений (функции Z1 и Z2) во время этого спада продолжала оставаться на своих максимальных значениях, т.е. при уменьшении числа землетрясений повысились их энергия и группируемость в пространстве. Причем существенное повышение концентрации землетрясений наблюдалось именно в месте очага будущего сильного события. Этот процесс хорошо просматривается на пространственно-временной диаграмме. Отметим также форшок с магнитудой 4.7, случившийся менее чем за сутки до основного толчка в 50 км к северу от его эпицентра.

Таким образом, сейсмическая обстановка, сложившаяся перед сильнейшими землетрясениями мира последнего времени, с бóльшим основанием поддерживает гипотезу о предвестниковой активизации, чем о сейсмическом затишье. На фоне среднесрочной активизации, распознанной алгоритмом М8, в большинстве случаев наблюдается краткосрочное (в масштабе месяцев и менее) увеличение сейсмической активности (рои, уникальные события), происходящее на расстояниях, которые сравнимы с размерами самого очага готовящегося сильного землетрясения (см. табл.2). Только перед двумя из 11 рассмотренных сильнейших землетрясений мира мы наблюдали среднесрочное (в масштабе нескольких лет) сейсмическое затишье. В случае землетрясения в Мексике (19.09.1985г.) это затишье имело пространственно локальный характер, порядка 200 км вдоль сейсмического пояса, и закончилось за год до сильного события, сменившись резким возрастанием сейсмической активности. В случае землетрясения на Суматре (04.06.2000г.) сейсмическое затишье имело интегральный характер и относилось ко всему исследуемому кругу радиуса 667 км. Это затишье сопровождалось повышением группируемости землетрясений вблизи очага будущего сильного события.

4. Обратный каскад к главному событию

Свидетельства в пользу активизации потока землетрясений средней силы перед сильнейшими событиями приводятся многими авторами. Так, например, отмечалось появление относительно большого числа средних землетрясений в северной Калифорнии перед катастрофическим землетрясением 1906 года в Сан-Франциско [15, 16]. После другого калифорнийского землетрясения в Лома Приета 1989 года Буфе и Варнес [5] предложили концепцию степенного возрастания количества высвобожденной энергии упругих деформаций перед сильным землетрясением. Активизация при этом ассоциируется с приближением к своему критическому значению некоторого “управляющего” параметра, в качестве которого рассматривается накопленная региональная деформация. Достижение критического значения переводит регион в нестабильное состояние, которое разрешается катастрофой – сильнейшим землетрясением. С приближением к критическому значению увеличивается корреляционное расстояние, на котором наблюдаются предвестниковые явления. Такая активизация является первоосновой алгоритмов среднесрочного прогноза, разработанных В.И. Кейлис-Бороком с соавторами [1, 6, 17–20]. Возможности этих алгоритмов для обнаружения предвестниковой активизации уже проиллюстрированы нами в предыдущих разделах на примере применения алгоритмов М8 и МSc к прогнозу 11 сильнейших землетрясений. Боуман с соавторами [21] тоже приводят наблюдавшиеся свидетельства того, что корреляционный радиус в последовательности землетрясений средней силы на порядок превышает размер зоны разрушений готовящегося основного толчка.

Наблюдая стабильность сейсмической последовательности на низком энергетическом уровне, разумно предположить, что сейсмичность Земли является своего рода термодинамической системой, в которой очень слабые землетрясения представляют собой независимый фоновый шум, коррелированный с “сейсмическим циклом”. Частота появления слабых землетрясений пропорциональна скорости роста региональной деформации, которая, в свою очередь, пропорциональна частоте возникновения более сильных землетрясений. Ассоциация сильного землетрясения (т.е. катастрофы) с фазовым переходом второго рода порождает естественное предположение о степенном росте активности, наблюдаемом в моделях [22], своеобразном обратном каскаде разрывов малых размеров к основному разрыву по магистральному разлому.

Боуман с соавторами [21] утверждают, что возникновению сильных землетрясений предшествует ускоренный степенной рост накопленной деформации по Беньоффу, т.е. суммы по всем землетрясениям их энергий в степени $1/2$. Такое поведение, согласно [5], соответствует простой механической модели разрушения. Однако приведенные авторами графики накопленной деформации в оптимально подобранных областях недостаточно убедительны (см. рис.6 из [5]), а полученный ими высокий уровень статистической значимости (99.5 %) скорее всего является, во первых, результатом однородной по пространству и пуассоновской по времени модели случайного каталога (реальный каталог неоднороден по пространству и времени, что увеличивает

шансы подыскать подходящее ускорение) и, во-вторых, неучтенного выбора начала рассмотрения последовательности событий модельной серии (разброс длительностей интервалов, на которых Боуман с соавторами находят степенное возрастание накопленной деформации, указывает на использованную дополнительную степень свободы). Отметим, что предвестниковые свойства аналогичного деформации по Беньоффу параметра, а именно – суммы по всем землетрясениям их энергий в степени $2/3$, отмечалось ранее В.И. Кейлис-Бороком и Л.Н. Малиновской [3] в несколько иной форме – аномально большие значения параметра наблюдались за некоторое время до сильного события. Параметр имеет физический смысл суммарной площади разрывов.

На рис. 13 приведены графики накопленной региональной деформации по Беньоффу, рассчитанные в 20-летний период перед каждым из рассматриваемых нами 11 землетрясений. Представляется достаточно очевидным, что в среднесрочном масштабе времени на среднеудаленных дистанциях ускоренный рост деформации по Беньоффу в основном эпизодичен и не является типичным окончанием интервала времени, предшествующего сильному землетрясению. В большинстве случаев ускоренное нарастание деформации оканчивалось за год и более до основного толчка. В течение двух-трех последних лет, некоторая выпуклость графика вниз, что соответствует ускорению роста накопленной деформации, наблюдается в половине случаев. Однако, как видно из рис. 13, в течение 20 лет такое случается многократно.

Нами рассматривались графики накопленной региональной деформации по Беньоффу в различных пространственно-временных масштабах, а также графики суммы по всем землетрясениям их энергий в степени $2/3$ [3]. Ситуация, интегрально представленная на рис. 13, в целом типична, хотя в отдельных случаях выпуклость графика изменялась на противоположную (Шикотанское землетрясение (04.10.1994 г.) за 10 предшествующих лет при уменьшении радиуса с 667 до 200 км). Отметим, что на близких расстояниях в слабоактивных регионах вообще нет землетрясений, необходимых для оценки скорости роста накопленной деформации (Глубокое Боливийское землетрясение (09.06.1994 г.) и землетрясение в море Баллени (23.05.1998 г.)).

Таким образом, проявление обратного каскада к основному толчку не носит ярко выраженного характера степенного роста непосредственно к моменту сильного события. Скорее можно утверждать, что аномально большие значения региональной деформации систематически наблюдаются за некоторое время до него, на временном интервале в несколько лет (среднесрочный масштаб времени).

5. Пространственно-временное распределение сейсмичности после сильного события

Как правило, сильные землетрясения не изолированы в пространстве-времени и сопровождаются многочисленными афтершоками, в процессе которых система разломов и блоков сейсмической зоны переходит в новое состояние. Процесс перераспределения энергии главного толчка вниз по иерархии исследуется уже более столетия [23, 24]. Тогда же было высказано предположение о степенном характере падения числа афтершоков как функции времени с момента основного толчка – закон Омори. Так случилось, что предположение Омори все чаще используется, наряду с соотношением Гутенберга–Рихтера, как основной закон, необходимый к воспроизведению при моделировании сейсмичности. Действительно ли это необходимое свойство последовательностей землетрясений, или ансамбль сценариев перехода системы в новое энергетическое состояние более широк? Попробуем разобраться систематически в этом вопросе, проанализировав наблюдаемую сейсмичность после каждого из всех 11 сильнейших землетрясений мира (см. табл.2).

Для систематического изучения пространственно-временного распределения афтершоков прежде всего необходимо определить понятие афтершока. Это далеко не просто и существующие даже формальные определения сильно отличаются друг от друга. Довольно легко определить ранние афтершоки, поскольку, как правило, они доминируют в региональном (а порой и в глобальном) каталоге и располагаются вблизи эпицентра. Значительно сложнее идентифицировать поздние афтершоки, для которых частота возникновения может приближаться к фоновой по-

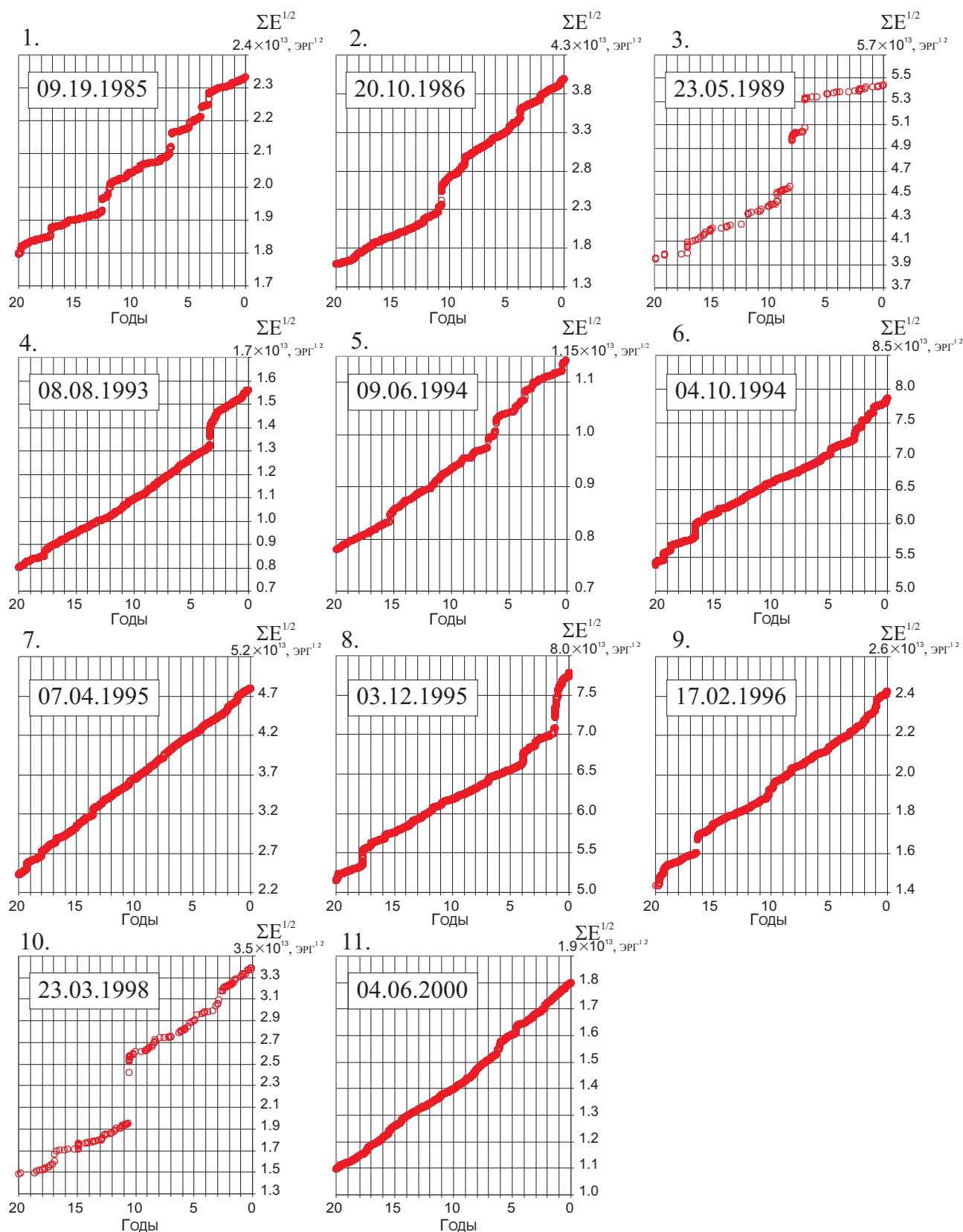


Рис. 13. Накопленная региональная деформация по Беньоффу как функция времени в течение 20 лет перед 11 сильнейшими землетрясениями мира 1985–2000 гг. в их 667-километровых окрестностях

вторяемости сейсмических событий в регионе. В практической работе с данными наиболее распространенными являются оконные методы, в которых афтершоками являются все землетрясения, отстоящие от основного толчка, более сильного по магнитуде, не более, чем на определенное расстояние и время [25–27]. Эти интервалы – пространственное и временное окна – обычно зависят от магнитуды и растут с ее увеличением. В практике применения алгоритма М8 для глобального прогноза сильнейших землетрясений мира используется метод В.И. Кейлиса-Борока [26], согласно которому, в частности, афтершоками основного толчка с магнитудой от 8.0 и выше считаются все землетрясения меньшей силы, произошедшие в течение трех лет и в радиусе 200 км от эпицентра. Попытка исправить очевидные недостатки оконных методов, используя статистику фона и оптимизацию ошибок классификации, предложена Г.М. Молчаном [28]. В этой работе мы не использовали систематически последний подход и выделяли афтершоки оконным методом, хотя и планируем в дальнейшем проверить, как более обоснованный статистически способ выделения афтершоков повлияет на представленные здесь результаты.

Для статистического анализа афтершоковых последовательностей мы воспользовались пакетом программ Огата [29], в котором реализована оценка максимума правдоподобия для параметров убывания частоты афтершоков во времени. Оценки соответствуют модельному убыванию по определенному закону, например, по экспоненте [30] или по степенному закону [23] и его модификациям, имеющим параметр p , который отличен от единицы, и допускающим афтершоки у афтершоков [31], а также некоторым комбинациям экспоненциального и степенного законов. Программа позволяет также учитывать сейсмический фон региона. Привлекая информационный критерий Акаике (Akaike Information Criterion – AIC [32]), можно выбрать наилучшее приближение данных. Сразу оговоримся, что AIC позволяет выбрать наилучшее приближение лишь из предложенных моделей, что, очевидно, недостаточно для утверждения об адекватности.

В табл. 2 (столбцы с 5 по 9) представлена информация, полученная при систематическом исследовании афтершоковых последовательностей 11 сильнейших землетрясений мира. А именно: для каждого события дано количество афтершоков, выделенных по методу В.И. Кейлиса-Борока [26]. Отдельно приведены: полное число афтершоков за три года и их количество за первые 100 дней после основного толчка. Для каждого из этих периодов времени, используя программу Огата [29], найден закон убывания частоты афтершоков, наилучшим образом (в смысле информационного критерия Акаике) приближающий данные. В случае модифицированного закона Омори, допускающего наличие второй и даже третьей афтершоковой последовательностей, даются времена предполагаемого начала каждой последовательности и параметры p в соответствующих им законах Омори. Следовательно, вся афтершоковая последовательность в этом случае моделируется суперпозицией нескольких степенных законов с возможно разными параметрами убывания. В последнем столбце табл. 2 приводится время “релаксации” системы, т.е. время, когда частота появления землетрясений в афтершоковой зоне вновь выходит на стационарное значение. На рис. 14 для каждого из 11 исследуемых нами землетрясений представлен график числа афтершоков в интервале от момента t до трех лет после основного толчка (время дано в логарифмическом масштабе). Для сравнения, на рис. 15 представлены три модельных примера изменения числа событий во времени: экспоненциальное и степенное падение, а также стационарная интенсивность. Стандартному закону Омори на рис. 15 соответствует прямая. На рис. 16 даны кумулятивные графики числа землетрясений в 200-километровых окрестностях 11 сильнейших событий мира за 10-летний период, предшествующий событию, и в три последующих года (если позволяет каталог).

Рассмотрим подробнее каждую из афтершоковых последовательностей.

1. Мексика, 19.09.1985 г., $M = 8.1$. Несмотря на то, что сильнейшее Мексиканское землетрясение произошло в сейсмически активном регионе, оно имеет сравнительно небольшое для события такой силы количество афтершоков (см. табл. 2). В афтершоковой последовательности

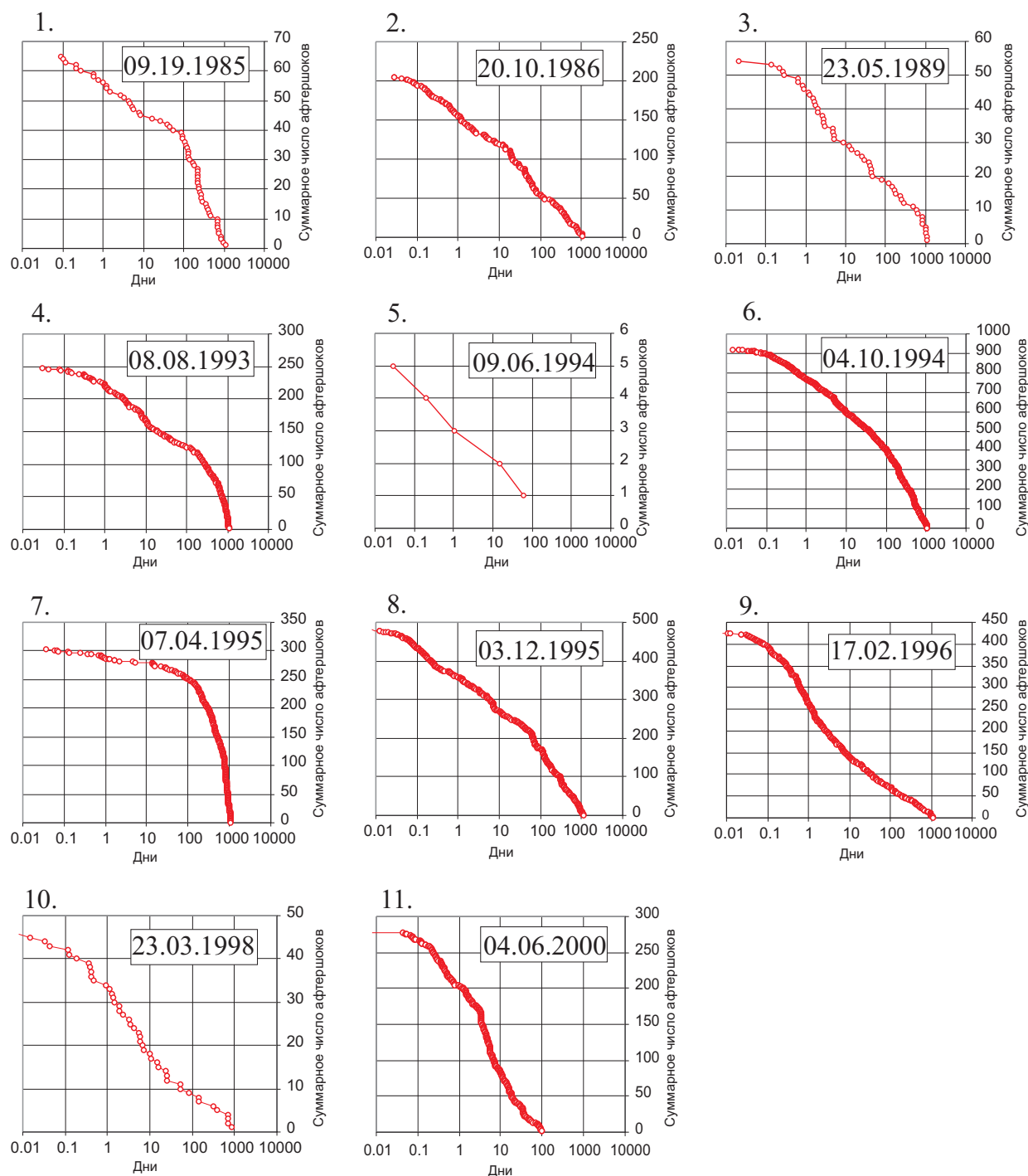


Рис. 14. Суммарное число афтершоков от момента t до трех лет после основного толчка как функция времени для 11 сильнейших землетрясений мира 1985–2000 гг.

присутствуют два землетрясения с магнитудой 7.0 и выше. Магнитуда же остальных афтершоков не превышает 5.8. Заметим (см. рис. 14, 1), что график числа афтершоков в логарифмическом масштабе времени представляет собой почти прямую линию в первые 3 мес. после основного толчка. Затем график претерпевает несколько изломов, соответствующих скачкообразным изменениям параметров убывания частоты афтершоков во времени. Причем, если, например, второй наблюдаемый нами излом связан с появлением в последовательности сильного события с его афтершоками, то первый, наиболее резкий излом, произошел более чем за 4 мес. до сильнейшего афтершока. Он не был связан ни с каким значительным землетрясением и соответствует общему повышению интенсивности сейсмического потока в зоне афтершоков.

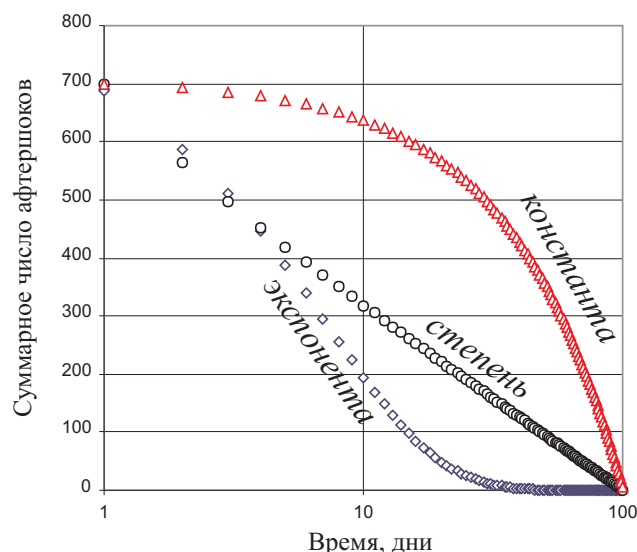


Рис. 15. Модельные примеры распределения числа афтершоков во времени

В первые 100 дней афтершоковая последовательность наилучшим образом приближается стандартным законом Омори ($p = 1$). В течение первых трех лет после основного толчка модифицированный закон Омори со второй и третьей афтершоковыми последовательностями обеспечивает наилучшее приближение. Коэффициент p начального участка графика при этом также остается порядка единицы. Вторая афтершоковая последовательность начинается в момент наиболее резкого излома графика числа афтершоков (см. рис. 14,1), а третья последовательность связывается с афтершоком ($M = 7.0$), произошедшим 30.04.1986 г. не далее 50 км от эпицентра основного толчка. Это второй по силе афтершок во всей последовательности. Сильнейший афтершок с магнитудой 7.6 произошел через 1.5 дня после основного толчка в 120 км от его эпицентра и не повлиял существенно на график числа афтершоков.

Район 200-километровой окрестности (афтершоковая зона) сильнейшего Мексиканского землетрясения характеризуется довольно стабильной интенсивностью сейсмического потока в периоды между сильными землетрясениями с магнитудой, превышающей 7.0 (рис. 16,1). За 10 лет, предшествующих исследуемому нами событию, эта интенсивность составляла примерно 0.018 землетрясений в день. Мы находим, что частота появления землетрясений в афтершоковой зоне приближается к фоновой начиная с 284 дня после главного события.

2. О-ва Кермадек, 20.10.1986 г., $M = 8.3$. Афтершоковая последовательность сильнейшего землетрясения на о-вах Кермадек характеризуется умеренным количеством афтершоков (см. табл. 2) и довольно резким падением их числа во времени (75% афтершоков случилось в первые 100 дней после основного толчка). Так как событие произошло в сейсмически очень активном регионе, в афтершоковой последовательности присутствует большое число сильных землетрясений с магнитудой 6.0 и выше. В то же время, нет ни одного события, магнитуда которого превышала бы 6.8. График числа афтершоков (см. рис. 14,2) довольно равномерный. Наиболее заметный излом на нем соответствует сильнейшему афтершоку с магнитудой 6.8, произошедшему 7 ноября 1986 года в 50 км к югу от основного толчка.

Как в первые 100 дней, так и в первые три года афтершоковая последовательность наилучшим образом приближается модифицированным законом Омори, предполагающим наличие второй и третьей афтершоковых последовательностей. Вторая последовательность при этом связывается с моментом сильнейшего афтершока, а третья — с моментом группы из двух землетрясений с магнитудами 6.3 и 6.1, произошедшей 1.12.1986 г. Коэффициент p основной афтершоковой последовательности достаточно велик — порядка 1.4, что подтверждает резкое падение числа афтершоков во времени.

Интенсивность сейсмического потока в окрестности сильнейшего землетрясения на о-вах Кермадек за 10 предшествующих ему лет довольно стабильна (см. рис. 16,2), причем можно выделить два относительно стационарных ее уровня — порядка 0.03 и 0.06 событий в день.

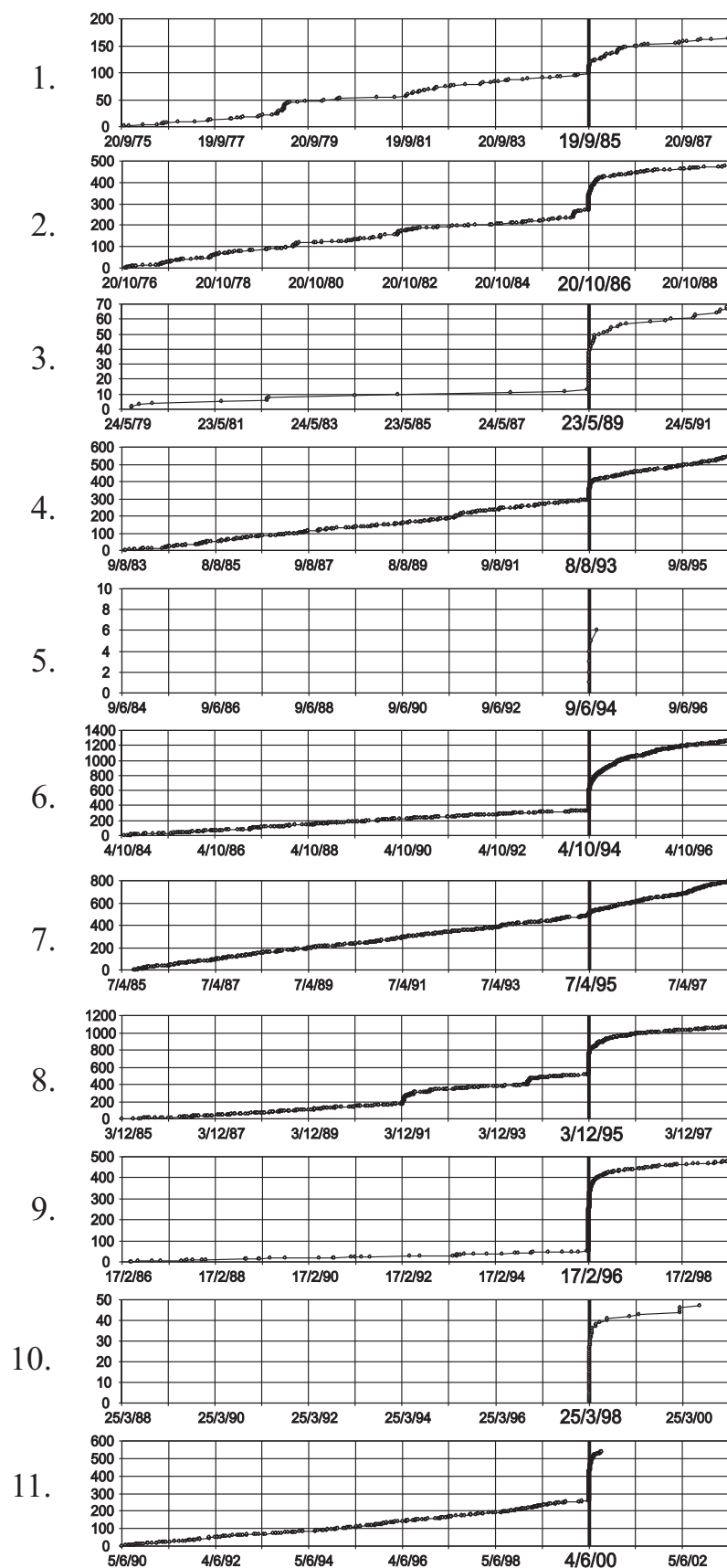


Рис. 16. Суммарное число землетрясений (вертикальные оси) в 200-километровой окрестности 11 сильнейших землетрясений мира 1985–2000 гг. за 10 предшествующих событию лет и за 3 последующих года.

Графики упорядочены по времени, каждый соответствует отдельному землетрясению, моменты сильнейших землетрясений отмечены вертикальной чертой

Большой уровень интенсивности относится к первой половине исследуемого интервала. В начале 1983 г. интенсивность падает почти в два раза и удерживается на этом низком уровне до конца 1984 г., после чего вновь возвращается на более высокий уровень. После сильнейшего землетрясения частота событий становится стационарной приблизительно через 100 дней после главного толчка. Это значение примерно соответствует уровню 1976–1982 гг. А через 1.5 года после сильнейшего землетрясения интенсивность переходит на более низкий уровень, примерно равный уровню 1983–1984 гг.

3. О. Маккуори, 23.05.1989 г., $M = 8.2$. Несмотря на то, что землетрясение Маккуори произошло в регионе с низкой сейсмической активностью, оно имеет довольно богатую афтершоковую последовательность. Магнитуда большинства событий превышает 5.0, а три афтершока имеют магнитуду 6.0 и выше. График числа афтершоков в логарифмическом масштабе времени представляет собой почти прямую линию в течение всех трех лет после основного толчка (см. рис. 14,3). Сильные афтершоки не вносят существенных изменений в последовательность.

При систематическом исследовании мы находим, что в первые 100 дней афтершоковая последовательность землетрясения Маккуори наилучшим образом приближается стандартным законом Омори ($p = 1$). Однако стоит отметить, что для афтершоков, произошедших в первые 10 дней, наилучшим, в смысле информационного критерия Акаике, приближением оказывается экспоненциальный закон убывания, который постепенно "выполживается", переходя со временем в степенной закон. В первые три года афтершоковая последовательность наилучшим образом приближается модифицированным законом Омори, предполагающим наличие второй афтершоковой последовательности, помещенной в момент времени 482 дня после основного толчка. При этом коэффициент p этой последовательности близок к нулю, т. е. распределение числа афтершоков во времени становится близким к стационарному. Таким образом, интенсивность афтершоков резко экспоненциально снижалась в первые 10 дней, затем перешла на степенное падение, постепенно приближаясь к стационарному уровню.

Интенсивность сейсмического потока в 200-километровой окрестности землетрясения Маккуори за предшествующие 10 лет очень мала и составляет 0.0004 события в день (см. рис. 16,3). В течение трех лет после сильнейшего события эта интенсивность так и не возвращается на свое предшествующее среднее значение. Начиная со второго года интенсивность выходит на стационарный уровень, который почти в три раза превышает долговременный средний. В последние несколько месяцев исследуемого трехлетнего интервала наблюдается даже дополнительное увеличение частоты землетрясений. Таким образом, можно предположить, что землетрясение Маккуори повлекло за собой изменение сейсмического режима региона, в котором оно произошло. Хотя, возможно, имела место и обратная ситуация – переход региона на другой сейсмический уровень привел к возникновению сильнейшего землетрясения в его начале. Возможно также, что оба явления – сильнейшее землетрясение и изменение уровня сейсмичности – явились следствиями одной причины.

4. О. Гуам, 08.08.1993 г., $M = 8.2$. Гуамское землетрясение произошло в регионе с очень высокой сейсмической активностью, однако его афтершоковая последовательность состоит преимущественно из землетрясений средней силы, и только два афтершока имеют магнитуды 6.0 и более. Оба эти афтершока произошли в течение первых 10 дней после основного толчка. График числа афтершоков в логарифмическом масштабе времени теряет линейность после первых 7 дней (см. рис. 14,4). После 100 дней происходит значительное изменение параметров убывания частоты афтершоков во времени.

В первые 100 дней изменение количества афтершоков во времени наилучшим образом приближается модифицированным законом Омори со второй афтершоковой последовательностью, связанной с землетрясением, произошедшим через неделю после главного события и имевшим магнитуду 6.0. В течение первых трех лет после основного толчка модифицированный закон Омори со второй и третьей афтершоковой последовательностью обеспечивает наилучшее приближение данных. При этом вторая последовательность – та же, что и в случае 100 дней, а

третья – начинается через 120 дней после основного толчка. Она не связана ни с каким сильным событием. Коэффициент p третьей последовательности равен нулю, что соответствует стационарной интенсивности афтершокового потока.

Район афтершоковой зоны Гуамского землетрясения характеризуется весьма стабильной фоновой интенсивностью сейсмического потока (0.06–0.09 событий в день) за 10 предшествующих лет (см. рис. 16,4). После сильнейшего события интенсивность возвращается к стационарному значению примерно с 66-го дня после основного толчка, но это значение в 1.5 раза превышает предыдущее фоновое. Таким образом, мы видим, что сильнейшее Гуамское землетрясение так же, как и землетрясение Маккуори, сопровождалось изменением сейсмического режима региона, в котором оно произошло.

5. Боливия, 09.06.1994 г., $M = 8.2$. Глубокое Боливийское землетрясение имеет только пять афтершоков, причем все они произошли в течение первых 50 дней после основного толчка. Такое малое количество афтершоков типично для очень глубоких землетрясений. Это не позволяет надежно применить статистический анализ к этой последовательности. Однако все пять точек на графике рис. 14,5 наилучшим образом приближаются прямой стандартного закона Омори с коэффициентом $p = 1$.

6. О. Шикотан, 04.10.1994 г., $M = 8.3$. Шикотанское землетрясение имеет исключительно большое количество афтершоков: 919 в течение первых трех лет и 515 в первые 100 дней (см. табл. 2). Сразу отметим, что Итурупское землетрясение 3 декабря 1995 года с магнитудой 7.9 также формально является афтершоком Шикотанского землетрясения, так как произошло в 180 км на северо-запад от него на 14 мес. позднее. Мы исключаем из рассмотрения это событие вместе со всеми его афтершоками. Даже в этом случае особенностью Шикотанского землетрясения остается наличие большого числа сильных афтершоков. Так, в течение трех лет было зарегистрировано 22 афтершока с магнитудой 6.0 и выше, а одно из них имело магнитуду 7.3. График числа афтершоков в логарифмическом масштабе времени (см. рис. 14,6) не может быть достаточно хорошо аппроксимирован прямой даже в первые 100 дней после сильного события. Скорее, этот график можно представить как суперпозицию нескольких прямых, причем, точки излома графика достаточно точно соответствуют временам многочисленных сильных афтершоков.

Как в течение первых 100 дней, так и в течение трех лет афтершоковая последовательность данного землетрясения наилучшим образом приближается модифицированным законом Омори. Причем, вторая и третья афтершоковые последовательности ассоциируются с временами сильнейших афтершоков с магнитудой 7.3 и 6.9.

За 10 лет, предшествующих Шикотанскому землетрясению, в его 200-километровой окрестности наблюдается очень стабильный уровень сейсмической активности, равный 0.092 события в день (см. рис. 16,6). Примерно через два года после сильного землетрясения интенсивность сейсмического потока выходит на стационарное значение, в 2.5 раза превышающее предыдущее фоновое.

7. О-ва Самоа, 07.04.1995 г., $M = 8.1$. Как уже упоминалось выше, землетрясение в районе архипелага Самоа произошло в сейсмически очень активном регионе и является не совсем обычным в статистическом плане событием. Несмотря на свою очень большую магнитуду, это землетрясение вместе с афтершоками не привело к резкому импульсу в уровне сейсмической активности в регионе. Это хорошо видно на рис. 16,7, демонстрирующем интенсивность сейсмического потока в 200-километровой окрестности эпицентра за период в 10 лет, предшествующих сильнейшему землетрясению, и три последующих года. И поэтому, хотя формально метод В.И. Кейлис-Борока [26] идентифицирует довольно большое количество афтершоков (все события в 200-километровой окрестности эпицентра, произошедшие в течение трех лет), большая часть этих событий, по-видимому, является сейсмическим фоном. График числа афтершоков в логарифмическом масштабе времени (см. рис. 14,7) перестает быть линейным уже через 2 недели после сильного землетрясения, и в дальнейшем достаточно хорошо аппроксимируется константой.

При систематическом исследовании мы находим, что в первые 100 дней афтершоковая последовательность землетрясения Самоа наилучшим образом приближается модифицированным законом Омори со второй афтершоковой последовательностью, начинающейся через 2 недели после основного толчка. При этом основная последовательность имеет очень большой параметр p , что говорит о быстром убывании числа афтершоков во времени, близком к экспоненциальному. Параметр p второй последовательности, наоборот, много меньше единицы, т.е. распределение числа афтершоков во времени приближается к стационарному уровню. Отметим, что при рассмотрении отдельно первого двухнедельного интервала оказывается, что он наилучшим образом приближается именно экспоненциальным законом убывания (программа Огата [29] не позволяет напрямую изучать последовательные по времени переходы одного закона убывания в другой). На интервале времени в три года после основного толчка наилучшим приближением оказывается модифицированный закон Омори с такой же второй афтершоковой последовательностью, что и в случае 100 дней, и с учетом сейсмического фона.

Интенсивность сейсмического потока в районе землетрясения Самоа очень высока. Ее среднее за предшествующие 10 лет значение составляет 0.138. Через 2 недели после сильнейшего землетрясения эта интенсивность опять приближается к стационарному уровню, среднее значение которого по трем годам почти в два раза выше предыдущего фонового.

8. О.Итуруп, 03.12.1995 г., $M = 8.0$. Итурупское землетрясение произошло практически в том же регионе, что сильнейшее Шикотанское, всего 14 мес. спустя. В его афтершоковой последовательности содержится большое количество землетрясений (см. табл.2), среди которых десять сильных событий с магнитудами 6.0 и выше. График числа афтершоков в логарифмическом масштабе времени довольно равномерный и может быть аппроксимирован несколькими прямыми. Наиболее сильный излом графика приходится на начало третьего месяца после основного толчка, когда сильнейший афтершок с магнитудой 7.2 произошел в 100 км северо-восточнее его эпицентра (см. рис. 14,8).

В оба исследуемых интервала времени наилучшим приближением данных оказывается модифицированный закон Омори. Третья афтершоковая последовательность при этом связывается с сильнейшим афтершоком, а вторая – с группой из двух афтершоков с магнитудами 6.4 и 6.3, произошедшей через неделю после основного толчка.

Данный регион характеризуется стабильным уровнем сейсмической активности во временных интервалах между сильными землетрясениями – порядка 0.10 событий в день. На рис. 16,8 отчетливо видны моменты Урупского (22.12.1991 г. с магнитудой 7.4) и Шикотанского (04.10.1994 г. с магнитудой 8.3) землетрясений, когда интенсивность сейсмического потока претерпевала временные скачкообразные изменения. Примерно через год после исследуемого нами землетрясения интенсивность опять приближается к своему предыдущему фоновому значению.

9. Новая Гвинея, 17.02.1996 г., $M = 8.2$. Это землетрясение произошло на границе между очень активным регионом о.Новая Гвинея и асейсмичной территорией Тихого океана, заняв, вместе со своими афтершоками, относительно спокойный участок сейсмического пояса. В непосредственной окрестности эпицентра (200 км) за 10 предшествующих лет произошло всего 50 землетрясений, в то время как в круге, используемом для прогноза алгоритмом M8 (радиусом 667 км вокруг эпицентра), интегральный уровень сейсмической активности очень велик. Афтершоковая последовательность Ново-Гвинейского землетрясения содержит большое количество событий (см. табл.2), второе по величине среди всех исследуемых нами сильнейших землетрясений после Шикотанского. Все пять сильных афтершоков с магнитудой 6.0 и выше произошли в первую неделю после основного толчка, причем четыре из них – в первые сутки. График числа афтершоков в логарифмическом масштабе времени (см. рис. 14,9) – очень гладкий, и сильные афтершоки не вызывают видимых возмущений.

В первые 100 дней изменение количества афтершоков во времени довольно хорошо приближается модифицированным законом Омори. Коэффициент p при этом получается больше единицы. В течение первых трех лет после основного толчка модифицированный закон Омори со второй афтершоковой последовательностью, связанной с землетрясением, которое произошло

через неделю после главного события и имело магнитуду 6.2, обеспечивает наилучшее приближение данных.

Уровень сейсмической активности за 10 лет, предшествующих землетрясению в Новой Гвинее, составляет 0.014 событий в день (см. рис.16,9). Через 200 дней после землетрясения интенсивность выходит на стационарный уровень, который более чем в четыре раза выше предшествующего фоновому. В начале 1998 г., т.е. почти через два года после основного толчка, уровень интенсивности опять снижается и выходит на новое стационарное значение, в 2.5 раза превышающее фоновое до 1996 г.

10. Море Баллени, 25.03.1998 г., $M = 8.3$. Землетрясение в море Баллени, как уже упоминалось выше, произошло (с точки зрения глобальной сети сейсмологических наблюдений) на абсолютно асейсмичной территории в 500 км от Антарктического побережья. В окрестности его эпицентра (200 км) не было зарегистрировано ни одного землетрясения, начиная с 1932 г. Тем не менее, землетрясение Баллени имеет достаточно много афтершоков (см. табл.2). Их количество в первые 100 дней сравнимо с количеством афтершоков таких землетрясений, как Мексиканское 1985 года, Маккуори 1989 года и Самоа 1995 года, большинство из которых произошло на гораздо более сейсмоактивных территориях (мы не можем пока назвать число афтершоков за три года, так как прошло еще меньше трех лет с момента сильнейшего землетрясения). Среди афтершоков есть два события с магнитудой, превышающей 6.0. Одно из них произошло через несколько часов после основного толчка в 100 км юго-западнее его эпицентра, а второе – почти два года спустя. График числа афтершоков в логарифмическом масштабе времени (см. рис.14,10) выглядит довольно гладко и не демонстрирует резких изменений параметров убывания числа событий во времени.

В первые 100 дней афтершоковая последовательность наилучшим образом приближается стандартным законом Омори с коэффициентом $p = 1$. За весь имеющийся в нашем распоряжении период времени после основного толчка (порядка 2.5 лет) наилучшим приближением данных оказывается модифицированный закон Омори со второй афтершоковой последовательностью, связанной с землетрясением, которое произошло через два года после главного события и имело магнитуду 6.1. Коэффициент p основной последовательности при этом остается почти неизменным.

Приблизительно через 140 дней после сильнейшего землетрясения уровень сейсмической активности в афтершоковой зоне становится близким к стационарному и равным 0.009 событий в день (см. рис.16,10).

11. О. Суматра, 04.06.2000 г., $M = 8.0$. К моменту написания этой работы со времени сильнейшего Суматринского землетрясения прошло всего несколько месяцев, поэтому сейчас мы можем говорить только о 100-дневной истории его афтершоковой последовательности. За этот период произошло очень большое количество афтершоков (см. табл.2), шесть из них имели магнитуду, превышающую 6.0. График числа афтершоков в логарифмическом масштабе времени (см. рис.14,11) ведет себя довольно стандартно, претерпевая наиболее существенный излом в момент сильнейшего афтершока. Это землетрясение имело магнитуду 6.7 и произошло через три дня после основного толчка практически в его эпицентре. Наилучшим приближением данных за первые 100 дней оказывается модифицированный закон Омори со второй афтершоковой последовательностью, связанной с сильнейшим афтершоком.

Мы не можем сделать надежный вывод об уровне сейсмической активности после этого землетрясения, так как имеем данные только о 100-дневном афтершоковом периоде (см. рис.16,11).

Таким образом видно, что хотя все исследуемые нами события имеют приблизительно одинаковую силу, их афтершоковые последовательности очень не похожи друг на друга. Они различаются как общим количеством афтершоков, так и скоростью убывания их числа во времени, а также своей продолжительностью. Внутри каждой отдельной последовательности часто наблюдаются резкие смены параметров убывания, причем, смены эти не всегда связаны с появлением в последовательности сильного события, сопровождающегося своими афтершоками. Обобщив данные изучения афтершоковых последовательностей 11 сильнейших землетрясений мира последнего времени, можно выделить следующие закономерности.

- Из всех исследованных нами законов убывания афтершоков [29], закон Омори (стандартный или его модификации, имеющие отличный от единицы параметр p и допускающие наличие афтершоков у афтершоков) является наилучшим приближением данных при систематическом подходе к этому вопросу, т.е. когда мы пытаемся найти закон убывания на заранее определенном интервале времени после основного толчка, одинаковом для всех исследуемых событий (100 дней и три года) из фиксированного списка законов убывания.

- В трех из 11 случаев стандартный закон Омори с параметром убывания p , равным единице, является наилучшим приближением данных в первые 100 дней после основного толчка. Так получается для афтершоков землетрясений 1985 года в Мексике, 1989 года на о-ве Маккуори и 1998 года в море Баллени. Заметим, что эти землетрясения произошли в трех наименее активных из изучаемых нами регионов. (Глубокое Боливийское землетрясение имеет всего пять афтершоков, но все они тоже хорошо "ложатся" на прямую стандартного закона Омори.) При исследовании всего 3-летнего интервала времени стандартный закон Омори ни разу не оказывается предпочтительнее модифицированного.

- В большинстве случаев наилучшим является модифицированный закон Омори, предполагающий наличие нескольких афтершоковых последовательностей. Вся афтершоковая последовательность при этом моделируется суперпозицией нескольких степенных законов с разными параметрами убывания. Для многих событий (о. Кермадек 1986 г., Курилы 1994 г. и 1995 г., Новая Гвинея 1996 г., море Баллени 1998 г. и о. Суматра 2000 г.) моменты перехода одного степенного закона в другой действительно совпадают с моментами сильнейших афтершоков. В других случаях (Мексика 1985 г., о. Маккуори 1989 г., о. Гуам 1993 г., о-ва Самоа 1995 г.) резкая смена режима афтершоковой последовательности происходит вне зависимости от наличия в ней сильных событий.

- При более детальном рассмотрении афтершоковых последовательностей обнаруживается, что в некоторых случаях экспоненциальный закон убывания событий во времени оказывается наилучшим приближением данных в первые дни после основного толчка. Так произошло при землетрясении 1989 года на о-ве Маккуори (первые 10 дней) и землетрясении 1995 года на о-вах Самоа (первые 2 недели). Таким образом, здесь наблюдается переход во времени экспоненциального закона убывания афтершоков в степенной.

- В некоторых афтершоковых последовательностях отмечается довольно резкий переход интенсивности событий на стационарный (или почти стационарный) уровень. В случае землетрясения 1989 года на о-ве Маккуори это произошло через 16 мес. после сильного события, для землетрясения 1993 года на о-ве Гуам – через 4 мес., а для землетрясения 1995 года на о-вах Самоа – через 2 недели.

- Эффективная продолжительность афтершоковых последовательностей (т.е. период, когда частота появления землетрясений в афтершоковой зоне еще не вернулась к стационарному значению) колеблется от двух недель (землетрясение 1995 года на о-вах Самоа) до двух лет (землетрясение 1996 года в Новой Гвинее). Причем вновь установившееся стационарное значение иногда бывает в несколько раз больше предыдущего фонового (см. табл. 2). Однако необходимо заметить, что мы делаем вывод об интенсивности землетрясений в период после сильного события, опираясь на информацию о 3-летнем периоде времени. Так что при рассмотрении более длительного интервала времени эти результаты могут быть другими.

6. Обсуждение результатов

Анализ сейсмической обстановки, сложившейся перед всеми 11 сильнейшими землетрясениями мира (с магнитудой 8.0 и выше) с 1985 г. до настоящего времени, подтверждает наличие предвестниковой активизации, проявляющейся в разных временных и пространственных масштабах. Такой среднесрочный обратный каскад разрывов малых размеров к основному разрыву по магистральному разлому, наблюдаемый в масштабе нескольких лет и на расстояниях, на порядок превышающих очаг готовящегося сильного землетрясения, заблаговременно идентифицируется алгоритмом прогноза М8. Наряду с этим, при подготовке землетрясения наблюдаются проявления локальной активизации в непосредственной близости от будущего

очага и в масштабе нескольких месяцев. Характерными примерами такой локальной активизации являются рои землетрясений, как было, например, за четыре месяца до землетрясения на о-вах Кермадек или за пять недель до Шикотанского землетрясения. В редких случаях процесс подготовки сильнейшего землетрясения сопровождается роем непосредственных форшоков в эпицентральной зоне будущего сильного события за несколько дней или часов до него. Такой форшоковый рой из 64 событий происходил в течение 10 дней перед сильнейшим Итурупским землетрясением. Последнее событие роя случилось за час до основного толчка.

К сожалению, такой сценарий активизации сейсмичности перед сильным землетрясением встречается редко. Обычно не удается пронаблюдать непосредственные предвестники надвигающегося основного толчка. В частности, наша попытка обнаружить степенной ускоренный рост накопленной деформации по Беньоффу, предшествующий сильнейшим землетрясениям, не увенчалась успехом. Тем не менее, опыт применения алгоритма MSc указывает на возможность эффективной локализации области тревоги вплоть до размеров порядка очага готовящегося события. Этот алгоритм на основе детального анализа подъема сейсмичности, обусловившего объявление тревоги по алгоритму M8, выделяет те места, которые характеризовались стабильно высоким уровнем активности, прерывавшимся кратковременными (1–2 мес.) периодами затишья. Время затишья составляет не более 10% от всего исследуемого временного интервала, что и обуславливает его аномальность. Заметим, что такое аномальное затишье не может быть выделено на малоактивной части территории тревоги. Таким образом, алгоритм MSc находит именно те места, которые отличались повышенной сейсмической активностью и приняли непосредственное участие в процессе подготовки сильного землетрясения.

Систематический анализ обстановки после главного толчка, т.е. афтершоковых последовательностей сильнейших землетрясений, свидетельствует о разнообразии сценариев прямого каскада от основного разрыва к стационарному потоку разрывов малых размеров. Пример афтершоковых последовательностей 11 сильнейших землетрясений показывает многочисленные несоответствия стандартному закону Омори. Часть данных демонстрирует экспоненциальное падение интенсивности афтершоков в первые несколько дней, которое затем сменяется степенным и, наконец, поток становится близким к стационарному. В других случаях, внутри отдельно взятой последовательности наблюдаются переключения убывания с одного степенного закона на другой. Причем, эти переключения не всегда связаны с появлением в последовательности сильного афтершока. Таким образом, согласно нашим наблюдениям, стандартный закон Омори не является адекватным приближением афтершоковой последовательности. Его использование при оценке вероятности повторных толчков (что, например, является официальной практикой Геологической Службы США) может приводить к ошибочным результатам.

Несмотря на близость по силе исследованных событий, выход региона на стационарный режим происходит через разные промежутки времени после основного толчка – от двух недель до двух лет. Вновь установившийся стационарный поток событий иногда значительно отличается от предшествующего сильному землетрясению. В половине случаев отмечено увеличение уровня сейсмической активности региона более, чем в два раза. Все это может служить проявлением сложного поведения системы разломов и блоков в критическом состоянии. Высвободившаяся энергия перераспределяется внутри системы, и афтершоки свидетельствуют о характере и интенсивности этого процесса в пространстве-времени. Возможно, сами сильные землетрясения являются скоротечными индикаторами перехода системы из одного равновесного состояния в другое. При этом локальные особенности геометрии блоков могут служить препятствием движению под воздействием тектонических сил и определять как характер таких переходов, так и активность системы разломов.

Таким образом, в динамике литосферы вероятно существует целый спектр стационарных состояний. При этом характерным поведением системы разломов и блоков является критическая перемежаемость режимов. Переход из одного стационарного состояния в другое может реализовываться через катастрофу – сильное землетрясение – или без нее. Это относится как к сейсмическому потоку в целом, так и к его составным частям – предвестниковой активизации и каскаду афтершоков.

В этой работе мы не сопоставляли систематически особенности сейсмического потока в предверии и после сильного землетрясения и их зависимость от региональной тектоники. На данном этапе исследования было бы преждевременно давать геофизическую интерпретацию отмеченных проявлений, и мы планируем вернуться к рассмотрению этих вопросов в дальнейшем. Однако уже сейчас очевидно, насколько многие модели сейсмического режима (в частности, модели афтершоков) переупрощены.

Авторы глубоко признательны академику В.И. Кейлис-Бороку за постоянную поддержку и плодотворные обсуждения на разных этапах выполнения работы. Авторы благодарны П.Н. Шебалину за высказанные замечания и предложения по улучшению содержания и текста статьи. Пакет программ Огаты для статистического анализа афтершоковых последовательностей помог в систематическом изучении сейсмичности после 11 сильнейших землетрясений мира.

Работа выполнена при частичной поддержке грантами NSF EAR 9804859, фонда J.S. McDonnell проект "Критические переходы в сложных системах" и финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект N 00-15-98507).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Keilis-Borok V.I.* The lithosphere of the Earth as a nonlinear system with implications for earthquake prediction // *Rev. Geophys.* 1990. Vol.28, N1. P.19–34.
2. Global Hypocenters Data Base, 2000. CD-ROM NEIC/USGS. Denver, CO. 1989 and its updates through January 2000.
3. *Keilis-Borok V. I., Malinovskaya L. N.* One regularity in the occurrence of strong earthquakes // *J. Geophys. Res.* 1964. Vol.69. P.3019–3024.
4. *Федотов С.А.* О сейсмическом цикле, возможности количественного районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // *Сейсмическое районирование СССР*. М.: Наука, 1968. С.121–150.
5. *Bufe C.G., Varnes D.J.* Predictive modeling of the seismic cycle of the greater San Francisco Bay region // *J. Geophys. Res.* 1993. Vol.98. P.9871–9883.
6. *Keilis-Borok V.I., Kossobokov V.G.* Preliminary activation of seismic flow: Algorithm M8 // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1990. Vol.61. P.73–83.
7. *Kossobokov V.G., Keilis-Borok V.I., Smith S.W.* Localization of intermediate-term earthquake prediction // *J. Geophys. Res.* 1990. Vol.95. P.19763–19772.
8. Special issue on the great Bolivian earthquake of 1994 // *Geophys. Res. Lett.* Vol.22. P.2231–2280.
9. *Wiens D.A., Wyssession M.E., Lawver L.* Recent oceanic intraplate earthquake in Balleny Sea was largest ever detected // *Trans. AGU*. 1998. Vol.79. P.353.
10. *Кейлис-Борок В.И., Кособоков В.Г.* Периоды повышенной вероятности возникновения сильнейших землетрясений мира // *Математические методы в сейсмологии и геодинимике*. М.: Наука, 1986. С.48–58. (Вычисл. сейсмология; Вып.19).
11. *Kossobokov V.G.* User Manual for M8. In Healy J.H., Keilis-Borok V.I., Lee W.H.K. (Eds), *Algorithms for earthquake statistics and prediction* // *IASPEI Software Library*. 1997. Vol.6. Seism. Soc. Amer. El Cerrito, CA.
12. *Kossobokov V.G., Healy J.H., Dewey J.W.* Testing an earthquake prediction algorithm // *PAGEOPH.* 1997. Vol.149. P.219–232.
13. *Kossobokov V.G., Romashkova L.L., Keilis-Borok V.I., Healy J.H.* Testing earthquake prediction algorithms: statistically significant advance prediction of the largest earthquakes in the Circum-Pacific, 1992–1997 // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1999. Vol.111. P.187–196.
14. *McNally K.C., Gonzalez-Ruiz J.R., Stolle C.* Seismogenesis of the 1985 great (Ms=8.1) Michoacan, Mexico earthquake // *Geoph. Res. Lett.* 1986. Vol.13. P.585–588.
15. *Sykes L.R., Jaume S.C.* Seismic activity on neighboring faults as a long-term precursor to large earthquakes in the San Francisco Bay area // *Nature*. 1990. Vol.348. P.595–599.
16. *Bakun W.* Seismic activity of the San Francisco Bay Region // *Bull. Seism. Soc. Amer.* 1999. Vol.89. P.764–784.
17. *Keilis-Borok V.I.* Intermediate-term earthquake prediction // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 1996. Vol.93. P.3748–3755.
18. *Кейлис-Борок В.И., Кособоков В.Г.* Комплекс долгосрочных предвестников для сильнейших землетрясений мира // *Землетрясения и предупреждение стихийных бедствий. 27-й Междунар. геол. конгр., 4-14 августа 1984 г., Москва*. М.: Наука, 1984. С.56–66. Коллоквиум С6; Т.61.

19. Аллен К., Кейлис-Борок В.И., Кузнецов И.В., Ротвайн И.М., Хаттен К. Долгосрочный прогноз землетрясений и автомодельность сейсмических предвестников // Достижения и проблемы современной геофизики. М.: ИФЗ АН СССР, 1984. С.152–165.
20. Keilis-Borok V.I., Rotwain I.M. Diagnosis of time of increased probability of strong earthquakes in different regions of the world: Algorithm CN // Phys. Earth Planet. Inter. 1990. Vol.61. P.57–72.
21. Bowman D.D., Ouillon G., Sammis C.G., Sornette A., Sornette D. An observational test of the critical earthquake concept // J. Geophys. Res. 1998. Vol.103. P.24359–24372.
22. Gabrielov A., Newman W.I., Turcotte D.L. An exactly soluble hierarchical clustering model: inverse cascades, self-similarity, and scaling // Phys. Rev. E. 1999. Vol.60. P.5293–5300.
23. Omori F. On the after-shocks of earthquakes // J. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo. 1894. Vol.7. P.111–200.
24. Utsu T., Ogata Y., Matsu'ura R.S. The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity // J. Phys. Earth. 1995. Vol.43. P.1–33.
25. Gardner J.K., Knopoff L. Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian? // Bull. Seism. Soc. Amer. 1974. Vol.64. P.1363–1367.
26. Keilis-Borok V.I., Knopoff L., Rotwain I.M. Bursts of aftershocks, long-term precursors of strong earthquakes // Nature. 1980. Vol.283. P.259–263.
27. Knopoff L., Kagan Y., Knopoff R. B-values for aftershocks in real and simulated earthquake sequences // Bull. Seism. Soc. Amer. 1982. Vol.72. P.1663–1675.
28. Molchan G.M., Dmitrieva O.E. Aftershock identification: methods and new approaches // Geophys. J. Inter. 1992. Vol.109. P.501–016.
29. Utsu T., Ogata Y. Statistical analysis of seismicity. In Healy J.H., Keilis-Borok V.I., Lee W.H.K. (Eds). Algorithms for earthquake statistics and prediction // IASPEI Software Library. 1997. Vol.6. Seism. Soc. Amer. El Cerrito, CA.
30. Kisslinger C. The stretched exponential function as an alternative model for aftershock decay rate // J. Geophys. Res. 1993. Vol.98. P.1913–1921.
31. Utsu T. A statistical study on the occurrence of aftershocks // Geophys. Mag. 1961. Vol.30. P.521–605.
32. Akaike H. A new look at the statistical model identification // IEEE. Trans. Autom. Contr. 1974. Vol.AC-19. P.716–723.