

## СИЛЬНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ЗЕМЛИ

Н.В. Шаторная

Каталог сильных землетрясений мира с  $MPSP$ ,  $MPLP$ ,  $MS \geq 6.0$  за 1999 г. [1] составлен по материалам ежедекадных оперативных сейсмологических каталогов и сейсмологических бюллетеней, выпускаемых в ЦОМЭ ГС РАН [2]. Географическое распределение гипоцентров сильных землетрясений показано на рис. 1. В основном оно соответствует известной мировой статистике наблюдаемых на земном шаре землетрясений.

Распределение сильных землетрясений мира в зависимости от их магнитуды приведено в табл. 1, где данные 1999 г. сравниваются с соответствующими значениями за десять предыдущих лет. Из табл. 1 видно, что в 1999 г. число землетрясений в интервале  $M=6-7$  составило 159, что близко к среднему ( $135 \pm 36$ ) за десять лет; но в диапазоне  $M=7-8$  оно равно 21, что заметно больше среднего ( $12 \pm 5$ ); землетрясений более сильных с  $M \geq 8$  не было уже пять лет, после 1994 г.

**Таблица 1.** Распределение числа землетрясений в различных интервалах магнитуд  $M$  ( $MPSP$ ,  $MPLP$ ,  $MS \geq 6.0$ ) за 1989–1999 гг.

Год	Число землетрясений в интервале $M$			Всего
	$6.0 \leq M < 7.0$	$7.0 \leq M < 8.0$	$M \geq 8.0$	
1989	92	6	1	98
1990	102	10	1	113
1991	84	9	–	93
1992	117	13	–	130
1993	97	7	–	104
1994	136	14	1	151
1995	242	28	–	270
1996	217	15	–	232
1997	151	5	–	156
1998	113	12	–	
Среднее за 10 лет	$135 \pm 36$	$12 \pm 5$	–	$147 \pm 43$
1999	159	21	–	180

Распределение суммарной сейсмической энергии, выделившейся в 1999 г. при сильных землетрясениях в различных сейсмических поясах, представлено в табл. 2.

**Таблица 2.** Распределение числа землетрясений и суммарной сейсмической энергии  $\Sigma E$  по сейсмическим поясам

Сейсмический пояс	Число землетрясений		$\Sigma E \cdot 10^{15}$ , Дж
	$6.0 \leq M < 7.0$	$M \geq 7.0$	
Тихоокеанский	155	19	283.66
Трансазиатский	17	2	11.80
Атлантический	2	–	0.02
Индийского океана	6	–	1.32
Восточно-Африканские грабены	1	–	0.01

Более 99.27% всей энергии выделилось в Тихоокеанском сейсмическом поясе, где произошло 18 сильнейших ( $M \geq 7.0$ ) землетрясений года, список которых дан в табл. 3 (включены все землетрясения, у которых хотя бы одна из трех магнитуд –  $MS$ ,  $MPLP$ ,  $MPSP$  – была на уровне 7.0 и выше). На другие сейсмические пояса приходится менее 0.73% суммарной энергии. Сейсмическая энергия рассчитана по формулам из [3]:

$$\lg E = 5.8 + 2.4 m_b,$$

$$\lg E = 11.8 + 1.5 M.$$

Здесь вместо  $m_b$  и  $M$  были использованы магнитуды  $MPSP$  и  $MS$  из [2].

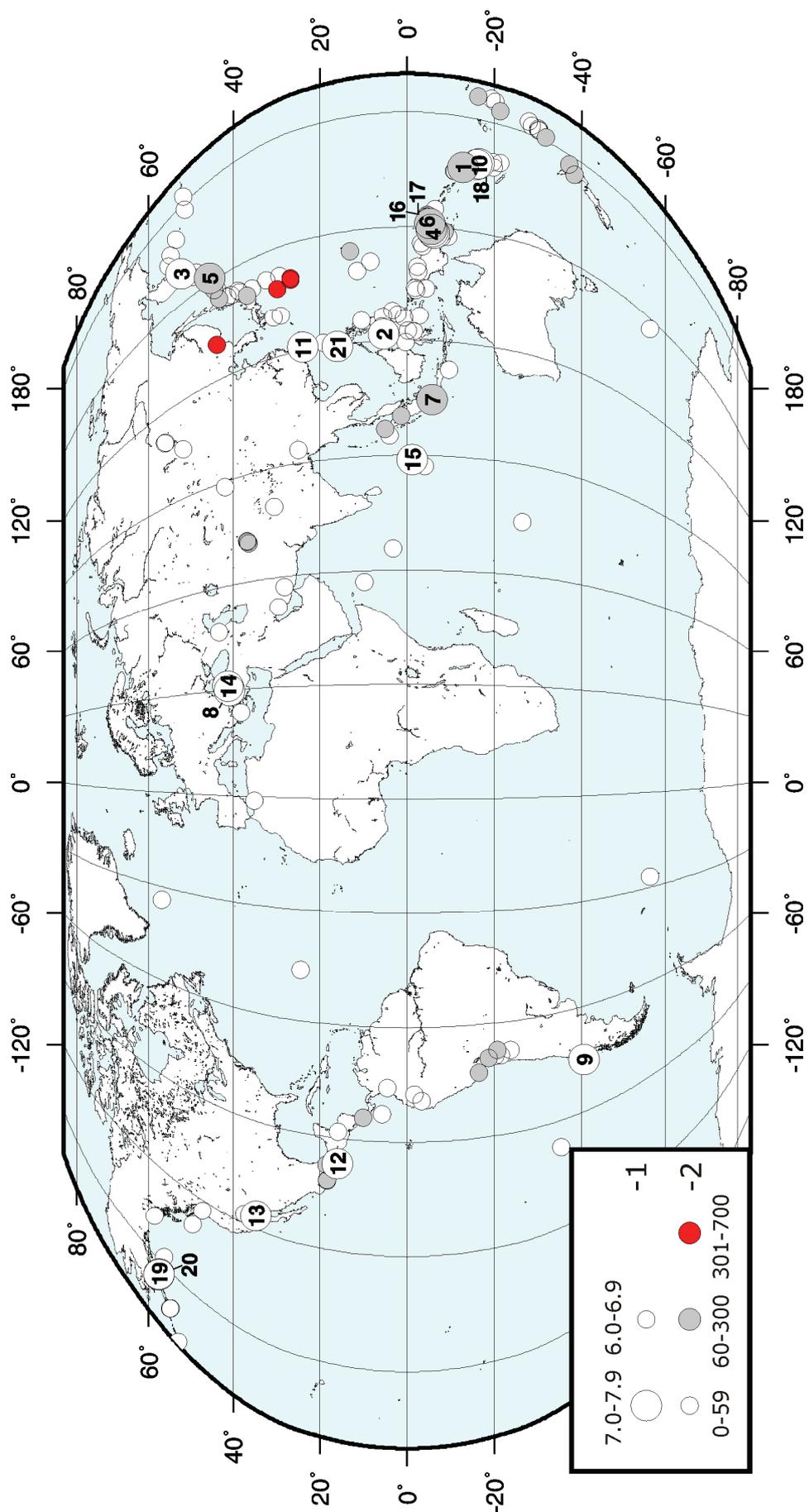


Рис. 1. Карта эпицентров сильных землетрясений мира с MPSL, MPLP, MS ≥ 6.0

1 – магнитуда; 2 – глубина *h* гипоцентра, км.

Таблица 3. Список наиболее сильных землетрясений Земли в 1999 г. по [1]

№	Дата, д м	$t_0$ , ч мин с	$\delta t_0$ , с	Эпицентр		$h$ , км	$n$ с/ст	$M_0$ (OBN), H·м	Магнитуды				Р а й о н
				$\varphi^\circ, N$	$\lambda^\circ, N$				$M_w$	$MS/n$	$MPLP/n$	$MPSP/n$	
1	06.02	21 48 01.9	1.37	12.81S	166.69E	110	99				7.3/6	6.6/17	Тихоокеанский пояс
2	04.03	08 52 02.0	1.09	5.48N	121.93E	33	110			6.4/40	7.2/19	6.7/37	Острова Санта-Крус
3	08.03	12 25 46.0	1.18	52.07N	159.37E	33	115	3.5E19	7.0	7.1/27	6.8/11	6.1/38	Море Сулавеси
4	05.04	11 08 03.4	1.08	5.53S	149.58E	141	141				7.0/9	6.3/11	У восточного побережья Камчатки
5	08.05	19 44 36.3	0.86	45.44N	151.62E	65	171				7.1/5	6.6/38	Район острова Новая Британия
6	10.05	20 33 03.0	0.96	5.11S	150.94E	142	157				7.0/4	6.5/17	Курильские острова
7	14.08	00 16 47.9	1.03	5.71S	104.63E	61	85				7.0/10	6.9/28	Район острова Новая Британия
8	17.08	00 01 37.4	1.25	40.85N	30.01E	10	186			7.5/20	7.2/7	6.4/18	Юг острова Суматра
9	22.08	09 35 39.7	1.09	40.60S	75.21W	33	109			6.2/21	7.0/4	6.5/27	Турция
10	22.08	12 40 46.2	0.98	15.98S	167.99E	33	115			6.2/27	7.0/11	6.3/26	У побережья Южного Чили
11	20.09	17 47 19.3	1.31	23.96N	121.00E	33	164	1.8E20	7.5	7.7/17	7.6/12	6.7/11	Острова Новые Гебриды
12	30.09	16 31 12.6	0.99	16.06N	96.82W	33	144			7.5/20		6.7/20	Остров Тайвань
13	16.10	09 46 46.4	1.24	34.64N	116.32W	10	101	3.0E19	7.0	7.5/25	6.6/9	6.5/23	Оахака, Мексика
14	12.11	16 57 21.2	1.30	41.15N	31.19E	10	156			7.2/29	7.3/5	6.5/41	Южная Калифорния
15	15.11	05 42 47.4	1.20	1.19S	88.93E	33	140	1.2E19	6.7	6.8/34	7.0/17	6.5/33	Турция
16	17.11	03 27 41.1	1.18	5.89S	148.88E	33	119			6.8/20	7.0/8	6.1/22	Индийский океан
17	19.11	13 56 47.0	1.08	6.26S	148.63E	33	106			6.7/19	7.0/6	6.1/17	Юг Индийского океана
18	26.11	13 21 16.2	1.47	16.42S	168.34E	33	131			7.2/26	7.2/7	6.3/12	Район острова Новая Британия
19	06.12	23 12 30.4	0.97	57.46N	154.58W	33	147			6.7/34	7.5/16	7.1/30	Район острова Новая Британия
20	07.12	00 19 48.9	1.05	57.40N	154.57W	33	149			6.1/26	7.0/12	6.9/42	Район острова Новая Британия
21	11.12	18 03 37.8	0.84	16.02N	119.70E	33	144			7.0/34	7.2/10	6.8/35	Район острова Новая Британия

Значения магнитуд  $MS$ ,  $MPLP$ ,  $MPSP$  землетрясений в [2] рассчитаны по максимальной скорости смещения  $(A/T)_{\max}$  в поверхностных и объемных волнах по соответствующим калибровочным кривым [4, 5].

Ниже приводится краткий обзор исследований, проведенных по сильным землетрясениям 1999 г. Значения их магнитуд ( $MS$ ,  $MPLP$ ,  $MPSP$ ) и  $t_0$  даны по [1, 2].

В [6] рассмотрены возможные причины разрушений при землетрясении 25 января в 18<sup>h</sup>19<sup>m</sup> в департаменте Киндио с  $MS=5.9$  ( $MPSP=6.2$ ) в Колумбии. Приводится карта распределения афтершоков.

В [7–9] анализируется геолого-тектоническая обстановка, в которой сформировался очаг сильного ( $MS=6.1$ ) Южно-Байкальского землетрясения, произошедшего 25 февраля в 18<sup>h</sup>58<sup>m</sup>. Определены механизмы очагов, координаты эпицентров форшоковой и афтершоковой последовательностей, напряженно-деформированное состояние среды, анализируется динамический процесс в очаге главного толчка. Подчеркивается, что эпицентр Южно-Байкальского землетрясения расположен в районе, который в 1994 г. был выделен как одно из мест возможного возникновения сильного землетрясения в пределах Южного Прибайкалья на период ожидания 15 лет. Сделана попытка установить связь землетрясений с разрывами земной коры, выявлены преимущественные направления активных разломов. Этому землетрясению посвящена отдельная ст. [10] в наст. сб.

Результаты регистрации подпочвенного радона на Петропавловск-Камчатском геодинимическом полигоне представлены в [11]. На основании анализа сезонных вариаций в динамике объемной активности радона перед сильным ( $MS=7.1$ ) землетрясением 8 марта в 03<sup>h</sup>12<sup>m</sup> выделены превышения объемной активности радона до 30% и длительностью 0.23 и 0.44 года. Эти превышения объемной активности радона, по-видимому, можно рассматривать как предвест-

никовые аномалии, что подтверждается еще рядом факторов. Развитие очагового процесса Камчатского землетрясения 8 марта происходило в близвертикальной фокальной плоскости, что позволяет отнести его к внутриплитовому типу. Разрыв длиной  $28.6 \pm 2.6$  км возник в течение  $13.4 \pm 0.2$  с вдоль разлома, движение по нему – почти чистый взброс. Очаг этого землетрясения состоял из двух субочагов: первый – с максимальным сдвигом 2.2 м на расстоянии 9 км от начала разрыва, второй – с максимальным сдвигом 0.6 м на расстоянии 22 км от начальной точки вспарывания [12].

Разрушительное землетрясение с  $MS=5.2$ , произошедшее в Чамоли (Индия) 29 марта в  $06^h17^m$ , было зарегистрировано Делийской акселерографической сетью. В [13] представлены очаговые параметры, рассчитанные по данным о сильных колебаниях на разных станциях: сейсмический момент –  $M_0=(6.94-12.4) \cdot 10^{18}$  Н·м, радиус очага по формуле Дж. Брюна – 1.98–2.96 км, падение напряжений – 2091–3984 бар, моментная магнитуда –  $M_w=6.53-6.69$ . Пиковые ускорения составили  $352.83$  см/с<sup>2</sup> в Гопешваре, вблизи эпицентра,  $11$  см/с<sup>2</sup> – в Дели, на расстоянии 300 км. Главный толчок возник в процессе надвига на участке пересечения разлома Алакананда с плоскостью разрыва на глубине 15 км, а афтершоки – в процессе сдвиговой «регулировки» на разломе Алакананда [14].

Остров Новая Британия расположен в южной части Тихого океана. Он характеризуется сложной тектоникой, обусловленной влиянием пяти крупных тектонических плит. Здесь произошло три сильных землетрясения: 5 апреля в  $11^h08^m$  с  $MPLP=7.0$ , 10 мая в  $20^h33^m$  с  $MPLP=7.0$  и 16 мая в  $00^h51^m$  с  $MPLP=6.7$ . Изучены механизмы очагов, наиболее вероятные глубины и временные функции в очагах. Землетрясение 5 апреля вызвано взбросом на глубине 150.8 км, землетрясение 10 мая – сбросом на глубине 139.0 км, а землетрясение 16 мая – взбросом на глубине 45.5 км. Различие механизмов очагов землетрясений 5 апреля и 10 мая, произошедших на промежуточной глубине, указывает на то, что оба землетрясения произошли в двойной сейсмической зоне субдуктирующей плиты Соломонова моря [15].

Эпицентр землетрясения с  $MS=6.7$ , произошедшего 15 июня в  $20^h42^m$  в Мексике, лежал в 20 км к северо-западу от Теуакана и в 55 км к северо-западу от г. Уахуапан-де-Леон. В [16] приводятся параметры очага землетрясения и несколько записей главного толчка. Полагают, что главный толчок состоял не менее чем из двух субтолчков. Землетрясение вызвало разрушения в деревнях эпицентральной зоны и в больших городах штата Пуэбла: Теуакан, Челуда, Атласко, Пуэбла. Разрушения есть и в штатах Тласкала, Герреро, Оахака, Веракрус и Морелос. В [17] приводятся акселерограммы, полученные на ближних станциях. Максимальные ускорения  $27.9$  см/с<sup>2</sup> зарегистрированы в г. Пуэбла. Описан характер разрушений исторических и жилых зданий, путепроводов и проч. Приводятся параметры оползня, сошедшего на склоне дороги Теуакан – Уахуапан-де-Леон. Анализируется влияние геологических условий. Погибли 17, ранены 197 человек.

С 7 по 13 сентября 1999 г. швейцарская комиссия по инженерной сейсмологии и строительной динамике обследовала зоны наиболее сильных разрушений при землетрясении с  $MS=7.5$ , произошедшего 17 августа в  $00^h01^m$  в Западной Турции с эпицентром в 90 км к юго-востоку от Стамбула. Сейсмический момент был равен  $1.4 \cdot 10^{20}$  Н·м. Горизонтальные сдвиги на поверхности грунта варьировали, по разным источникам [18, 19], от 2.7 до 4.2 м, вертикальные – до 2 м. Землетрясение получило название Измитского. Сильно разрушены города к востоку от Стамбула [18]. Погибли около 15 135, ранены около 23 984 человек, повреждены или разрушены полностью до 115 тыс. зданий, ущерб составил около 40 млрд. долларов [19]. Приводятся иллюстрации с примерами разрушений зданий, трубопроводов, портовых сооружений и линий жизнеобеспечения. Было разрушено много зданий. Пожар на нефтеперегонном заводе в Измите продолжался более двух суток. В [20] приведены карта зон разрушений, записи землетрясения, примеры разрушений жилых и промышленных зданий. Анализ результатов обследования показал, что главными причинами сильнейших разрушений были: 1) недостаточный учет местных грунтовых условий при строительстве; 2) эффект, вызванный излишней жесткостью первого этажа; 3) несоблюдение современных норм строительства; 4) неудовлетворительное качество строительных материалов. Необходимая для своевременного принятия инженерных решений быстрая оценка распределения разрушений в пространстве в результате сильного землетрясения требует знания «следа» сильных колебаний грунта во время землетрясения – зоны, где сильные колебания превышают определенную величину,

например 25%. Размеры этой зоны и ее положение, которые определяются с помощью сейсмических записей и по результатам обследований, зависят от длины и ориентации разрыва. Во время Измитского землетрясения «след» сильных колебаний грунта представлял собой прямоугольник размером  $100 \times 50 \text{ км}^2$  [21]. Выявлено существование протяженной линейной разломной зоны шириной  $\div 100 \text{ м}$ , прослеживающейся на  $\sim 70 \text{ км}$  от Гельджука до Акъязы, по которой, как предполагается, происходило образование крупного сдвигового разрыва [22]. В [23] приводятся иллюстрации разрушений нефтезавода, вызванные землетрясением. По результатам моделирования изменения напряженного состояния в северо-западной части Анатолии вследствие сильных землетрясений и анализа карт активных разломов еще до катастрофы 1999 г. было установлено, что в районе Измита может произойти сильное землетрясение. Моделирование [24], проведенное с учетом этого землетрясения, а также всех землетрясений с  $M > 6$ , произошедших после 1700 г., и данных GPS, показало, что следующее, не менее сильное, землетрясение может произойти в акватории Мраморного моря к югу от Стамбула. Сейсмическое отображение процесса разрыва Измитского землетрясения приведено в [25–27]. В [28] представлены результаты обследования макросейсмических проявлений Измитского землетрясения. Даны характеристики произошедших разрушений, анализируются причины разрушений. Построены карты изосейст. Максимальная интенсивность была 10 баллов по шкале MSK-64 [29], 10–11 баллов – по шкале ММ [30]. Рассмотрена корреляция между интенсивностью и амплитудой колебаний. Метод инверсии тензоров региональных моментов использован для анализа механизмов очагов 30 наиболее сильных афтершоков Измитского землетрясения [31]. Результаты согласуются с определениями механизмов по первым вступлениям продольных волн. Основной чертой всей последовательности землетрясений 1999 г. является преобладание сдвигов в очагах. Наибольшая афтершоковая активность отмечалась к западу и востоку от краев основного разрыва. Очаги «восточных» афтершоков вблизи г. Дюздже могут быть отнесены к раннему этапу подготовки землетрясения в Дюздже с  $MS=7.2$ , произошедшего 12 ноября в  $16^{\text{h}}57^{\text{m}}$  1999 г. Большинство очагов афтершоков в Мраморном море характеризуются правосторонними сдвигами, направление которых параллельно подводным ветвям Северо-Анатолийского разлома.

В [32] анализировались телесеismicкие записи объемных волн сильных землетрясений 1999 г. на участке Северо-Анатолийского разлома (на котором ранее наблюдалось сейсмическое затишье): 17 августа в Измите (Коджаэли) и 12 ноября в Дюздже ( $120 \text{ км}$  к востоку от Измита). Используются широкополосные записи Глобальной сейсмографической сети (GSN). Исследовались процессы разрывообразования, поверхностные разрывы и пространственно-временное распределение афтершоков. В обоих землетрясениях происходили подвижки по простирающему разлому. Землетрясение 12 ноября в Дюздже связано с участком Северо-Анатолийского разлома, примыкающим с востока к разрыву Измитского землетрясения. Величины смещений в 32 пунктах, измеренные с помощью GPS непосредственно до и после землетрясения 12 ноября, позволили оценить геометрию и распределение косейсмических смещений [33]. Оно характеризуется самым большим отношением смещения к длине разрыва, по сравнению с любыми землетрясениями на Северо-Анатолийском разломе. В [34, 35] предложена интерпретация геологических условий возникновения разрушительных землетрясений 17 августа и 12 ноября, исходя из закономерностей сейсмогенеза. Определены параметры очагов этих землетрясений и проанализировано их взаимоотношение с параметрами соседних крупных сейсмических очагов. Автодорожным исследовательским центром (г. Сакраменто, штат Калифорния, США) систематизированы данные ущерба проходящему по территории Турции участку дорожной сети и сооружениям от землетрясения 12 ноября. Жертвы среди населения г. Дюздже – 1000 погибших и 5000 пострадавших [36].

В [37] исследуется механизм очага землетрясения с  $MS=5.9$ , произошедшего 7 сентября в  $11^{\text{h}}56^{\text{m}}$  в Афинах (Греция), а также распределение смещений, связанных с этим землетрясением. При анализе использовался метод эмпирической функции Грина. Установлено, что значительная часть смещений ( $\sim 50\%$  от суммарной величины) приурочена к интервалу глубин, превышающему гипоцентральную, а часть ( $\sim 25\%$ ) – в близповерхностной области. В целом, так называемая «активизированная область» имеет площадь около  $100 \text{ км}^2$ . Показано, что наблюдаемое асимметричное распределение поверхностных смещений может быть связано с выявленной близповерхностной областью смещений. Сделан также вывод о распространении разрыва, связанного с данным землетрясением, в глубинную область.

В западных областях Тайваня за последние 289 лет (1711–1999 гг.) произошло 24 сильных землетрясения ( $M \sim 6.0-7.6$ ), которые унесли жизни  $\sim 10\,000$  человек и принесли убытки в несколько миллиардов долларов. К ним относится и разрушительное землетрясение 1999 г. с  $MS=6.6$ , произошедшее 20 сентября в  $21^{\text{h}}46^{\text{m}}$  в Цзици (погибли  $\sim 2300$  и ранены более  $10\,000$  человек) [38]. В [39] исследуется влияние геометрии разлома на протекание сейсмического процесса в зоне землетрясения 20 сентября. Различные особенности разрушений, вызванные катастрофическим землетрясением в Цзици, проявились в эпицентральной области не только на висячем, но и на лежащем крыле разлома Челунпу (на его северном и южном концах) [40]. В [41] приведено описание последствий разрушительного землетрясения по результатам обследования, проведенного группой экспертов EERI. Землетрясение произошло в результате подвиги по субмеридиональному разлому Челунпу, падающему на восток, который вскрылся на протяжении  $60\text{ км}$ . Подвижка имела преимущественно взбросовый характер с амплитудой вертикального смещения до  $8\text{ м}$  и подчиненной сдвиговой компонентой. Описан характер повреждений сооружений разных типов, в том числе зданий, мостов, плотин, систем жизнеобеспечения, а также социальные и экономические последствия. При землетрясении в Цзици получено большое число записей на свободной поверхности Земли. Проанализировано  $130$  записей [42], полученных в зоне в пределах  $55\text{ км}$  от разлома. Изучался характер скоростей, смещений и длительности колебаний. Оказалось, что на приразломные колебания сильное влияние оказывали расстояние от разлома, направленность вспарывания, локальные условия участка регистрации и др. Отмечено, что пиковые ускорения этого землетрясения не такие большие, как можно было бы ожидать, однако пиковые скорости и пиковые смещения были очень большими ( $292\text{ см/с}$  и  $867\text{ см}$  соответственно). В течение трех месяцев после землетрясения зарегистрированы постсейсмические смещения около  $14\text{ см}$  [43]. Исследования показали, что падение разлома выполаживается с глубиной и на глубине  $8-12\text{ км}$  превращается в почти горизонтальный срыв. Максимальная величина постсейсмического смещения составила  $25\text{ см}$  в гипоцентральной области на глубине  $7-12\text{ км}$ . Сложность разрыва во время землетрясения была выявлена по результатам инверсии данных GPS и обработки записей сильных колебаний. Смещения оказались сконцентрированными на поверхности блока клинообразной формы [44]. Сложность разрыва объясняет различие между простиранием плоскости разрыва, определенным по длиннопериодным сейсмическим записям, и явлениями на поверхности Земли. Привлечение других геофизических и геологических данных помогло восстановить уникальную картину тектонических деформаций с очень большими смещениями ( $>10\text{ м}$ ) массивного клинообразного блока земной коры. Полагают, что это связано с переходом от пологого надвига к поддвигу в зоне между Филиппинской и Евразийской плитами. Анализ последовательностей землетрясений в Цзици, включающих форшоки и афтершоки, позволил установить существование шести аномальных явлений, касающихся модели форшоков (1), сейсмического молчания перед главным толчком (2), других типов сейсмического затишья (3), сейсмических зон (4), роеподобной активности в афтершоковой области (5) и вторичных афтершоков (6) [45]. По результатам анализа разработан метод прогноза сильных мелкофокусных землетрясений на конвергирующей границе в западной части Тайваня. В [46] анализируется геометрия разлома и области афтершоков в Цзици. Результаты показывают, что очаговая область может рассматриваться как система сопряженных разломов, состоящая из полого падающего к востоку разлома Челунпу и круто падающего к западу другого более глубокого разлома. По спутниковым данным измерены величины косейсмических горизонтальных подвижек. Прорисована трасса разлома и выявлено вращение поверхностных смещений по часовой стрелке по направлению к северу с много большими смещениями и деформациями в висячем крыле [47]. Поверхностные косейсмические сдвиги составили  $5\text{--}16\text{ м}$  в эпицентральной зоне, увеличиваясь к северу до  $10-11\text{ м}$ .

При землетрясении 30 сентября в  $16^{\text{h}}31^{\text{m}}$  с  $MS=7.5$  в Оахаке (Мексика) произошли подвиги на плоскости разлома с простиранием  $295^\circ$ , падением  $50^\circ$ , наклоном  $83^\circ$ . Разрыв распространялся с востока–юго-востока на запад–северо-запад со средней скоростью  $3\text{ км/с}$  [48]. Сдвиги на разломе концентрировались в основном в двух областях с максимальным сдвигом  $2.5\text{ м}$  на расстояниях  $20$  и  $40\text{ км}$  от гипоцентра. Большая часть смещений произошла на глубинах  $45\text{ км}$ . Небольшая область с максимальным сдвигом  $1.5\text{ м}$  наблюдалась вблизи эпицентра. Общий сейсмический момент равен  $1.8 \cdot 10^{20}\text{ Н}\cdot\text{м}$ .

Эпицентр землетрясения, произошедшего 16 октября в 09<sup>h</sup>46<sup>m</sup> с  $MS=7.5$  в Южной Калифорнии, локализован в пустыне Мохаве [49]. В районе Хектор-Майн были незначительные разрушения и несколько человек были ранены. Случайно над районом была выполнена радиолокационная интерферометрическая съемка до (15 сентября) и после землетрясения (20 октября) [50]. Это позволило определить деформации земной поверхности в эпицентре на четвертый день после толчка. Изображения хорошего качества позволили определить смещения блоков пород вдоль основного разлома, которые составили более 7 м на расстоянии свыше 20 км. Полевые оценки смещения по геологическим данным и поверхностной морфологии рельефа оказались на 1–2 м меньше, чем по данным указанной съемки. Кроме того, градиенты интерферометрических фаз показали особенности смещений на соседних разломах, опускания местности на глубину до 30 мм и диаметром 1 км на южной окраине впадины Трой-Драй-Лейк. В [51] построены карты распределения трех ортогональных компонент поля косейсмических смещений при землетрясении в районе Хектор-Майн. Вертикальные и горизонтальные смещения большей частью асимметричны по отношению к плоскости разлома, что совпадает с расчетными упругими модулями линейных деформаций для разломов с подвижками по простиранию. Некоторые отклонения от симметрии в поверхностных смещениях могут быть следствием сложности геометрии разлома. В результате этого землетрясения появился новый поверхностный разрыв длиной 50 км [52]. По результатам интерпретации данных радарных исследований построены модель разрыва и поле смещений. Максимумы смещений (6.5 м) наблюдались на северном конце разлома и в центральной его части, где 3 м правостороннего сдвига относятся к поверхности, а 5.8 м – к глубине 8 км.

Сильное землетрясение произошло 6 декабря в 23<sup>h</sup>12<sup>m</sup> с  $MS=6.7$  на Аляске. Оно вызвало разрушения в Кадьяке. Эпицентр землетрясения [53] располагался к западу от области разрыва землетрясения 1964 г.

На Филиппинах 11 декабря в 18<sup>h</sup>03<sup>m</sup> произошло землетрясение с  $MS=7.0$ . Эпицентр находился в северной части г. Лингаен в пров. Пангасинан. Землетрясение ощущалось в Маниле и на большей части о. Лусон. Погибли 3 человека, ранены 24 человека [53].

#### Л и т е р а т у р а

1. **Шаторная Н.В. (отв. сост.).** Каталог сильных землетрясений Земли с магнитудой  $\geq 6.0$ . (См. раздел I (Обзор сейсмичности) в наст. сб.).
2. **Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 1999 год /** Отв. ред. О.Е. Старовойт. – Обнинск: ЦОМЭ ГС РАН, 1999–2000.
3. **Касахара К.** Механика землетрясений. – М.: Мир, 1985. – 264 с.
4. **Ванек И., Затопек А., Карник В. и др.** Стандартизация шкал магнитуд // Изв. АН СССР. Сер. геофизическая. – 1962. – № 2. – С. 153–158.
5. **Горбунова И.В., Шаторная Н.В.** О калибровочной кривой для определения магнитуды землетрясений по волнам *PKIKP* // Физика Земли. – 1976. – № 7. – С. 77–81.
6. **Землетрясение в департаменте Киндио, Колумбия, 25 января 1999 г.** [The Quindio, Colombia, Earthquake of January 25, 1999] // EIR Newslett. – 1999. – 33. – № 3. – С. 1–12.] ⇒ РЖ «Физика Земли». – 2000. – № 8 (реф. 76).
7. **Голенецкий С.И., Бержинская Л.П., Ордынская А.П., Бержинский Ю.А.** Макросейсмические проявления землетрясений 29.06.1995 г. и 25.02.1999 г. в городах Иркутске, Ангарске, Шелехове // Сейсмические опасность и воздействия (Тезисы Международной научной конференции, посвященной памяти профессора О.В.Павлова. Иркутск, 3–6 окт., 2000). – Новосибирск: Наука (СО РАН), 2000. – С. 38–40. // ⇒ РЖ «Физика Земли». – 2001. – № 12 (реф. 112).
8. **Ружич В.В., Семенов Р.М., Алакшин А.М., Чипизубов А.И., Аржанников С.Г., Смекалин О.П., Емельянова И.А., Демьянович М.Г., Радзиминович Н.А.** Южно-Байкальское землетрясение 25.02.1999 года и его последствия // Сейсмология в Сибири на рубеже тысячелетий (Материалы Международной геофизической конференции, Новосибирск, 27–29 сент., 2000). – Новосибирск: Наука (СО РАН), 2000. – С. 202–205 (рус. яз.), 373–376 (англ. яз.). // ⇒ РЖ «Физика Земли». – 2003. – № 9 (реф. 84).
9. **Мельникова В.И., Радзиминович Н.А., Гилёва Н.А., Саньков В.А., Деверше Д.** Напряженно-деформированное состояние Южно-Байкальской впадины и рой землетрясений 25.02.1999 г. // Сейсмология в Сибири на рубеже тысячелетий (Материалы Международной геофизической конференции,

- Новосибирск, 27–29 сент., 2000). – Новосибирск: СО РАН, 2000. – С. 157–159 (рус. яз.), 348–350 (англ. яз.) // ⇒РЖ «Физика Земли». – 2003. – № 8 (реф. 120).
10. **Радзиминович Н.А., Гилёва Н.А., Мельникова В.И., Масальский О.К., Радзиминович Я.Б., Ружич В.В., Бержинская Л.П., Ордынская А.П., Емельянова И.А., Смекалин О.П.** Южно-Байкальское землетрясение 25 февраля 1999 года с  $M_w=6.0$ ,  $I_0=8$  (Прибайкалье). (См. раздел II (Макросейсмические обследования) в наст. сб.)
  11. **Фирстов П.П., Рудаков В.П.** Результаты регистрации подпочвенного радона в 1997–2000 гг. на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне // Вулканология и сейсмология. – 2003. – № 1. – С. 26–41. // ⇒РЖ «Физика Земли». – 2003. – № 7 (реф. 107).
  12. **Краева Н.В.** Средние параметры сейсморазрыва Камчатского землетрясения 08.03.1999 ( $M=6.9$ ) // Проблемы геодинамики и прогноза землетрясений (Материалы 1-го Российско-Японского семинара. Хабаровск, 26–29 сент., 2000). – Хабаровск: Ин-т тектон. и геофиз. ДВО РАН, 2001. – С. 126–138 (рус. яз.), 276–277 (англ. яз.). // ⇒РЖ «Физика Земли». – 2003. – № 10 (реф. 85).
  13. **Pandey Y., Dharmaraju R., Chauhan P.K.S.** Определение очаговых параметров землетрясения в Чамоли, Индия [Estimation of source parameters of Chamoli earthquake, India // Proc. Indian Acad. Sci. Earth and Planet. – Sci. – 2001. – 110. – № 2. – С. 171–177.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2002. – № 4 (реф. 79).
  14. **Mukhopadhyay S., Kayal J.R.** Сейсмическая томография структуры очаговой области землетрясения 1999 г. в Чамоли в Гархвалских Гималаях (Индия) [Seismic tomography structure of the 1999 Chamoli source area in the Garhwal Himalaya // Bull. Seismol. Soc. Amer. – 2003. – 93. – № 4. – С. 1854–1861.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2004. – № 5 (реф. 54).
  15. **Анализ трех землетрясений 1999 г. на острове Новая Британия (Тихий океан)** [Analysis of three 1999 new Britain earthquakes (Park Sun Cheon) // Individ. Stud. Particip. Int. Inst. Seismol. and Earthquake Eng. – 1999. – 35. – С. 91–104.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2000. – № 11 (реф. 112).
  16. **Мигумо Такэру.** Землетрясение с  $M_w=6.8$ , произошедшее 15 июня 1999 г. в центральной части Мексики в результате внутриплитового сдвига // [Newslett. Seismol. Soc. Jap. – 1999. – 11. – № 3. – С. 4–8.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2000. – № 2 (реф. 103).
  17. **Ramirez Julio, Leader Team, Miller James.** Землетрясение 15 июня 1999 г. в Теуакане, Мексика [The Tehuacan, Mexico, earthquake of June 15, 1999 // EERI Newslett. – 1999. – 33. – № 9. – С. 1–8.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2002. – № 1 (реф. 114).
  18. **Землетрясение 1999 г. в Турции с магнитудой 7.4** [Earthquake strikes Turkey // EERI Newslett. – 1999. – 33. – № 9. – С. 1–3.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2002. – № 1 (реф. 104).
  19. **Землетрясение 17 августа 1999 г. в Измите (Коджаэли), Турция** [The Izmit (Kocaeli), Turkey earthquake of August 17, 1999 // EERI Newslett. – 1999. – 33. – № 10. – С. 1–12.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2000. – № 8 (реф. 72).
  20. **Землетрясение в Западной Турции 17 августа 1999 г.** [Erdbeben in der Westturkei vom 17, August 1999. // Schweiz. Ing. und Archit. – 1999. – 117. – № 43. – С. 4–10.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2000. – № 9 (реф. 107).
  21. **Housner G.W.** След землетрясения [The footprint of an earthquake // Earthquake Spectra. – 1999. – 15. – № 4. – С. 825.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2000. – № 11 (реф. 108).
  22. **Michel Remi, Avouac Jean-Philippe.** Деформации, связанные с землетрясением 17 августа 1999 г. в Измите, Турция, по данным съемок со спутника SPOT [Deformation due to the 17 August 1999 Izmit, Turkey, earthquake measured from SPOT images // J. Geophys. Res. B. – 2002. – 107. – № 4. – ET6 2/1–ET6 2/7, 3.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2003. – № 7 (реф. 68).
  23. **Suzuki Kohei.** Сообщения о разрушениях и повреждениях нефтеочистительного и нефтеперегонного завода землетрясением 1999 г. в Коджаэли, Турция // J. Jap. Soc. Eng. – 2000. – 103. – № 977. – С. 242–245.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2000. – № 9 (реф. 63).
  24. **Hubert-Ferrari Aurelia, Barka Aykut, Jacques Eric, Nalbant Suleyman S., Meyer Bertrand, Armijo Rolando, Tapponnier Paul, King Geoffrey C.P.** Сейсмическая опасность в районе Мраморного моря после Измитского землетрясения 17 августа 1999 г. (Турция) [Seismic hazard in the Marmara Sea region following the 17 August 1999 Izmit earthquake // Nature (Gr. Brit.). – 2000. – 404. – № 6775. – С. 269–273.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2000. – № 9 (реф. 140).
  25. **Bouchon Michel, Tokoz Nafi, Karabulut Hayrullan, Bouin Marie-Paule, Dietrich Michel, Aktar Mustafa, Edie Margaret.** Сейсмическое отображение процесса разрыва Измитского землетрясения 1999 г. (Турция) по сейсмическим записям, полученным вблизи разлома [Seismic imaging of the 1999 Izmit ( Turkey ) rupture inferred from the near-fault recording // Geophys. Res. Lett. – 2000. – 27. – № 18. – С. 301–3016.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2000. – № 9 (реф. 124).
  26. **Kiratzi Anastasia, Louvari Eleni.** Параметры очагов последовательности землетрясений 1999 г. в Турции (Измит-Болу), определенные по телесеизмическим данным [Source parameters of the Izmit-Bolu

- 1999 (Turkey) earthquake sequence from teleseismic data] // *Ann. geofis.* – 2001. – **44**. – № 1. – С. 33–47.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2001. – № 12 (реф. 109).
27. **Yagi Yuji, Kikuchi Masayuki.** Процесс разрыва в очаге землетрясения 17 августа 1999 г. в Коджаэли (Турция) по данным, полученным в ближней зоне и на телесеismicких расстояниях [Source rupture process of the Kocaeli, Turkey, earthquake of August 17, 1999, obtained by joint inversion of near-field data and teleseismic data // *Geophys. Res. Lett.* – 2000. – **27**. – № 13. – С. 1969–1972.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2001. – № 12 (реф. 134).
28. **Raschke Mathias.** Макросейсмический эффект землетрясений, произошедших 17 августа 1999 г. в Коджаэли/Измите (Турция) [Makroseismische Effekte des Kocaeli/Izmit (Turkey)-Erdbebens vom 17 August 1999 // *Thesis: Wiss. Z. Bauhaus-Univ. Weimar.* – 2001. – **47**. – № 1–2. – С. 170–179.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2002. – № 7 (реф. 79).
29. **Медведев С.В. (Москва), Шпонхойер В. (Иена), Карник В. (Прага).** Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. – М.: МГК АН СССР, 1965. – 11 с.
30. **Рихтер Ч.Ф.** Модифицированная шкала Меркалли, вариант 1956 г. // *Элементарная сейсмология.* – М.: ИЛ, 1963. – С. 131–132.
31. **Orgulu Gonca, Aktar Mustafa.** Инверсия тензоров региональных моментов для сильных афтершоков Измитского землетрясения ( $M_w=7.4$ ) 17 августа 1999 г. (Турция) [Regional Moment Tensor inversion for strong aftershocks of the August 17, 1999 Izmit earthquake ( $M_w=7.4$ ) // *Geophys. Res. Lett.*, 2001. – **28**. – № 2 – с. 371–374.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2002. – № 2 (реф. 80).
32. **Tibi R., Bock G., Xia Y., Baumbach M., Grosse H., Milkereit C., Karakisa S., Zunbul S., Kind R., Zschau J.** Процесс разрыва при землетрясениях 1999 г. 17 августа в Измите и 12 ноября в Дюздже (Турция). Rupture processes of the 1999 August 17 Izmit and November 12 Duzce (Turkey) earthquakes // *Geophys. J. Ins.* – 2001. – **144**. – № 2. – С. 1–5.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2001. – № 5 (реф. 63).
33. **Ayhan M.E., Burgmann R., McClusky S., Lenk O., Aktug B., Herece E., Reilinger R.E.** Кинематические характеристики землетрясения 12 ноября 1999 г. ( $M_w=7.2$ ) в Дюздже (Турция) [Kinematics of the  $M_w=7.2$ , 12 November 1999, Duzce, Turkey Earthquake // *Geophys. Res. Lett.* – 2001. – **28**. – №2. – С. 367–370] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2002. – № 2 (реф. 79).
34. **Балакина Л.М., Москвина А.Г.** Северо-Анатолийская сейсмогенная зона (САСЗ). II. Землетрясения 17.08 и 12.11.1999 г. в свете закономерностей сейсмических проявлений в западной части зоны // *Физика Земли.* – 2002. – № 8. – С. 29–49. // ⇒РЖ «Физика Земли». – 2003. – № 2 (реф. 162).
35. **Балакина Л.М., Москвина А.Г.** Северо-Анатолийская сейсмогенная зона (САСЗ). I. Закономерности сейсмических проявлений, обусловленные геологическими параметрами // *Физика Земли.* – 2002. – № 8. – С. 29–49. // ⇒РЖ «Физика Земли». – 2003. – № 2 (реф. 163).
36. **Ghasemi Hamid, Cooper James D., Imbsen Roy.** Ущерб дорожной сети и сооружениям от землетрясения 12 ноября 1999 г. в районе г. Дюздже (Турция) [The performance of the trans European Motorway structures during the Nov. 12, 1999 Duzce earthquake. 32 Joint Meeting of the US-Japan Cooperative Program in Natural Resources on Wind and Seismic Effects, Gaithersburg (Md), May 16–19, 2000 // *NIST Spec. Publ.* – 2001. – № 963. – С. 463–477.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2003. – № 4 (реф. 77).
37. **Roumelioti Z., Dreger D., Kiratzi A., Theodoulidis N.** Анализ распределения смещений, связанных с землетрясением 7 сентября 1999 г. в Афинах (Греция) с использованием эмпирической функции Грина [Slip distribution of the 7 September 1999 Athens earthquake inferred an empirical Green's function study // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* – 2003. – **93**. – № 2. – С. 775–782.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2004. – № 6 (реф. 55).
38. **Lewis Charles.** Распределение сильных землетрясений на западе Тайваня: 1711–1999 г. [Patterns of western Taiwan's worst earthquakes: 1711–1999 // *Геофиз. ж.* – 2001. – **23**. – № 3. – С. 83–89.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2002. – № 1 (реф. 188).
39. **Oglesby David D., Day Steven M.** Влияние геометрии разлома на землетрясение 1999 г. в Цицизи (Тайвань) [The effect of fault geometry on the 1999 Chi-Chi (Taiwan) earthquake // *Geophys. Res. Lett.* – 2001. – **28**. – № 9. – С. 1831–1284.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2002. – № 3 (реф. 144).
40. **Shieh Chiou-Fen, Sheu Shyh-Yang, Shih Ruey-Chyuan.** Корреляция поверхностных разрушений и косейсмических смещений и высвобождение напряжений при землетрясении 1999 г. в Цицизи, Тайвань [Correlation between surface damage and the coseismic displacement and stress relaxation of the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake // *Geophys. Res. Lett.* – 2001. – **28**. – № 17. – С. 3381–3384.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2002. – № 3 (реф. 145).
41. **Землетрясение в Цицизи на Тайване 21 сентября 1999 г.** [The Chi-Chi, Taiwan earthquake of September 21, 1999 // *EERI Newslett.* – 1999. – **33**. – № 12. – С. 1–12.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2002. – № 3 (реф. 66).
42. **Wang G.-Q., Zhou X.-Y., Zhang P.-Z., Igel H.** Характеристики амплитуды и длительности сильных колебаний от землетрясения 1999 г. в Цицизи, Тайвань [Characteristics of amplitude and duration for near

- fault strong ground motion from the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake // *Soil Dyn. and Earthquak Eng.* – 2002. – 22. – № 1. – С. 73–96.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2003. – № 7 (реф. 72).
43. **Hsu Ya-Ju, Bendor Noa, Segall Paul, Yu Shui-Beih, Kuo Long-Chen, Ma Kuo-Fong.** Быстрый постсейсмический сдвиг после землетрясения 1999 г. в Цзицзи, Тайвань. Rapid afterslip following the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake // *Geophys. Res. Lett.* – 2002. – 29. – № 16. – С. 1/1–1/4.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2003. – № 7 (реф. 71).
44. **Ji Chen, Helmberger Donald V., Song Teh-Ru Alex, Ma Kuo-Fong, Wald David J.** Распределение смещений и тектоническое объяснение землетрясения 1999 г. в Цзицзи на Тайване [Slip distribution and tectonic implication of the 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake // *Geophys. Res. Lett.* – 2001. – 28. – № 23. – С. 4379–4382.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2002. – № 3 (реф. 64).
45. **Cheng Kuei-hsiang, Chao Ru-jen.** Сейсмический прогноз на основе данных о сериях землетрясений в Цзицзи (Тайвань) [название статьи по англ. // *Earth Sci. Front.* – 2002. – 9. – № 2. – С. 493–498.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2002. – № 10 (реф. 78).
46. **Chen Kou-Cheng, Huang Bor-Shour, Wang Jeen-Hwa, Yen Horng-Yuan.** Разрывообразование на сопряженных разломах, связанное с последовательностью землетрясений 1999 г. в Цзицзи, Тайвань [Conjugate thrust faulting associated with the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake sequence // *Geophys. Res. Lett.* – 2002. – 29. – № 8. – С. 118/1–118/4.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2002. – № 3 (реф. 67).
47. **Domingues Stephane, Avouac Jean-Philippe, Michel Remi.** Горизонтальные coseismic деформации при землетрясении 1999 г. в Цзицзи по космоснимкам со спутника SPOT: значение для сейсмического цикла в западных предгорьях центральной части Тайваня [Horizontal coseismic deformation of the 1999 Chi-Chi earthquake measured from SPOT satellite images: implications for the seismic cycle along the western foothills of central Taiwan // *J. Geophys. Res. B.* – 2003. – 108. – № 2. – С. ESE8/1–ESE8/19.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2004. – № 4 (реф. 118).
48. **Hernandez B., Shapiro N.M., Singh S.K., Pacheco J.F., Cotton F., Campillo M., Iglesias A., Cruz V., Gomez J.M., Alcantara L.** Процесс разрыва внутриплитового землетрясения ( $M_w=7.5$ ), произошедшего 30 сентября 1999 г. в Оахаке, Мексика, с помощью инверсии данных о сильных колебаниях [Rupture history of September 30, 1999 intraplate earthquake of Oaxaca, Mexico ( $M_w=7.5$ ) from inversion of strong-motion data // *Geophys. Res. Lett.* – 2001. – 28. – № 2. – С. 363–366.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2002. – № 3 (реф. 138).
49. **Землетрясение 1999 г. с  $M=7.1$  в Южной Калифорнии (США)** [ $M=7.1$  earthquake hits Southern California // *EERI Newslett.* – 1999. – 33. – № 11. – С. 1.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2002. – № 1 (реф. 112).
50. **Sandweil David T., Sichoix Lydie, Agnew Duncan, Bock Yehuda, Minster Jean-Bernard.** Радиолокационные интерферометрические исследования землетрясения Хектор-Майн с  $M_w=7.1$  в квазиреальном масштабе времени [Near realtime radar interferometry of the  $M_w=7.1$  Hector Mine Earthquake // *Geophys. Res. Lett.* – 2000. – 27. – № 19. – С. 3101–3104.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2002. – № 8 (реф. 71).
51. **Fialko Yuri, Simons Mark, Agnew Duncan.** Полное (трехмерное) поле поверхностных смещений в эпицентральной области землетрясения 1999 г. с  $M=7.1$  в районе Хектор-Майн, Калифорния (США) из пространственных геодезических наблюдений [The complete (3-D) surface displacement field in the epicentral area of the 1999  $M_w=7.1$  Hector Mine earthquake, California, from space geodetic observations // *Geophys. Res. Lett.* – 2001. – 28. – № 16. – С. 3063–3066.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2002. – № 1 (реф. 134).
52. **Peltzer Gilles, Crampe Frederic, Rosen Paul.** Землетрясение с  $M_w=7.1$  в районе Хектор-Майн, Калифорния (США): поверхностный разрыв, поле поверхностных смещений, распределение смещений на разломе по данным ERS SAR [The  $M_w=7.1$ , Hector Mine, California earthquake: surface rupture, surface displacement field, and fault slip solution from ERS SAR data // *Conference-debat «Failles et seismes».* Paris: 20 mars, 2000.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2002. – № 3 (реф. 85).
53. **Сильные землетрясения на Аляске и Филиппинах** [Large earthquakes hit Alaska and Philippines // *EERI Newslett.* – 2000. – 34. – № 1. – С. 1.] ⇒РЖ «Физика Земли». – 2000. – № 2 (реф. 75).