

**СИЛЬНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ЗЕМЛИ (обозрение РЖ)****Н.В. Болдырева**Геофизическая служба РАН, г. Обнинск, [ninabol@gsras.ru](mailto:ninabol@gsras.ru)

Список сильных землетрясений мира с  $MPSP$ ,  $MPLP$ ,  $MS \geq 7.0$  за 2001 г. дан в табл. 1, а их географическое распределение показано на рис. 5 в статье [1] наст. сб.

**Таблица 1.** Список наиболее сильных землетрясений Земли в 2001 г. по [2]

№	Дата, д м ч мин с	$t_0$ , с	$\delta t_0$ , с	Эпицентр		$h$ , км	$n$ с/ст	$M_0$ (OBN), Н·м	Магнитуды				Р а й о н
				$\varphi^\circ, N$	$\lambda^\circ, N$				$M_w$	$MS/n$	$MPLP/n$	$MPSP/n$	
1	01.01	065704.7	0.96	7.04N	126.56E	33	86			6.9/26	7.1/22	6.9/28	Минданао, Филиппины
2	09.01	164930.6	1.14	14.60S	167.14E	115	134				7.0/4	6.6/16	Вануату (Новые Гебриды)
3	10.01	160242.2	1.23	56.92N	153.68W	27	188	4.7E19	7.0	7.0/25	7.0/17	6.7/28	Район острова Кадьяк, Аляска
4	13.01	173327.8	1.13	12.65N	88.85W	33	103			7.9/17	7.6/4	6.8/12	У побережья Центральной Америки
5	26.01	031642.3	1.21	23.38N	70.29E	33	91			7.8/16	7.8/13	7.2/28	Индия
6	13.02	192829.1	1.48	4.79S	102.54E	33	146	1.2E20	7.4	7.0/38	6.9/18	6.5/19	Южная Суматра, Индонезия
7	24.02	072348.4	0.93	1.41N	126.29E	33	162	9.2E19	7.3	6.9/41	7.3/17	6.8/36	Молуккский пролив
8	23.06	203312.4	2.47	16.36S	73.77W	23	100			8.3/24		6.3/17	Побережье Перу
9	26.06	041833.7	1.33	17.77S	71.37W	33	87			7.0/26		6.0/21	Побережье Перу
10	07.07	093844.9	1.21	17.41S	72.07W	33	123			7.6/24	7.7/6	6.1/15	Побережье Перу
11	21.08	065207.4	0.85	36.67S	179.93W	33	164			7.0/16	6.8/4	6.4/15	Восточнее Северного острова, Новая Зеландия
12	09.10	235337.3	1.07	47.81N	155.01E	36	138			5.8/41	7.1/8	6.3/55	Район Курильских островов, Россия
13	12.10	150217.1	0.95	12.93N	144.97E	33	149	6.9E19	7.2	7.2/38	7.2/13	6.9/36	Южнее Марианских островов
14	19.10	032845.0	1.46	4.02S	123.92E	33	130	4.3E19	7.1	7.1/20	7.1/12	6.4/20	Море Банда
15	14.11	092609.9	0.96	35.89N	90.58E	10	109	1.9E19	6.8	7.5/25	6.8/12	6.2/43	Провинция Цинхай, Китай
16	18.12	040301.5	1.22	24.15N	122.78E	33	148	2.0E19	6.8	7.3/44	7.0/9	6.3/49	Район Тайваня
17	23.12	225257.5	0.93	9.48S	159.38E	33	181			6.9/70	7.1/7	6.2/41	Соломоновы острова

Для этих землетрясений ниже дан краткий обзор публикаций в реферативных журналах «Геофизика».

1 января в 06<sup>h</sup>57<sup>m</sup> с  $MS=6.9$  произошло землетрясение в районе Минданао, Филиппины. Землетрясение зарегистрировано 703 мировыми сейсмическими станциями, локализовано на глубине  $h^*=31$  км по фазе  $pP$ . Оно характеризуется моментной магнитудой  $M_w=7.5$  по HRVD и  $M_w=7.4$  по NEIC [3]. Соответствующие значения сейсмических моментов равны:  $M_0=1.7 \cdot 10^{20}$  Н·м и  $M_0=1.5 \cdot 10^{20}$  Н·м.

Землетрясение в районе Вануату (Новые Гебриды) возникло 9 января в 16<sup>h</sup>49<sup>m</sup> с  $MPLP=7.0$ ,  $h^*=114$  км и записано 793 мировыми станциями. Значение его моментной магнитудой получено по HRVD ( $M_w=7.0$ ) и NEIC ( $M_w=7.1$ ) [3]. Соответствующие значения сейсмических моментов равны:  $M_0=4.2 \cdot 10^{19}$  Н·м и  $M_0=5.2 \cdot 10^{19}$  Н·м.

Землетрясение 10 января в 16<sup>h</sup>02<sup>m</sup> с  $MS=7.0$  зарегистрировано 898 станциями и локализовано в районе о. Кадьяк на глубине  $h^*=32$  км по фазе  $pP$ . Величины моментной магнитуды по определениям HRVD и NEIC, соответственно, равны 7.0 и 6.8, а сейсмические моменты –  $3.3 \cdot 10^{19}$  Н·м и  $1.7 \cdot 10^{19}$  Н·м [3].

13 января в 17<sup>h</sup>33<sup>m</sup> у побережья Центральной Америки в Сальвадоре произошло сильное ( $MS=7.9$ ) разрушительное землетрясение. В [4] приведены параметры гипоцентра землетрясения и механизма его очага. Землетрясение было зарегистрировано сетью акселерометров. Построены спектры реакций. Выполнен анализ разрушений сооружений и макросейсмических проявлений на поверхности. Погибли 827 человек, остались без крыши над головой ~100 000 человек [5]. Отмечались поверхностные разрывы, разжижение и проседание грунтов, «вскипание» песка, а также крупные оползни. Даны характеристики наиболее крупных сейсмогенных оползней на склонах гор Бальсамо, в частности, в Лас-Колинасе. Приводится график зависимости между углом наклона склона и объемом оползня. Описаны разрушения речных дамб и мостовых ферм. Приводятся карта изосейст, распределение максимальных горизонтальных ускорений, акселерограммы, полученные на сейсмической станции в Санта-Текле, в 86 км от эпицентра, где сошел огромный оползень. Максимальные горизонтальные ускорения, равные 0.89 g (N-S) и 0.54 g, (E-W), зарегистрированы на аллювиальных отложениях на южном побережье вблизи Ла-Либертад. По данным спутниковых наблюдений (спутники серии SPOT), была обеспечена пересылка картографической информации, а также спутниковых изображений в спасательные службы, органы местной власти и гуманитарные организации [6]. Поступление информации (в том числе в Internet) обеспечивалось в масштабе реального времени, пространственное разрешение карт составляло  $\sim 10 \times 10 \text{ м}^2$ . Сильнейшие афтершоки зарегистрированы 18 января с  $MS=4.6$ , 13 февраля с  $MS=5.7$  (погибли 283 человека) и 18 февраля с  $MS=5.3$ . В [7] анализируются телесеismicческие региональные и локальные данные. Построена кинематическая модель очага землетрясения, для этого одновременно инвертировались волновые формы смещений (волны  $P$  и  $S$ ), и по данным о поверхностных волнах получены временные очаговые функции, для чего использовались эмпирические функции Грина. Разрыв распространялся в основном вверх по падению и к северо-западу, площадь района разрывных нарушений момента –  $25 \times 50 \text{ км}^2$ , среднее смещение –  $\sim 3.5 \text{ м}$ . Большой сдвиг произошел в межплитовой зоне, на участке значительного увеличения крутизны слоя. Это землетрясение связывают с изгибом субдуктирующей плиты.

Сильное землетрясение с  $MS=7.8$  произошло 26 января в 03<sup>h</sup>16<sup>m</sup> в области Качх шт. Гуджарат, Индия. Погибло более 20 000 человек, ранено более 167 000 человек [8]. Ущерб составил более 5 млрд долларов США. Землетрясение ощущалось в Калькутте (1900 км к востоку). Было разрушено несколько городов и крупных деревень, причем разрушились и современные высотные железобетонные здания (даже на расстоянии  $>340 \text{ км}$  к юго-востоку от Бхуджа). Дана характеристика тектонике области Качх. Приведены параметры очага: глубина очага – 17–22 км, простирание разрыва –  $60^\circ$  северо-восток, падение –  $60\text{--}70^\circ$  к югу, направление смещения  $62^\circ$ ,  $M_0=6.2 \cdot 10^{21} \text{ Н}\cdot\text{м}$ . Элементы механизма очага хорошо согласуются с данными, полученными в Гарвардском сейсмологическом центре (для нодальной плоскости  $NP2$  отмечается северо-восточное простирание –  $STK=60^\circ$ , падение плоскости под углом  $DP=64^\circ$  в южном направлении, угол скольжения  $SLIP=60^\circ$ ). Тип движения – взброс с компонентами сдвига [1]. Максимальное смещение на глубине составило 8–9 м, поднятие – 2 м (15 км к западу от эпицентра). Произошел взброс с небольшой компонентой правостороннего сдвига. Сильные колебания продолжались 85 с, менее сильные – несколько минут. Многие свидетельствуют о двух отдельных толчках, что может быть связано со вступлением волн  $P$  и  $S$ . Ближайшая к эпицентру (225 км) запись сильных колебаний получена в Ахмадабаде, где зарегистрированы пиковые ускорения 0.16 g. Усиление колебаний здесь могло быть обусловлено впадиной. Приводится карта изосейст. Разрыв вышел на поверхность, повсеместно происходило разжижение грунтов, отмечены обвалы на крутых склонах. Получили повреждения  $\sim 300\,000$  домов, разрушено более 700 000 домов. Анализируются причины и характер разрушений домов, мостов, портовых и других сооружений. Сейсмическая активность связана с системой грабено-горстовых структур, ограниченных молодыми разломами [10]. Процесс вспарывания разрыва при землетрясении анализировался посредством инверсии телесеismicческих широкополосных записей объемных волн [11]. Сброс статического давления составил  $\sim 20 \text{ МПа}$ . По-видимому, разрушения вблизи эпицентра были вызваны аномальными высокочастотными колебаниями земли. По телесеismicическим данным, в неглубокой части разлома Бхудж выделяется вторая область больших смещений. Так как к западу и к северо-западу от разрыва отмечалась высокая интенсивность сотрясений, полагают, что основная часть смещений произошла в его верхней 10-км части. Это подтверждают результаты сопоставления смоделированных и зарегистрированных колебаний. Верхняя часть разреза в окрестности разлома Бхудж представлена неконсолированными слабо жесткими осадками и аллювием.

Верхняя 10-км часть разлома Бхудж находится в относительно стабильном регионе, который нормально деформируется в процессе асейсмического крипа, в нем может произойти сейсмический разрыв только при возникновении динамического напряжения. Полагают, что глубинная шероховатость может быть связана с литологической аномалией ультрамафического состава. В [12] анализируется распределение сейсмических скоростей  $v_p$  и  $v_s$ , а также коэффициент Пуассона в области землетрясения. Главный толчок произошел в области, характеризующейся высокими значениями  $v_p$ , низкими  $v_s$  и высокими значениями коэффициента Пуассона в интервале глубин 20–30 км и размерами по горизонтали 15–30 км. Структура может быть связана с заполнением флюидами объема трещиноватых пород, что и могло облегчить возникновение землетрясения. Произошел взброс по крутопадающей плоскости разрыва, предположительно являющегося западным продолжением северного граничного разлома поднятия Вагад [8, 13]. В области  $40 \times 20 \text{ км}^2$  наблюдались интенсивные деформации: разрывы поверхности земли, поднятия (до ~1 м у Будхарморы, протяженностью 300 м), проседание земли (Чобари и Амарсар), широкие и глубокие трещины (в основном широтного направления, а в Манфаре – меридиональные), 5-км разрыв северо-северо-западного направления между пунктами Манфара и Кхарой. Первичные и вторичные поверхностные деформации указывают, что происходил надвиг на широтном разломе вблизи западного продолжения Южно-Вагадского разлома, являющегося ветвью континентального разлома Качч [14]. Приводятся результаты полевых двухнедельных обследований в мае 2001 г., привлекались данные GPS. Описывается уступ надвига длиной 800 м и высотой 15–35 см широтного простирания. Анализировались породы уступа. Вторичные косейсмические явления, в основном разжижение грунтов и растрескивание поверхности земли, преобладали к югу от надвига. В [9] анализируются записи группы из семи портативных сейсмографов, регистрировавших афтершоки. Область афтершоков падает к югу под углом  $50^\circ$ , ее связывают с плоскостью разрыва главного толчка. Глубины очагов афтершоков – от 10 до 35 км, площадь области афтершоков составляет  $1260\text{--}1960 \text{ км}^2$ , что мало для землетрясения с  $MS=7.8$ . Анализ распределения афтершоков позволил выявить скрытый разлом широтного простирания с падением  $\sim 45^\circ$ , протягивающийся на глубину от 10 км до  $\sim 45 \text{ км}$  [15]. Сейсмическая зона включает коровый блок с размерами более  $60 \times 40 \times 35 \text{ км}^3$ . Верхний 6-км слой – это низкоскоростная зона юрских и более молодых отложений. Интервал 6–42 км характеризуется скоростями  $v_p=6.31\text{--}6.98 \text{ км/с}$ ,  $v_s=3.64\text{--}4.05 \text{ км/с}$  и  $v_p/v_s=1.69\text{--}1.81$ . Высокие скорости могут быть связаны с присутствием основных, интрузивных или рифтовых структур. В пределах этой хрупкой высокоскоростной зоны под воздействием сжимающих напряжений могли накопиться локальные напряжения. Далее, в интервале глубин 20.5–30 км, расположен слой с  $v=6.98 \text{ км/с}$ ,  $v_s=3.854 \text{ км/с}$  и  $v_p/v_s=1.81$ , разбитый системой трещин и разломов и насыщенный флюидами. Именно с этим слоем было связано более 47% афтершоков, и здесь произошло образование главного разрыва землетрясения. В [16] приводятся результаты статистического анализа записей афтершоков с  $MS=3.0\text{--}5.7$ , полученных сейсмической обсерваторией в Вадодаре до 31 марта 2001 г. За этот период высвободилась сейсмическая энергия  $8.2 \cdot 10^{14} \text{ Дж}$ . Отсутствие форшоков для такого сильного главного толчка в этой тектонической системе является аномальным явлением. Получены следующие величины: наклон графика повторяемости Гуттенберга-Рихтера  $b=0.86$ ,  $\Delta M_a=M_0-M_i=1.2$ ,  $M_i/M_0=0.89$ .

13 февраля в  $19^{\text{h}}28^{\text{m}}$  с  $MS=7.0$  произошло землетрясение в районе Южной Суматры. Оно зарегистрировано 770 мировыми станциями, локализовано на глубине  $h^*=34 \pm 1.7 \text{ км}$  по фазе  $pP$ . Его моментная магнитуда равна  $M_w=7.4$  по HRVD и  $M_w=7.2$  по NEIC [5]. Значение сейсмического момента равно  $M_0=6.5 \cdot 10^{19} \text{ Н}\cdot\text{м}$  по NEIC.

24 февраля в  $07^{\text{h}}23^{\text{m}}$  с  $MS=6.9$ ,  $MPLP=7.3$  возникло землетрясение в районе Молуккского пролива, записанное 824 сейсмическими станциями. Глубина очага равна  $h^*=55 \pm 2.0 \text{ км}$  по фазе  $pP$ . Оно характеризуется моментной магнитудой  $M_w=7.1$  по HRVD и  $M_w=7.1$  по NEIC [5]. Соответствующие значения сейсмических моментов равны  $M_0=4.5 \cdot 10^{19} \text{ Н}\cdot\text{м}$  и  $M_0=4.5 \cdot 10^{19} \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

Сильное ( $MS=8.3$ ) разрушительное землетрясение произошло 23 июня в  $20^{\text{h}}33^{\text{m}}$  у южного побережья Перу. Его эпицентр находился в 175 км от Арекипы и 595 км к юго-востоку от Лимы [17]. 102 человека погибли и 1368 ранены. Наблюдались обширные разрушения в Арекипе, Камане, Мокегуа и Такие. Человеческие жертвы были также в результате цунами, последовавшего за землетрясением. Землетрясение произошло на границе плит Южно-Американской и Наска, проходящей вдоль южной части побережья Центрального Перу, где в течение многих веков происходят сильнейшие землетрясения [18]. Землетрясение сопровождалось сильными

афтершоками, включая афтершоки 26 июня с  $MS=7.0$  и 7 июля с  $MS=7.6$  [19]. Субдукционное землетрясение имело площадь разрыва  $320 \times 100 \text{ км}^2$ . Моделирование с использованием широкополосных записей  $P$ -волн показало, что сейсмический момент высвобождался двумя импульсами, причем второй импульс был больше, чем первый, и произошел в  $130 \text{ км}$  к юго-востоку, т.е. разрыв распространялся в юго-восточном направлении. Наблюдения GPS в течение двух часов в Арекипе (Перу) обнаружили предвестниковые деформации, начавшиеся за 18 часов до афтершока 7 июля с  $MS=7.6$  [20]. Деформации проявились на северных и восточных компонентах, как медленные смещения с амплитудой в два раза больше, чем у косейсмической деформации. Полагают, что предсейсмические деформации образовались перед сейсмогенным разрывообразованием на границе плит Наска и Южно-Американской, где происходил медленный сдвиг, который привел к образованию афтершока с  $MS=7.6$ . По данным Перуанского института геофизики, эпицентр лежал в море у побережья в районе Чалы [21]. Землетрясение связывают с разломом, разделяющим океаническую и континентальную плиты. Описаны макросейсмические эффекты землетрясения. Эмпирическая функция Грина является удобным средством для восстановления свойств очага, но при ее применении возникает проблема с нестабильностью деконволюции [22]. Удалось определить длину разлома ( $180 \text{ км}$ ). Землетрясение вызвало интенсивные разрушения на поверхности: оползни, глубокое растрескивание поверхности, микрорастрескивание пород на склонах, разрушение дренажных насыпей вследствие растяжения, распространение склоновых борозд, удлинение русел притоков первого порядка [23]. Для объемного описания всего множества поверхностных эффектов вводят термин «раздробленный ландшафт». Долговременное последствие этого раздробления ландшафта заключается в увеличении массопереноса воды и пород при ливнях после землетрясения. Большое количество атмосферных осадков в районе этой пустыни исторически связывают с Эль-Ниньо. Исследования отложений палеонаводнений в этом районе показали, что они являются следствием сильных ливней, которые были вызваны Эль-Ниньо и падали на сейсмически раздробленную поверхность пустыни. В [24] показано, что разрыв Перуанского землетрясения распространился на  $\sim 70 \text{ км}$ .

У побережья Перу 26 июня в  $04^{\text{h}}18^{\text{m}}$  и 7 июля в  $09^{\text{h}}38^{\text{m}}$  произошли два сильных ( $MS=7.0$  и  $7.6$ ) землетрясения с близкими очагами:  $\varphi_1=17.83^\circ\text{S}$ ,  $\lambda_1=71.63^\circ\text{W}$ ,  $h^*_1=32 \text{ км}$ ;  $\varphi_2=17.57^\circ\text{S}$ ,  $\lambda_2=72.01^\circ\text{W}$ ,  $h^*_2=26 \text{ км}$ . Первое вызвало в Чили сотрясения до 5 баллов, второе сопровождалось разрушениями и повреждениями зданий и сооружений во многих населенных пунктах Чили, погибли 30 человек. Их моментные магнитуды, определенные по HRVD и NEIC составили 6.7 для первого и, соответственно, 7.6 и 7.5 – для второго [3].

Землетрясение 21 августа в  $06^{\text{h}}52^{\text{m}}$  с  $MS=7.0$  восточнее Северного острова Новой Зеландии зарегистрировано 842 мировыми станциями, локализовано на глубине  $h^*=33 \text{ км}$  по фазе  $pP$ . Оно характеризуется моментной магнитудой  $M_w=7.1$  по HRVD и  $M_w=7.1$  по NEIC [3]. Соответствующие значения сейсмических моментов равны  $M_0=5.2 \cdot 10^{19} \text{ Н}\cdot\text{м}$  и  $M_0=5.4 \cdot 10^{19} \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

9 октября в  $23^{\text{h}}53^{\text{m}}$  на 722 мировых сейсмостанциях отмечено землетрясение с  $MPLP=7.1$ , локализованное в районе Курильских островов на глубине  $h^*=47 \text{ км}$  по фазе  $pP$ . Его моментная магнитуда определена по HRVD ( $M_w=5.9$ ) и NEIC ( $M_w=5.9$ ) [3], при значениях сейсмических моментов  $M_0=8.4 \cdot 10^{17} \text{ Н}\cdot\text{м}$  и  $M_0=8.8 \cdot 10^{17} \text{ Н}\cdot\text{м}$  соответственно.

Землетрясение с  $MS=7.2$ , возникшее 12 октября в  $15^{\text{h}}02^{\text{m}}$  южнее Марианских островов, вызвало сотрясения до 7 баллов и повреждение многих зданий в населенных пунктах в Гуаме и Сайпане, жертв нет, ранен один человек. Землетрясение записано 871 мировыми сейсмическими станциями, локализовано на глубине  $h^*=44 \text{ км}$  по фазе  $pP$ . Сейсмические моменты и моментные магнитуды определены по HRVD и NEIC, соответственно, равные  $M_0=3.7 \cdot 10^{19} \text{ Н}\cdot\text{м}$ ,  $M_w=7.0$ ;  $M_0=2.6 \cdot 10^{19} \text{ Н}\cdot\text{м}$ ,  $M_w=6.9$  [3].

19 октября в  $03^{\text{h}}28^{\text{m}}$  с  $MS=7.1$  произошло землетрясение в море Банда, ощущавшееся в Индонезии (Кендари и Рахе), с интенсивностью до 4 баллов. Землетрясение зарегистрировано 633 мировыми сейсмостанциями, локализовано на глубине  $h^*=32 \pm 2.3 \text{ км}$  по фазе  $pP$ . Оно характеризуется моментной магнитудой  $M_w=7.5$  по HRVD и  $M_w=7.4$  по NEIC [3]. Соответствующие значения сейсмических моментов равны  $M_0=1.9 \cdot 10^{20} \text{ Н}\cdot\text{м}$  и  $M_0=1.4 \cdot 10^{20} \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

В районе перевала Куньлунь, провинция Цинхай, Китай, 14 ноября в  $09^{\text{h}}26^{\text{m}}$  произошло сильное землетрясение с  $MS=7.5$ . При полевых обследованиях района землетрясения была обнаружена  $400\text{-км}$  зона поверхностного разрыва с левосторонним максимальным сдвигом  $16.3 \text{ м}$  [25]. Длина косейсмического поверхностного разрыва и максимального смещения самые большие из известных на сегодняшний день. Полагают, что активность Куньлуньского разлома обу-

словлена вдавливанием Индийской плиты в Евразийскую. Для этого землетрясения имела место следующая последовательность предвестников: сейсмическая брешь (размером  $\sim 600 \times 200$  км), образование линейных сейсмических зон в пределах региональной сейсмогенной зоны, имеющей северо-западное простирание в западной части региона, повышенная фоновая сейсмичность и роевая активность вне зоны затишья [26]. В [26] исследуется влияние силы Кориолиса на возникновение землетрясения. Анализируется взаимосвязь между силами Кориолиса и магнитудами афтершоков в континентальных районах Китая, связанных с этим землетрясением. Показано, что предложенный метод может быть весьма эффективен для прогноза максимальной магнитуды афтершоков. Воздействие сил Кориолиса может как ослабить силу сцепления между блоками по обеим сторонам разлома, так и увеличить ее, что в свою очередь может приводить к уменьшению и к возрастанию магнитуды афтершоков. Разлом, на котором произошло Куньлуньское землетрясение, представляет собой левосторонний сдвиг, и за счет воздействия сил Кориолиса здесь могли генерироваться напряжения  $\sim 0.06$  МПа. Таким образом, уровень афтершоковой активности будет здесь невысоким. Длительные наблюдения GPS зарегистрировали движения земной коры в континентальном Китае до и после землетрясения. Особенно активными были горизонтальные движения в западной части Китая [28]. Этот процесс позволяет предположить, что основная движущая сила землетрясения возникла вследствие давления Индийской плиты в северном направлении на континентальный Китай. По данным проведенных исследований определяется геометрия зоны косейсмического поверхностного разрыва протяженностью  $\sim 400$  км и сдвигом  $\sim 16.3$  м, образовавшегося в результате землетрясения [29]. Отмечается «наложение» образовавшегося разрыва на «следы» уже существующих здесь активных разломов. Установлено, что в очаге данного землетрясения реализовался чистый сдвиг по простиранию. Показано, что пространственное распределение косейсмических поверхностных разрывов ограничивается уже существующими здесь геологическими структурами, связанными с Куньлуньским разломом. По региональным широкополосным записям землетрясения определили скорость вспарывания разлома, ее средняя величина составляла  $3.7\text{--}3.9$  км/с, что сопоставимо со скоростью сдвиговых волн в хрупкой части коры [30]. Процесс вспарывания начинался на субрелеевской скорости и после прохождения  $100$  км стал суперсдвиговым (скорость вспарывания достигала  $5$  км/с). На основе модели строения литосферы и данных GPS для очаговой зоны Куньлуньского землетрясения рассчитывалось поле напряжений до и после землетрясения [31]. Установлено, что район очага землетрясения и окружающих участков до землетрясения находились в режиме доминирующего сжатия с достаточно большой скоростью; векторы скоростей показали, что эпицентральная область перед землетрясением была «стабильной», с пониженной сейсмичностью относительно прилегающих областей. По характеру деформаций установлено скопление энергии в сейсмогенных телах во время периода сжатия. После землетрясения значения скоростей сжатия сильно изменились. По результатам анализа сейсмограмм, полученных 28 сейсмическими станциями глобальной сейсмологической сети, исследуется процесс образования и развития разрыва в очаговой области землетрясения [32]. Общая длина разрыва составляет около  $490$  км, а максимальная ширина плоскости разрыва –  $\sim 45$  км. Средняя величина сброса статических напряжений оценивается  $5$  МПа при максимальных значениях до  $18$  МПа. В [33] представлены результаты оценок уровня напряжений, существовавших в очаговой зоне землетрясения. Показано, что до его начала величина напряжений могла составлять  $6.3\text{--}8.0$  МПа, а после землетрясения –  $5.0\text{--}6.7$  МПа. Таким образом, величина сброшенных напряжений составляет около 30% от уровня, существовавшего до момента землетрясения. В [38] приводятся результаты глубинного сейсмического зондирования коры, выполненного на  $500$ -км профиле (от Туотуохэ до Сяо-Чайданя). Мощность коры под северной частью Тибетского нагорья –  $61\text{--}75$  км. Граница Мохоровичича плавно опускается в южном направлении. Утончение нижней коры не сопровождается уменьшением скоростей сейсмических волн. В верхней коре развиты надвиги и сдвиги. Между верхней и нижней корой существует зона пониженных сейсмических скоростей. Мощность впадины Цайдам –  $53 \pm 2$  км, ее жесткость выше, чем у северной части Тибетского нагорья. Этот регион испытывает давление Индийской плиты с юга. Крип в процессе деформации увеличивает напряжения в неглубокой части коры. Анализ показал, что возникновение сильных землетрясений в этом регионе обусловлено не только северо-восточным сжатием, но и латеральным движением коровых блоков. Вследствие разницы в скоростях и направлениях движения блоков на их границах накапливаются напряжения, что активизирует граничные разломы. Существование в коре низкоскоростного слоя является

предпосылкой для образования своеобразных «виадуков» – зон для возникновения сильных землетрясений. С целью определения более детально структуры Куньлуньской разломной зоны проведены сейсмические исследования на двух профилях – вдоль и вкрест простирания разлома [35]. Определялись амплитудные спектры, групповые скорости, их дисперсия, построены скоростные модели. Выделены волны, возникшие или проходящие через разломную зону («трапповые»). Получена модель изучаемой разломной зоны. В [36] анализируется временной ряд GPS-наблюдений, полученный с помощью 25 станций, расположенных на территории Китая. При обработке данных наблюдений использовалось программное обеспечение GIPSY. В результате выявлены отчетливые трендовые компоненты. Предполагается, что процесс землетрясения можно разделить на три стадии: изменение напряженного состояния коровых блоков, накопление напряжений, быстрое накопление и сравнительно медленное выделение потенциальной энергии деформаций. На первой стадии землетрясения, сопровождаемого косейсмическими процессами, а также непосредственно после землетрясения преобладающими являются аномалии вертикальных движений. Эти движения приводят, в свою очередь, к блокированию перемещений между разломами. На следующей стадии преобладают дифференциальные движения между блоками, что приводит к быстрому накоплению энергии. На заключительной стадии, по данным GPS-наблюдений, выявлена характерная «седлообразная» аномалия, которая может предположительно объясняться как деформационная волна.

Землетрясение 18 декабря в  $04^{\text{h}}03^{\text{m}}$  с  $MS=7.3$ , записанное 982 мировыми станциями, вызвало сильные ( $I=4$  балла по JMA) сотрясения на севере Тайваня, а также в Окинаве, на островах Рюкю до и спровоцировало волны цунами высотой 20 см в Ириомото-Джима, 13 см – в Уехаре и 5 см – в Ишигаки-Джима, Япония. Землетрясение локализовано на глубине  $h^*=28\pm 2.0$  км по фазе  $pP$ . Оно характеризуется моментной магнитудой  $Mw=6.8$  по HRVD и  $Mw=6.7$  по NEIC [3]. Соответствующие значения сейсмических моментов равны  $M_0=2.1\cdot 10^{19}$  Н·м и  $M_0=1.2\cdot 10^{19}$  Н·м.

В районе Соломоновых островов отмечено землетрясение 23 декабря в  $22^{\text{h}}52^{\text{m}}$  с  $MPLP=7.1$ ,  $MS=6.9$ , зарегистрированное 691 станцией. Оно локализовано на глубине  $h=12$  км. В [3] приведены его сейсмический момент и моментная магнитуда по данным HRVD ( $M_0=2.1\cdot 10^{19}$  Н·м,  $Mw=6.8$ ) и NEIC ( $M_0=1.5\cdot 10^{19}$  Н·м,  $Mw=6.8$ ).

### Л и т е р а т у р а

1. **Чепкунас Л.С., Болдырева Н.В.** Оперативная обработка землетрясений мира по телесеизмическим наблюдениям ГС РАН. (См. раздел I (Обзор сейсмичности) в наст. сб.).
2. **Шаторная Н.В. (отв. сост.), Бабкина В.Ф., Аторина М.А., Щербакова А.И.** Оперативный каталог землетрясений Земли за 2001 г. (См. раздел VI (Каталоги землетрясений) в наст. сб. на CD).
3. **Bulletin of the International Seismological Centre for 2001.** – Berkshire: ISC, 2002–2003.
4. **Предварительные результаты изучения Сальвадорских землетрясений, произошедших 13 января и 13 февраля 2001 г.** [Preliminary observations on the El Salvador Earthquakes of January 13 and February 13, 2001 // EERI Newslett. – 2001. – 35. – № 7. – С. 5–16.] (РЖ «Физика Земли». – 2002. – № 7 (реф. 82)).
5. **Orense R., Vargas-Monge W., Cepeda J.** Геотехнические аспекты Сальвадорского землетрясения 13 января 2001 г. [Geotechnical aspects of the January 13, 2001 El Salvador earthquake // Soils and Found. – 2002. – 42. – № 4. – С. 57–68.] (РЖ «Физика Земли». – 2003. – № 1 (реф. 98)).
6. **Nezry E., Romeijn P., Sarti F., Inglada J., Zagolski F., Yakam-Simen F.** Новое направление работ в области дистанционного зондирования для решения задач ослабления последствий стихийных бедствий: обнаружение и точное определение местоположения разрушений, осуществляемое в масштабе реального времени (Сальвадор, 2001 г.). [Breaking new grounds for remote sensing in support of disaster relief efforts: detecting and pinpointing earthquake damages in near-real time (El-Salvador, January 2001). SPIE Conference on Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology, Toulouse, 18–21 Sept., 2001. // Proc. SPIE. – 2001. – № 4545. – С. 255–263.] (РЖ «Физика Земли». – 2003. – № 1 (реф. 99)).
7. **Vallee M., Bouchon M., Schwartz S.** Сальвадорское землетрясение 13 января 2001 г.: анализ мультиданных. [The 13 January 2001 El Salvador earthquake: A multidata analysis // Y. J. Geophys. Res. B. – 2003. – 108. – № 4. – С. ESE7/1–ESE7/19.] (РЖ «Физика Земли». – 2006. – № 12 (реф. 45)).
8. **Предварительные результаты изучения начала и эффектов землетрясения 26 января 2001 г. в Бхудже (Гуджарат, Индия).** [Preliminary observations on the origin and effects of the January 26, 2001 Bhuj (Gujarat, India) Earthquake // EERI Newslett. – 2001. – 35. – № 4. – С. 5–20.] (РЖ «Физика Земли». – 2001. – № 12 (реф. 114)).

9. **Negishi H., Mori J., Sato T., Singh R., Kumar S., Hirata N.** Величина и ориентация плоскости разрыва для Гуджаратского землетрясения (Индия) 2001 г. с  $M_w=7.7$  по записям афтершоков: землетрясение с большим сбросом напряжений. [Size and orientation of the fault plane for the 2001 Gujarat, India earthquake ( $M_w=7.7$ ) from aftershock observations: A high stress drop event. (National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan) // *Geophys. Res. Lett.* – 2002. – **29**. – № 20. – С. 10/1–10/4.] (РЖ «Физика Земли». – 2003. – № 12 (реф. 78)).
10. **Ghevariya Z.G., Sahu B.K.** Оценка активности разломов и линеаментов районов Катх и Саураштра (Гуджарат, Индия) по данным изучения последствий землетрясения 26 января 2001 г. [Assessment of active faults and lineaments in Kutch and Saurashtra regions of Gujarat a post 26 January 2001 earthquake study // *Geol. Surv. India. Spec. Publ.* – 2001. – № 65. – Part 2. – С. 103–113.] (РЖ «Физика Земли». – 2003. – № 12 (реф. 79)).
11. **Antolik M., Dreger D.** Процесс разрыва при землетрясении 26 января 2001 г. с  $M_w=7.6$  в Бхудже, Индия, по телесейсмическим широкополосным записям. [Rupture process of the 26 January 2001  $M_w=7.6$  Bhuj, India, earthquake from teleseismic broadband data // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* – 2003. – **93**. – № 3. – С. 1235–1248.] (РЖ «Физика Земли». – 2004. – № 2 (реф. 81)).
12. **Kayal J.R., Zhao Dapeng, Mishra O.P., De Reena, Singh O.P.** Землетрясение 2001 года в Бхудже (Индия): томографические данные о наличии флюидов в гипоцентральной области и их участии в зарождении разрыва. [The 2001 Bhuj earthquake: Tomographic evidence for fluids at the hypocenter and its implications for rupture nucleation // *Geophys. Res. Lett.* – 2002. – **29**. – № 24. – С. 5/1–5/4.] (РЖ «Физика Земли». – 2004. – № 3 (реф. 67)).
13. **Rastogi B.K.** Изучение поверхностных деформаций землетрясения 2001 г. с  $M_w=7.7$  в Бхудже (Индия). [Ground deformation study of  $M_w=7.7$  Bhuj earthquake of 2001. // *Episodes.* – 2001. – **24**. – № 23. – С. 160–165.] (РЖ «Физика Земли». – 2004. – № 4 (реф. 57)).
14. **McCalpin J.P., Thakkar M.G.** Землетрясение 2001 в области Бхудж Качх: поверхностное разрывообразование и его связь с неотектоникой и региональными структурами, Гуджарат, Западная Индия. [2001 Bhuj-Kachchh earthquake: surface faulting and its relation with neotectonics and regional structures, Gujarat, western India // *Ann. Geophys.* – 2003. – **46**. – № 5. – С. 937–956.] (РЖ «Физика Земли». – 2004. – № 9 (реф. 37)).
15. **Mandal P., Rastogi B.K., Satyanaraya H.V.S., Kousalya M., Vijayraghavan R., Satyamurty C., Raju I. P., Sarma A.N.S., Kumar N.** Определение параметров системы разломов, связанной с землетрясением ( $M_w=7.7$ ) 2001 г. в Бхудже, Индия. [Characterization of the causative fault system for the 2001 Bhuj earthquake of  $M_w=7.7$  // *Tectonophysics.* – 2004. – **378**. – № 1–2. – С. 105–121.] (РЖ «Физика Земли». – 2004. – № 9 (реф. 38)).
16. **Shaik M.A., Srivastava S.** Статистические параметры Бхуджской серии землетрясений (Индия) 26 января 2001 г. [Statistical parameters of Bhuj earthquake sequence of January 26 th, 2001 // *Proc. Indian Acad. Sci. Earth and Planet. Sci.* – 2003. – **112**. – № 3. – С. 397–400.] (РЖ «Физика Земли». – 2005. – № 1 (реф. 53)).
17. **Сильное землетрясение нанесло удар по Перу.** [Major earthquake hits Peru. // *EERI Newslett.* – 2001. – **35**. – № 8.] (РЖ «Физика Земли». – 2002. – № 1 (реф. 116)).
18. **Giovanni M.K., Beck S.L., Wagner L.** Перуанское землетрясение 23 июня 2001 г. и субдукционная зона на юге Перу. [The June 23, 2001 Peru earthquake and the southern Peru subduction zone // *Geophys. Res. Lett.* – 2002. – **29**. – № 21. – С. 14/1–14/4.] (РЖ «Физика Земли». – 2004. – № 1 (реф. 78)).
19. **Bilek S.L., Ruff L.J.** Анализ поддвигового Перуанского землетрясения 23 июня 2001 г. с  $M_w=8.4$  и его афтершоков. [Analysis of the 23 June 2001  $M_w=8.4$  Peru underthrusting earthquake and its aftershocks // *Geophys. Res. Lett.* – 2002. – **29**. – № 20. – С. 21/1–21/4.] (РЖ «Физика Земли». – 2004. – № 1 (реф. 79)).
20. **Melbourne T.I., Webb F.H.** Предвестниковое быстрое смещение при последовательности землетрясений 2001 г. с  $M_w=8.4$  в Перу по наблюдениям Глобальной позиционной системой (GPS). [Precursory transient slip during the 2001  $M_w=8.4$  Peru earthquake sequence from continuous GPS // *Geophys. Res. Lett.* – 2002. – **29**. – № 21. – С. 28/1–28/4.] (РЖ «Физика Земли». – 2004. – № 1 (реф. 80)).
21. **Dorbath L.** Хроника землетрясения (2001 г. в Андах, Южная Америка). [Chronique d'un seisme annonce // *Sci. Sud.* – 2001. – № 11. – С. 1–7.] (РЖ «Физика Земли». – 2004. – № 11 (реф. 104)).
22. **Vallee M.** Стабилизация анализа эмпирической функции Грина: развитие метода проецирования Ландвебера. [Stabilizing the empirical Green function analysis: development of the projected Landweber method // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* – 2004. – **94**. – № 2. – С. 394–409.] (РЖ «Физика Земли». – 2005. – № 8 (реф. 112)).

23. **Keefer D.K., Moseley M.E.** Разрушения при сильном землетрясении 2001 г. в Южно-Перуанской пустыне: применение для палеосейсмологии и палеоследов Эль-Ниньо Южных осцилляции. [Southern Peru desert shattered by the great 2001 earthquake: Implications for paleoseismic and paleo – El Nino—Southern Oscillation records // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. – 2004. – **101**. – № 30. – С. 10878–10883.] (РЖ «Физика Земли». – 2006. – № 12 (реф. 37)).
24. **Robinson D.P., Das S., Watts A.B.** Сейсмогенный разрыв, остановленный субдущирующей раздробленной зоной. [Earthquake rupture stalled by a subducting fracture zone // Science. – 2006. – **312**. – № 5777. – С. 1203–1205.] (РЖ «Физика Земли». – 2006. – № 12 (реф. 46)).
25. **Lin Aiming, Fu Bihong, Guo Jianming, Zeng Qingli, Dang Guangming, He Wengui, Zhao Yue.** Косейсмический сдвиг и длина разрыва при Центрально-Куньлунском землетрясении (северная часть Тибета) 2001 г. с  $M_s=8.1$ . [Co-seismic strike-slip and rupture length produced by the 2001  $M_s=8.1$  Central Kunlun earthquake // Science. – 2002. – **296**. – № 5575. – С. 2015–2017.] (РЖ «Физика Земли». – 2002. – № 10 (реф. 58)).
26. **Liu Pu-xiong, Zheng Da-lin, Che Shi, Pan Huai-wen, Liu Gui-ping, Yang Li-ming.** Сейсмические аномалии перед сильным землетрясением в районе перевала Куньлунь (Китай) и их значение для прогноза землетрясений. [Seismicity anomalies before the great earth-quake of  $M_s=8.1$  in the Kunlun Pass and its significance to earthquake prediction // Acta seismol. sin. – 2003. – **16**. – № 2. – С. 219–225.] (РЖ «Физика Земли». – 2003. – № 11 (реф. 62)).
27. **Lti Jian, Gao Jian-hua, Liu Ji-fu, Ни Cui-e, Huang Shuang-feng.** Дискуссия о влиянии силы Кориолиса и тенденциях афтершоковой активности Куньлуньского землетрясения (Китай) с  $M=8.1$ , произошедшего 14 ноября 2001 г. [A discussion of Coriolis force effect and aftershock activity tendency of the  $M=8.1$  Kunlun Mountain Pass earthquake on Nov. 14, 2001 // Acta seismol. sin. – 2003. – **16**. – № 4. – С. 459–467.] (РЖ «Физика Земли». – 2004. – № 3 (реф. 59)).
28. **Gu Guo-hua, Zhang Jing, Wang Xu-xing.** Горизонтальные подвижки коры в континентальном Китае до и после сильного Куньлуньского землетрясения 2001 г. с  $M=8.1$ . [Horizontal crustal movement in Chinese mainland before and after the great Kunlun Mountain  $M=8.1$  earthquake in 2001. // Acta seismol. sin. – 2003. – **16**. – № 6. – С. 676–685.] (РЖ «Физика Земли». – 2004. – № 8 (реф. 39)).
29. **Lin Ai-ming.** Взаимосвязь между древним активным разломом Куньлунь и косейсмическими поверхностными разрывами, образовавшимися в результате землетрясения 2001 года ( $M_w=7.8$ ) в Центральном Куньлуне, Китай. [Relationship between the pre-existing active Kunlun fault and Co-seismic surface ruptures produced by the 2001  $M_w=7.8$  central Kunlun earthquake, China // Diqui kexue jinzhan. Adv. Earth Sci. – 2004. – **19**. – № 3. – С. 368–372.] (РЖ «Физика Земли». – 2005. – № 1 (реф. 76)).
30. **Bouchon Michel, Vallee Martin.** Наблюдение длинного суперсдвигового разрыва при Куньлунском землетрясении (2001 г.) с магнитудой 8.1. [Observation of long supershear rupture during the magnitude 8.1 Kunlunshan earthquake // Science. – 2003. – **301**. – № 5634. – С. 824–826.] (РЖ «Физика Земли». – 2005. – № 5 (реф. 95)).
31. **Guo Liang-Qian, Zhang Zu-Sheng, Li Yan-Xing, Wang Min, Bo Wan-Ju.** Изучение поля напряжения, связанного с Куньлунским землетрясением с  $M_s=8.1$  (Китай). [Diqui wuli xuehao // Chin. J. Geophys. – 2004. – **47**. – № 6. – С. 1068–1075.] (РЖ «Физика Земли». – 2005. – № 7 (реф. 75)).
32. **Zhou Yun-hao, Chen Zhang-li, Miao Fa-jun.** Изучение очаговой области землетрясения, произошедшего 14 ноября 2001 года в западной части гор Куньлунь ( $M_s=8.1$ ). [Source process of the 14 November 2001 western Kanlun Mountain  $M_s=8.1$  earth-quake // Acta seismol. sin. – 2004. – **17**. – С. 9–21.] (РЖ «Физика Земли». – 2005. – № 8 (реф. 85)).
33. **Chen Xue-zhong.** Оценка уровней действующих напряжений в пределах очаговой зоны до и после землетрясения с  $M=8.1$ , произошедшего 14 ноября 2001 года в области горного перевала Западного Куньлуна (Китай). [Estimation of the stress levels in the focal region before and after the 2001  $M=8.1$ . Western Kunlun Mountain Pass earthquake // Acta snismol. sin. – 2005. – **18**. – № 6. – С. 651–655.] (РЖ «Физика Земли». – 2006. – № 9 (реф. 45)).
34. **Li Qiusheng, Peng Suping, Gao Rui, Guan Ye, Fan Jingyi.** Глубинная тектоника землетрясения (2001 г.) с  $M_s=8.1$  в восточной части Куньлуна (Китай). [Diqui xuebao // Acta geosci. sin. – 2004. – **25**. – № 1. – С. 11–16.] (РЖ «Физика Земли». – 2006. – № 11 (реф. 13)).
35. **Lou Haг, Wang Chun-Yong, Ding Zhi-Feng, He Zheng-Qin, Yang Jian-Si, Zhou Mгn-Dou.** Анализ «храповых» волн, возникших в Куньлуньской разломной зоне. [Diqui wuli xuebao // Chin. J. Geophys. – 2006. – **49**. – № 3. – С. 788–796.] (РЖ «Физика Земли». – 2006. – № 12 (реф. 4)).
36. **Jing Shao-qun, Wu Yun, Qiao Xue-jun, Zhou Shuo-yu, Shi Shun-ying.** Анализ временных рядов GPS-наблюдений и влияние Куньлуньского землетрясения с  $M_s=8.1$  на данные наблюдения. [GPS time-series and its response to  $M_s=8.1$  Kunlunshan earthquake // Acta seismol. sin. – 2005. – **18**. – № 4. – С. 419–426.] (РЖ «Физика Земли». – 2006. – № 12 (реф. 41)).