

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

За 2002 г. произошло 11 сильнейших ($M \geq 7.0$) землетрясений, список которых дан в табл. 1. Включены все землетрясения из Сейсмологического бюллетеня ГС РАН [1], у которых хотя бы одна из трех магнитуд (MS , $MPLP$, $MPSP$) была ≥ 7.0 . Магнитуды MS , $MPLP$, $MPSP$ рассчитаны по максимальной скорости смещения $(A/T)_{\max}$ в поверхностных и объемных волнах по соответствующим калибровочным кривым [2, 3].

Таблица 1. Список наиболее сильных землетрясений Земли в 2002 г. по [1]

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	δt_0 , с	Эпицентр		h , км	n с/ст	M_0 , 10^{20} Н·м	Магнитуды				Р а й о н
				φ°, N	λ°, N				M_w	MS/n	$MPLP/n$	$MPSP/n$	
1	02.01	17 22 51.2	0.97	17.67S	167.85E	33f	156	0.87**	7.3	7.4/26	7.6/4	6.6/39	Острова Вануату (Новые Гебриды)
2	05.03	21 16 10.0	1.14	6.20N	124.27E	33f	168	0.48*	7.1	7.0/32	6.9/11	6.5/37	Минданао, Филиппины
3	31.03	06 52 49.7	0.90	24.41N	122.30E	27	253	0.90*	7.3	7.2/38	7.1/17	6.6/47	Район Тайваня
4	11.04	21 57 01.9	1.11	14.34S	167.71E	46	154	–		5.8/36	7.0/11	6.1/45	Острова Вануату (Новые Гебриды)
5	26.04	16 06 07.7	1.38	13.37N	144.61E	76	149	1.2*	7.4		7.1/15	6.8/32	Марианские острова
6	22.06	02 58 25.0	1.43	35.66N	48.96E	33f	256	–		6.2/38	7.0/10	6.3/32	Западный Иран
7	27.06	05 50 40.2	1.68	6.57S	103.92E	33f	151	–		6.6/18	7.0/12	6.4/40	Юго-западнее Суматры, Индонезия
8	08.09	18 44 27.1	1.11	3.14S	142.88E	33f	217	2.1*** 2.0**	7.5 7.5	7.5/47	7.5/9	6.5/31	Северное Побережье Новой Гвинеи
9	10.10	10 50 23.8	1.10	1.65S	134.12E	33f	136	0.58** 0.74*	7.1 7.2	7.4/22	7.3/6	6.6/39	Район Западного Ириана, Индонезия
10	02.11	01 26 11.2	1.80	3.06N	96.10E	24	196	0.64*	7.2	7.2/30	7.2/8	6.4/29	Северная Суматра, Индонезия
11	03.11	22 12 40.9	0.90	63.61N	147.71W	10f	263	0.15*	7.4	7.6/31	7.2/10	7.0/31	Центральная Аляска

Примечание. В графе 7 буквой «f» отмечена фиксированная глубина; знаками *, ** и *** отмечены определения M_0 по станциям «Обнинск», «Талая» и «Аркти» соответственно.

Ниже приводится краткий обзор публикаций в реферативных журналах «Геофизика» об исследованиях, проведенных по сильным землетрясениям из табл. 1.

2 января в 17^h22^m произошло землетрясение с $MS=7.4$ в районе Вануату (Новые Гебриды). Землетрясение зарегистрировано 888 мировыми сейсмическими станциями, локализовано на глубине $h^*=42 \pm 1.9$ км по фазе pP . Оно характеризуется моментной магнитудой $M_w=7.2$ по HRVD и 7.1 по NEIC [4]. Соответствующие значения сейсмических моментов равны: $M_0=7.7 \cdot 10^{19}$ Н·м и $M_0=5.5 \cdot 10^{19}$ Н·м.

Землетрясение с $MS=7.0$ в районе Минданао (Филиппины) возникло 5 марта в 21^h16^m, локализовано на глубине $h^*=31 \pm 1.1$ км по фазе pP и записано 733 мировыми станциями. Значение его моментной магнитуды получено по HRVD ($M_w=7.5$) и NEIC ($M_w=7.2$) [4]. Соответствующие значения сейсмических моментов равны: $M_0=1.9 \cdot 10^{20}$ Н·м и $M_0=8.1 \cdot 10^{19}$ Н·м.

Сведения о разрушительном землетрясении 31 марта в 06^h52^m с $MS=7.2$ в районе Тайваня приводятся в [5]. Погибло 5, ранено 270 человек. Жертвы вызваны падением грузоподъемных кранов на строительной площадке. Это землетрясение вызвало незначительные разрушения в эпицентральной области и сильные разрушения на эпицентральной расстоянии ~ 110 км в Тай-

пэйской впадине, где пиковые грунтовые ускорения были в 5 раз больше, чем вблизи эпицентра [6]. В южной части впадины разрушения были наибольшие. Полагают, что большое усиление ускорений и сильные разрушения в Тайпэйской впадине связаны с интенсивными sS -волнами от границы Мохоровичича.

11 апреля в 21^h57^m произошло землетрясение с $MPLP=7.0$ в районе Вануату (Новые Гебриды). Землетрясение зарегистрировано 618 мировыми сейсмическими станциями, локализовано на глубине $h^*=17\pm 4.5$ км по фазе pP . Оно характеризуется моментной магнитудой $M_w=6.1$ по HRVD и 6.2 по NEIC [4]. Соответствующие значения сейсмических моментов M_0 равны: $1.7\cdot 10^{18}$ Н·м и $1.9\cdot 10^{18}$ Н·м.

Землетрясение 26 апреля в 16^h06^m с $MPLP=7.1$ возникло в районе Марианских островов и зарегистрировано 747 мировыми станциями, локализовано на глубине $h^*=84\pm 3.0$ км по фазе pP . Его моментная магнитуда определена равной $M_w=7.0$ по HRVD и 7.1 по NEIC [4], при значениях сейсмических моментов $M_0=4.3\cdot 10^{19}$ Н·м и $5.2\cdot 10^{19}$ Н·м соответственно.

22 июня в 02^h58^m в районе Западного Ирана произошло сильное ($MPLP=7.0$) землетрясение [7]. Данные сейсмологических наблюдений, а также анализ спутниковых фотоснимков показывает, что землетрясение произошло на ранее не известном надвиге. Угол падения разлома составляет около 49° , а глубина ~ 10 км. Установлено, что распространение разрыва происходило в северо-западном направлении. Значительная часть подвижки на дневной поверхности была обусловлена образованием антиклинального поднятия.

27 июня в 05^h50^m с $MS=7.0$ произошло землетрясение в районе Юго-Западной Суматры (Индонезия). Оно зарегистрировано 748 мировыми станциями, локализовано на глубине $h^*=28\pm 2.0$ км по фазе pP . Его моментная магнитуда составляет $M_w=6.5$ по HRVD и $M_w=6.5$ по NEIC [4]. Соответствующие значения сейсмических моментов равны: $M_0=6.6\cdot 10^{18}$ Н·м и $M_0=6.0\cdot 10^{18}$ Н·м.

Землетрясение 8 сентября в 18^h44^m с $MS=7.5$ в районе Северного побережья Новой Гвинеи зарегистрировано 836 мировыми станциями, локализовано на глубине $h^*=17\pm 1.7$ км по фазе pP . Оно характеризуется моментной магнитудой $M_w=7.6$ по HRVD и $M_w=7.2$ по NEIC [4]. Соответствующие значения сейсмических моментов равны: $M_0=2.94\cdot 10^{20}$ Н·м и $M_0=6.7\cdot 10^{19}$ Н·м.

Землетрясение в районе Западного Ириана (Индонезия) возникло 10 октября в 10^h50^m с $MS=7.4$ и записано 972 сейсмическими станциями. Глубина очага равна $h^*=23\pm 2.1$ км по фазе pP . Оно характеризуется моментной магнитудой $M_w=7.5$ по HRVD и $M_w=7.4$ по NEIC [4]. Соответствующие значения сейсмических моментов равны: $M_0=2.59\cdot 10^{20}$ Н·м и $M_0=1.3\cdot 10^{20}$ Н·м.

Сильное землетрясение с $MS=7.2$ произошло 2 ноября в 01^h26^m к западу от северной части о. Суматра (Индонезия) [8]. Очаг лежал в переходной зоне между субдуктирующей Австралийской плитой и наезжающим блоком Сунда Евразийской плиты, которая погружается на северо-восток. Максимальная интенсивность – 5–6 баллов – отмечалась в Тапактуане. Разрушено ~ 350 зданий. Разрушения различной степени отмечены в 1000 зданий на о. Симеулеу к западу от эпицентра. Появились трещины на дорогах и автострадах. Погибло 30, ранено 65 человек. Сообщений о цунами не было. На некоторых участках наблюдалось усиление до 2.8 раз пиковых ускорений колебаний грунтов.

Землетрясение 3 ноября в 22^h12^m на разломе Денали (Аляска) с $MS=7.6$ было сильнейшим сдвиговым землетрясением Северной Америки за последние 150 лет [9]. Из-за удаленности землетрясения от населенных пунктов человеческих жертв не было. Прямые экономические потери из-за нарушений в системах жизнеобеспечения составили 90 млн долларов. Временные экономические потери из-за отключения нефтепровода и приостановки перекачки нефти в Валдес на два дня составили 60 млн долларов. Это послужило проверкой сейсмостойкости Трансальяскинского нефтепровода. Землетрясение вызвало серии слабых толчков в геотермальной области Те-Гейзерс в Калифорнии, Йеллоустоунском национальном парке в Вайоминге, плескание воды в оз. Пончетрейн в Новом Орлеане. В Пенсильвании и Джорджии отмечались изменения уровня грунтовых вод сразу после землетрясения, в Миннесоте и Висконсине – помутнение воды в колодцах. В [10] дана характеристика геологии, тектоники и сейсмичности региона. Обследования показали, что землетрясение началось как надвиг, в течение 100 с распространялось с запада на восток вдоль разлома Денали, затем перекинулось на разлом Тотшунда. Вспарывались три разлома: Денали со средним смещением 5 м (до 8.8 м на пересечении с разломом Тотшунда), Тотшунда со смещениями 1–2 м и ранее не известный разлом в районе ледника Сусит-

на со средним смещением 2 м. Общая длина поверхностного разрыва составила 340 км (224, 69 и 48 км для трех разломов соответственно). В 22 км к западу от эпицентра 23 октября на разломе Денали в районе горы Ненана произошел форшок с $MS=6.6$. Это был правосторонний сдвиг, но он не выходил на поверхность. Записаны тысячи афтершоков [11], которые располагались не глубже 10 км. Полагают, что небольшая глубина очагов обусловлена высоким геотермальным градиентом. В [12] отмечается, что в афтершоковых последовательностях их максимальные магнитуды почти на два порядка ниже, чем магнитуды главного толчка. Анализируются параметры объемных волн P и S , записанных на телесеismicких расстояниях [13]. Используя широкополосные записи объемных волн (0.1–5.0 Гц), выделяют три последовательных эпизода: надвиг и два правосторонних сдвиговых землетрясения, произошедших, соответственно, на 22 и 49 с позже и на 90 и 188 км восточнее эпицентра. В случае надвига по количеству излученной энергии на средних частотах (0.1–1.0 Гц) доминирует P -волна, тогда как S -волны доминируют по тому же параметру на более низких частотах (0.05–0.20 Гц), излученных сдвиговыми землетрясениями. Длина участка разрыва, на котором выделилась значительная доля энергии, гораздо короче 340 км. Однако суммарный сейсмический момент трех землетрясений равен $M_0=4.0 \cdot 10^{20}$ Н·м, что составляет приблизительно половину сейсмического момента, определенного по низкочастотным записям. Наличие разницы объясняется проскальзыванием на участках разрыва, при котором не излучается значимая или когерентная сейсмическая энергия. Существование энергодефицитного режима разрывообразования имеет значение для оценки сейсмической опасности возникновения очень сильных сдвиговых землетрясений. В [14] исследовались сейсмограммы поверхностных волн, а эмпирическая функция Грина использовалась, чтобы выделить и исследовать кинематику разрыва при главном толчке. Особый интерес представляет эффект фокусировки больших амплитуд, вызванный направленностью сейсмических волн. Зафиксировано увеличение на два порядка максимальных амплитуд волн Лява и Релея с периодами T от 10 до 33 с. Эти поверхностные волны послужили триггером для слабых землетрясений, отмеченных на расстояниях >3000 км от главного разлома. Обработаны данные наблюдений о смещениях на геологических разломах по данным системы GPS [15]. Время накопления напряжений для данного землетрясения составляет ~ 1000 лет. Региональные сейсмические записи, данные GPS и измерения поверхностных смещений использованы для построения кинематической модели процесса образования разрыва [16]. Кинематическое моделирование показало, что величина скорости вспарывания разлома была почти равна скорости сдвиговых волн. Величины среднего и максимального сдвигов были равны 2.14 и 10.3 м соответственно. Сброс статических напряжений составлял 1.3–5.0 МПа для модели разлома на пяти отрезках.

Л и т е р а т у р а

1. Шаторная Н.В. (отв. сост.), Бабкина В.Ф., Аторина М.А., Щербакова А.И. Оперативный каталог землетрясений Земли за 2002 г. (См. раздел VI (Каталоги землетрясений) в наст. сб. на CD).
2. Ванек И., Затопек А., Карник В., Кондорская И.В., Ризниченко Ю.В., Саваренский Е.Ф., Соловьёв С.Л., Шебалин Н.В. Стандартизация шкал магнитуд // Изв. АН СССР, сер. геофизич. – 1962. – № 2. – С. 153–158.
3. Горбунова И.В., Шаторная Н.В. О калибровочной кривой для определения магнитуды землетрясений по волнам $PKIKP$ // Физика Земли. – 1976. – № 7. – С. 77–81.
4. *Bulletin of the International Seismological Centre for 2002.* – Berkshire: ISC, 2003–2004.
5. Сильное землетрясение на Тайване (2002 г.). [Major earthquake rocks Taiwan // EERI Newslett. – 2002. – 36. – № 5. – С. 4.] (РЖ «Физика Земли». – 2002. – № 1 (реф. 65)).
6. Chen Kou-Cheng. Сильные колебания поверхности земли и разрушения в Тайпэйской впадине от отраженных от границы Мохоровичича сейсмических волн при землетрясении 31 марта 2002 г. в Хуаляне, Тайвань [Strong ground motion and damage in the Taipei basin from the Moho relected seismic waves during the March 31, 2002, Hualien, Taiwan earthquake // Geophys. Res. Lett. – 2003. – 30. – № 11. – С. 1–4.] (РЖ «Физика Земли». – 2004. – № 4 (реф. 54)).
7. Walker R.T., Bergman E., Jackson J., Ghorashi M., Talebian M. Землетрясение 22 июня 2002 года в районе Ченгуре (Авадж) в провинции Казвин, северо-западная часть Ирана: повторное определение координат эпицентра, параметры очага, поверхностные деформации и особенности геоморфологии. [The 2002 June 22 Changureh (Avaj) earthquake in Qazvin province, northwest Iran: epicentral relocation, source parameters, surface deformation and geomorphology // Geophys. J. Int. – 2005. – 160. – № 2. – С. 707–720.] (РЖ «Физика Земли». – 2006. – № 1 (реф. 67)).

8. **Эффекты в Индонезии и Малайзии землетрясения 2 ноября 2002 г., произошедшего на севере Суматры.** [Effects of 11-2-02 Northern Sumatra earthquake in Indonesia and Malaysia // EERI Newslett. – 2003. – 37. – № 2. – С. 4.] (РЖ «Физика Земли». – 2004. – № 12 (реф. 97)).
9. **Eberhart-Phillips D., Haussler P.J., Freymueller J.T., Frankel A.D., Rubin C.M., Craw P.** Землетрясение 2002 г. на разломе Денали (Аляска): сдвиговое землетрясение с большой магнитудой. [The 2002 Denali fault earthquake, Alaska: a large magnitude, slip-partitioned event. // Science. – 2003. – 300. – № 5622. – С. 1113–1118.] (РЖ «Физика Земли». – 2003. – № 10 (реф. 87)).
10. **Предварительные результаты изучения землетрясения 3 ноября 2002 г. на разломе Денали, Аляска.** [Preliminary Observations on the November 3, 2002 Denali Fault, Alaska, earthquake // EERI Newslett. – 2003. – 37. – № 2. – С. 1–5.] (РЖ «Физика Земли». – 2005. – № 7 (реф. 89)).
11. **Fisher M.A., Nokleberg W.J., Ratchkovski N.A., Pellerin L., Glen J.M., Brocher T.M., Booker J.** Геофизические исследования разлома Денали и орогена Аляскинского хребта в пределах афтершоковой зоны землетрясения 2002 г. с $M=7.9$, произошедшего на разломе Денали [Geophysical investigation of the Denali fault and Alaska Range orogen within the aftershock zone of the October–November 2002, $M=7.9$ Denali fault earthquake // Geology. – 2004. – 32. – № 3. – С. 269–272.] (РЖ «Физика Земли». – 2004. – № 12 (реф. 99)).
12. **Vufe C.G.** Сравнение землетрясений, произошедших в ноябре 2002 г. на разломе Денали (Аляска) и на Куньлунском разломе (Тибет) [Comparing the November 2002 Denali and November 2001 Kunlun earthquakes. // Bull. Seismol. Soc. Amer. – 2004. – 94. – № 3. – С. 1159–1165.] (РЖ «Физика Земли». – 2005. – № 8 (реф. 74)).
13. **Choy G.L., Boatwright J.** Излученная энергия и процесс разрывообразования при последовательности землетрясений 2002 г. на разломе Денали (Аляска), рассчитанные по широкополосным телесеismicким записям объемных волн [Radiated energy and the rupture process of the Denali fault earthquake sequence of 2002 from broadband teleseismic body waves // Bull. Seismol. Soc. Amer. – 2004. – 94. – № 6, В. – С. 269–277.] (РЖ «Физика Земли». – 2007. – № 2 (реф. 82)).
14. **Velasco A.A., Ammon C.J., Farrell J., Paknow K.** Направленность разрывообразования при землетрясении 3 ноября 2002 г. на разломе Денали (Аляска), полученная по поверхностным волнам [Rupture directivity of the 2 November 2002 Denali fault earthquake determined from surface waves // Bull. Seismol. Soc. Amer. – 2004. – 94. – № 6, В. – С. 293–299] (РЖ «Физика Земли». – 2007. – № 2 (реф. 80)).
15. **Землетрясение на разломе Денали (Аляска) дает уникальную возможность для ученых из Института геофизики (США)** [For G1 scientists, Denali fault earthquake offers a once-in-a-lifetime opportunity. // Geophys. Inst. Quart. – 2003. – 18. – № 2. – С. 1.] (РЖ «Физика Земли». – 2004. – № 2 (реф. 87)).
16. **Dreger D.S., Oglesby D.D., Harris R., Ratchkovski N., Hansen R.** Кинематическая и динамическая модели разрывообразования землетрясения с $M_w=7.9$, произошедшего 3 ноября 2002 г. на разломе Денали (Аляска). [Kinematic and dynamic rupture models of the November 3, 2002 $M_w=7.9$ Denali, Alaska, earthquake // Geophys. Res. Lett. – 2004. – 31. – № 4. – С. L04605/1–L04605/4.] (РЖ «Физика Земли». – 2005. – № 9 (реф. 61)).