

II. СПЕКТРЫ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

УДК 550.348.436 (100)

ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЗЕМЛИ

Л.С. Чепкунас, Л.С. Малянова

Геофизическая служба РАН, г. Обнинск, luba@gsras.ru

Для девяти коровых землетрясений земного шара, удаленных от станции «Обнинск» на расстояние $\Delta=65-98^\circ$ (рис. 1), исследованы основные (табл. 1) и динамические (табл. 2, 3) параметры очагов.

Таблица 1. Сведения о рассмотренных землетрясениях 2004 г.

№	Дата, д м	Вариант	t_0 , ч мин с	Гипоцентр			Магнитуды				Район
				φ°	λ°	h , км	M_w/n_{OBN} M_w/n_{HRVD}	$MPSP/n$, m_b/n	$MPLP/n$	MS/n Ms/n	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	07.02	I	02 42 33.5	-3.98	135.04	10f	7.1/1	6.4/39	7.0/10	7.4/23	Район Западного Ириана, Индонезия
		II	02 42 34.2	-4.03	135.09	15		6.3/124		7.5/158	
		III	02 42 35.2	-4.03	134.78	12	7.3/89				
2	28.06	I	09 49 44.9	54.91	-134.44	10f	6.7/1	6.3/61	6.7/12	6.9/31	Район островов Королевы Шарлотты
		II	09 49 46.3	54.82	-134.49	20		5.9/281		6.8/152	
		III	09 49 47.0	55.02	-134.46	12	6.8/69				
3	05.09	I	10 07 09.8	33.13	136.68	33f	7.3/1	7.0/76	7.8/11	7.2/31	Южное побережье Западного Хонсю
		II	10 07 07.2	33.07	136.74	19		6.7/318		7.1/132	
		III	10 07 07.8	32.94	137.00	16	7.2/78				
4	23.10	I	08 56 03.6	37.66	138.73	33f	6.7/1	6.6/90	7.0/7	6.9/38	Западное побережье Хонсю, Япония
		II	08 55 58.6	37.30	138.77	8		6.3/320		6.4/164	
		III	08 56 00.9	37.31	138.83	13	6.6/77				
5	11.11	I	21 26 43.6	-8.14	124.78	33f	7.2/1*	6.7/26	7.3/10	7.1/34	Район Тимора
		II	21 26 42.4	-8.15	124.74	23		6.4/117		7.2/171	
		III	21 26 41.2	-7.87	125.12	17	7.5/78				
6	28.11	I	18 32 14.4	43.15	145.14	50	7.4/1	6.5/74	7.5/11	7.1/57	Район Хоккайдо, Япония
		II	18 32 12.8	42.90	145.21	43		6.4/325		6.9/188	
		III	18 32 14.1	42.88	145.36	47	7.0/78				
7	06.12	I	14 15 11.9	43.11	145.21	41	7.0/1	6.6/88		7.0/43	Район Хоккайдо, Япония
		II	14 15 10.2	42.77	145.25	36		6.5/323		6.6/191	
		III	14 15 11.9	42.82	145.41	36	6.7/61				
8	18.12	I	06 46 18.1	48.84	156.21	10f	6.3/1**	5.8/93	6.6/5	6.4/50	Район Курильских островов
		II	06 46 19.2	48.87	156.37	16		5.5/246		6.2/170	
		III	06 46 19.9	48.77	156.58	15	6.2/74				
9	26.12	I	00 58 52.8	3.42	95.96	33f	7.9/1	7.1/75	7.8/5	8.7/61	У западного побе- режья Северной Суматры
		II	00 58 52.0	3.41	95.90	26		6.8/197		8.7/149	
		III	00 58 50.0	3.09	94.26	29	9.0/73				

Примечание. В графе 3 вариант I дан по [1], II, III – по [2]; в графе 7 символом f отмечены фиксированные глубины по [3]; в графе 8 знаками * и ** отмечены значения M_w по станциям «Арти» и «Галая» соответственно.

Очаги всех девяти землетрясений расположены в земной коре (табл. 1). Семь из них с $MS, MPLP, MPSP \geq 7.0$ [1] локализованы в различных регионах мира на расстоянии $\Delta=65-98^\circ$ от

станции «Обнинск». Выбор Δ связан с методикой расчета спектров P -волн [4, 5]. Для двух землетрясений магнитуды MS , $MPLP$, $MPSP < 7.0$, но одно из них (18 декабря в 06^h46^m с $MS=6.4$) является сильным для Курильского региона, другое (28 июня в 09^h49^m с $MS=6.9$) расположено в западной части земного шара (о-ва Королевы Шарлотты) и достаточно значимо для этого района.

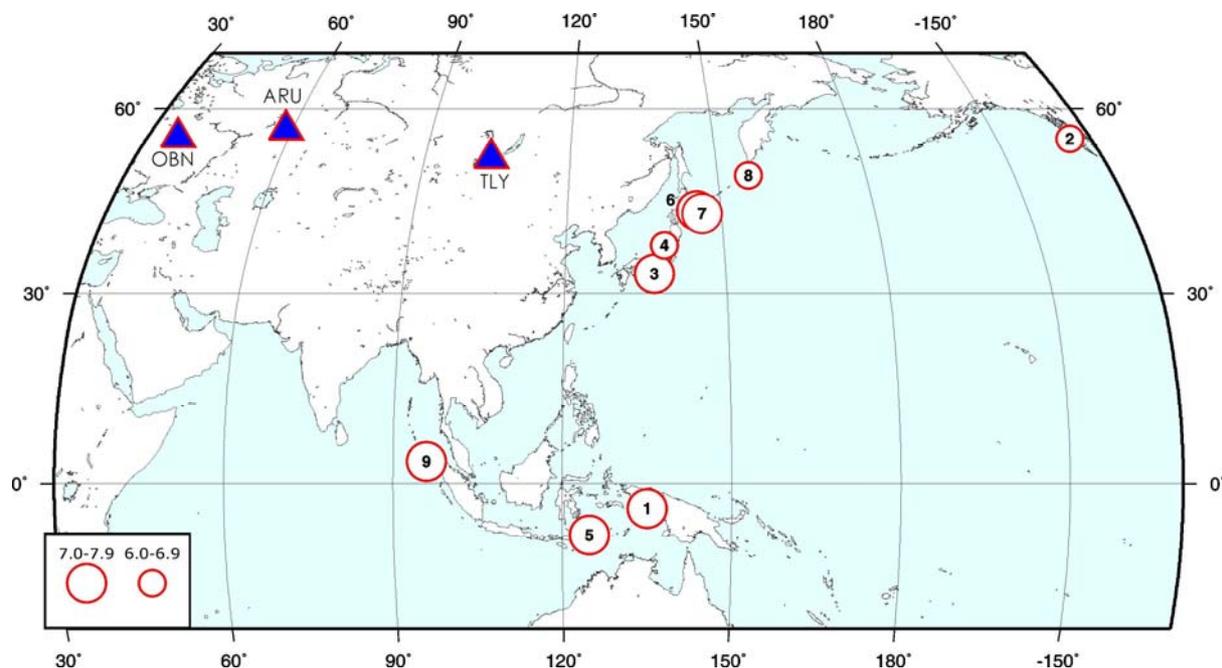


Рис. 1. Эпицентры землетрясений (1–4, 6, 7, 9), (5), (8), для которых построены спектры по цифровым сейсмограммам станций «Обнинск», «Арти» и «Талая» соответственно

Основные параметры очагов землетрясений (время возникновения t_0 , координаты гипоцентра φ , λ , h , магнитуды) даны в табл. 1 из двух бюллетеней в трех вариантах: I – Сейсмологического бюллетеня ГС РАН (MOS) [1]; II – бюллетеня Международного сейсмологического центра (ISC) [2]. Параметры землетрясений варианта III определены в Гарвардском центре США HRVD [2] по методу тензора момента центроида (ТМЦ) [6], использующего при расчетах волновые формы всей сейсмограммы. Значения гипоцентров в I и II получены по временам первых вступлений P -волн на основе одного и того же годографа Джеффриса–Буллена [7], но по разным системам наблюдений. Различия значений t_0 , φ , λ , h по варианту III от I и II связаны с тем, что решения по I и II локализуют начальную фазу процесса в очаге, а III – максимальную. Параметры t_0 , φ , λ , h по I и II в большинстве случаев различаются в пределах погрешности их определений.

В варианте I даны магнитуды $MPSP$, $MPLP$ по продольным волнам и MS – по поверхностным. Кроме того, здесь приведены моментные магнитуды M_w , рассчитанные на основе величины сейсмического момента M_0 , определенного по цифровым сейсмограммам станций «Обнинск» (землетрясения 1–4, 6, 7, 9), «Арти» (5) и «Талая» (8). Расчет M_w выполнен по формуле Х. Канамори [8]:

$$M_w = \frac{2}{3} \lg M_0 - 10.7$$

для сейсмического момента в единицах «дина · см». В варианте II даны магнитуды m_b по продольным волнам и M_S – по поверхностным; в III – моментные магнитуды M_w , полученные по методу ТМЦ.

Относительно магнитуд m_b и $MPSP$ следует отметить, что для восьми землетрясений значения $m_b < MPSP$ на 0.1–0.3, лишь для одного (2) – на 0.4. Разница объясняется методикой расчета: для m_b выбирается интервал записи P -волн в пределах 5 с от вступления, для $MPSP$ – до 40–60 с [9]. Различия магнитуд MS (MOS) и M_S (ISC) по поверхностным волнам заключены в интервале 0.1–0.3 единицы магнитуды. Максимальная разница в 0.4 единицы получена для землетрясения (7), что, возможно, связано с разной выборкой данных для расчета.

Сравнение магнитуд $M_w(\text{MOS})$ и $M_w(\text{HRVD})$ показывает, что для землетрясений (1, 2, 5, 9) – $M_w(\text{MOS}) < M_w(\text{HRVD})$, для землетрясений (3, 4, 6, 7, 8) – $M_w(\text{MOS}) > M_w(\text{HRVD})$. При этом наибольшие различия $M_w(\text{MOS}) < M_w(\text{HRVD})$ на 0.4–0.5 единицы M_w отмечены для землетрясения (9) у западного побережья Северной Суматры. В настоящей статье $M_w(\text{MOS})$ определена для большинства землетрясений (1, 2, 3, 4, 6, 7, 9) по записям на станции «Обнинск» по одному типу волн (P -волне); для землетрясения (5) с $MS=7.1$ спектры P -волн рассчитывались по сейсмограмме на станции «Арти» ($\Delta=84^\circ$), для (8) с $MS=6.4$ – по сейсмограмме на станции «Талая» ($\Delta=33^\circ$), т.к. записи на станции «Обнинск» для этих землетрясений были осложнены сильными фоновыми колебаниями в области P -волн. В то же время значение $M_w(\text{HRVD})$ рассчитано по волновым формам на многих ($n=61-89$) станциях.

В табл. 2 для землетрясений (1–4, 6–8) из [1, 10] приведены параметры механизмов очагов, определенные по знакам первых вступлений P -волн на ряде сейсмических станций для модели двойной пары сил по программе А.С. Ландера и Ж.Я. Аптекман. Эта программа написана для персонального компьютера и представляет собой удобную для пользователя версию программы [11]. Второй строкой для всех девяти землетрясений даны решения по ТМЦ [2].

Таблица 2. Параметры механизмов очагов землетрясений с $M_w(\text{MOS})$ и $M_w(\text{HRVD})$ *

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	h , км	Магнитуды			Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Источ- ник
				M_w M_w^*	MS MS	$MPSP$ m_b	T		N		P		$NP1$			$NP2$			
							PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	$SLIP$	STK	DP	$SLIP$	
1	07.02	02 42 33.5	10f	7.1	7.4	6.4	6	128	64	27	25	221	262	68	-15	357	76	-157	[1]
				7.3			11	126	67	10	21	220	261	68	7	354	83	158	[2]
2	28.06	09 49 44.9	10f	6.7	6.9	6.3	20	285	64	63	16	189	326	64	177	58	87	26	[1]
				6.8			27	295	51	64	26	191	333	51	179	63	89	39	[2]
3	05.09	10 07 09.8	33f	7.2	7.2	7.0	62	79	28	259	0	169	234	51	53	104	51	127	[1]
				7.2			80	321	6	89	7	180	277	38	100	85	53	82	[2]
4	23.10	08 56 03.6	33f	6.7	6.9	6.6	66	202	24	22	0	292	360	50	58	224	50	122	[1]
				6.6			78	144	5	30	11	299	23	34	81	214	56	96	[2]
5	11.11	21 26 43.6	33f	7.2	7.1	6.7													[1]
				7.5			69	194	8	83	19	350	67	27	72	267	65	99	[2]
6	28.11	18 32 14.4	50	7.4	7.1	6.5	63	290	9	39	25	133	244	21	117	35	71	80	[1]
				7.0			64	274	13	33	22	129	242	26	122	28	68	75	[2]
7	06.12	14 15 11.9	41	7.0	7.0	6.6	68	248	18	31	12	125	237	36	121	20	60	69	[1]
				6.7			62	277	13	33	25	129	246	24	125	29	71	76	[2]
8	18.12	06 46 18.1	10f	6.3	6.4	5.8	55	332	24	202	23	101	152	30	36	30	72	115	[1]
				6.2			67	303	2	38	22	129	223	23	95	37	68	88	[2]
9	26.12	00 58 52.8	33f	7.9	8.7	7.1													[1]
				9.0			52	36	3	113	38	222	329	8	110	129	83	87	[2]

Ниже дано краткое описание механизмов очагов всех землетрясений из табл. 2, показанных на рис. 2.

Большинство землетрясений (1–8) произошли в Тихоокеанском сейсмическом поясе, и лишь одно (9) – в Индийском. Решения механизмов очагов по MOS и HRVD близки (табл. 2, рис. 2).

Землетрясение (1) возникло 7 февраля в 02^h42^m с $MS=7.4$, $M_w=7.1$ в районе Западного Ириана, Индонезия. Движение в очаге происходило под действием близких по величине сжимающих и растягивающих напряжений, ориентированных в юго-западном и юго-восточном направлениях соответственно. Тип подвижки – сдвиг по круто-падающим плоскостям близширотного и близмеридионального направления с компонентами сброса.

Землетрясение (2) произошло 28 июня в 09^h49^m с $MS=6.9$, $M_w=6.7$ в районе о-вов Королевы Шарлотты вблизи берегов Северной Америки. Подвижка по обеим плоскостям крутого залегания северо-восточного и северо-западного простирания, произошла под действием близких по величине сжимающих и растягивающих напряжений, ориентированных на юг и запад соответственно (рис. 2). Тип подвижки – сдвиг.

Землетрясения (3, 4) в районе о. Хонсю, зарегистрированные 5 сентября в 10^h07^m с $MS=7.2$, $M_w=7.3$ и 23 октября в 08^h56^m с $MS=6.9$, $M_w=6.7$, имеют механизмы очагов, типичные

[12–14] для этих областей. Землетрясения возникли под действием сжимающих напряжений. Тип подвижки по обеим плоскостям – взброс с компонентами сдвига: для землетрясения (3) – правостороннего по $NP1$ и левостороннего по $NP2$; для (4) – левостороннего по $NP1$ и правостороннего по $NP2$. Но простирания нодальных плоскостей различные – для землетрясения (3) обе плоскости ориентированы близширотно, для (4) – в северо-восточном направлении.

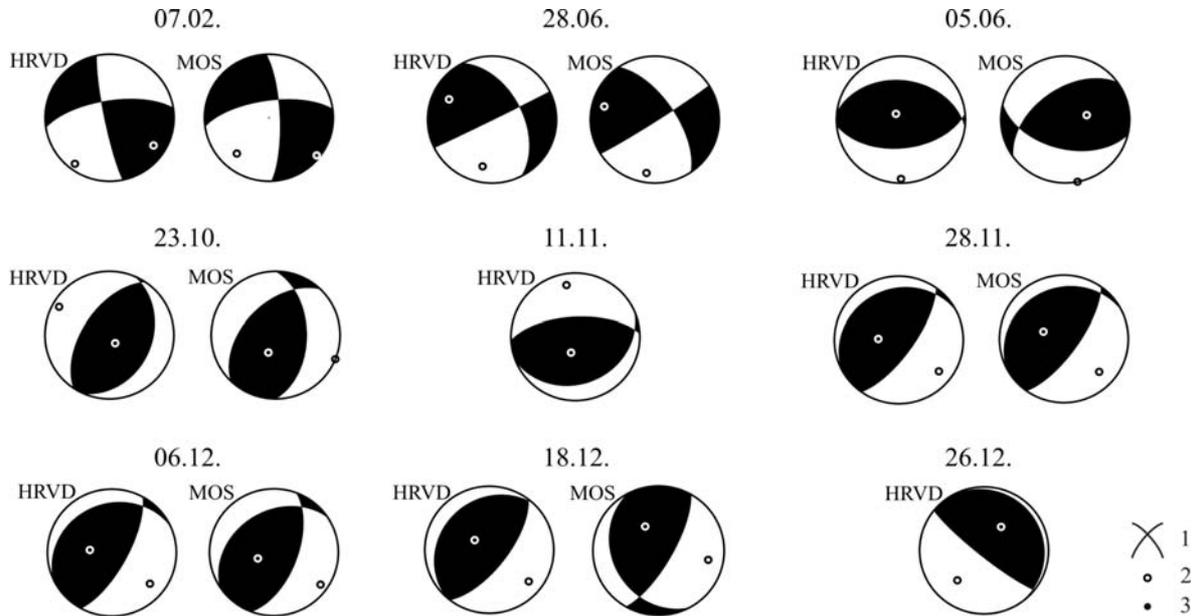


Рис. 2. Стереогаммы механизмов очагов землетрясений 2004 г. в проекции нижней полусферы

1 – нодальные линии; 2, 3 – оси главных напряжений сжатия и растяжения соответственно; зачернены области волн сжатия.

Землетрясения (6, 7) в районе о. Хоккайдо, произошедшие 28 ноября в $18^{\text{h}}32^{\text{m}}$ с $MS=7.1$, $M_w=7.4$ и 6 декабря в $14^{\text{h}}15^{\text{m}}$ с $MS=7.0$, $M_w=7.0$, а также землетрясение (8) 18 декабря в $06^{\text{h}}46^{\text{m}}$ с $MS=6.4$, $M_w=6.3$ в Курило-Камчатской зоне возникли под действием сжимающих напряжений, ориентированных на юго-юго-восток. Обе нодальные плоскости $NP2$ крутого залегания имеют северо-восточное простирание в (6, 7, 8), подвижка по ним – типа взброс с компонентами левостороннего сдвига в (6, 7) и правостороннего – в (8). По пологим плоскостям $NP1$ северо-восточного простирания подвижка типа надвиг с компонентами правостороннего сдвига в (6, 7) и левостороннего – в (8).

Эпицентр землетрясения (5) (11 ноября в $21^{\text{h}}26^{\text{m}}$ с $MS=7.1$, $M_w=7.2$) расположен в районе о. Тимор, вблизи сейсмического Индийского пояса, где 26 декабря в $00^{\text{h}}58^{\text{m}}$ произошло сильнейшее ($MS=8.7$, $M_w=7.9$) землетрясение (9) на о. Суматра. Механизмы событий (5, 9), представленные по HRVD, подобны. Тип движения – взброс по крутопадающим плоскостям и надвиг – по пологим. Движение произошло под превалирующим действием напряжений сжатия. Ориентация нодальных плоскостей для (5) – близширотная, для (9) – северо-западная.

Динамические параметры очагов землетрясений (1–4, 6, 7, 9) в табл. 3 рассчитаны по спектрам продольных волн, зарегистрированных цифровой аппаратурой IRIS–STS-1 на телесейсмических расстояниях по записям станции «Обнинск» (OBN). Интервал эпицентральных расстояний для рассматриваемых землетрясений оказался равным $\Delta=31\text{--}69^\circ$. Землетрясения (5) и (8) рассмотрены по записям станций «Арти» и «Талая» соответственно. Станционные спектры, приведенные к очагу, показаны на рис. 3. Определены следующие спектральные характеристики: уровень Ω_0 длиннопериодной ветви спектра, частота f_n точки перелома спектра, частота угловой точки f_0 . Далее рассчитывались динамические параметры: сейсмический момент M_0 , сброшенное $\Delta\sigma$ и кажущееся $\eta\sigma$ напряжения, а также длина L разрыва и подвижка \bar{u} в очагах [15]. Для получения значений L , \bar{u} , $\Delta\sigma$ использовалась дислокационная модель Брюна [16], которая нашла широкое применение в сейсмологической практике.

Таблица 3. Характеристики спектров Р-волн и динамические параметры очагов семи землетрясений 2004 г. по записям цифровых широкополосных сейсмометров STS-1 на станциях «Обнинск», «Арти», «Талая»

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	С/ст	M_w	M_S	Δ°	$\Omega_0, 10^{-4}$ м·с	$f_p, 10^{-2}$ Гц	$f_0, 10^{-2}$ Гц	$M_0, 10^{19}$ Н·м	$L, 10^3$ м	$\Delta\sigma, 10^5$ Н/м ²	$\bar{\eta}\sigma, 10^5$ Н/м ²	\bar{u} , м
1	07.02	02 42 33.5	OBN	7.1	7.4	98.1	0.40	4.2	11.0	5.0	44	20	56	0.94
2	28.06	09 49 44.9	OBN	6.7	6.9	70.1	0.28	2.7	22.9	1.2	22	39	41	0.90
3	05.09	10 07 09.8	OBN	7.3	7.2	68.9	1.90	2.7	12.6	9.8	40	54	14	2.23
4	23.10	08 56 03.6	OBN	6.7	6.9	66.3	0.32	3.5	20.9	1.3	24	33	38	0.82
5	11.11	21 26 43.6	ARU	7.2	7.1	84.0	2.51	12.0		6.6				
6	28.11	18 32 14.4	OBN	7.4	7.1	64.9	2.14	2.3	13.5	16.0	44	66	14	1.32
7	06.12	14 15 11.9	OBN	7.0	7.0	65.0	1.00	2.5	11.5	4.1	42	19	17	0.85
8	18.12	06 46 18.1	TLY	6.3	6.4	33.1	0.27	7.8		0.3				
9	26.12	00 58 52.8	OBN	7.9	8.7	70.1	17.75	6.3	11.2	79.0	74	68	3	5.25

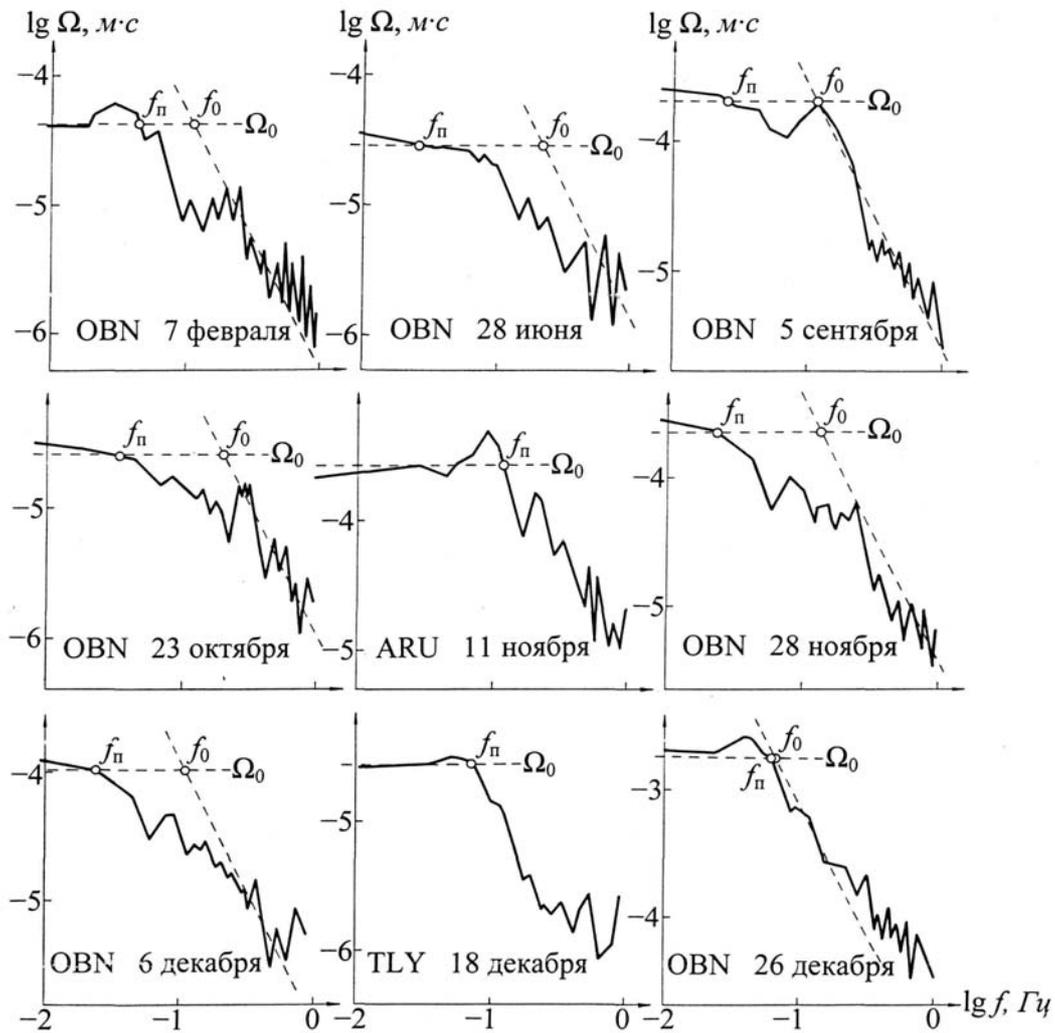


Рис. 3. Очаговые спектры Р-волн землетрясений (1–4, 6, 7, 9), (5), (8), записанных в 2004 г. на станциях «Обнинск», «Арти» и «Талая»

Л и т е р а т у р а

1. Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 2004 год / Отв. ред. О.Е. Старовойт. – Обнинск: ГС РАН, 2004–2005.
2. Bulletin of the International Seismological Centre for 2004. – Berkshire: ISC, 2006–2007.

3. **Шаторная Н.В. (отв. сост.), Бабкина В.Ф., Аторина М.А., Болдырева Н.В., Щербакова А.И., Рыжикова М.И.** Каталог землетрясений Земли за 2004 год. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
4. **Захарова А.И., Чепкунас Л.С.** Динамические параметры очагов сильных землетрясений по спектрам продольных волн на станции «Обнинск» // Физика Земли. – 1977. – № 2. – С. 9–17.
5. **Аптекман Ж.Я., Дараган С.К., Долгополов Д.В., Захарова А.И., Зобин В.М., Коган С.Я., Корчагина О.А., Москвина А.Г., Поликарпова Л.А., Чепкунас Л.С.** Спектры *P*-волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений. Унификация исходных данных и процедуры расчета амплитудных спектров // Вулканология и сейсмология. – 1985. – № 2. – С. 60–70.
6. **Dziewonski A., Chou T. and Woodhouse J.** Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity // J. Geophys. Res. – 1981. – **86**. – N B4. – P. 2825–2852.
7. **Jeffreys H., Bullen K.E.** Seismological tables // Brit. Assoc. for the advancement of Sci. – London: Gray-Milne Trust, 1958. – 65 p.
8. **Hanks T.C., Kanamori H.** A moment magnitude scale // J. Geophys. Res. – 1979. – **84**. – N 135. – P. 2348–2350.
9. **Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях ЕССН СССР.** – М.: Наука, 1982. – 272 с.
10. **Малянова Л.С., Чепкунас Л.С. (отв. сост.).** Каталог механизмов очагов землетрясений Земли по методу 1-х вступлений *P*-волн за 2004 год. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
11. **Старовойт О.Е., Чепкунас Л.С., Аптекман Ж.Я., Бармин М.П.** Об определении механизма очагов на ЭВМ ЕС-1030 // Физика сейсмических волн и внутреннее строение Земли. – М.: Наука, 1983. – С. 86–91.
12. **Захарова А.И., Чепкунас Л.С.** Очаговые параметры сильных землетрясений мира // Землетрясения Северной Евразии в 1994 году. – М.: ГС РАН, 2000. – С. 129–133.
13. **Чепкунас Л.С., Болдырева Н.В., Пойгина С.Г.** Оперативная обработка землетрясений мира по телесеismicким наблюдениям ГС РАН // Землетрясения Северной Евразии, 2002 г. – Обнинск: ГС РАН, 2008. – С. 274–282.
14. **Чепкунас Л.С., Болдырева Н.В., Пойгина С.Г.** Оперативная обработка землетрясений мира по телесеismicким наблюдениям ГС РАН. (См. раздел I (Обзор сейсмичности) в наст. сб.).
15. **Аптекман Ж.Я., Белавина Ю.Ф., Захарова А.И., Зобин В.М., Коган С.Я., Корчагина О.А., Москвина А.Г., Поликарпова Л.А., Чепкунас Л.С.** Спектры *P*-волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений. Переход от стационарного спектра к очаговому и расчет динамических параметров очага // Вулканология и сейсмология – 1989. – № 2. – С. 66–79.
16. **Brune J.N.** Tectonic stress and the spectrum of seismic shear waves from earthquake // J. Geophys. Res. – 1970. – **75**. – N 26. – P. 4997–5009.