

II. СПЕКТРЫ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

УДК 550.348.436

ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЗЕМЛИ

А.И. Захарова, Л.С. Чепкунас, Л.С. Малянова

Геофизическая служба РАН, г. Обнинск aiz@ifz.ru

Для 14 землетрясений земного шара с очагами в земной коре (рис. 1) представлены основные и динамические параметры очагов. Двенадцать из них возникли в Тихоокеанском сейсмическом поясе: шесть – в Курило-Камчатской зоне с магнитудами $M_S=5.8-6.3$, по одному – в районе Аляски с $M_S=7.0$, Тайваня с $M_S=7.3$, Марианских островов с $M_S=7.2$ и о. Суматры с $M_S=7.0$, в Молуккском проливе с $M_S=6.9$ и в море Банда с $M_S=7.1$. Два землетрясения произошли в Альпийско-Гималайском сейсмическом поясе (в Индии – с $M_S=7.8$ и в Китае – с $M_S=7.1$).

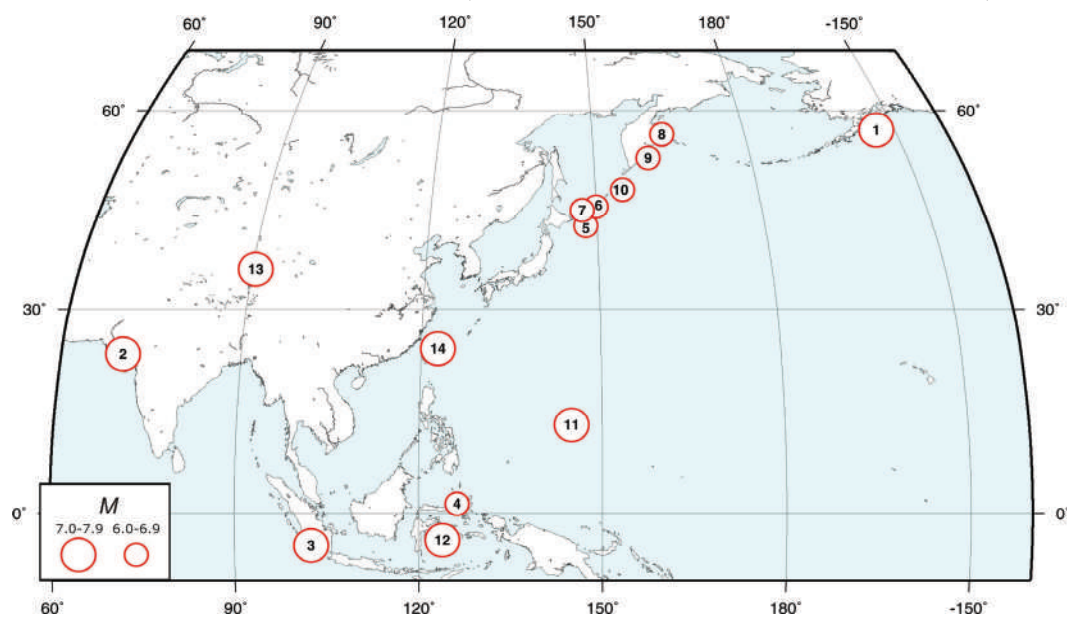


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений за 2001 г., для которых построены спектры по цифровым сейсмограммам на станции «Обнинск»

Наиболее сильным в 2001 г. было разрушительное землетрясение 26 января с магнитудой $M_S=7.8$ в Индии, шт. Гуджарат. Отметим, что в 2001 г., как на территории России, так и на территории стран СНГ, не было сильных землетрясений с $M_S \geq 7.0$.

Основные параметры очагов землетрясений (время возникновения t_0 и координаты гипоцентра φ, λ, h , магнитуды) даны в табл. 1 из двух бюллетеней: I – Сейсмологического бюллетеня ГС РАН [1]; II – бюллетеня Международного сейсмологического центра (ISC) [2]. Значения гипоцентров в I и II получены по временам первых вступлений P -волн на основе одного и того же годографа Джеффриса-Буллена [3], но по разным системам наблюдений. Параметры землетрясений варианта III определены в Гарвардском университете США по методу тензора момента центраида (ТМЦ), использующего при расчетах волновые формы от продольных до поверхностных волн [2]. 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.

Таблица 1. Сведения о землетрясениях за 2001 г.

№	Дата, д м	Вариант	t_0 , ч мин с	Эпицентр			Магнитуды				Район
				φ°, N	λ°, E	h , км	M_w	$MPSP$, m_b	$MPLP$	MS	
1	10.01	I	16 02 42.2	56.92	-153.68	27	7.1	6.7	7.0	7.0	Район острова Кадык
		II	16 02 43.6	56.99	-153.46	33		6.1		6.9	
		III	16 02 54.5	56.99	-153.56	21	7.0				
2	26.01	I	03 16 42.3	23.38	70.29	33	7.6	7.2	7.8	7.8	Индия
		II	03 16 40.3	23.44	70.31	16		6.9		7.9	
		III	03 16 54.9	23.63	70.24	20	7.7				
3	13.02	I	19 28 29.1	-4.79	102.54	33	7.4	6.5	6.9	7.0	Южная Суматра
		II	19 28 30.5	-4.75	102.48	34		6.2		7.2	
		III	19 28 45.1	-5.40	102.36	21	7.4				
4	24.02	I	07 23 48.4	1.41	126.29	33	7.3	6.8	7.3	6.9	Молуккский пролив
		II	07 23 50.5	1.33	126.34	56		6.5		6.9	
		III	07 23 57.8	1.55	126.42	43	7.1				
5	23.03	I	11 30 10.7	44.08	148.01	34	6.2	5.9	6.6	6.0	Курильские острова
		II	11 30 12.0	44.12	148.04	43		5.8		5.7	
		III	11 30 16.0	44.12	148.38	46	6.0				
6	25.05	I	00 40 56.0	44.56	148.24	66	7.0	6.3	6.8	6.9	Курильские острова
		II	00 40 50.6	44.21	148.35	33		6.1		6.7	
		III	00 40 57.6	44.18	148.61	32	6.7				
7	24.06	I	13 18 55.1	44.38	148.07	53	6.3	6.3		6.3	Курильские острова
		II	13 18 50.0	44.19	148.45	20		5.8		5.7	
		III	13 18 58.8	44.43	148.70	35	6.0				
8	02.08	I	23 41 10.1	56.20	163.73	46	6.5	6.0	6.4	6.2	Восточное побережье Камчатки
		II	23 41 06.7	56.25	163.77	16		5.9		6.2	
		III	23 41 12.3	56.26	163.93	17	6.3				
9	08.10	I	18 14 22.6	52.57	160.36	21	6.8	6.0	6.6	6.3	У восточного побережья Камчатки
		II	18 14 25.4	52.54	160.30	41		6.0		6.4	
		III	18 14 32.2	52.59	160.56	28	6.5				
10	09.10	I	23 53 37.3	47.81	155.01	36		6.3	7.1	5.8	Курильские острова
		II	23 53 38.6	47.71	155.07	47		6.4		5.7	
		III	23 53 39.5	47.79	155.24	22	5.9				
11	12.10	I	15 02 17.1	12.93	144.97	33	7.2	6.9	7.2	7.2	Южнее Марианских островов
		II	15 02 19.6	12.72	144.98	62		6.7			
		III	15 02 23.3	12.88	145.08	42	7.0				
12	19.10	I	03 28 45.0	-04.02	123.92	33	7.1	6.4	7.1	7.1	Море Банда
		II	03 28 44.0	-04.09	123.98	33		6.1		7.2	
		III	03 28 58.4	-04.31	124.11	19	7.5				
13	14.11	I	09 26 09.9	35.89	90.58	10	6.8	6.2	6.8	7.5	Провинция Цинхай
		II	09 26 10.4	35.93	90.59	11		6.1		8.0	
		III	09 27 15.9	35.80	92.91	15	7.8				
14	18.12	I	04 03 01.5	24.15	122.78	33	6.8	6.3	7.0	7.3	Район Тайваня
		II	04 03 00.4	23.92	122.81	28		6.3		7.2	
		III	04 03 04.5	24.00	122.79	16	6.8				

В I представлены 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 сейсмической станции «Обнинск» (см. ниже, в табл. 3). Расчет сейсмического момента M_w выполнен по формуле Н. Канамори [4]:

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

в единицах «дина·см». В II даны магнитуды m_b по продольным волнам и Ms – по поверхностным. В III – моментные магнитуды M_w , полученные по методу ТМС и взятые из [2].

Относительно магнитуд m_b и $MPSP$, полученных по продольным P -волнам, следует отметить, что для одиннадцати землетрясений значения $m_b < MPSP$, для двух – равны между собой. Разница этих значений объясняется методикой их расчета. Для m_b выбирается интервал записи P -волн в пределах 5 с от вступления, в то время как для $MPSP$ он может быть увеличен до 40–60 с [5]. Максимальное различие магнитуд $MPSP$ и m_b составляет 0.6 единицы магнитуды для землетрясения 1. Сравнение магнитуд $MS(MOS)$ и $Ms(ISC)$ по поверхностным волнам показывает, что в основном различия заключены в интервале 0.1–0.2 единицы магнитуды. Максимальная разница в 0.5 единиц получена только для землетрясения 12, что, возможно, связано с разной выборкой данных для расчета.

Магнитуды $M_w(I)$ и $M_w(III)$ для землетрясений 3, 13 равны, для 2, 11, 12 $M_w(I)$ меньше $M_w(III)$ и для восьми землетрясений 1, 4–10 – $M_w(I)$ превышает $M_w(III)$ на 0.1–0.4 единицы магнитуд. Отмечаемые различия, вероятно, связаны с различной методикой определения: $M_w(I)$ определены по одному типу волн на одной станции, в то время как при расчете $M_w(III)$ рассматривается вся сейсмограмма на многих станциях. (Информация о сейсмической обстановке в районах землетрясений 26 января (2), 25 мая (6), 8 октября (9) и 14 ноября (13) за 2001 г. помещена на сайте <http://www.ceme.gsras.ru>).

В табл. 2 приведены механизмы очагов шести землетрясений 1, 3, 5, 6, 8, 13, для которых в ГС РАН получены решения по знакам первых вступлений P -волн [1] для модели двойной пары сил. Здесь же помещены решения, полученные по методу ТМЦ [6] из [2]. Для остальных землетрясений из списка табл. 1 решения по ТМЦ и описания механизмов даны в работе [7] наст. сб.

Таблица 2. Параметры механизмов очагов за 2001 г. по [1, 2]

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	h , км	Магнитуды			Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Источник
				M_w	MS	$MPSP$	T		N		P		$NP1$			$NP2$			
							PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	$SLIP$	STK	DP	$SLIP$	
1	10.01	16 02 42.2	27	7.0	7.0	6.7	51	299	4	34	38	126	242	7	119	33	84	86	MOS
				7.0	7.0	6.7	53	333	2	240	37	148	224	8	74	60	82	92	HRV
3	13.02	19 28 29.1	33	7.4	7.0	6.5	50	50	9	309	38	211	253	11	34	130	84	99	MOS
				7.4	7.4	6.5	60	26	4	122	29	214	315	16	103	121	74	86	HRV
5	23.03	11 30 10.7	34	6.0	6.0	5.9	68	276	18	59	12	153	265	36	123	48	60	69	MOS
				6.0	6.0	5.9	71	268	11	32	16	125	231	31	112	26	61	77	HRV
6	25.05	00 40 56.0	66	6.7		6.3	64	287	5	27	26	119	220	20	104	25	71	85	MOS
8	02.08	23 41 10.1	46	6.3	6.2	6.0	5	245	78	0	10	154	290	79	-176	199	86	-11	MOS
				6.3	6.3	6.0	31	245	56	37	13	147	282	59	166	191	78	32	HRV
13	14.11	09 26 09.9	10	7.8	7.5	6.2	4	303	74	45	16	212	348	76	-171	256	81	-14	MOS
				7.8	7.8	6.2	13	319	59	207	28	56	94	61	-12	190	80	-150	HRV

Ниже дано краткое описание механизмов очагов, приведенных на рис. 2.

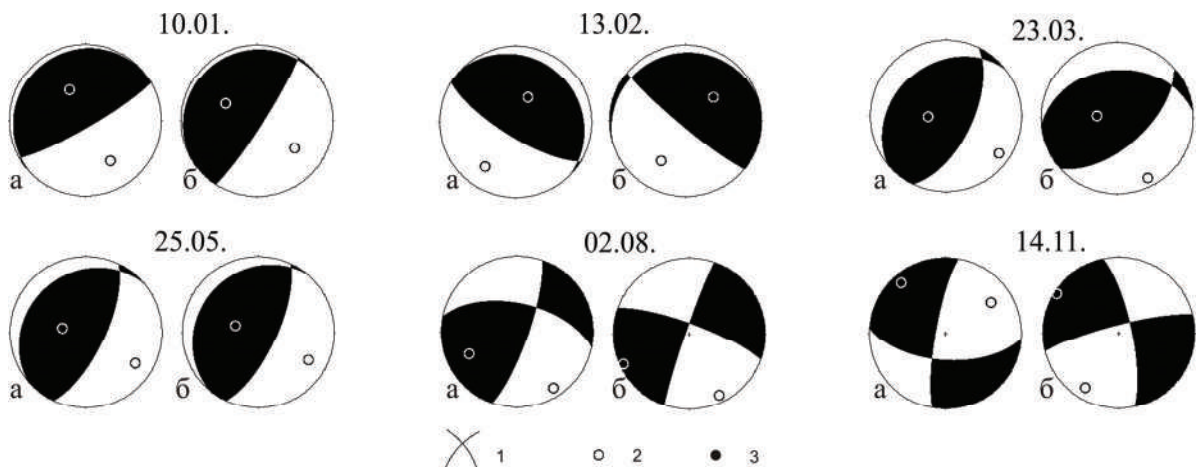


Рис. 2. Стереогаммы механизмов очагов землетрясений 2001 г. в проекции нижней полусферы

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

Решения механизма очага землетрясения 10 января (1) близ о. Кадыяк, по данным [1] и [2], близки. Землетрясение произошло под действием близких по величине сжимающих напряжений, ориентированных на юго-восток, и растягивающих, направленных на северо-запад. Обе нодальные плоскости имеют простирание северо-восток–юго-запад, одна из них – пологая, тип движения – надвиг с компонентами правостороннего сдвига по $NP1$ в [1] и левостороннего в [2]. Другая плоскость $NP2$ – крутопадающая, тип движения – чистый взброс в [2] и взброс с компонентой сдвига по $NP2$ в [1].

Решения механизма очага землетрясения 13 февраля (3) в районе Южной Суматры, по данным [1] и [2], также близки. Землетрясение произошло под действием близких по величине сжимающих напряжений, ориентированных на юго-запад, и растягивающих, направленных на северо-восток. Тип движения в очаге по крутой плоскости $NP2$ – взброс с компонентами сдвига – правостороннего в [1] и левостороннего в [2]. По пологой плоскости $NP1$ – надвиг с компонентами сдвига: левостороннего в [1] и правостороннего в [2].

Решения механизма очагов землетрясения 23 марта (5) в районе Курильских островов, по данным [1] и [2], также близки. Землетрясение произошло под действием сжимающих напряжений, ориентированных на юго-восток. Простирание крутопадающих нодальных плоскостей – северо-восточное. Тип движения в очаге по обеим плоскостям в [1] и [2] – взброс с компонентами сдвига, по $NP1$ – правостороннего и по $NP2$ – левостороннего.

Для землетрясения 25 мая (6) в районе Курильских островов решение, полученное по P -волнам и опубликованное в [1], близко к таковому по данным Гарварда [2]. Последнее помещено в табл. 4 [8]. При сравнении решений видно, что они также близки и подобны механизму очага землетрясения 23 марта (5). Оно также произошло под действием сжимающих напряжений, ориентированных на юго-восток. Простирание плоскостей – северо-восточное, но одна из плоскостей $NP1$ залегает полого, другая $NP2$ – круто. По плоскости $NP1$ – тип движения – надвиг с элементами правостороннего сдвига, по $NP2$ – взброс с элементами левостороннего сдвига.

Механизм очага землетрясения 2 августа (8) в районе Камчатки представляет сдвиг по обеим нодальным плоскостям крутого залегания в решениях [1] и [2]. Землетрясение произошло под действием близких по величине сжимающих напряжений, ориентированных на юго-запад, и растягивающих, направленных на северо-запад.

Механизм очага землетрясения 14 ноября (13) в районе Цхинкая представляет сдвиг по обеим нодальным плоскостям крутого залегания в решениях [1] и [2]. Землетрясение произошло под действием близких по величине сжимающих напряжений, ориентированных на юго-восток, и растягивающих, направленных на юго-запад.

Динамические параметры очагов в табл. 3 рассчитаны по спектрам продольных волн, зарегистрированных цифровой аппаратурой IRIS – STS-1 на станции «Обнинск» (OBN) на телесеismicких расстояниях $\Delta=40^\circ-92^\circ$. 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 по станции «Обнинск» [9, 10]. На их основе рассчитаны динамические параметры (сейсмический момент M_0 , сброшенное $\Delta\sigma$ и кажущееся $\eta\sigma$ напряжения), а также величины разрыва в очагах (длина L) и подвижки (\bar{u}) [11]. Для получения значений L , \bar{u} , $\Delta\sigma$ использовалась дислокационная модель Брюна [12], которая нашла широкое применение в сейсмологической практике.

Таблица 3. Характеристики спектров P -волн и динамические параметры очагов землетрясений по записям цифровой аппаратуры IRIS – STS-1 на станции «Обнинск»

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	M_w	MS	Δ°	$\Omega_0 \cdot 10^{-4}$, мс	$f_n \cdot 10^{-2}$, Гц	$f_0 \cdot 10^{-2}$, Гц	$M_0 \cdot 10^{19}$, Н·м	$L \cdot 10^3$, м	$\Delta\sigma \cdot 10^5$, Н/м ²	$\eta\sigma \cdot 10^5$, Н/м ²	\bar{u} , м
1	10.01	16 02 42.2	7.1	7.0	68.01	1.10	2.7	8.7	4.7	56	9.4	15	0.54
2	26.01	03 16 42.3	7.6	7.8	40.36	9.55	6.9	14.1	31.0	34	276	36	9.76
3	13.02	19 28 29.1	7.4	7.0	80.49	2.51	3.4	9.3	12.0	52	30	5.8	1.61
4	24.02	07 23 48.4	7.3	6.9	88.69	1.41	1.8	14.4	9.2	71	9.0	5.4	0.66
5	23.03	11 30 10.7	6.2	6.0	65.41	0.063	3.2	21.4	0.25	24	6.3	8.8	0.16
6	25.05	00 40 56.0	7.0		65.12	0.55	4.6	11.2	4.2	52	10	–	0.25
7	24.06	13 18 55.1	6.4	6.0	65.20	0.063	2.3	11.5	0.48	50	1.3	10	0.30
8	02.08	23 41 10.1	6.5	6.2	61.00	0.089	13.8	25.1	0.62	24	16	16	0.17
9	08.10	18 14 22.6	6.8	6.3	63.05	0.40	2.6	9.1	1.5	54	3.3	4.2	0.19

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	M_w	MS	Δ°	$\Omega_0 \cdot 10^{-4}$,	$f_n \cdot 10^{-2}$,	$f_0 \cdot 10^{-2}$,	$M_0 \cdot 10^{19}$,	$L \cdot 10^3$,	$\Delta\sigma \cdot 10^5$,	$\bar{\eta}\sigma \cdot 10^5$,	\bar{u} , м
						м·с	Гц	Гц	Н·м	м	Н/м ²	Н/м ²	
10	09.10	23 53 37.3	6.4	5.8	65.2	0.1	2.6	18.2	0.41	27	7.3	2.7	0.20
11	12.10	15 02 17.1	7.2	7.2	89.70	1.00	2.7	10.5	6.9	36	51	20	1.94
12	19.10	03 28 45.0	7.1	7.1	91.75	0.54	10.0	14.4	4.3	34	38	23	0.89
13	14.11	09 26 09.9	6.8	7.5	41.25	0.58	14.4	19.0	1.9	26	38	206	1.35
14	18.12	04 03 01.5	6.8	7.3	68.43	0.48	8.3	12.9	2.0	38	13	98	1.02

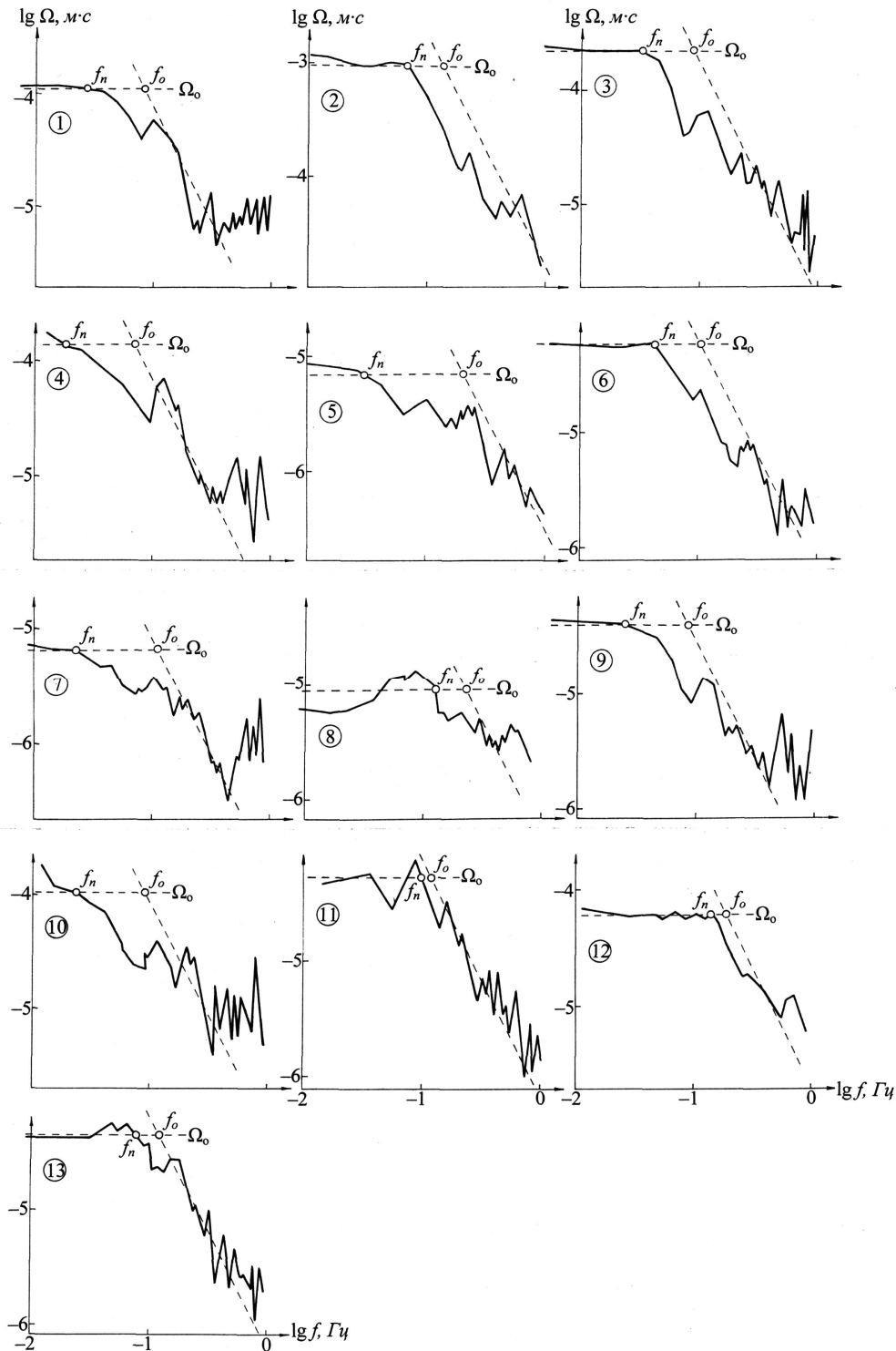


Рис. 3. Очаговые спектры P-волн, записанных на станции «Обнинск»

Номера спектров соответствуют номерам землетрясений в табл. 1.

Л и т е р а т у р а

1. **Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 2000 год** / Отв. ред. О.Е. Старовойт. – Обнинск: ГС РАН, 2000–2001.
2. **Bulletin of the International Seismological Centre for 2000.** – Berkshire: ISC, 2002.
3. **Jeffreys H., Bullen K.E.** Seismological tables // Brit. Assoc. for the advancement of Sci. – London: Gray-Milne Trust, 1958. – 65 p.
4. **Hanks T.C., Kanamori H.** A Moment Magnitude Scale // J. Geophys. Res. – 1979. – **84.** – № 135. – P. 2348–2350.
5. **Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях ЕССН СССР.** – М.: Наука, 1982. – 272 с.
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.** – № B4. – P. 2825–2852.
7. **Чепкунас Л.С., Болдырева Н.В.** Оперативная обработка землетрясений мира по телесеismicким наблюдения ГС РАН. (См. раздел I (Обзор сейсмичности) в наст. сб.).
8. **Старовойт О.Е., Захарова А.И., Рогожин Е.А., Михайлова Р.С., Пойгина С.Г.** Северная Евразия. (См. раздел I (Обзор сейсмичности) в наст. сб.).
9. **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.
10. **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.
11. **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 станционного спектра к очаговому и расчет динамических параметров очага // Вулканология и сейсмология – 1989. – № 2. – С. 66–79.
12. **Brune J.N.** Tectonic stress and the spectrum of seismic shear waves from earthquake // J. Geophys. Res. – 1970. – **75.** – № 26. – P. 4997–5009.