

## II. СПЕКТРЫ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

УДК 550.348. (100)

### **ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЗЕМЛИ**

*Л.С. Чепкунас, Л.С. Малянова*

*ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, luba@gsras.ru*

**Аннотация.** Для 18 сильных землетрясений земного шара с магнитудой  $MS=5.4-8.4$ , удаленных от станций «Обнинск», «Арти», «Анапа», «Кисловодск» и «Талая» на расстояния  $\Delta=45-57^\circ$ , рассчитаны динамические (очаговые) параметры. Очаги землетрясений расположены в земной коре, в основном в восточной части земного шара, большинство из них произошли в Альпийско-Гималайском ( $N=8$ ) и Тихоокеанском ( $N=6$ ) сейсмических поясах и лишь три, но наиболее сильных ( $MS=6.9, 8.4$  и  $8.0$ ), – в Индийском, у западного побережья Северной Суматры.

Выбор  $\Delta$  связан с методикой расчета спектров продольных  $P$ -волн по цифровым сейсмограммам аппаратурой IRIS–STS-1 на телесеизмических расстояниях для коровых землетрясений по записям одной станции. На основе станционных спектров, приведенных к очагу, определены следующие спектральные характеристики: уровень  $\Omega_0$  длиннопериодной ветви спектра, частота  $f_n$  точки перелома спектра, частота угловой точки  $f_0$ . Далее рассчитывались очаговые параметры: сейсмический момент  $M_0$ , сброшенное  $\Delta\sigma$  и кажущееся  $\eta\sigma$  напряжения, а также длина  $L$  разрыва и подвижка  $\bar{u}$  в очагах. Для получения значений  $L, \bar{u}, \Delta\sigma$  использовалась дислокационная модель Брюна.

**Abstract.** For eighteen strong earthquakes with the magnitude  $MS=5.4-8.4$ , remote from «Obninsk», «Arti», «Anapa», «Kislovodsk» and «Talaya» at distances  $\Delta=45-57^\circ$ , are calculated dynamic (focal) parameters. The foci of earthquakes are located in the earth's crust, mainly in the eastern part of the earth, most of them occurred in the Alpine-Himalayan ( $N=8$ ) and Pacific ( $N=6$ ) seismic belts and only three strongest earthquakes ( $MS=6.9, 8.4$  and  $8.0$ ) are located in the Indian belt, off the western coast of northern Sumatra.

The choice of  $\Delta$  is related to the method of calculating the longitudinal  $P$ -wave from digital seismograms using the equipment of IRIS–STS-1 at teleseismic distances for crustal earthquakes according to the records of one station. The following spectral characteristics are determined based on the station spectra, brought to the focus: level  $\Omega_0$  of the long-period branch of the spectrum, frequency  $f_n$  of the point of fracture of the spectrum, frequency of the angular point  $f_0$ . The focal parameters were calculated next: the seismic moment  $M_0$ , the dropped  $\Delta\sigma$  and apparent  $\eta\sigma$  stress, the length  $L$  of the discontinuity and the shift  $\bar{u}$  in the foci. To obtain the values of  $L, \bar{u}, \Delta\sigma$  the Brun dislocation model were used.

Очаговые параметры рассчитаны по спектрам продольных волн, зарегистрированных на станциях «Арти», «Обнинск», «Талая», «Анапа» и «Кисловодск» (табл. 1). Спектры построены для 18 сильных ( $MS=5.4-8.4$ ) землетрясений Земли за 2012 г. из [1]. Основные параметры землетрясений приведены в табл.2. Все землетрясения расположены в основном в восточной части земного шара на расстоянии  $\Delta<100^\circ$  с очагами в земной коре (рис. 1). Но это достаточно сильные землетрясения на территории России и в пограничных районах Северной Евразии, представляющие заметный интерес.

**Таблица 1.** Сейсмические станции ФИЦ ЕГС РАН, используемые для анализа спектров 18 сильных ( $MS=5.4-8.4$ ) землетрясений Земли в 2012 г.

№	Станция	Код	Координаты			Источник
			$\varphi^\circ, N$	$\lambda^\circ, E$	$h, m$	
1	Арти	ARU	56.429	58.562	260	[2]
2	Обнинск	OBN	55.114	36.569	130	[2]
3	Талая	TLY	51.681	103.644	579	[3]
4	Анапа	ANN	44.881	37.314	58	[4]
5	Кисловодск	KIV0	43.956	42.695	1196	[4]

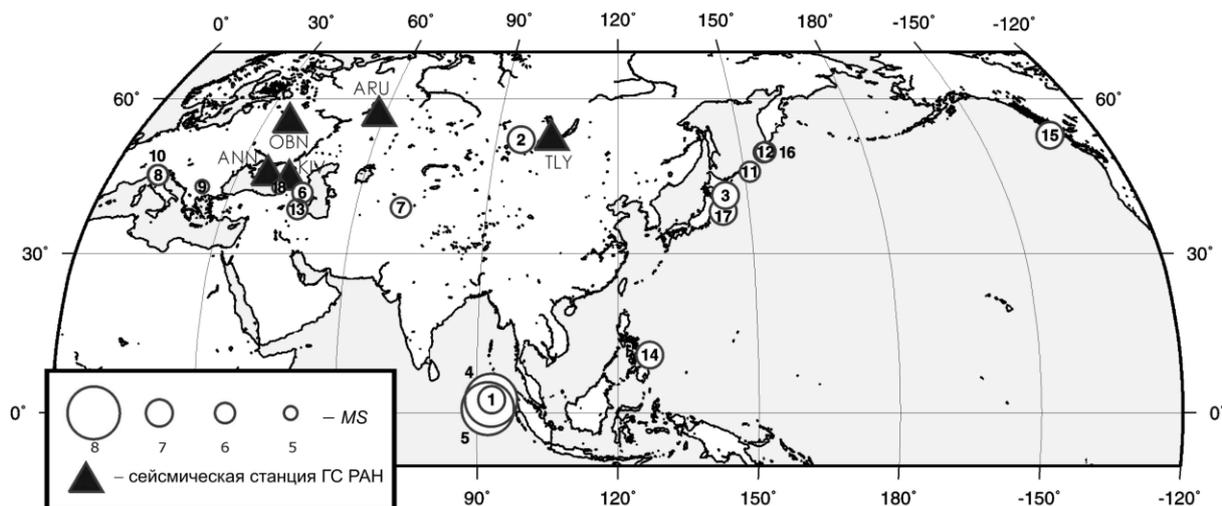


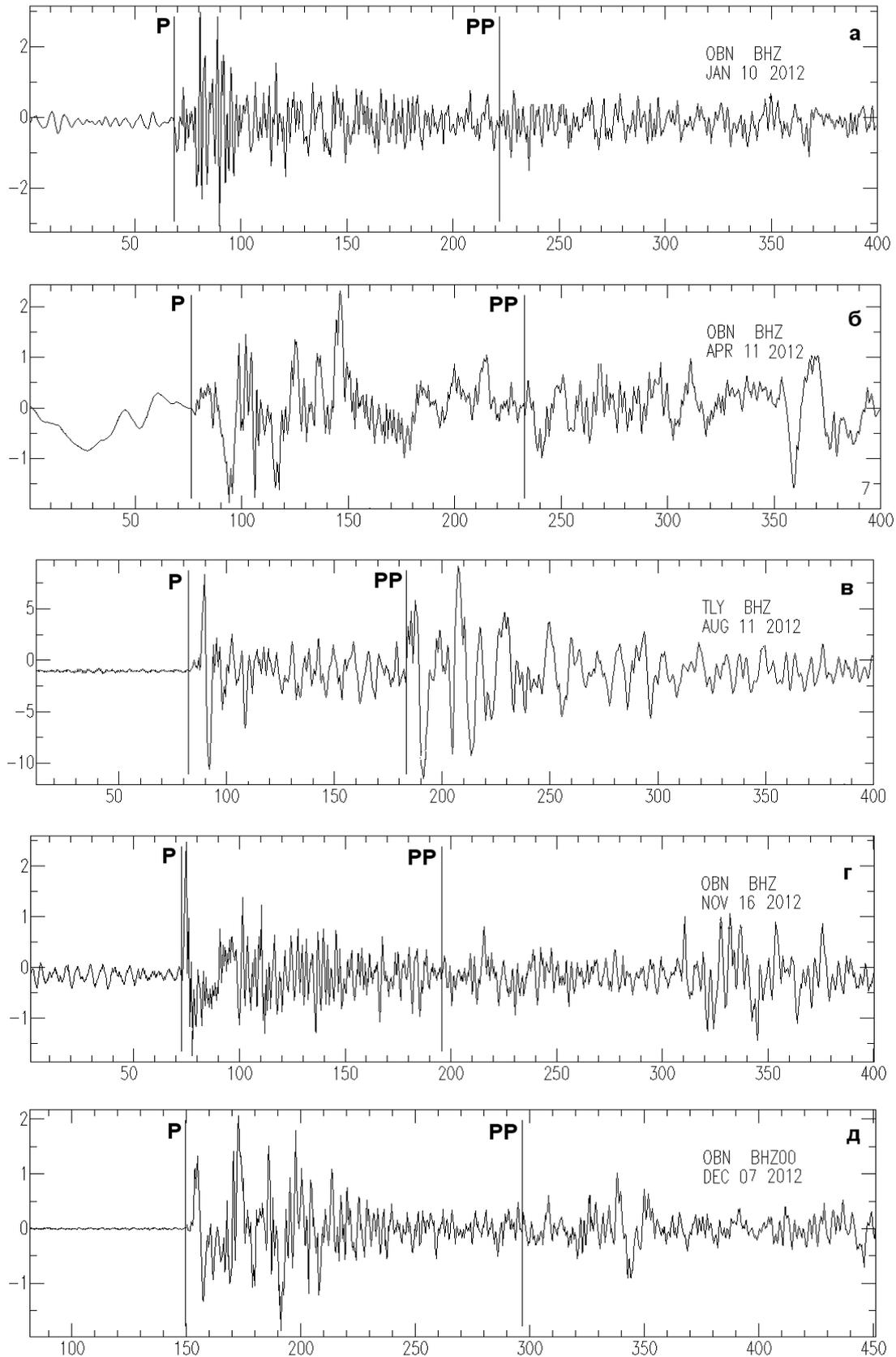
Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений с рассчитанными спектрами за 2012 г.

Таблица 2. Сведения о сильных землетрясениях Земли с  $MS=5.4-8.4$  по данным из [1, 5]

№	Дата, д м	$t_0$ , ч мин с	Гипоцентр			MS	Район по [6]
			$\varphi^\circ$	$\lambda^\circ$	$h$ , км		
1	10.01	18 36 58.2	2.40	93.16	22	6.9	У западного побережья Северной Суматры
2	26.02	06 17 18.0	51.73	96.05	14	6.7	Юго-Западная Сибирь, Россия
3	14.03	09 08 36.6	40.94	144.91	36	6.9	У восточного побережья Хонсю, Япония
4	11.04	08 38 36.5	2.27	93.08	38	8.4	У западного побережья Северной Суматры
5	11.04	10 43 08.7	0.80	92.44	26	8.0	У западного побережья Северной Суматры
6	07.05	04 40 25.8	41.46	46.85	10	5.6	Восточный Кавказ
7	12.05	23 28 44.8	38.68	70.37	30	5.8	Афганистан-Таджикистан, пограничная область
8	20.05	02 03 50.2	44.86	11.26	12	6.1	Северная Италия
9	22.05	00 00 30.9	42.68	22.92	12	5.4	Болгария
10	29.05	07 00 01.6	44.85	11.08	10	5.9	Северная Италия
11	08.07	11 33 04.0	45.48	151.33	43	5.9	Курильские острова
12	20.07	06 10 26.9	49.39	155.94	47	5.9	Курильские острова
13	11.08	12 23 16.3	38.36	46.81	11	6.5	Армения-Азербайджан-Иран, пограничная область
14	31.08	12 47 32.4	10.73	126.74	33	7.4	Район Филиппинских островов
15	28.10	03 04 07.8	52.63	-132.30	21	7.5	Район островов Королевы Шарлотты
16	16.11	18 12 41.4	49.22	155.52	62	6.4	Курильские острова
17	07.12	08 18 20.8	37.95	144.05	25	7.5	У восточного побережья Хонсю, Япония
18	23.12	13 31 38.8	42.56	40.84	11	5.4	Чёрное море

Из табл. 2 следует, что очаги выбранных землетрясений расположены в земной коре в основном в восточной части земного шара, большинство из них произошли в Альпийско-Гималайском ( $N=8$  с №№ 2, 6–10, 13, 18) и Тихоокеанском ( $N=6$  с №№ 3, 11, 12, 14–16) сейсмических поясах и лишь три, но наиболее сильных ( $MS=6.9, 8.4$  и  $8.0$ , с №№ 1, 4, 5), – в Индийском, у западного побережья Северной Суматры.

На всех станциях использовались записи вертикального канала цифрового широкополосного сейсмометра STS-1. Анализируемый интервал выбирался от вступления продольной волны  $P$  до вступления отраженной волны  $PP$ . В качестве примера на рис. 2 приведены записи  $P$ -волн для пяти землетрясений, зарегистрированных на сейсмических станциях «Обнинск» и «Талая».



**Рис. 2.** Сейсмограммы продольных волн на станциях «Обнинск» и «Талая» для землетрясений 10 января в 18<sup>h</sup>36<sup>m</sup> с  $MS=6.9$ ,  $\Delta=69.51^\circ$  (а); 11 апреля в 10<sup>h</sup>43<sup>m</sup> с  $MS=8.0$ ,  $\Delta=70.51^\circ$  (б); 11 августа в 12<sup>h</sup>23<sup>m</sup> с  $MS=6.5$ ,  $\Delta=41.29^\circ$  (в); 16 ноября в 18<sup>h</sup>12<sup>m</sup> с  $MS=6.4$ ,  $\Delta=64.17^\circ$  (г); 7 декабря в 08<sup>h</sup>18<sup>m</sup> с  $MS=7.5$ ,  $\Delta=68.60^\circ$  (д)

**Амплитудные спектры**, приведенные на рис. 3, рассчитаны по программе Access Service Controller (SAC) [7]. Это интерактивная программа общего назначения, снабженная модулями спектрального анализа, позволяющая выделять, рассчитывать и анализировать спектральные данные сигналов. Аппроксимация спектров и расчет очаговых параметров проводились по [8–10]. Станционные спектры исправлялись за влияние амплитудно-частотной характеристики аппаратуры и приводились к очагу с учетом неупругого затухания  $m(f)$ , частотной характеристики земной коры под станцией  $c(f)$ , геометрического расхождения  $G(\Delta)$  фронта  $P$ -волн, направленности излучения из очага  $R_{\theta\varphi}$ . Первые два фактора  $m(f)$  и  $c(f)$  зависят от частоты, они приводят к изменению всей спектральной картины. В данной работе величина поправки за направленность излучения из очага  $R_{\theta\varphi}$  принималась средней и равной 0.4 для всех землетрясений.

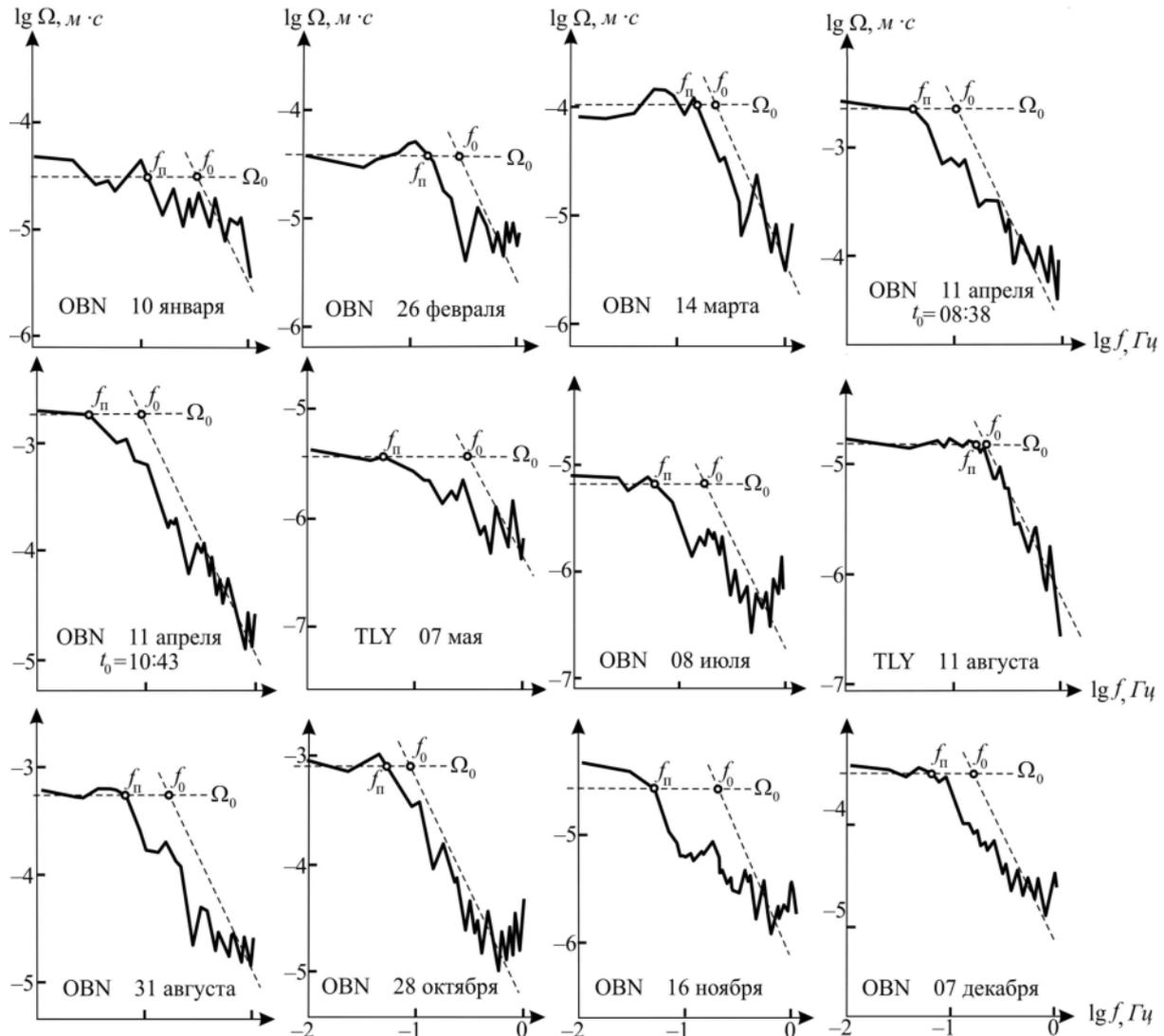


Рис. 3. Спектры  $P$ -волн землетрясений 2012 г. из табл. 1

**Спектральные параметры** для всех 18 землетрясений даны в табл. 3. Динамические параметры были посчитаны для 12 из них и представлены в табл. 4. Определены следующие спектральные характеристики: уровень  $\Omega_0$  длиннопериодной ветви спектра, частота  $f_n$  точки перелома спектра, частота угловой точки  $f_0$ , точка пересечения двух прямых, описывающих спектр длиннопериодной и короткопериодной частей спектра. На их основе вычислялись 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 по методике [8–10]. Для получения значений  $L$ ,  $\bar{u}$ ,  $\Delta\sigma$  использовалась дислокационная модель Брюна [11], которая нашла широкое применение в сейсмологической практике.

**Таблица 3.** Значения спектральной амплитуды  $\Omega_0$ , скалярного сейсмического момента  $M_0$  и моментной магнитуды  $M_w$  по данным из OBN [1] и GCMT [12] за 2012 г.

№	Дата, д м	$t_0$ , ч мин с	Станция	$\Delta^\circ$	$MS$	$\Omega_0, 10^{-4}$ м·с	$M_0, 10^{19}$ Н·м OBN	$M_w$ OBN	$M_0, 10^{19}$ Н·м GCMT	$M_w$ GCMT
1	10.01	18 36 58.2	OBN	69.51	6.9	0.316	1.4	6.7	7.55	7.2
			ARU	60.56		1.10	2.0	6.8		
2	26.02	06 17 18.0	OBN	34.67	6.7	39.8	1.5	6.8	1.19	6.6
3	14.03	09 08 36.6	OBN	66.59	6.9	1.12	6.2	7.2	3.35	6.9
			TLY	30.08		1.90	5.5	7.1		
			ARU	55.28		2.69	6.2	7.2		
			KIV	70.39		2.45	7.1	7.2		
4	11.04	08 38 36.5	OBN	69.58	8.4	22.4	99.0	8.0	914	8.6
			TLY	50.03		25.1	85.0	7.9		
			KIV	60.84		60.2	110.0	8.0		
			ARU	60.65		61.6	110.0	8.0		
5	11.04	10 43 08.7	OBN	70.51	8.0	18.6	102.0	8.0	289	8.2
			TLY	51.57		11.2	48.0	7.8		
			ARU	61.79		29.5	71.0	7.9		
6	07.05	04 40 25.8	TLY	39.43	5.6	0.03	0.15	6.1	0.078	5.9
7	12.05	23 28 44.8	OBN	27.38	5.8	0.04	0.11	6.0	0.045	5.7
8	20.05	02 03 50.2	ARU	31.52	6.1	0.17	0.26	6.2	0.174	6.1
9	22.05	00 00 30.9	ARU	26.55	5.4	0.1	0.095	6.0	0.032	5.6
10	29.05	07 00 01.6	ARU	31.62	5.9	0.08	0.12	6.0	0.080	5.9
11	08.07	11 33 04.0	OBN	65.65	5.9	0.06	0.27	6.2	0.11	6.0
12	20.07	06 10 26.9	ARU	54.35	5.9	0.23	0.40	6.4	0.124	6.0
13	11.08	12 23 16.3	OBN	18.14	6.5	0.46	0.41	6.4	0.604	6.5
			TLY	41.29		0.33	0.74	6.5		
14	31.08	12 47 32.4	OBN	81.39	7.4	5.7	28.0	7.6	33.7	7.6
15	28.10	03 04 07.8	OBN	72.23	7.5	7.9	48.0	7.7	56.8	7.8
16	16.11	18 12 41.4	OBN	64.17	6.4	0.28	2.0	6.8	0.656	6.5
17	07.12	08 18 20.8	OBN	68.60	7.5	5.0	22.0	7.5	7.89	7.2
18	23.12	13 31 38.8	ANN	3.45	5.9	18.0	0.085	5.9	0.056	5.8

Для сейсмических станций «Кисловодск» и «Арти» нет коровых поправок, которые влияют на форму спектра. В его короткопериодной части нельзя провести наклонную прямую к оси частот близко к значению  $(-2)$ . По станции «Обнинск» для землетрясений № 7 и № 13 не получилась высокочастотная часть спектра, по станции «Анапа» для землетрясения № 18 спектр рассчитан по  $S$ -волне.

**Таблица 4.** Характеристики спектров  $P$ -волн и динамические параметры очагов землетрясений за 2012 г.

№	Дата, д м	$t_0$ , ч мин с	Станция	$MS$	$\Delta^\circ$	$\Omega_0, 10^{-4}$ м·с	$f_b, 10^{-2}$ Гц	$f_0, 10^{-2}$ Гц	$M_0, 10^{19}$ Н·м	$M_w$	$L, 10^3$ м	$\Delta\sigma, 10^5$ Н/м <sup>2</sup>	$\bar{\eta}\sigma, 10^5$ Н/м <sup>2</sup>	$\bar{u},$ м
1	10.01	18 36 58.2	OBN	6.9	69.51	0.316	11.0	33.1	1.4	6.7	15	145	30	2.64
2	26.02	06 17 18.0	OBN	6.7	34.67	39.8	13.8	26.3	1.5	6.8	18	90	14	1.96
3	14.03	09 08 36.6	OBN	6.9	66.59	1.12	12.9	20.0	6.2	7.2	24	157	7	4.57
			TLY		30.08	1.90	15.1	15.1	5.5	7.1	32	59	36	2.28
4	11.04	08 38 36.5	OBN	8.4	69.58	22.4	5.0	15.8	99.0	8.0	44	410	76	41.05
			TLY		50.03	25.1	2.9	8.3	85.0	7.9	60	20	532	10.00
5	11.04	10 43 08.7	OBN	8.0	70.51	18.6	3.0	9.1	102.0	8.0	54	227	19	14.85
			TLY		51.57	11.2	5.0	11.2	48.0	7.8	44	28	39	10.50
6	07.05	04 40 25.8	TLY	5.6	39.43	0.03	5.0	29.5	0.15	6.1	16	13	3	0.25
7	08.07	11 33 04.0	OBN	5.9	65.65	0.06	6.0	18.2	0.27	6.2	27	5	5	0.15

№	Дата, д м	$t_0$ , ч мин с	Станция	$MS$	$\Delta^\circ$	$\Omega_0, 10^{-4}$ м·с	$f_n, 10^{-2}$ Гц	$f_0, 10^{-2}$ Гц	$M_0, 10^{19}$ Н·м	$M_w$	$L, 10^3$ м	$\Delta\sigma, 10^5$ Н/м <sup>2</sup>	$\bar{\eta}\sigma, 10^5$ Н/м <sup>2</sup>	$\bar{u}$ , м
13	11.08	12 23 16.3	TLY	6.5	41.29	0.33	15.1	18.6	0.74	6.5	26	15	14	0.46
14	31.08	12 47 32.4	OBN	7.4	81.39	5.7	6.3	16.2	28.0	7.6	30	363	8	13.21
15	28.10	03 04 07.8	OBN	7.5	72.23	7.9	5.3	8.5	48.0	7.7	58	86	7	6.06
16	16.11	18 12 41.4	OBN	6.4	64.17	0.28	4.7	18.2	2.0	6.8	32	21	100	0.31
17	07.12	08 18 20.8	OBN	7.5	68.60	5.0	6.0	15.8	22.0	7.5	32	235	41	3.42

На основе значений  $M_0$  вычислена моментная магнитуда  $M_w$ . Расчет  $M_w$  выполнен по формуле Х. Канамори [13]:

$$M_w, \text{ дн} \cdot \text{см} = \frac{2}{3} \lg M_0 - 10.7,$$

$$M_w, \text{ Н} \cdot \text{м} = \frac{2}{3} (\lg M_0 + 7) - 10.7.$$

### Л и т е р а т у р а

1. Болдырева Н.В. (отв. сост.), Аторина М.А., Бабкина В.Ф., Дуленцова Л.Г., Лёвкина А.В., Малянова Л.С., Рыжикова М.И., Щербакова А.И. (сост.). Каталог землетрясений Земли за 2012 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 21 (2012 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – Приложение на CD\_ROM.
2. Габсатарова И.П. и др. Сведения о станциях ГС РАН на Восточно-Европейской платформе и Урале в 2012 г. // Землетрясения в России в 2012 году. – Обнинск: ГС РАН, 2014. – С. 23–25.
3. Масальский О.К., Гилёва Н.А., Хайдурова Е.В. Сведения о станциях БФ ГС СО РАН (сеть ВУКЛ) в 2012 г. // Землетрясения в России в 2012 году. – Обнинск: ГС РАН, 2014. – С. 36–37.
4. Габсатарова И.П., Даниялов М.Г., Мехрюшев Д.Ю., Погода Э.В., Янков А.Ю. Сведения о станциях ГС РАН (сети OBN CMWS) на Северном Кавказе в 2012 г. // Землетрясения в России в 2012 году. – Обнинск: ГС РАН, 2014. – С. 17–18.
5. Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 2012 год [Электронный ресурс] / Отв. ред. О.Е. Старовойт. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2012–2013. – URL: [ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic\\_bulletin/2012](ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2012)
6. Young J.B., Presgrave B.W., Aichele H., Wiens D.A., Flinn E.A. The Flinn-Engdahl Regionalisation Scheme: the 1995 revision // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 1996. – 96. – P. 223–297.
7. Golstein P., Dodge D., Firpoand M., Lee M. The IASPEI International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology / Ed. by W.H.K. Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings and C. Kisslinger. – London: Academic Press, 2003.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Brune I.N. Tectonic stress and the spectrum of seismic shear waves from earthquake // J. Geophys. Res. – 1970. – 75. – N 26. – P. 4997–5009.
12. International Seismological Centre, Thatcham, Berkshire, United Kingdom, 2015 [Сайт]. – URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>
13. Hanks T.C., Kanamori H. A Moment Magnitude Scale // J. Geophys. Res. – 1979. – 84. – N 135. – P. 2348–2350.