

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПАДЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ

Н.А. Сычева, Л.М. Богомолов\*

Научная станция РАН в г. Бишкек, 720042, Бишкек, 49, Кыргызстан

\* Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 16, Россия

Проведены расчеты динамических параметров очагов землетрясений: радиуса очага  $r$ , сейсмического момента  $M_0$ , снятия напряжений  $\Delta\sigma$ , которые произошли на территории расположения станций сети KNET за 1998—2012 гг. Значения динамических параметров получены для 87 событий энергетических классов  $K = 9.5—13.7$ , что составляет 86 % от общего числа событий (99) в этом диапазоне классов  $K$  за исследуемый период. Для рассматриваемых событий определены механизмы очагов на базе двух подходов: по знаку прихода  $P$ -волны (66 событий) и методу инверсии (14 событий). На основе исследования фокальных механизмов очагов событий с максимальным (14 событий) и минимальным (14 событий) значением падения напряжений определена связь вида подвижки от уровня сброшенных напряжений.

На основе расчета усредненных механизмов очагов по полному каталогу фокальных механизмов землетрясений Северного Тянь-Шаня (1056 землетрясений за 1998—2012 гг.) построены карты распределения коэффициента Лодэ—Надаи и угла напряженно-деформированного состояния ( $\omega$ ). Выполнено сопоставление распределения коэффициента Лодэ—Надаи и угла  $\omega$  с областями значительного падения напряжений.

*Сейсмограмма, землетрясение, очаг, спектр, скалярный сейсмический момент, радиус очага, падение напряжений, фокальный механизм.*

### PATTERNS OF STRESS DROP IN EARTHQUAKES OF THE NORTHERN TIEN SHAN

N.A. Sycheva and L.M. Bogomolov

Source parameters of local earthquakes that occurred between 1998 and 2012 within the Kyrgyz seismological network (KNET) are used to study the patterns of stress drop in the Northern Tien Shan. The dynamic parameters of source radius  $r$ , the seismic moment  $M_0$ , and the stress drop  $\Delta\sigma$  are estimated for eighty seven  $M = 3.0–5.5$  ( $K = 9.5–13.7$ ) events, which make up 86 % of earthquakes with this magnitude (99) for the period of observations. Earthquake mechanisms are determined either from  $P$ -wave arrivals (66 events) or by inversion (14 events). The distribution of earthquake mechanisms with the maximum (14 events) and minimum (14 events) stress drop shows that the amount of released stress correlates with slip geometry and reverse-slip events contribute the most into the stress drop in the area. The spatial distribution of events with  $\Delta\sigma > 0.9$  MPa is compared with maps of kinematic parameters (Lodé–Nadai coefficient or stress ratio,  $\mu_\sigma$ , and stress-strain line slope,  $\omega$ ) based on average strain tensors according to the complete earthquake catalog for the Northern Tien Shan (1056 events for 1998–2012). The two sets of source parameters ( $r$ ,  $M_0$ ,  $\Delta\sigma$  and  $\mu_\sigma$ ,  $\omega$ ) correlate within the eastern Kyrgyz Range and the Karamoinok and Syndyk ranges.

*Sesimogram, earthquake, source, spectrum, scalar seismic moment, source radius, stress drop, earthquake mechanism*

### ВВЕДЕНИЕ

Разработка новых подходов к прогнозированию разрушительных землетрясений (ЗЛТ) и уменьшению их последствий включает, по необходимости, расширение объема данных о спектральных характеристиках очагов ЗЛТ и определяемых на их основе динамических параметрах: радиуса очага  $r$ , скалярного сейсмического момента  $M_0$  и снятия напряжений  $\Delta\sigma$ . Информация об этих параметрах, непосредственно относящихся к объемам очагов ЗЛТ, может характеризовать региональные особенности геодеформационного процесса. В частности, изменение со временем усредненного снятия напряжений для событий заданных магнитуд отражает напряженное состояние земной коры по диаграмме Кулона—Мора. Но для такого описания коры сейсмоактивных регионов необходим статистически значимый набор данных — достаточно большое число ЗЛТ, для которых определены динамические параметры (ДП) очагов. Между тем по сложившейся мировой практике динамические параметры очагов ЗЛТ определяются, как правило, для сильных землетрясений [Dziewonski et al., 1981; Кальметьева и др., 1992; Бурым-

ская, 2001; Ключевский, Демьянович, 2002; Parolai et al., 2007]. При этом составление каталога ДП для компактной территории было возможно лишь для регионов с наиболее высокой сейсмической активностью. Лишь в нескольких работах в прошлом столетии расчеты динамических параметров также проводились для умеренных и слабых событий [Горбунова, Кальметьева, 1988; Кальметьева и др., 1992]. Стоит отметить, что эти работы посвящены землетрясениям на территории Северного и Центрального Тянь-Шаня.

Возможность и целесообразность расширения количества решений ДП за счет обработки записей среднемагнитудных ЗЛТ ( $M = 3.9—5.5$ , т. е. энергетический класс, по Раутиан,  $K = 11—14$ ) была продемонстрирована в нашей предшествующей работе [Сычева, Богомолов, 2014]. В этой работе расчет ДП проводился на основе данных сейсмической сети KNET, включающей 10 станций, работающих в режиме квазиреального времени [Сычева и др., 2005]. Сеть обеспечивает регистрацию локальной сейсмичности внутри области  $41—43^\circ$  с.ш.,  $73—77^\circ$  в.д., которую удобно называть Бишкекским геодинамическим полигоном (БГП). В настоящей работе для продолжения анализа особенностей и статистических закономерностей ДП очагов землетрясений на территории БГП в расчет включены слабые события с магнитудами  $M > 3$  ( $K > 9.5$ ). Это позволило сформировать массовые однородные сводки параметров: радиуса очага  $r$ , скалярного сейсмического момента  $M_0$  и снятия напряжений  $\Delta\sigma$ . Число записей в полученной сводке (в каталоге ДП очагов ЗЛТ Северного Тянь-Шаня за период 1998—2012 гг.) достигло 87, что составляет 86 % от общего числа событий из того же диапазона магнитуд  $M = 3.0—5.5$  и более чем в 6 раз превышает количество определений ДП в предыдущей работе [Сычева, Богомолов, 2014].

Наряду с составлением каталога ДП задачей данной работы является уточнение взаимосвязей между параметрами  $r$ ,  $M_0$ ,  $\Delta\sigma$  и значениями магнитуд событий. Поиску корреляций между значениями радиуса очага  $r$  (радиуса Брюна), момента  $M_0$  и магнитуды  $M$  посвящено большое число работ (обзор в [Ключевский, Демьянович, 2002; Kocharyan, 2014]). Для различных сейсмоактивных регионов установлены соответствующие им соотношения, которые в логарифмическом масштабе представляют собой линейные зависимости. Наиболее известным среди таких соотношений можно считать среднюю корреляционную зависимость между  $M$  и  $M_0$  (Н·м):  $\lg(M_0) = 15.4 + 1.6M$  [Ризниченко, 1985]. Проведенный в настоящей работе анализ подтвердил естественное допущение, что и для диапазона низших магнитуд ( $M > 3$ ), на изучаемой территории БГП справедливы корреляционные соотношения такого вида. Показано, что они выполняются с доверительной погрешностью менее 10—15 %.

Вопрос о корреляциях между значениями снятия напряжений в очаге и магнитудой события изучен в меньшей степени. Для широкого диапазона магнитуд  $M$  наличие корреляции между величинами  $\Delta\sigma$  и  $M$  весьма нетривиально. Поясним это обстоятельство. В некоторых работах, например [Ключевский, Демьянович, 2002], обращено внимание на то, что величина  $\Delta\sigma$  может зависеть не только от магнитуды  $M$ , но и от типа фокального механизма. Для изучаемой территории БГП также отмечены случаи, когда при землетрясениях взбросового типа падение напряжений больше, чем при сдвиговых событиях примерно такой же энергии, и это отличие превышает доверительный интервал расчета  $\Delta\sigma$ . Появляющийся разброс значений  $\Delta\sigma$  ограничивает диапазон магнитуд, в которых возможна линейная или степенная аппроксимация зависимости  $\Delta\sigma$  ( $M$ ). Тем не менее, как показали расчеты, представленные ниже, для слабых событий с магнитудами  $3.0 < M \leq 4.5$  рассеяние значений  $\Delta\sigma$  относительно невелико, и справедливо выражение для линейной регрессии зависимости снятия напряжения от магнитуды.

При обсуждении полученных результатов также проведено сопоставление распределений ДП очагов по изучаемой территории с распределением кинематических характеристик очагов ЗЛТ: параметра Лоде—Надаи  $\mu_\sigma$  и угла напряженно-деформированного состояния  $\omega$  [Соколовский, 1969]. Для такого сравнения использованы данные о параметрах механизмов очагов ЗЛТ и параметрах сеймотектонических деформаций (усредненные механизмы и интенсивность СТД, усредненные значения  $\mu_\sigma$ ,  $\omega$ ) для той же зоны Северного Тянь-Шаня [Сычева и др., 2005; Костюк и др., 2010; Сычева, Юнга, 2011]. Обнаружена связь между кинематическими и динамическими параметрами.

## ИССЛЕДУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДП

В качестве исходных данных были использованы сейсмограммы локальных землетрясений, которые произошли на территории расположения станций сети KNET за 1998—2012 гг. с  $K = 9.5—13.7$ . Геологические разломы, географические названия некоторых хребтов исследуемой территории и эпицентральное расположение рассматриваемых событий представлены на рис. 1. Основная часть ЗЛТ расположена на северных склонах Киргизского хребта, хр. Карамойнок, горе Сандык и в районе Суусамырской и Кочкорской впадин. В таблице (колонки 1—8) представлены числовые значения кинематических параметров сейсмических событий, а на рис. 2 — гистограммы их распределений по магнитудам и глубинам, а также график повторяемости исследуемых событий.

В соответствии с представленными гистограммами магнитуда рассматриваемых событий меняется в диапазоне 3—5 (пересчет из класса в магнитуду, согласно зависимости  $K = 1.8M + 4$  [Раутиан, 1960]),

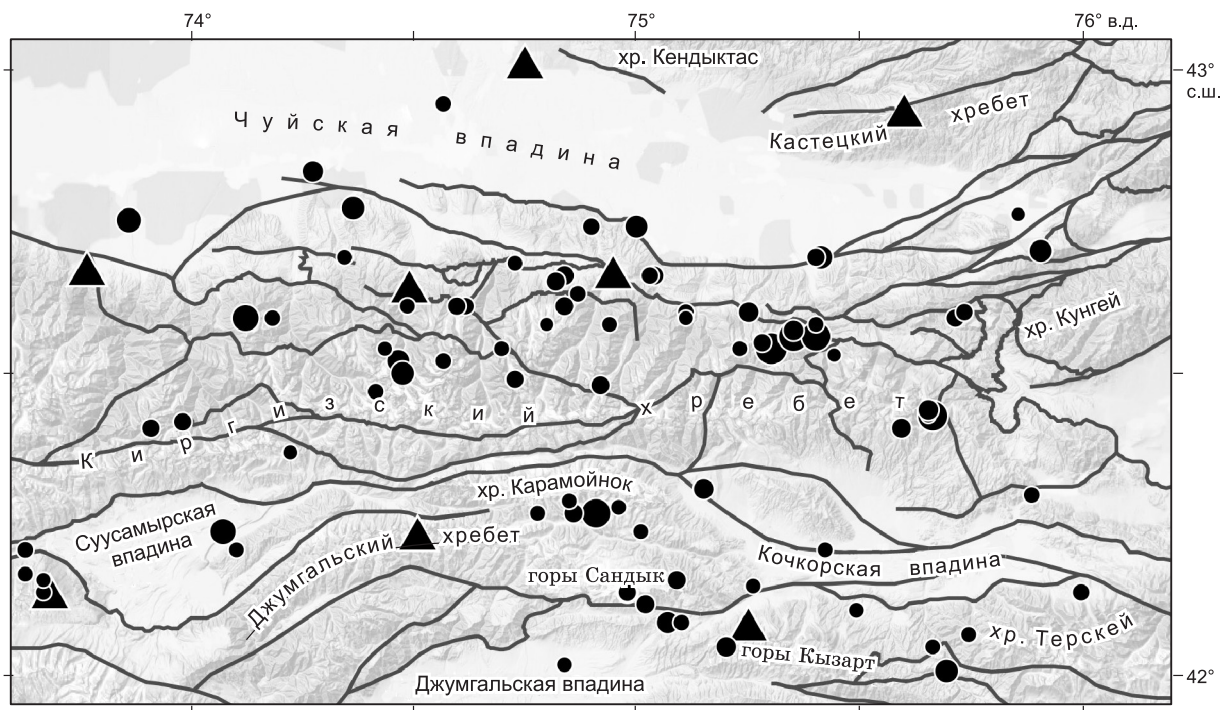


Рис. 1. Эпицентральное расположение исследуемых событий (кружки) и станции сети KNET (треугольники).

Активные разломы, по С.И. Кузикову [Ребецкий и др., 2016].

и большая часть событий расположена на глубине 5—15 км. График повторяемости исследуемых событий (см. рис. 2, в) имеет линейный характер, что свидетельствует о представительности рассматриваемых событий, исключение составляют события 13 класса.

При построении станционных спектров рассматривались только  $S$ -волны и использовались записи скоростей сейсмозвонков (нм/с) с частотой оцифровки 100 Гц. Станции сети KNET относятся к малошумящим [Сычева и др., 2011], и для выбранных землетрясений уровень полезного сигнала, т. е. амплитуды  $S$ -волн, более чем в три раза превышает уровень помех. При выборе интервала участка  $S$ -волны решается задача выделения так называемых «прямых» сейсмических волн, которые наиболее полно характеризуют очаг землетрясения. Длина отрезка выбирается в интервале времени от  $\sim 1$  с до начала  $S$ -волны и до момента спада ее амплитуды до  $1/3$  от максимального значения (участок выделения 80 %-й сейсмической энергии) [Ameri et al., 2009; Oth et al., 2009]. Перед построением спектра выбранный участок записи проходит фильтрацию во взвешивающем окне с применением фильтра Хемминга для исключения разрыва функции. Построение спектра осуществляется на основе стандартного алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). Построение станционных спектров  $S$ -волны проводилось по двум горизонтальным компонентам записей скоростей с поляризацией  $N$  (север-юг) и  $E$  (восток-запад), по вертикальной компоненте  $Z$  построение спектра проводилось только для уточнения угловой частоты.

Для расчета станционного спектра выбирались станции, которые находятся на расстоянии более 35 км (дальняя зона) для событий с  $9.5 < K < 11.5$  и более 50 км для событий с  $K > 11.5$ . Станции, удовлетворяющие этим условиям, были отсортированы в порядке удаления от очага, и выбирались первые три станции из этой последовательности.

Станционные спектры скорости смещения по выбранным станциям приводились к спектрам смещения делением их на значение угловой частоты ( $2\pi f$ ). Станционный спектр смещения приводился к спектру «в очаге» ЗЛТ, а реально — к референтной точке, находящейся на расстоянии 10 км от гипоцентра. Методика построения очагового спектра на основе станционного (с учетом вклада частотной зависимости добротности среды) изложена в работах [Сычева, Богомолов, 2014; Сычева и др., 2012].

Расчет радиуса очага  $r$ , скалярного сейсмического момента  $M_0$  и падения напряжения  $\Delta\sigma$  проводился с использованием выражений, вытекающих из известной модели «мгновенного» смещения вдоль поверхности разрыва [Аки, Ричардс, 1983]. Сам очаг моделируется сферой, которую перерезает эта поверхность. В такой модели величины радиуса  $r$  и момента  $M_0$  определяются по спектральным характерис-

**Некоторые кинематические и динамические параметры исследуемых землетрясений**

№	Дата	Время			С.ш., град	В.д., град	H, км	K	Стан- ция	R от очага до стан- ции, км	$f_0$ , с <sup>-1</sup>	$\Omega_0$ , м·с	$M_0$ , Н·м	r, м	$\Delta\sigma$ , МПа
		ч	мин	с											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	26.08.1998	22	50	27.42	42.24	75.01	18	9.7	UCH	40.8	4.65	5.42E-06	1.27E+13	280	0.25
2	02.11.1998	0	57	36.60	42.09	75.07	17	11.5	»	51.0	2.90	3.66E-05	8.55E+13	449	0.41
3	21.11.1998	11	46	09.40	42.24	74.08	19	12.5	ААК	59.0	1.60	2.96E-04	6.91E+14	815	0.56
4	24.05.1999	7	39	21.39	42.66	75.04	7	10.7	СНМ	44.3	4.88	1.52E-05	3.55E+13	267	0.81
5	15.06.1999	7	32	03.52	42.66	75.03	7	10.3	»	43.8	5.00	1.55E-05	3.61E+13	261	0.89
6	13.07.1999	0	40	40.99	42.14	73.68	13	9.7	UCH	68.8	6.00	4.82E-06	1.12E+13	217	0.48
7	14.01.2000	13	27	43.37	42.07	75.74	4	9.9	КЗА	40.6	6.00	2.34E-06	5.47E+12	217	0.23
8	28.07.2000	17	41	28.18	42.58	74.80	17	9.5	»	67.0	5.10	2.18E-06	5.10E+12	256	0.13
9	01.08.2000	18	48	51.09	42.09	75.10	16	10.1	КБК	63.8	4.30	3.99E-06	9.32E+12	303	0.15
10	22.10.2000	0	54	20.68	42.12	75.02	7	10.6	СНМ	99.6	5.50	2.66E-05	6.22E+13	237	<b>2.04</b>
11	14.12.2000	21	34	25.04	42.63	74.87	13	9.6	UCH	53.0	6.00	4.68E-06	1.09E+13	217	0.47
12	14.12.2000	23	47	48.60	42.63	74.87	13	10.2	»	53.1	5.61	2.89E-06	6.74E+12	232	0.24
13	21.02.2001	12	15	16.40	42.74	75.00	2	11.7	СНМ	35.6	2.48	5.15E-05	1.20E+14	526	0.36
14	08.07.2001	11	51	52.68	42.14	74.98	14	11.2	UCH	39.9	4.59	1.60E-05	3.73E+13	284	0.71
15	20.08.2001	1	27	05.74	42.14	74.98	7	10.5	КБК	57.0	3.83	9.85E-06	2.30E+13	340	0.26
16	11.09.2001	7	13	42.81	42.41	75.59	6	10.9	ULHL	56.9	5.50	1.17E-05	2.74E+13	237	<b>0.90</b>
17	18.11.2001	1	28	55.10	42.59	74.13	5	12.7	АМЛ	63.0	3.30	3.20E-04	7.47E+14	395	<b>5.30</b>
18	08.10.2002	17	0	03.65	42.05	75.66	16	9.7	ULHL	52.4	5.50	4.89E-06	1.14E+13	237	0.38
19	11.12.2002	14	21	07.63	42.58	74.94	17	9.8	ААК	37.0	5.53	2.40E-06	5.60E+12	236	0.19
20	21.02.2003	10	35	21.40	42.52	74.47	21	11.7	ЕКС2	62.0	5.25	1.01E-05	2.36E+13	248	0.67
21	02.07.2003	10	30	14.42	42.69	74.35	21	9.8	КБК	49.2	5.50	1.22E-06	2.85E+12	237	0.09
22	15.07.2003	10	17	01.84	42.11	75.49	11	9.9	»	75.0	6.30	2.31E-06	5.39E+12	207	0.27
23	24.09.2003	1	51	17.94	42.37	74.23	17	9.6	ААК	36.5	5.30	3.01E-06	7.02E+12	246	0.21
24	06.10.2003	16	42	13.50	42.50	74.48	22	12	ЕКС2	64.0	4.15	4.02E-05	9.39E+13	314	<b>1.33</b>
25	11.12.2003	22	44	35.94	42.42	73.99	6	10.4	ААК	47.9	5.75	6.15E-06	1.44E+13	227	0.54
26	16.01.2004	9	6	17.60	42.54	75.3	10	13.7	»	67.0	2.00	7.04E-04	1.64E+15	652	<b>2.60</b>
27	18.01.2004	13	26	34.98	42.55	75.28	19	10.5	»	64.7	5.50	6.20E-06	1.45E+13	237	0.48
28	04.02.2004	19	48	15.44	42.83	74.28	7	11.3	УСП	52.0	4.48	1.02E-05	2.37E+13	291	0.42
29	13.02.2004	2	1	08.30	42.74	74.90	20	10.3	ААК	35.2	4.35	3.12E-06	7.29E+12	300	0.12
30	13.05.2004	22	37	09.42	42.61	74.62	13	10.3	UCH	43.7	5.90	7.26E-06	1.70E+13	221	0.69
31	02.06.2004	17	15	10.60	42.27	74.91	18	13.3	ААК	56.0	2.70	5.25E-04	1.23E+15	483	<b>4.77</b>
32	20.09.2004	14	25	22.70	42.54	75.23	20	9.7	КЗА	51.1	5.15	3.83E-06	8.95E+12	253	0.24
33	27.11.2004	12	42	54.30	42.61	74.84	15	10.6	СНМ	43.4	4.69	8.29E-06	1.94E+13	278	0.39
34	08.06.2005	21	5	21.44	42.16	75.09	17	10.6	ААК	72.2	4.63	1.01E-05	2.36E+13	282	0.46
35	20.06.2005	14	25	01.50	42.77	74.37	21	12.0	КБК	53.0	2.90	1.59E-05	3.71E+13	449	0.18
36	07.07.2005	19	22	05.42	42.66	74.84	12	10.9	UCH	54.4	5.00	8.82E-06	2.06E+13	261	0.51
37	07.07.2005	21	0	07.50	42.65	74.82	11	10.8	КЗА	72.8	4.65	8.25E-06	1.93E+13	280	0.38
38	03.10.2005	9	28	26.24	42.65	74.82	12	10.8	УСП	72.9	5.20	4.23E-06	9.88E+12	251	0.27
39	27.12.2005	0	55	30.30	42.70	75.90	12	11.6	КЗА	88.0	2.80	2.59E-05	6.05E+13	466	0.26
40	28.12.2005	1	52	47.90	42.69	75.41	12	11.9	»	70.0	1.70	4.39E-04	1.02E+15	767	<b>0.99</b>
41	29.12.2005	8	50	32.76	42.69	75.40	6	10.5	КБК	36.7	3.94	6.06E-06	1.42E+13	331	0.17
42	01.01.2006	8	56	53.85	42.60	75.25	22	11.0	КЗА	58.1	3.10	2.26E-05	5.27E+13	420	0.31
43	28.05.2006	3	23	55.39	42.21	73.64	0	10.0	UCH	71.7	4.60	3.30E-06	7.71E+12	283	0.15



№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
44	20.07.2006	18	43	00.42	42.76	75.85	7	9.5	AAK	111.4	5.00	5.38E-06	1.26E+13	261	0.31
45	15.08.2006	18	58	22.87	42.60	75.11	10	10.2	»	50.2	5.15	5.99E-06	1.40E+13	253	0.38
46	09.09.2006	2	32	07.82	42.16	73.68	13	9.6	»	84.9	5.75	1.22E-06	2.86E+12	227	0.11
47	05.11.2006	23	43	30.68	42.17	73.64	10	9.8	KBK	119.9	5.34	3.08E-06	7.20E+12	244	0.22
48	08.11.2006	2	21	26.70	42.56	75.35	11	13.4	AAK	72.0	1.90	1.83E-03	4.27E+15	686	<b>5.79</b>
49	08.11.2006	2	26	50.84	42.57	75.35	20	10.9	KZA	57.4	5.00	1.02E-05	2.38E+13	261	0.59
50	17.11.2006	19	47	58.27	42.57	75.35	13	10.1	AAK	70.7	5.33	3.82E-06	8.91E+12	245	0.27
51	25.12.2006	20	21	16.74	42.14	75.99	1	10.3	KBK	103.2	5.07	1.07E-05	2.49E+13	257	0.64
52	28.12.2006	2	4	46.76	42.54	74.44	13	9.6	»	43.5	6.00	1.98E-06	4.62E+12	217	0.20
53	06.06.2007	11	9	25.40	42.56	75.40	15	13.3	KZA	58.0	2.00	7.35E-04	1.72E+15	652	<b>2.71</b>
54	07.06.2007	17	50	10.27	42.58	75.40	20	9.7	KBK	38.0	6.30	4.21E-06	9.84E+12	207	0.49
55	06.10.2007	23	56	47.92	42.47	74.42	7	10.2	»	47.7	4.73	7.81E-06	1.82E+13	276	0.38
56	21.10.2007	14	8	44.42	42.57	75.35	14	11.0	TKM2	43.9	2.42	1.21E-05	2.82E+13	539	0.08
57	08.01.2008	18	4	13.75	42.05	75.20	17	11.0	KBK	70.6	3.34	1.35E-05	3.15E+13	390	0.23
58	05.02.2008	9	24	12.29	42.28	74.96	6	9.7	»	41.9	6.00	2.52E-06	5.88E+12	217	0.25
59	24.02.2008	21	2	11.89	42.53	75.44	22	9.5	»	43.0	6.00	2.66E-06	6.21E+12	217	0.26
60	13.09.2008	13	40	29.18	42.52	74.57	12	9.8	KZA	74.3	4.85	1.79E-06	4.19E+12	269	0.09
61	13.09.2008	18	18	42.06	42.52	74.57	11	10.1	CHM	54.9	5.10	1.83E-06	4.26E+12	256	0.11
62	20.09.2008	4	15	52.27	42.27	74.86	22	10.6	AAK	50.6	6.33	1.67E-05	3.89E+13	206	<b>1.95</b>
63	22.01.2009	12	55	14.19	42.61	74.49	17	9.9	UCH	42.0	5.80	2.09E-06	4.87E+12	225	0.19
64	01.02.2009	11	25	38.00	42.75	73.87	15	12.3	AAK	55.0	2.80	5.11E-04	1.19E+15	466	<b>5.17</b>
65	26.02.2009	22	48	10.55	42.27	74.78	17	9.8	KBK	45.2	4.75	2.12E-06	4.95E+12	274	0.10
66	09.05.2009	5	36	34.52	42.59	75.11	15	9.6	AAK	50.5	6.00	1.78E-06	4.16E+12	217	0.18
67	16.05.2009	5	38	46.20	42.59	74.19	6	10.1	AML	65.2	6.30	7.07E-06	1.65E+13	207	0.82
68	24.05.2009	0	8	40.93	42.61	74.60	13	10.5	EKS2	67.4	5.89	5.34E-06	1.25E+13	221	0.50
69	25.07.2009	14	57	10.42	42.59	75.71	12	10.5	KBK	67.7	4.40	2.25E-05	5.25E+13	296	0.88
70	31.07.2009	9	21	48.59	42.68	74.73	10	9.7	CHM	35.7	5.93	1.64E-06	3.83E+12	220	0.16
71	07.08.2009	4	32	46.60	42.01	75.69	15	11.8	KBK	98.0	3.30	3.18E-05	7.42E+13	395	0.53
72	27.10.2009	15	42	17.95	42.29	74.85	20	9.9	KZA	40.0	6.00	1.49E-06	3.49E+12	217	0.15
73	22.11.2009	16	16	03.28	42.60	75.73	14	10.3	KBK	64.0	5.90	4.95E-06	1.16E+13	221	0.47
74	02.03.2010	1	55	36.02	42.43	75.66	19.3	13.34	KZA	64.0	2.25	1.83E-03	4.26E+15	579	<b>9.59</b>
75	02.03.2010	2	49	01.06	42.43	75.65	22	9.5	»	50.9	5.90	1.81E-06	4.23E+12	221	0.17
76	02.03.2010	4	17	40.13	42.44	75.65	20	11.0	»	51.8	5.40	1.00E-05	2.33E+13	241	0.73
77	19.05.2010	15	29	36.24	42.21	74.11	7	9.7	AML	35.5	5.05	3.76E-06	8.78E+12	258	0.22
78	09.09.2010	18	31	50.35	42.31	75.15	19	11	AAK	64.7	5.78	1.06E-05	2.48E+13	226	<b>0.95</b>
79	19.12.2010	19	12	48.85	42.54	74.70	7	9.8	EKS2	76.6	5.46	1.67E-06	3.89E+12	239	0.13
80	09.04.2011	2	28	48.84	42.02	74.84	19	9.8	AML	94.0	5.25	3.25E-06	7.59E+12	248	0.22
81	16.12.2011	3	14	40.13	42.30	75.88	13	10.2	KBK	86.1	4.80	4.65E-06	1.09E+13	272	0.24
82	10.02.2012	6	49	17.11	42.94	74.57	16	10.2	»	43.4	5.15	4.44E-06	1.04E+13	253	0.28
83	28.03.2012	12	54	01.43	42.49	74.73	17	10.4	KZA	62.7	5.15	4.92E-06	1.15E+13	253	0.31
84	16.05.2012	3	26	40.57	42.48	74.92	16	10.6	AAK	38.9	4.70	5.62E-06	1.31E+13	277	0.27
85	12.09.2012	5	51	15.70	42.41	73.92	4	10.4	»	53.2	4.10	5.27E-05	1.23E+14	318	<b>1.68</b>
86	06.10.2012	11	41	23.18	42.21	75.42	14	9.9	KBK	62.8	4.20	3.84E-06	8.98E+12	310	0.13
87	29.10.2012	17	44	48.37	42.15	75.26	6	9.7	»	61.9	5.20	2.89E-06	6.74E+12	251	0.19

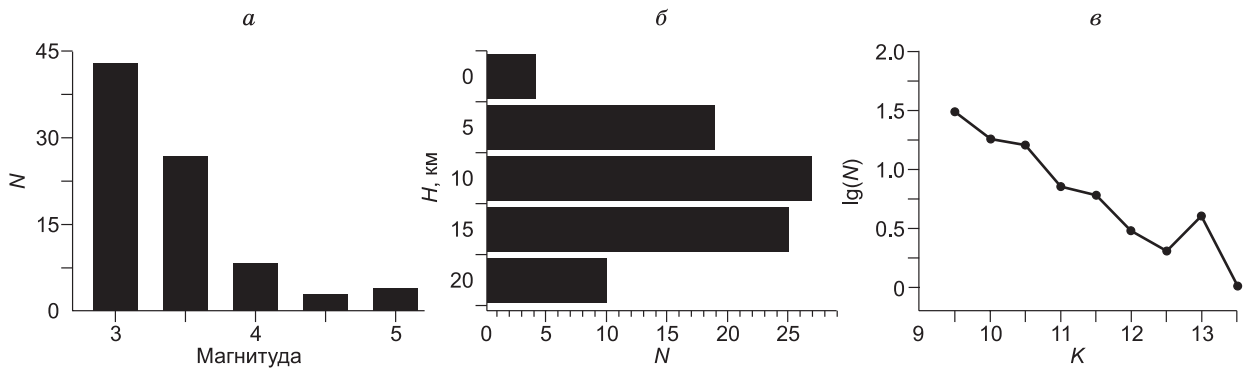


Рис. 2. Статистические характеристики исследуемых событий:

*a* — распределение по магнитуде; *b* — распределение по глубине; *в* — график повторяемости по классам землетрясений.

тикам сейсмограмм независимо друг от друга, а  $\Delta\sigma$  оказывается пропорциональным отношению  $M_0/r^3$  [Костров, 1975; Ризниченко, 1985].

Точность расчета величины радиуса очага и, как следствие, падения напряжений зависит главным образом от погрешности при определении угловой частоты. С учетом этого определение  $f_0$  проводилось на основе станционного и очагового спектров, и полученные значения сравнивались друг с другом. Станционный спектр и аппроксимирующая функция по каждой из компонент ( $E$ ,  $N$ ,  $Z$ ) и по их сумме ( $E + N + Z$ ) строятся в линейном масштабе, и угловая частота определяется на переломе аппроксимирующей функции. Очаговый спектр строится по каждой компоненте в логарифмическом масштабе, и путем перебора значений  $f_0$  определяется минимальная разница между аппроксимирующей функцией (моделью) и спектральной характеристикой. На рис. 3, *a* приведен пример станционных спектров для компонент  $Z$ ,  $N$ ,  $E$  станции КВК для землетрясения от 01.08.2000 г.,  $M = 3.4$  и аппроксимирующие функции, а на рис. 3, *б* представлен очаговый спектр для  $E$ -компоненты. Усредненное значение угловой частоты, полученное по станционному спектру, сравнивается с угловой частотой, полученной по  $E$ - и  $N$ -компонентам очагового спектра, и в качестве окончательного результата используется значение, максимально удовлетворяющее обоим спектрам. Рисунок 3, *a* демонстрирует, что значения переломной частоты на разных компонентах могут отличаться друг от друга. В приведенном примере разница между минимумом и максимумом составляет 0.5 Гц, что может соответствовать ошибке 0.25 Гц в обе стороны. Для проверки влияния такой ошибки в определении угловой частоты на величину радиуса Брюна и сброшенного напряжения использовались данные для землетрясения под № 49 (см. таблицу). Для выбранного события динамические параметры пересчитывались для значения угловой частоты больше и меньше на 0.25 Гц от значения, указанного в таблице. Для частоты 4.75 Гц радиус очага  $r = 274$  м и

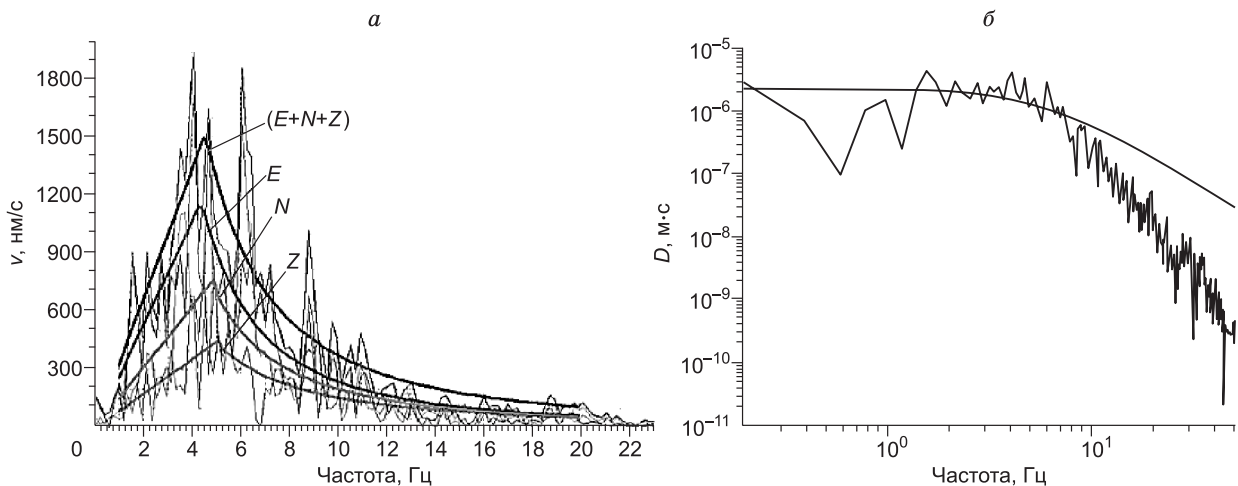


Рис. 3. Пример определения угловой частоты ( $f_0$ ), по станционному спектру (рассматривается скорость смещения,  $v$ ) в линейном масштабе (*a*) и по спектру очага (рассматривается смещение,  $D$ ) в логарифмическом масштабе (*б*).

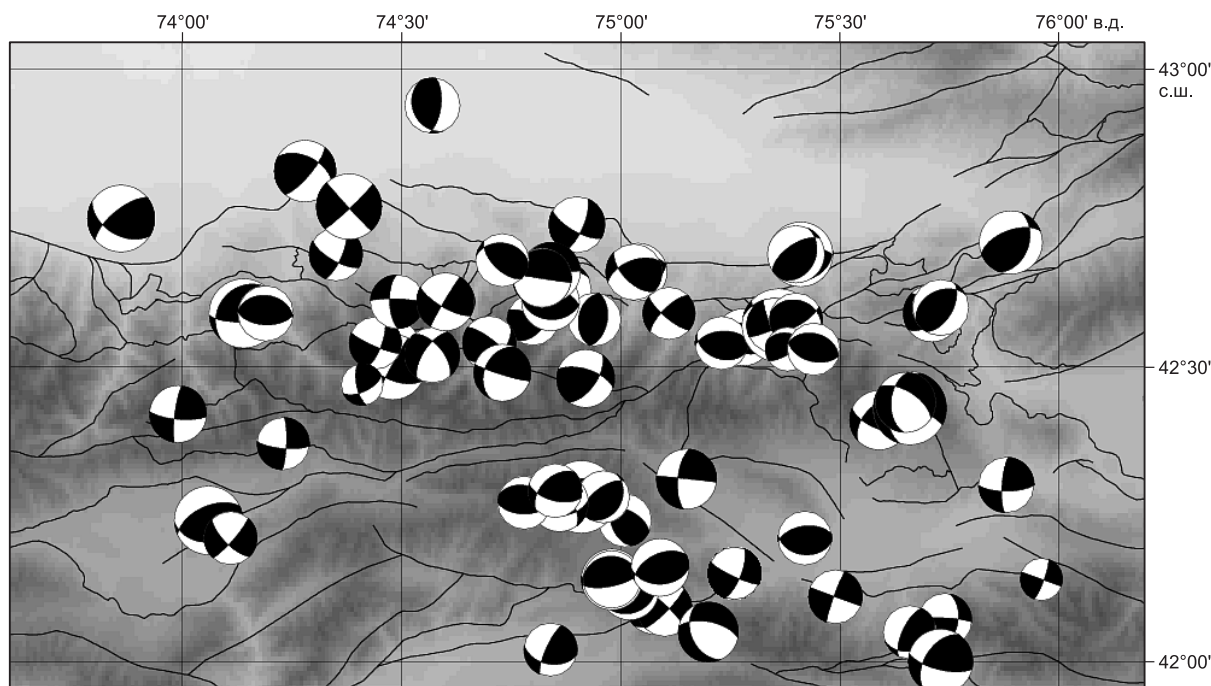


Рис. 4. Фокальные механизмы очагов исследуемых событий (в проекции нижней полусферы).

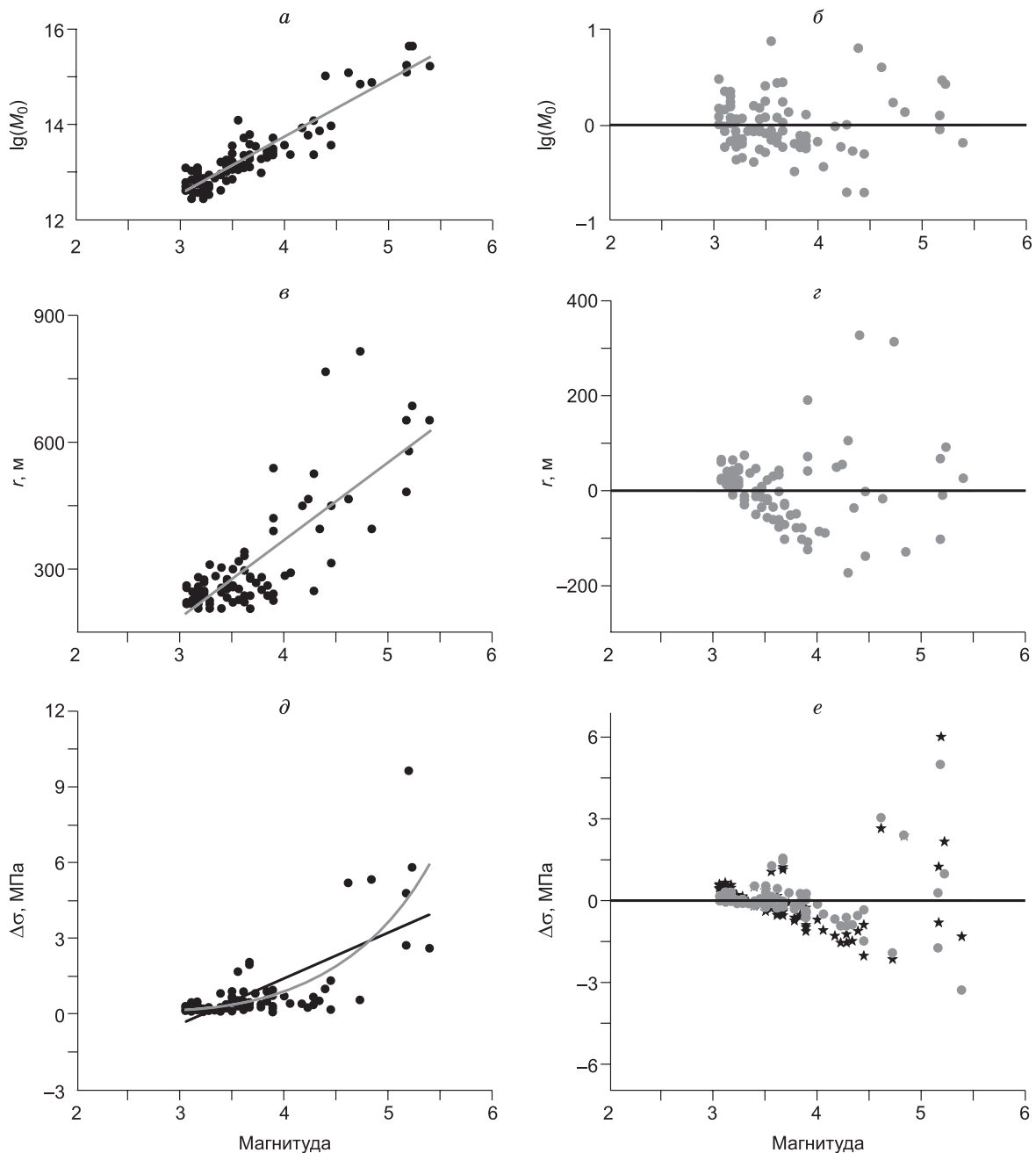
$\Delta\sigma = 0.50$  МПа, а для частоты 5.25 Гц  $r = 248$  м и  $\Delta\sigma = 0.68$  МПа. Эти вычисления показали, что радиус максимально может измениться на 26 м, а сброшенное напряжение на 0.18 МПа. Отсюда, изменение угловой частоты на 10 % изменяет значение радиуса очага на 11 % и уровень сброшенных напряжений на 30 %. Из материалов недавних работ, посвященных расчетам динамических параметров [Parolai et al., 2007; Ameri et al., 2009; Oth et al., 2009, 2011], вытекает, что погрешность оценки сейсмического момента  $M_0$ , пропорционального спектральной плотности  $\Omega_0$ , меньше погрешности определения угловой частоты и радиуса очага.

Стоит отметить общепринятое допущение при расчетах  $M_0$ , по которому фактор направленности излучения очага ЗЛТ  $R_\psi$  ( $M_0 \sim \Omega_0 \sim 1/R_\psi$  [Аки, Ричардс, 1983; Ризниченко, 1985]) можно аппроксимировать константой. Для Северного Тянь-Шаня характерное значение фактора  $R_\psi$  составляет 0.64. Реальное различие фактора направленности  $R_\psi$  в зависимости от расположения станций относительно очага может быть источником некоторой систематической погрешности, однако анализ этого вопроса выходит за рамки данной работы. Для уменьшения возможного влияния различий в  $R_\psi$  в представляемых расчетах значение спектральной плотности  $\Omega_0$  определялось как среднее по трем выбранным станциям.

Для определения фокальных механизмов землетрясений использовались два подхода (по знакам прихода  $P$ -волны и метод инверсии), которые подробно описаны в работе [Сычева, Богомолов, 2014]. На рис. 4 представлена карта фокальных механизмов. Для исследуемой территории характерны взбросы, взбрососдвиги и сдвиги. Сбросы составляют незначительную часть от общего числа очагов с восстановленными механизмами.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты расчета параметров спектральных характеристик – значение угловой частоты  $f_0$  и уровень спектральной плотности  $\Omega_0$  — представлены в таблице (колонки 11, 12), а также показаны станции, по которым определялась угловая частота (хорошо выделяется «полочка» спектра смещений и частота среза) по очаговому спектру. Для рассматриваемых событий ( $M = 3.0—5.4$ )  $\Omega_0$  меняется от  $1.22E-6$  до  $1.83E-3$  м·с, а  $f_0$  от 1.6 до 6.33 Гц (что соответствует времени разрыва в очаге 0.63—0.16 с). В колонках 13—15 (см. таблицу) представлены результаты расчета динамических параметров, таких как скалярный сейсмический момент  $M_0$ , радиус Брюна  $r$  и падение напряжений  $\Delta\sigma$ . Согласно полученным результатам для рассматриваемого класса событий,  $M_0$  меняется от  $2.85E + 12$  до  $4.27E + 15$  Дж·м, уровень падения напряжений от 0.08 до ~9.6 МПа и радиус Брюна от ~200 до ~800 м. Распределение этих параметров от магнитуды события показано на рис. 5.



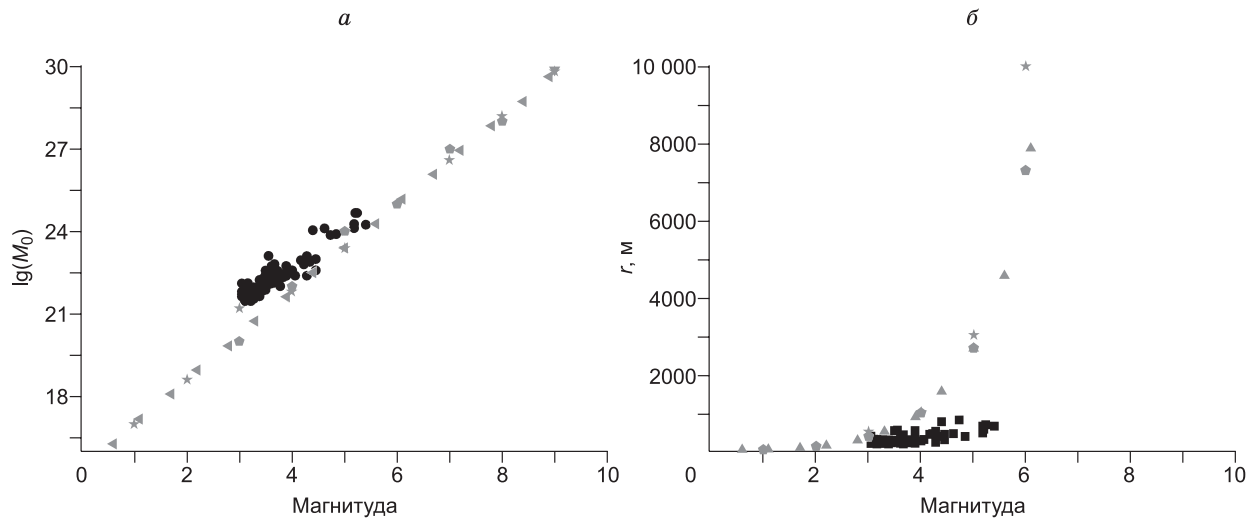
**Рис. 5. Распределение динамических параметров в зависимости от магнитуды землетрясения и аппроксимирующие функции (а, в, д) и отклонение значений от модели (б, з, е):**

*а, б* — скалярный сейсмический момент; *в, з* — радиус Брюна; *д, е* — сброшенное напряжение, описание см. в тексте.

**Скалярный сейсмический момент.** Зависимость десятичного логарифма скалярного сейсмического момента от магнитуды события хорошо описывается линейной моделью с положительным углом наклона: чем выше магнитуда, тем выше значение скалярного сейсмического момента (см. рис. 5, а). Эта зависимость может быть описана выражением  $\lg(M_0) = 9 + 1.2M$ , что вполне соответствует выражению  $\lg(M_0) = 8.4 + 1.6M$  из работы [Ризниченко, 1985], где  $M_0$  представлено в Дж·м (различие составляет 4 %). Отклонение значений относительно линии тренда имеет равномерный характер на всем диапазоне рассматриваемых магнитуд (см. рис. 5, б).

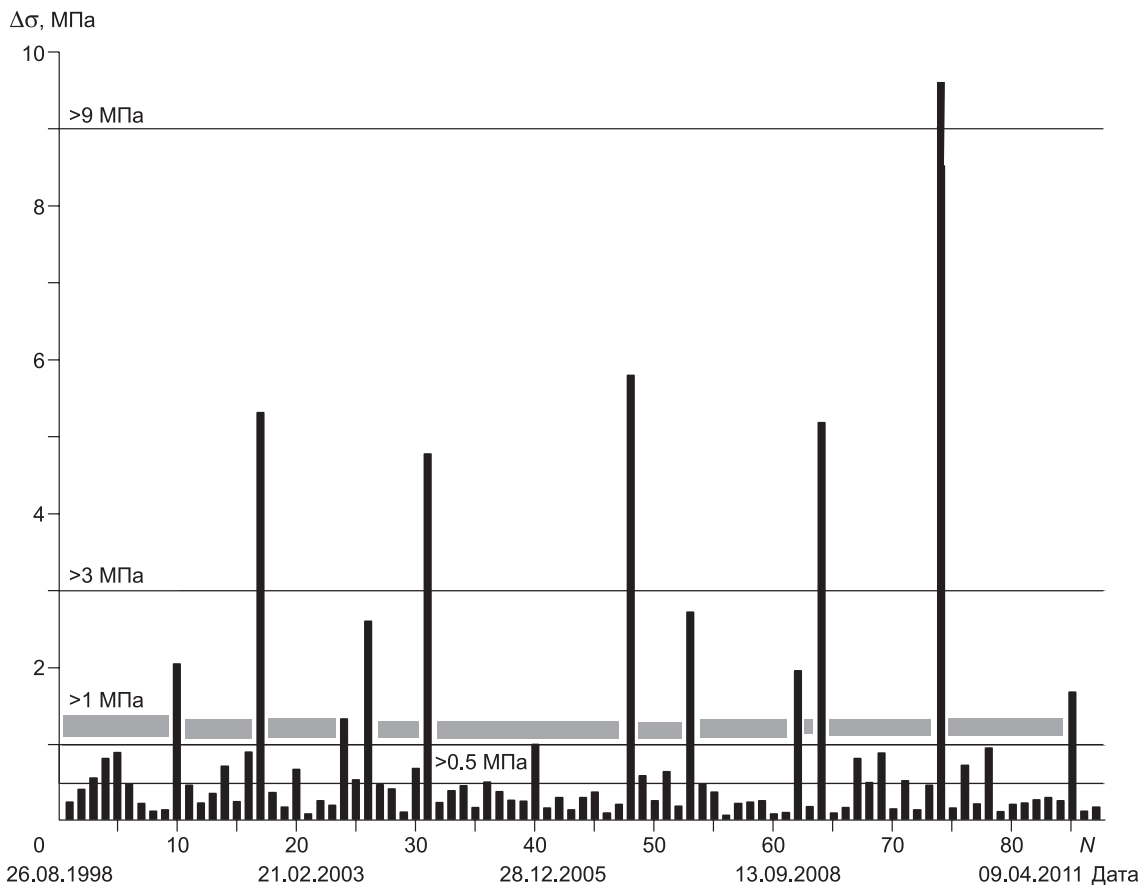
**Радиус Брюна.** Зависимость радиуса Брюна от магнитуды события представлена на рис. 5, в, которая также описана линейной функцией, при этом отклонения от тренда для событий с  $M < 4$  меньше, чем отклонения для событий с  $M > 4$  (см. рис. 5, з).





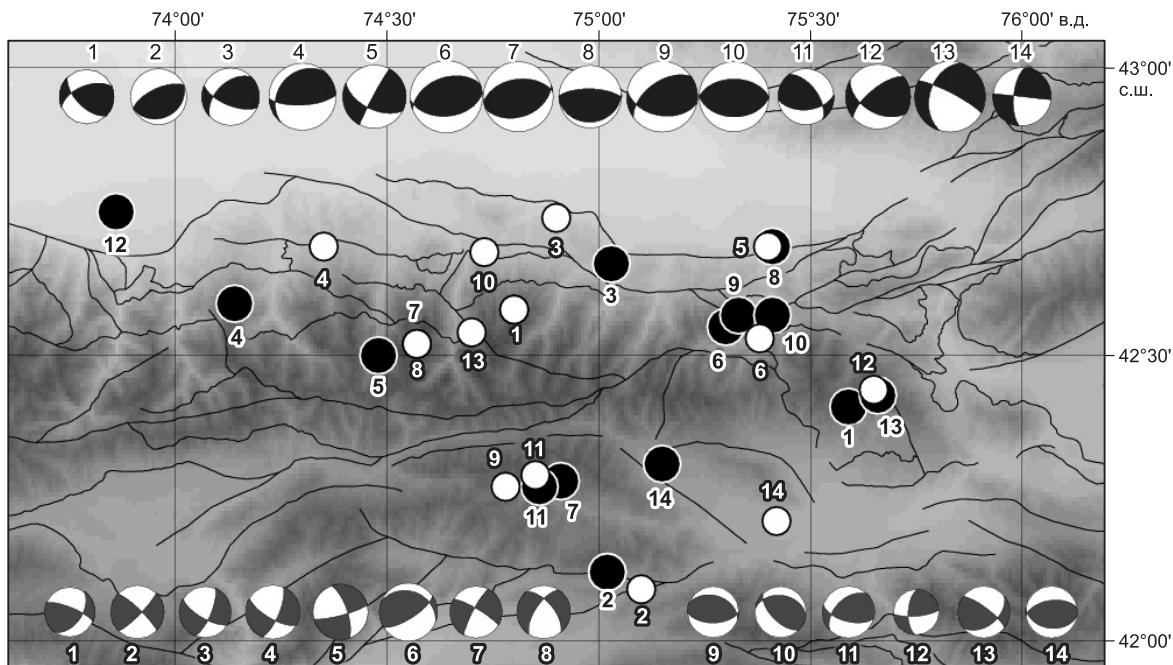
**Рис. 6. Сравнение распределения  $M_0$  (а) и  $r$  (б) с установленными средними зависимостями, по [Ризниченко, 1985].**

Звездочками, треугольниками и пятиугольниками обозначены значения зависимости из работы [Ризниченко, 1985, см. табл. 1—3].



**Рис. 7. Гистограмма распределения падения напряжений во времени (1998—2012 гг., см. таблицу).**

Описание см. в тексте.



**Рис. 8.** Эпицентральное расположение событий из двух выборок по  $\Delta\sigma$  и фокальные механизмы этих событий.

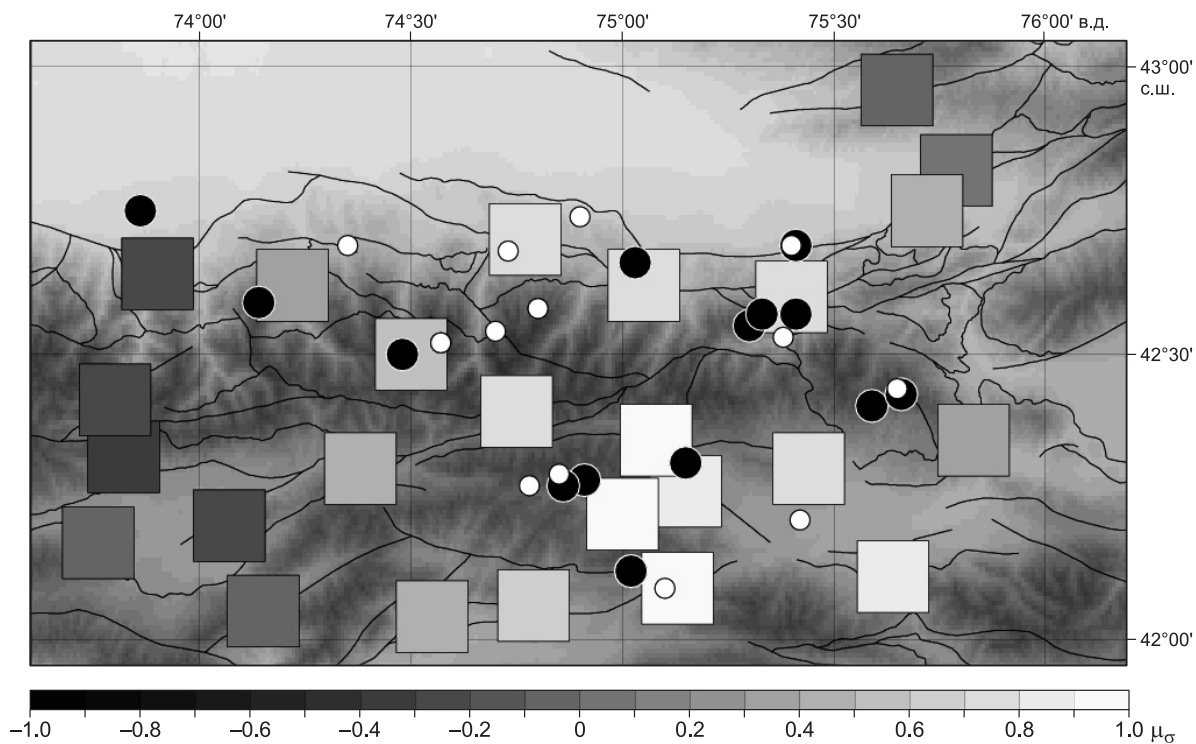
Черные кружки – события с  $\Delta\sigma > 0.9$  МПа, белые – с малыми значениями  $\Delta\sigma$ . Цифры — номер события, описание см. в тексте.

**Падение напряжений.** Для описания распределения уровня падения напряжений от магнитуды события использовались две модели – линейная и степенная ( $y = a + x^n$ ) функции (см. рис. 5, *d, e*). Разность между моделями и исходным рядом приведена на рис. 5, *e*: серыми точками отмечены отклонения от степенной функции, звездочками — от линейной. Согласно рис. 5, *e*, величина отклонений резко растет для обеих моделей для событий с  $M > 4.5$ . Это означает, что падение напряжений плохо описывается рассмотренными моделями и наблюдается слабая связь между падением напряжений и силой землетрясения.

Сравнение полученных зависимостей с теоретическими кривыми из работы [Ризниченко, 1985] позволило отметить следующее: распределение сейсмических моментов находится чуть выше (рис. 6, *a*), а значения радиусов — ниже теоретической кривой (см. рис. 6, *b*).

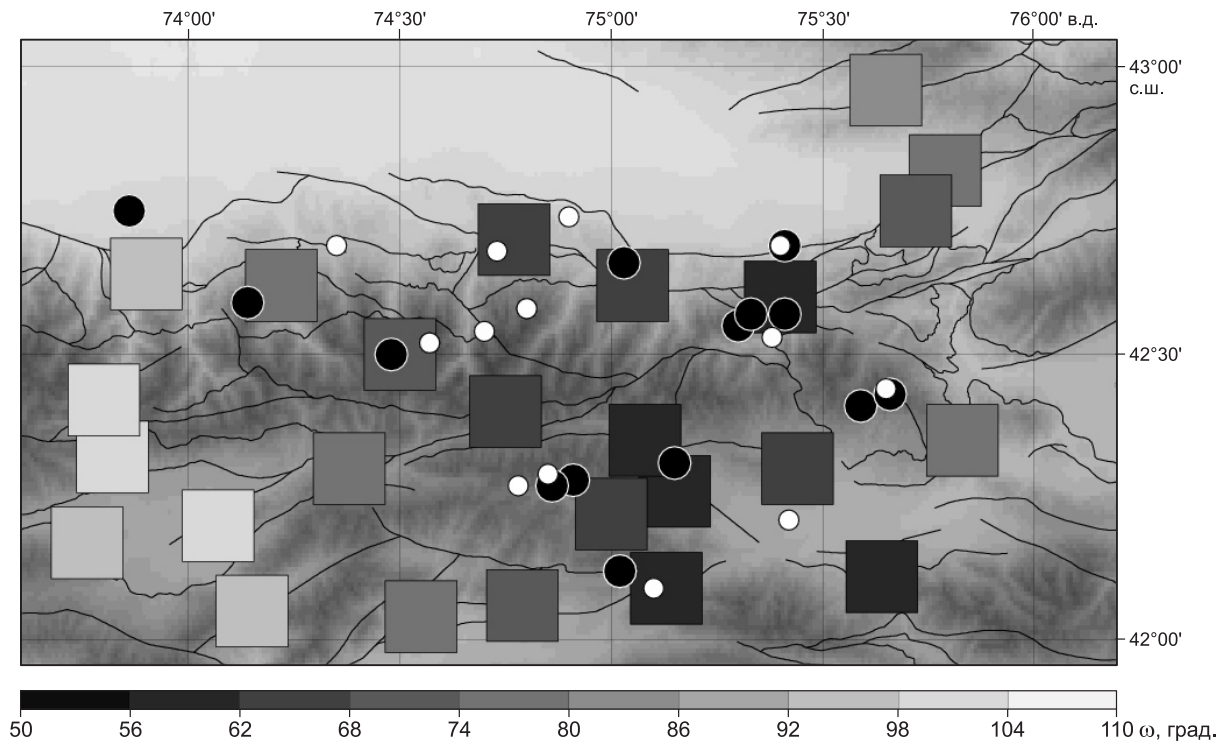
**Падение напряжений во времени.** На рис. 7 представлена гистограмма распределения падения напряжений во времени (см. таблицу, колонки 1, 15), кроме даты на графике представлены и номера событий ( $N$ ). Горизонтальными серыми линиями отмечены уровни падения напряжений – 0.5, 1, 3 и 9 МПа. Серыми прямоугольниками (см. рис. 7) показаны периоды с уровнем падения напряжений менее 1 МПа. Нанесение этих данных позволило отметить некоторую закономерность в падении напряжений: периоду значительного сброса напряжений ( $> 3$  МПа) соответствует период некоторого «затишья», когда падение напряжений не превышает уровня 0.5–1.0 МПа.

**Падение напряжений и фокальные механизмы.** Для исследования зависимости уровня падения напряжений от фокального механизма из таблицы были выбраны события с уровнем падения напряжений более 0.9 МПа, число таких событий 14. Из той же таблицы были выбраны 14 событий с минимальным уровнем падения напряжений. На рис. 8 представлены эпицентральное положение и фокальные механизмы этих двух квантилей событий. Эпицентры событий с максимальным уровнем падения напряжений отмечены черными цветом, а с минимальным — белым. Пространственное положение двух классов событий совпадает только частично. В верхней части рисунка представлены фокальные механизмы первых событий, а в нижней части рисунка — вторых. Основная часть первой выборки событий имеют чисто взбросовый (2, 6, 7, 8, 9, 10) или взбрососдвиговый механизм с минимальной сдвиговой составляющей (1, 3, 4, 5, 11, 12, 13, 14). Для второй выборки основную часть событий составляют взбрососдвиги (1, 6, 8, 12, 13) или сдвиги (2, 3, 4, 5, 7), к чистым взбросам можно отнести события 9, 10, 11, 14. Таким образом, рис. 8 демонстрирует наличие связи между уровнем падения напряжений и характером подвижки.



**Рис. 9.** Распределения коэффициента Лоде—Надаи ( $\mu_\sigma$ ) и расположение событий с малыми и большими  $\Delta\sigma$ .

Усл. обозн. см. на рис. 8. Насыщенность цвета квадрата соответствует значению  $\mu_\sigma$  в узловой точке согласно легенде.



**Рис. 10.** Распределение угла напряженно-деформированного состояния  $\omega$  и расположение событий с малыми и большими  $\Delta\sigma$ .

Усл. обозн. см. на рис. 8. Насыщенность цвета квадрата соответствует значению  $\omega$  в узловой точке согласно легенде.

### **Коэффициент Лодэ—Надаи, угол вида напряженного состояния ( $\omega$ ) и падение напряжений.**

Для того чтобы получить представление о деформации земной коры в целом, используется коэффициент Лодэ—Надаи, который не зависит от координатного представления тензора и может рассматриваться как инвариант. На рис. 9 представлена карта-схема распределения коэффициента Лодэ—Надаи, построенная на основе определения усредненных тензоров деформации по данным за 1998—2012 гг. (1056 определений механизмов очагов). При проведении расчетов направленности сейсмотектонической деформации посредством осреднения исходных данных геоструктурная область подразделяется на элементарные подобласти с размером порядка менее 1 дугового градуса, центры которых размещаются в узлах (узловые точки) специально выбранной сетки. Более подробно методика расчета усредненных тензоров и коэффициента Лодэ—Надаи описана в работах [Сычева и др., 2005, 2008]. Анализ значений этого коэффициента показал, что значительная часть исследуемой территории характеризуется деформацией простого сжатия ( $\mu_\sigma > 0.2$ ), и только незначительная часть земной коры находится в условиях простого сдвига ( $-0.2 < \mu_\sigma < 0.2$ ) – западная часть. На эту же карту вынесены события из рис. 8. Основная часть событий с  $\Delta\sigma > 0.9$  МПа (79 %) находится в области, характеризующейся деформацией простого сжатия (коэффициент Лодэ—Надаи меняется в пределах 0.73—0.93). Доля событий с минимальными значениями  $\Delta\sigma$ , расположенных в этой области, составляет 50 %.

Схема классификации режимов СТД [Юнга, 1997] основана на параметризации угловых параметров, одним из которых является угол вида напряженного состояния  $\omega$  [Соколовский, 1969]. Значение этого угла может меняться от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ . Расчет угла  $\omega$  проводился на основе тех же данных, что и коэффициент Лодэ—Надаи. Площадное распределение  $\omega$  представлено на рис. 10, где значение этого угла меняется от  $56^\circ$  до  $102^\circ$ . Основная часть событий с  $\Delta\sigma > 0.9$  МПа находится в зоне с минимальным значением этого угла, что может свидетельствовать о преобладающих горизонтальных напряжениях в этих областях.

Коэффициент Лодэ—Надаи и угол вида напряженного состояния относятся к кинематическим характеристикам, а сброшенные напряжения являются динамической характеристикой. Результаты, представленные на рис. 9 и 10, свидетельствуют о корреляции кинематических и динамических параметров в области, включающей восточную часть Киргизского хребта и хребты Карамойнок и Сындык. Выделенная область является геодинамически активной и требует детального изучения и мониторинга.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В работе проведено массовое определение динамических параметров 87 землетрясений энергетических классов  $K = 9.5—13.7$ , которые произошли на территории Северного Тянь-Шаня за 1998–2012 годы. Проанализированы зависимости ДП от магнитуды землетрясения. Проведено сравнение полученных результатов с теоретическими кривыми из работы [Ризниченко, 1985]. Определено, что уровень сброшенных напряжений для событий рассматриваемого энергетического диапазона меняется в пределах от  $\sim 0.08$  до 9.6 МПа и слабо зависит от силы землетрясения. Установлено, что события взбросового типа вносят значительный вклад в уровень падения напряжений. Построены совместные карты распределения коэффициента Лодэ—Надаи, угла напряженно-деформированного состояния на основе усредненных тензоров деформации по методу СТД и расположения событий с  $\Delta\sigma > 0.9$  МПа. Установлена связь между кинематическими и динамическими параметрами.

Авторы благодарят А.Н. Мансурова за программное обеспечение для построения спектральных характеристик и заведующего лабораторией ИС РАН В.Д. Брагина за предоставление цифровых записей и каталога сейсмических событий.

Исследование частично поддержано РФФИ (гранты 12-05-00234, 15-05-06857).

## **ЛИТЕРАТУРА**

**Аки К., Ричардс П.** Количественная сейсмология. М., Мир, 1983, т. 1—2, 880 с.

**Бурымская Р.Н.** Спектральный состав излучения и очаговые параметры землетрясений северо-западной части Тихого океана за 1969—1996 годы // Динамика очаговых зон и прогнозирование сильных землетрясений северо-запада Тихого океана. Т. 1. / Отв. ред. А.И. Иващенко. Южно-Сахалинск, ИМГиГ ДВО РАН, 2001, с. 48—67.

**Горбунова И.В., Кальметьева З.А.** Экспериментальные характеристики излучения очагов слабых землетрясений. Бишкек, Илим, 1988, 127 с.

**Кальметьева З.А., Мельникова Т.А., Мусиенко Е.В., Юдахин Ф.Я.** Модели очаговых зон сильных землетрясений // Типовые геолого-геофизические модели сейсмичных и асейсмичных районов. Бишкек, Илим, 1992, с. 124—131.

**Ключевский А.В., Демьянович В.М.** Динамические параметры очагов землетрясений Байкальской сейсмической зоны // Физика Земли, 2002, № 2, с. 55—66.

**Костров Б.В.** Механика очага тектонического землетрясения. М., Наука, 1975, 175 с.

**Костюк А.Д., Юнга С.Л., Богомолов Л.М., Сычева Н.А., Яги Ю.** Деформация земной коры Северного Тянь-Шаня по данным очагов землетрясений и космической геодезии // Физика Земли, 2010, № 3, с. 52—65.

**Раутиан Т.Г.** Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности. М., Изд-во АН СССР, 1960, № 176, с. 75—114.

**Ребецкий Ю.Л., Сычева Н.А., Сычев В.Н., Кузиков С.И., Маринин А.В.** Напряженное состояние коры Северного Тянь-Шаня по данным сейсмической сети KNET // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (3), с. 496—520.

**Ризниченко Ю.В.** Проблемы сейсмологии. М., Наука, 1985, 408 с.

**Соколовский В.В.** Теория пластичности. М., Высш. шк., 1969, 608 с.

**Сычева Н.А., Богомолов Л.М.** Падение напряжения в очагах среднемагнитудных землетрясений в Северном Тянь-Шане // Физика Земли, 2014, № 3, с. 142—153.

**Сычева Н.А., Юнга С.Л.** Современные данные по механизмам очагов и сеймотектоническим деформациям земной коры Тянь-Шаня // Труды конференции с участием иностранных ученых (3—6 октября 2011 г., г. Новосибирск). Новосибирск, Ин-т горного дела, 2011, с. 151—156.

**Сычева Н.А., Юнга С.Л., Богомолов Л.М., Мухамадиева В.А.** Сеймотектонические деформации земной коры Северного Тянь-Шаня (по данным определений механизмов очагов землетрясений на базе цифровой сейсмической сети KNET) // Физика Земли, 2005, № 11, с. 62—78.

**Сычева Н.А., Юнга С.Л., Богомолов Л.М., Макаров В.И.** Сеймотектонические деформации и новейшая тектоника Тянь-Шаня // Физика Земли, 2008, № 5, с. 3—15.

**Сычева Н.А., Богомолов Л.М., Сычев В.Н.** О геоэффективных солнечных вспышках и вариациях уровня сейсмического шума // Физика Земли, 2011, № 3, с. 55—71.

**Сычева Н.А., Кальметьева З.А., Мансуров А.Н., Сычев В.Н.** Методические особенности определения динамических параметров землетрясений по данным сейсмологической сети KNET (Северный Тянь-Шань) // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. Третья тектонофизическая конференция. Материалы докладов конференции 8—12 октября 2012 г. Т. 2. М., ИФЗ РАН, 2012, с. 181—184.

**Юнга С.Л.** О классификации тензоров сейсмических моментов на основе их изометрического отображения на сферу // ДАН, 1997, т. 352, № 2, с. 253—255.

**Ameri G., Oth A., Pilz M., Bindi D., Parolai S., Luzi L., Mucciarelli M., Cultreri G.** Separation of source and site effects by generalized inversion technique using the aftershock recordings of the 2009 L'Aquila earthquake // Bull. Earthquake Eng., 2009, №9, p. 717—739. doi: 10.1007/s10518-011-9248-4.

**Dziewonski A.M., Chou T.A., Woodhouse J.H.** Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of regional and global seismicity // J. Geophys. Res., 1981, № 86, p. 2825—2852.

**Kocharyan G.G.** Scale effect in seismotectonics // Geodyn. Tectonophys., 2014, v. 5, № 2, p. 353—385, doi:10.5800/GT2014520133.

**Oth A., Parolai S., Bindi D., Wenz F.** Source spectra and site response from *S*-waves of intermediate-depth Vrancea, Romania, Earthquakes // Bull. Seismol. Soc. Amer., 2009, v. 99, № 1, p. 235—254, doi:10.1785/012008005.

**Oth A., Bindi D., Parolai S., Giacomo D.** Spectral analysis of K-NET and KiK-net data in Japan, Part II: On attenuation characteristics, source spectra, and site response of borehole and surface stations // Bull. Seismol. Soc. Amer., 2011, v. 101, №2, p. 667—687. doi: 10.1785/0120100135.

**Parolai S., Bindi D., Durukal E., Grosser H., Milkereit C.** Source parameters and seismic moment-magnitude scaling for Northwestern Turkey // Bull. Seismol. Soc. Amer., 2007, v. 97, № 2, p. 655—660. doi:10.1785/0120060180.