

УДК 550.34.094

## СРАВНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ РАЗЛИЧНЫХ РЕГИОНОВ

Н.А. Сычева

Проведено сравнение динамических параметров 183 землетрясений с  $K > 9.5$ , произошедших на территории Северного Тянь-Шаня (Бишкекский геодинамический полигон, БГП) с 1998 по 2017 г. с результатами, полученными по другим регионам: Байкальская рифтовая зона (62 события), северо-западная часть Тихого океана (147 событий), Крым (58 событий) и область Коджаэли (Турция, 523 события). Построены распределения ДП в зависимости от магнитуды для БГП и других рассматриваемых регионов. Установлено хорошее совпадение по уровню скалярного сейсмического момента и некоторые различия в значениях угловой частоты и радиуса очага.

*Ключевые слова:* землетрясение; очаговый спектр; стационарный спектр; угловая частота; спектральная плотность; скалярный сейсмический момент; радиус очага; уровень сброшенных напряжений.

---

## COMPARISON OF THE DYNAMIC EARTHQUAKE PARAMETERS OF VARIOUS REGIONS

N.A. Sycheva

The dynamic parameters of 183 earthquakes with  $K > 9.5$ , which occurred in the Northern Tien Shan (Bishkek geodynamic proving, BGP) from 1998 to 2017 were compared with the results obtained for other regions: Baikal rift zone (62 events), northwestern part of the Pacific (147 events), Crimea (58 events) and Kocaeli region (Turkey, 523 events). Distributions of DPs are constructed depending on the magnitude for BGP and other regions considered. A good coincidence in the level of the scalar seismic moment and some differences in the values of the angular frequency and the radius of the focus have been established.

*Keywords:* seismogram; earthquake; source spectrum; station spectrum; angle frequency; spectral density; scalar seismic moment; source radius; stress drop.

**Введение.** Исследование динамических параметров землетрясений на Научной станции РАН началось с анализа 14 умеренных землетрясений с  $K > 11.5$ , которые произошли на территории Северного Тянь-Шаня (Бишкекский геодинамический полигон, БГП) с 1998 по 2009 г. Результаты этих исследований представлены в работах [1–3]. На следующем этапе исследования к анализу были привлечены более слабые события с  $K > 9.5$  (87 событий), которые произошли на той же территории за 1998 по 2012 г. Результаты исследований представлены в работе [4, 5]. При расчете очаговых спектров 14 умеренных землетрясений использовалась функция затухания сейсмических волн, полученная по данным добротности Тянь-Шаньского региона [6] ( $Q(f) = 138f^{0.8}$ ). На втором этапе исследования после привлечения событий с  $K > 9.5$  проводился пересчет очаговых спектров для 14 событий первого этапа. Это было обусловлено тем, что функция затухания на втором этапе рассчитыва-

лась по данным добротности, полученной в работе [7] для слоя среды 80 км ( $Q(f) = 80f^{0.9}$ ). На третьем этапе при определении динамических параметров землетрясений за 2013–2017 гг. использовалась добротность, полученная для слоя 65 км ( $Q(f) = 20f^{1.2}$ ) [8]. На этом же этапе все очаговые спектры, а также динамические параметры, полученные на предыдущих этапах, также пересчитывались.

К настоящему моменту получены динамические параметры для 183 землетрясений с  $K > 9.5$ , которые произошли на территории Северного Тянь-Шаня за 1998–2017 гг.

Прежде чем использовать полученные результаты для оценки напряженно-деформированного состояния (например, уровень сброшенных напряжений), необходимо оценить, как они согласуются с результатами, полученными при исследовании ДП землетрясений других регионов. Сравнение ДП 87 землетрясений с установленными средними зависимостями по скалярному сейсмическому

Таблица 1 – Анализируемые регионы (источники) и некоторые характеристики данных

№ п/п	Регион	N	Период		M		f <sub>0</sub> , Гц		M <sub>0</sub> , дж·м		r, м		Δσ, МПа	
			min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
1	БГП	183	1998	2017	2.7	6.0	1.7	6.0	6.2E+12	2.2E+17	200	800	2.0E-1	214
2	БРЗ	62	2003	2006	2.8	6.5	0.7	3.3	1.9E+12	1.4E+18	390	1740	1.0E-3	174
3	КИС	30	2001	2003	2.2	4.4	4.2	8.8	2.0E+13	6.6E+15	150	540	9.0E-1	71
4	Турция	523	1999	1999	0.5	5.9	0.6	12.0	1.1E+14	2.4E+17	100	2500	2.0E-3	40
5	Тихий океан	147	1969	1996	5.5	8.2	нет	нет	4.0E+13	1.8E+19	нет	нет	1.2E-1	56
6	Крым	58	2007	2011	1.2	4.8	нет	нет	3.9E+13	2.2E+16	260	1390	1.0E-2	3.5

Примечание: 1 – [1-4]; 2 – [10]; 3 – [14-15]; 4 – [11]; 5 – [12]; 6 – [13]. Нет – нет данных.

моменту и радиусу очага из [9], представлено в работе [4].

Цель данной работы – сравнение значений динамических параметров 183 землетрясений, произошедших на территории Северного Тянь-Шаня со значениями ДП, полученными для других тектонически активных регионов.

**Исследуемые данные.** Сравнение значений динамических параметров землетрясений (угловая частота  $f_0$ , скалярный сейсмический момент  $M_0$ , радиус очага  $r$ , уровень сброшенных напряжений  $\Delta\sigma$ ) Северного Тянь-Шаня (БГП) проводили с данными, полученными в результате исследований следующих регионов: Байкальская рифтовая зона [10]; область Коджаэли, северо-западная часть Турции [11]; северо-западная часть Тихого океана (о. Сахалин) [12] и Крым [13]. К анализу так же были привлечены данные полученные по Северному Тянь-Шаню, но другими исследователями [14, 15] (КИС, Институт сейсмологии НАН КР). В таб-

лице 1 представлены некоторые характеристики данных по исследуемым регионам: количество событий, период исследования, минимальные и максимальные значения магнитуды, угловой частоты, скалярного сейсмического момента, радиуса очага и уровня сброшенных напряжений.

**Результаты.** На рисунке 1 показано графическое представление граничных значений динамических параметров для исследуемого энергетического диапазона событий по регионам, указанным в таблице 1. Граничные значения по угловой частоте  $f_0$  представлены по первым четырем источникам (см. таблицу 1): наблюдается хорошее согласие между КИС и северо-западной Турцией (Коджаэли) и их отличие от БГП и БРЗ, которые неплохо согласуются между собой (рисунок 1, а). Значение угловой частоты  $f_0$  используется в формуле расчета радиуса очага ( $r = 2.34 \cdot V_s / 2 \cdot \pi \cdot f_0$ ) [16, 17], в результате чего различия, наблюдаемые в угловых частотах, отражаются и в значениях радиусов

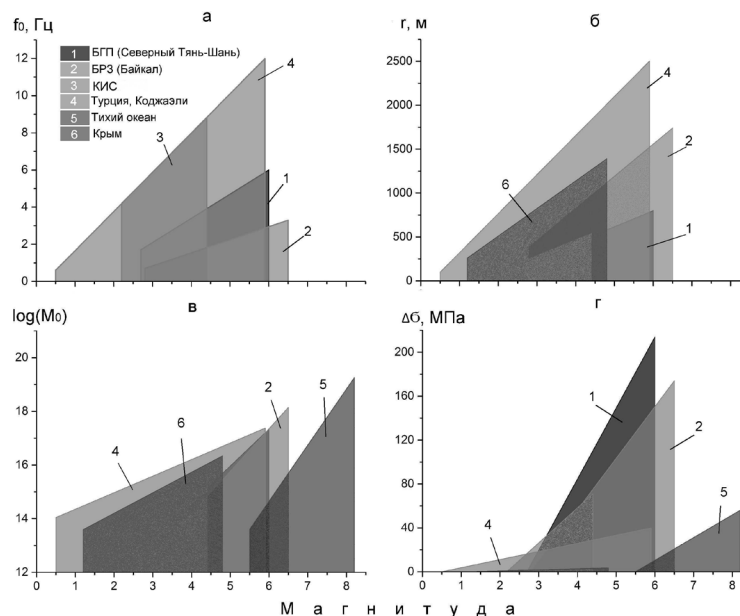


Рисунок 1 – Граничные значения динамических параметров для источников из таблицы 1

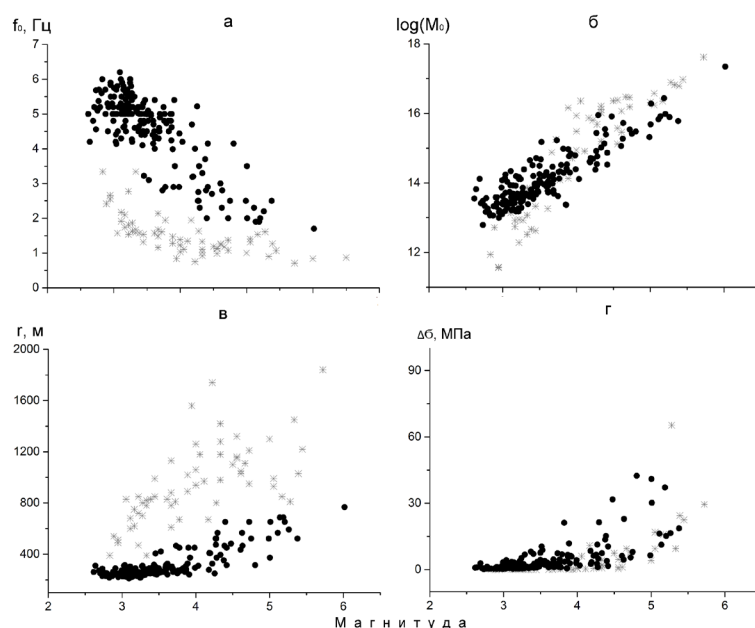


Рисунок 2 – Распределение ДП в зависимости от магнитуды для БГП (черные точки) и БРЗ (звездочки): а – угловая частота  $f_0$ ; б – логарифм скалярного сейсмического момента  $M_0$ ; в – радиус очага  $r$ ; г – падение напряжений  $\Delta\sigma$

очагов (рисунок 1, б), и как следствие, в значениях уровня сброшенных напряжений (рисунок 1, г). При расчете уровня сброшенных напряжений  $\Delta\sigma$  ( $\Delta\sigma = 7M_0 / 16r^3$ ) [16] радиус возводится в третью степень, что увеличивает расхождение в данных. Границы изменения значений скалярного сейсмического момента  $M_0$  хорошо согласуются между представленными регионами, за исключением северо-западной части Тихого океана (рисунок 1, в).

Расчет динамических параметров осуществляли на основе двух характеристик очагового спектра: угловая частота  $f_0$  и спектральная плотность  $\Omega_0$ . Значение угловой частоты использовали при расчете радиуса очага  $r$ , а значение спектральной плотности  $\Omega_0$  при расчете скалярного сейсмического момента  $M_0$ . Хорошее соответствие граничных значений скалярного сейсмического момента для всех регионов свидетельствует о том, что определение спектральной плотности  $\Omega_0$  по очаговому спектру (“полочка” спектра) определяется однозначно, а вот различие в угловых частотах свидетельствует о том, что подход в определении этого параметра может отличаться у каждого исследователя.

Ниже приводятся распределения некоторых динамических параметров в зависимости от магнитуды землетрясения  $M$  для рассматриваемых регионов. На рисунке 2 представлено распределение ДП по Бишкекскому геодинамическому полигону [1–4] и Байкальской рифтовой зоне [10]. Наблюдается хорошее соответствие в распределении

скалярного сейсмического момента  $M_0$  и падении напряжений  $\Delta\sigma$  (рисунок 2, б) и значительная разница в распределении радиуса очага (рисунок 2, в). В работе [10] угловые частоты не представлены, однако их можно получить из значения радиуса, подставляя скорость  $S$ -волны ( $f_0 = 2.34V_s/2\pi r$ ). Распределение рассчитанных угловых частот и частот по БГП совпадают только частично (рисунок 2, а), хотя класс рассматриваемых событий идентичен. Чем объяснить такое различие? На рисунке 3 в логарифмическом масштабе представлено распределение угловых частот по трем регионам: северо-западная Турция (523 события) [11], БГП (183 события), БРЗ (60 событий): угловые частоты по БГП совпадают с верхней границей, а по БРЗ – с нижней границей области распределения частот по северо-западной Турции. Такое распределение можно объяснить либо систематической ошибкой интерпретатора, либо особенностью регионов.

На рисунке 4 представлено распределение ДП для БГП (183 события) и КИС (30 событий): наблюдается хорошее совпадение результатов по распределению угловой частоты и радиусу очага (зависит от частоты), а некоторые отклонения в распределении скалярного сейсмического момента отражаются и в распределении уровня падения напряжений.

На рисунке 5 представлено распределение динамических параметров по БГП и северо-западной части Тихого океана (147 событий). Надо

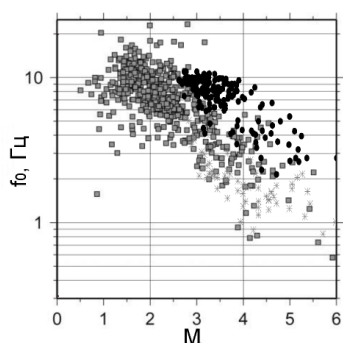


Рисунок 3 – Распределение угловых частот по трем регионам: квадратики – северо-западная Турция; точки – БГП; звездочки – БРЗ

отметить, что энергетический диапазон исследуемых событий не совпадает (за исключением 1 события с  $M = 6.0$ ). Если описать распределение логарифма скалярного сейсмического момента линейной моделью, то модель по данным БГП в пересекающейся части находится выше модели по данным северо-западной части Тихого океана. Вероятно, причиной такого несоответствия может быть определение уровня спектральной плотности для Тихоокеанского региона не по очаговому спектру, а по стационарному. Распределение уровня сброшенных напряжений по двум регионам в силу этих причин так же не совпадает (рисунок 5, б).

Сравнение распределений ДП землетрясений по БГП и Крыма представлено на рисунке 6:

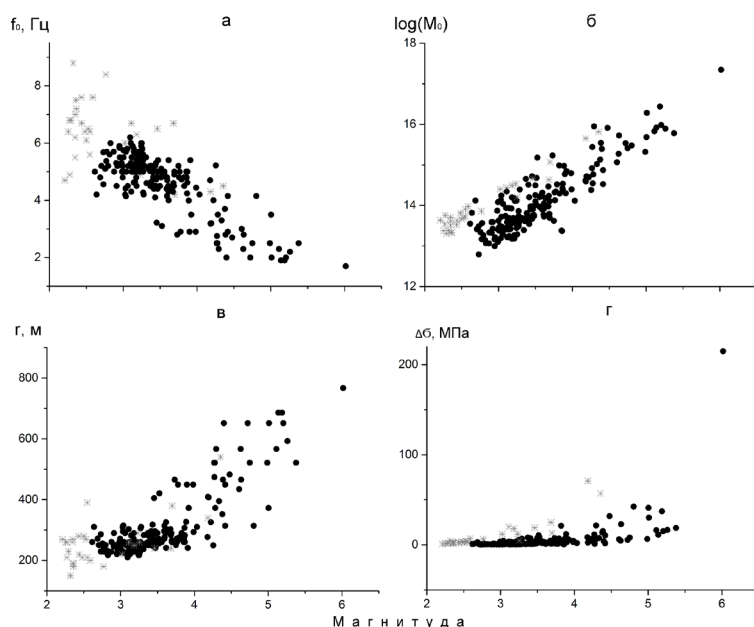


Рисунок 4 – Распределение ДП в зависимости от магнитуды для БГП (черные точки) и КИС (звездочки): а – угловая частота  $f_0$ ; б – логарифм скалярного сейсмического момента  $M_0$ ; в – радиус очага  $r$ ; г – падение напряжений  $\Delta\sigma$

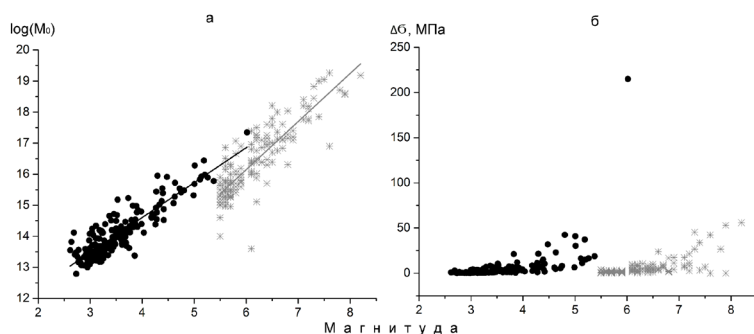


Рисунок 5 – Распределение ДП в зависимости от магнитуды для БГП (черные точки) и события Тихоокеанского региона (звездочки): а – логарифм скалярного сейсмического момента  $M_0$ ; б – падение напряжений  $\Delta\sigma$

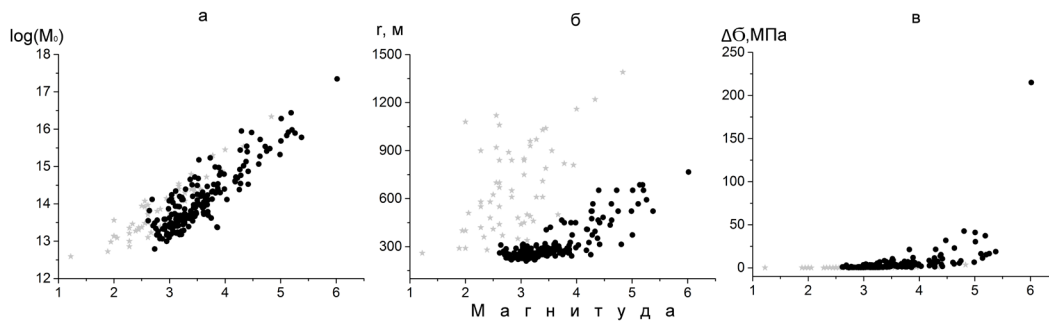


Рисунок 6 – Распределение ДП в зависимости от магнитуды для БГП (черные точки) и Крыма (звездочки):

а – логарифм скалярного сейсмического момента  $M_0$ ; б – радиус очага  $r$ ; в – падение напряжений  $\Delta\sigma$

наблюдается хорошее согласование по распределению логарифма сейсмического момента  $M_0$  и уровню сброшенных напряжений  $\Delta\sigma$  и разнице в распределении радиуса очага  $r$ . Это несоответствие можно объяснить разным подходом к определению угловой частоты, которая участвует в вычислении радиуса очага.

**Заключение.** Проведено сравнение значений динамических параметров, полученных для 183 землетрясений с  $K > 9.5$  Северного Тянь-Шаня с результатами исследований, проведенных по другим регионам: Байкальская рифтовая зона (62 события), северо-западная часть Турции (Коджаэли, 523 события), северо-западная часть Тихого океана (147 событий), Крым (58 событий). Также рассматривались ДП землетрясений, полученных для Северного Тянь-Шаня, но другими исследователями (30 событий). Сравнение ДП показало, что наблюдается хорошее совпадение в определении скалярного сейсмического момента для всех рассматриваемых регионов и некоторые различия в определении угловой частоты для тех регионов, в которых она была представлена, что ведет к различию в значениях радиуса очага. Уровень сброшенных напряжений, полученных для Северного Тянь-Шаня, совпадает с уровнем сброшенных напряжений, полученных по Байкальской рифтовой зоне, Крыму и КИС, что позволяет в дальнейшем их использование для оценки напряженно-деформированного состояния Северного Тянь-Шаня.

Исследование частично поддержано по гранту РФФИ 15-05-06857.

#### Литература

1. Сычева Н.А. Методические особенности определения динамических параметров землетрясений по данным сейсмологической сети KNET (Северный Тянь-Шань) / Н.А. Сычева, З.А. Кальметьева, А.Н. Мансуров, В.Н. Сычев // Матер. III тектонофизической конф. “Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле”, 8–12 окт. 2012 г. Бишкек, 2012. Т. 2. С. 185–190.
2. Сычева Н.А. Падение напряжения в очагах среднемагнитудных землетрясений в Северном Тянь-Шане / Н.А. Сычева, Л.М. Богомолов // Физика Земли. 2014. № 3. С. 142–153.
3. Мансуров А.Н. Программный пакет расчета динамических характеристик сейсмических событий для проведения комплексного анализа тектонических напряжений территории Северного Тянь-Шаня / А.Н. Мансуров, Н.А. Сычева // Вестник КРСУ. 2011. Том 11. № 11. С. 65–71.
4. Сычева Н.А. Закономерности падения напряжений при землетрясениях Северного Тянь-Шаня / Н.А. Сычева, Л.М. Богомолов // Геология и геофизика. 2016, а. Том 57. № 11. С. 2071–2083.
5. Сычева Н.А. Падение напряжений при землетрясениях Северного Тянь-Шаня / Н.А. Сычева, Л.М. Богомолов // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Матер. XI сейсмолог. школы, г. Чолпон-Ата, 12–16 сент. 2016 г. Обнинск, 2016, б. С. 330–334.
6. Земцова А.Г. Сейсмическая кода и динамические особенности землетрясений Киргизии: дис... канд. физ.-мат. наук / А.Г. Земцова. Фрунзе: Ин-т сейсмологии АН, 1985. 164 с.
7. Сычева Н.А. Расчет добротности коры и верхней мантии Северного Тянь-Шаня на основе разработанного программного комплекса CodaQ / Н.А. Сычева, В.Н. Сычев, И.В. Сычев, П.В. Ильичев // Геоинформатика. 2015. № 2. С. 12–23.
8. Сычева Н.А. Добротность среды Бишкекского геодинамического полигона / Н.А. Сычева, В.Н. Сычев // Матер. IV конф.: “Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле”. 3–7 октября 2016 г. Т. 1. С. 562–570.
9. Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии / Ю.В. Ризниченко. М.: Наука, 1985. 408 с.
10. Добрынина А.А. Очаговые параметры землетрясений Байкальской рифтовой зоны / А.А. Добрынина // Физика Земли. 2009. № 12. С. 60–75.

11. *Parolai S.* Source parameters and seismic moment–magnitude scaling for Northwestern Turkey / S. Parolai, D. Bindi, E. Durukal, H. Grosser and C. Milkereit // *Bull. Seism. Soc. Am.* April 2007. V. 97. No. 2. P. 655–660. doi:10.1785/0120060180.
12. *Бурымская Р.Н.* Спектральный состав излучения и очаговые параметры землетрясений северо-западной части Тихого океана за 1969–1996 годы / Р.Н. Бурымская; отв. ред. А.И. Иващенко // *Динамика очаговых зон и прогнозирование сильных землетрясений северо-запада Тихого океана*. Т. 1. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2001. С. 48–67.
13. *Пустовитенко Б.Г.* Динамические параметры очагов землетрясений Крыма по сейсмическим станциям / Б.Г. Пустовитенко, Е.А. Мержей, А.А. Пустовитенко // *Геофизический журнал*. 2013. № 5. С. 172–186.
14. *Грин Т.П.* Пояснительная записка к Акту выполненных работ за III, IV кв. 2001 г. и I кв. 2002 г. / Т.П. Грин, З.А. Кальметьева, Р.А. Чеховская // *Опытно-методическая сейсмологическая экспедиция НАН КР*. 2002. С. 66.
15. *Кальметьева З.А.* Пояснительная записка к Акту выполненных работ по обработке и использованию данных KNET за III кв. 2002 г., I, III, IV кв. 2003 г. / З.А. Кальметьева, С.К. Молдобекова, Р.А. Чеховская // *Опытно-методическая сейсмологическая экспедиция НАН КР*. 2003. С. 124.
16. *Brune J.N.* Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes / J.N. Brune // *J. Geophys. Res.* 1970. V. 75. P. 4997–5009.
17. *Brune J.N.* Corrections / J.N. Brune // *J. Geophys. Res.* 1971. V. 76. P. 5002.