

*О. А. Кучай**

Умеренно сильные землетрясения и их афтершоки ($M_w = 6.7-6.9$)

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: KuchayOA@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Анализируются фоновые сейсмические события и афтершоковые последовательности ($m_b \geq 4.5$) 23-х умеренно сильных ($M_w = 6.7-6.9$) внутриплитных коровых землетрясений на территории с координатами $20^\circ-50^\circ$ с.ш. и $59^\circ-120^\circ$ в.д. за период наблюдения 1971-2022 гг. Четкой связи между суммарной величиной скалярного сейсмического момента, рассчитанного по афтершоковым последовательностям землетрясений, и уровнем суммарной величины скалярного сейсмического момента фонового режима не прослеживается. Характер подвижек в очагах главных землетрясений не оказывает заметного влияния на значения суммарного скалярного сейсмического момента афтершоковой активности.

Ключевые слова: фоновая сейсмичность, афтершоковые последовательности, скалярная величина сейсмического момента, сильные землетрясения Азии, механизмы очагов землетрясений

*О. А. Kuchay**

Moderately strong earthquakes and their aftershocks ($M_w = 6.7 - 6.9$)

Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: KuchayOA@ipgg.sbras.ru

Abstract. Background seismic events and aftershock sequences ($m_b \geq 4.5$) of 23 moderately strong ($M_w = 6.7-6.9$) intraplate earthquakes in the earth's crust over the observation period 1971-2022 were analyzed in the area of $20^\circ-50^\circ$ N and $59^\circ-120^\circ$ E. No clear connection was found between the total value of the scalar seismic moment calculated from the aftershock sequences of earthquakes and the level of the total value of the scalar seismic moment of the background mode. The nature of the movements in the sources of the main earthquakes does not have a noticeable effect on the values of the total scalar seismic moment of aftershock activity.

Keywords: background seismicity, aftershock sequences, scalar magnitude of the seismic moment, the strongest earthquakes in Asia, mechanisms of earthquake foci

Введение

Ранее были исследованы зоны фоновой и афтершоковой сейсмичности в пределах семи сильнейших внутриплитных землетрясений ($M_w \geq 7.6$) Центральной Азии, произошедших со второй трети 20 века и до настоящего времени [1]. Такие землетрясения в Центральной Азии происходят довольно редко, однако угрозу представляют и землетрясения с $M_w = 6.7-6.9$, интенсивность которых определяется в VII и даже VIII баллов [2]. В связи с этим важно оценить величину суммарного скалярного сейсмического момента как за счет фоновых сейсмиче-

ских событий в окрестности землетрясений с $M_w = 6.7-6.9$, так и высвободившегося за счет афтершокового процесса.

Методы и материалы

Для определения сейсмической активности афтершоковых последовательностей и фоновых землетрясений использовались каталоги Геологической службы США [2], Международного Сейсмологического центра ISC [3] и Global CMT [4]. Выборки для главных событий с $M_w = 6.7-6.9$ и глубиной очагов 1-40 км для территории с координатами $20^\circ-55^\circ$ с.ш. и $59^\circ-120^\circ$ в.д. осуществлялись из каталога [2]. Период наблюдений составил 50 лет (1971-2022 гг.). Выбраны 23 главных землетрясения. Из этого же каталога [2] отобраны данные о фокальных механизмах очагов главных событий (рис. 1). Механизмы очагов двух землетрясений, зарегистрированных до 1976 г., привлекались из литературных источников [5, 6]. Данные о магнитудах (M_w) и скалярных величинах сейсмических моментов для отобранных 23 землетрясений взяты из каталога [4] (величины M_w сопоставлены по двум каталогам [2] и [4]).

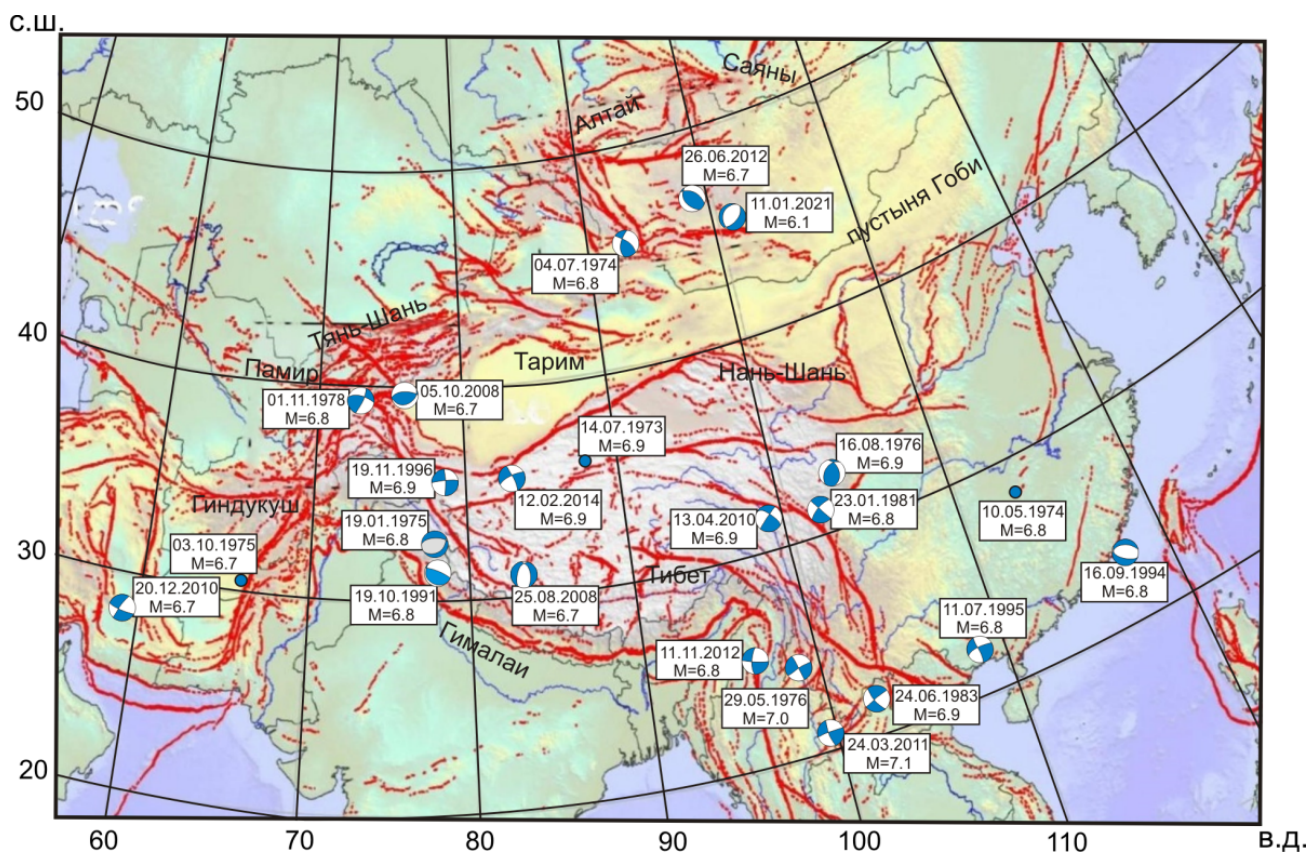


Рис. 1. Карта-схема эпицентров сильнейших землетрясений Азии ($M = 6.7-6.9$) и решения их фокальных механизмов за период 1973-2021 гг. Синим цветом закрашены области волн сжатия, белым – волн растяжения. Красными линиями показана сеть разломов по [7]. Решения механизмов очагов землетрясений представлено в верхней полусфере. Голубыми точками отмечены три землетрясения, для которых механизм очага не определен

В работе [8] показано, что выборка афтершоков содержит в себе субъективный элемент, поэтому необходимо задать размер временного и пространственного окна. В настоящей работе для каждого из 23 главных землетрясений из каталогов ISC [3] отобраны афтершоковые серии и фоновые землетрясения с $m_{b(isc)} \geq 4.5$ на площадке $3^\circ \times 3^\circ$ с центральным расположением эпицентра основного землетрясения. Следуя статье [9], длительность повторных толчков была ограничена одним годом. Согласно [10], моментная магнитуда землетрясения $M_w = (m_{b(isc)} - 1.65)/0.65$, где $m_{b(isc)}$ – данные о магнитудах из каталога [3]. Точность расчета M_w конечно ниже, чем данных, полученных при непосредственном определении по сейсмическим записям. С использованием таблицы Ю. В. Ризниченко [11] определены значения скалярных сейсмических моментов (M_0) афтершоков и фоновых событий. Аналогично подходу в работе [12], суммарный скалярный сейсмический момент, высвобождаемый в афтершоках и в фоновых землетрясениях рассматривался как:

$$M_{0 \text{ sum af}} = \sum M_{0i \text{ af}} \text{ и } M_{0 \text{ sum фон}} = \sum M_{0i \text{ фон}}, i = 1 \dots n,$$

где M_{0i} – скалярный сейсмический момент каждого афтершока или фонового землетрясения.

Результаты

Представленные в табл. 1 данные о магнитудах (M_w) сильнейших землетрясений из каталогов [2] и [4] отличаются, но имеют близкие значения. В этой же таблице приведены сведения о магнитудах сильнейших афтершоков каждой серии. Значения магнитуд используются при рассмотрении экспериментального закона Бота [13], в котором заявляется о близкой к единице разности между магнитудой главного события и магнитудой сильнейшего афтершока. В настоящей работе этот параметр меняется в достаточно широких пределах от 0.2 до 2.1 (табл. 1). Наименьшие значения (0.2, 0.3 и 0.5) можно видеть для землетрясений под номерами 7, 5 и 18, наибольшие – для землетрясений 9, 12 и 13, которые произошли при разном уровне фоновой сейсмичности (табл. 2).

Максимальные величины магнитуд фоновых событий, зарегистрированных с 1901 г. до главных толчков, имели наибольшие значения практически в половине случаев (табл. 2, землетрясения под номерами 2, 4, 5, 7-9, 13, 16, 21-23). После афтершоковой деятельности на рассматриваемых площадках только четыре фоновых землетрясения (табл. 2, № 6, 8, 13 и 16) превысило магнитуду главного события.

В настоящей работе фоновая сейсмичность оценивается на практически близких по величине площадке участках (табл. 2). Продолжительность афтершокового процесса, регистрируемого после землетрясений с $M_w = 6.7-6.9$, значительно различается, что сказывается на величине суммарного скалярного сейсмического момента (табл. 2).

Таблица 1

Каталог сильнейших землетрясений с данными о их магнитудах из разных каталогов и максимальных магнитудах сильнейших афтершоков в каждой серии после главного события

N п/п	дата	время	ши-рота	дол-гота	H_{isc}	M_w^{usgs}	M_w^{cmf}	$M_w^{max(usgs)}$	аф-терш.
1	14.07.1973	4:51	35.10	86.39	11.6	6.9	-	5.9	
2	10.05.1974	19:25	28.25	104.08	16.9	6.8	-	5.5	
3	04.07.1974	19:30	45.13	93.92	11.6	6.7	-	5.3	
4	19.01.1975	8:02	32.35	78.49	12.9	6.8	-	6	
5	03.10.1975	5:14	30.28	66.38	12.7	6.7	-	6.4	
6	29.05.1976	14:00	24.54	98.72	8	7	6.7	6.3	
7	16.08.1976	14:06	32.69	104.10	7.8	6.9	6.7	6.7	
8	01.11.1978	19:48	39.29	72.66	15.3	6.8	6.6	5.5	
9	23.01.1981	21:13	30.97	101.17	13.9	6.8	6.5	4.7	
10	24.06.1983	3:28	21.79	103.43	15	6.9	6.2	5.1	
11	19.10.1991	21:23	30.76	78.79	16.1	6.8	6.8	4.9	
12	16.09.1994	6:20	22.54	118.78	15.1	6.8	6.7	4.8	
13	11.07.1995	21:46	21.94	99.22	13.7	6.8	6.8	4.8	
14	19.11.1996	10:44	35.29	78.15	35	6.9	6.8	5	
15	25.08.2008	13:22	30.97	83.64	23.9	6.7	6.7	6	
16	05.10.2008	15:52	39.49	73.76	21.5	6.7	6.7	5.9	
17	13.04.2010	23:49	33.13	96.69	17.5	6.9	6.9	6.1	
18	20.12.2010	18:42	28.39	59.16	14.8	6.7	6.5	6.2	
19	24.03.2011	13:55	20.63	99.92	12.8	6.9	6.8	5.7	
20	26.02.2012	6:17	51.80	95.98	13	6.7	6.6	5.2	
21	11.11.2012	1:12	22.89	95.85	14.2	6.8	6.8	5.8	
22	12.02.2014	9:19	35.88	82.58	4.1	6.9	6.9	5.7	
23	11.01.2021	21:32	51.27	100.46	9.8	6.7	6.8	5.4	

Таблица 2

Суммарные величины скалярного сейсмического момента афтершоковых серий ($\sum M_{oi\ af}$) и фоновой активности ($\sum M_{oi\ фон}$); в двух правых столбцах приведены максимальные магнитуды ($M_{w\ max(usgs)}$) землетрясений, зарегистрированных с 1901 г. до главного события и после него в каждой серии афтершоков до 2023 г.

N п/п	дата	$\sum M_{oi\ фон}$ [дин·см]	$\sum M_{oi\ af}$ [дин·см]	Тип подвижки в очаге	$M_{w\ max(usgs)}$ С 1901 до глав-ного события	$M_{w\ max(usgs)}$ после афтер-шоков до 2023 г.
1	14.07.1973	1.51E+27	1.28E+27	-	6 (1946)	7.5 (1997)
2	10.05.1974	5.58E+26	1.05E+26	-	7.0 (1917)	6.2 (2014)
3	04.07.1974	5.36E+26	1.5E+25	сдвиго-надвиг	6 (1920)	5.5 (2020)
4	19.01.1975	3.55E+26	8.9E+26	сброс	7.9 (1905)	5.6 (1981)
5	03.10.1975	9.0E+27	4.6E+24	-	7.6 (1935)	6.1 (2008)
6	29.05.1976	7.7E+27	1.75E+27	сдвиг	6.7 (1930)	6.4 (1988)
7	16.08.1976	1.2E+28	8.1E+27	надвиг	7.4 (1933)	6.5 (2017)
8	01.11.1978	3.7E+28	1.37E+26	сдвиго-надвиг	7.4 (1974)	7.2 (2015)
9	23.01.1981	7.1E+26	2.5+23	сдвиг	7.4 (1973)	6.6 (2022)

N п/п	дата	$\sum M_{oi} \text{ фон}$ [дин·см]	$\sum M_{oi} \text{ af}$ [дин·см]	Тип подвижки в очаге	$M_{w \max}(\text{usgs})$ С 1901 до глав- ного события	$M_{w \max}(\text{usgs})$ после афтер- шоков до 2023 г.
10	24.06.1983	1.1E+27	1.66E+25	сдвиг	6.8 (1935)	5.7 (2021)
11	19.10.1991	8.3E+27	3.4E+24	надвиг	6.4 (1945)	5.1 (2017)
12	16.09.1994	1.9E+27	4.33E+25	сброс	6.4 (1918)	5.7 (2018)
13	11.07.1995	1.2E+28	4.16E+24	сдвиго-надвиг	7.7 (1988)	6.9 (2011)
14	19.11.1996	4.19E+26	1.3E+25	сдвиг	6.4 (1938)	5.5 (2006)
15	25.08.2008	5.6E+27	1.5E+26	сброс	6.8 (1944)	5.2 (2012)
16	05.10.2008	4.2E+28	4.69E+26	надвиг	7.3 (1974)	7.2 (2015)
17	13.04.2010	9.80E+25	4.30E+25	сдвиго-надвиг	6.1 (1915)	5.4 (2021)
18	20.12.2010	3.5E+27	2.76E+26	сдвиг	6.6 (2008)	5.6 (2018)
19	24.03.2011	4.40E+27	3.20E+26	сдвиг	6.9 (1950)	6.1 (2014)
20	26.02.2012	1.9E+27	1.88E+26	надвиг	5.8 (1938)	4.9 (2021)
21	11.11.2012	6.3E+27	2.53E+26	сдвиг	7.6 (1946)	5.4 (1919)
22	12.02.2014	6.00E+27	1.80E+25	сдвиг	7.3 (1924)	6.2 (2020)
23	11.01.2021	4.1E+27	3.66E+26	сброс	6.9 (1950)	-

Обсуждение

В течение предыдущих 20 лет появилось множество публикаций, посвященных анализу афтершоковых процессов [14, 15, 16, 17, 18, 19]. Однако наибольший интерес вызывают публикации [20] и [21], в которых рассматривается процесс возникновения афтершоков в зонах разного уровня сейсмичности. Авторы работы [21] пришли к выводу о том, что «сопровождая сильные сейсмические события релаксационные процессы тем продолжительнее и интенсивнее, чем ниже средняя сейсмическая активность в регионе, где они происходят». В более ранней работе [20] показано, что «при одинаковой величине главного толчка численность афтершоков в высокосейсмической зоне значительно выше, чем в зонах, характеризующихся низкой активностью».

Из анализа (табл. 1) и (рис. 2) следует, что уровень суммарной величины скалярного сейсмического момента фоновых землетрясений существенно отличается в пределах площадок вокруг главных землетрясений, даже в областях с одинаковой магнитудой главных событий, где диапазон значений меняется от $4.19E+26$ до $4.2E+28$ [дин·см]. По материалам настоящего исследования повторные толчки основных событий фиксируются в течение разного периода времени (от одних суток до нескольких месяцев) и регистрируются в различном количестве, соответственно, даже при одинаковых магнитудах главных событий (табл. 2, рис. 2) наблюдается разброс в значениях суммарной величины скалярного сейсмического момента афтершоковых серий от $2.5E+23$ до $1.75E+27$ [дин·см]. Таким образом, на основе представленных данных (табл. 2 и рис. 2) не удастся выявить четкую зависимость повышения суммарного скалярного момента, высвободившегося при развитии афтершоковых серий, от поведения суммарного скалярного сейсмического момента фоновой активности. Полученные результаты

лишь в ряде случаев соответствуют выводам статьи [21] (рис. 2, например, для землетрясений, произошедших 24.03.2011 и 10.05.1974). Увеличение уровня афтершоковой активности осуществляется с повышением сейсмического фона в пределах районов, окружающих 8 главных землетрясений (см. рис. 2), что согласуется с представлением авторов публикации [20].

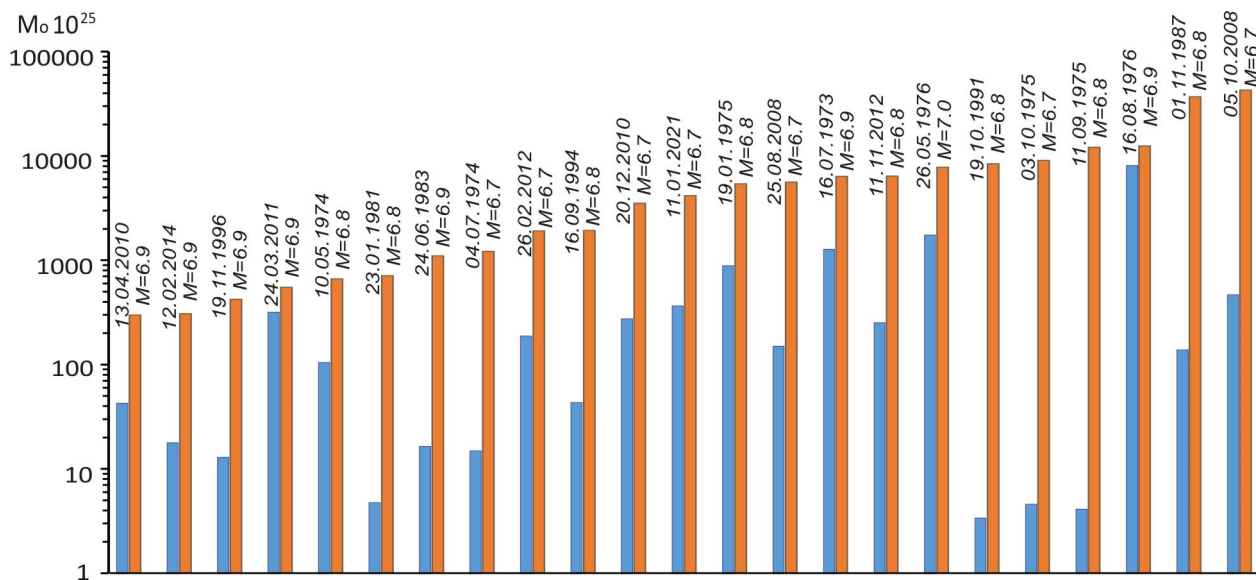


Рис. 2. Диаграмма суммарных величин скалярных сейсмических моментов афтершоковых последовательностей (синий цвет) и суммарных значений скалярных сейсмических моментов фоновой активности (оранжевый цвет) в области главных землетрясений

Далее рассмотрены типы фокальных механизмов очагов сильнейших землетрясений, разделенных на три группы по положению осей напряжений Р и Т: надвиги и сдвиго-надвиги, сбросы и сдвиго-сбросы, сдвиги. Для 8 главных землетрясений со сдвиговой подвижкой в очаге и для 8 событий со сдвиго-надвиговым смещением в очагах суммарные значения сейсмических моментов афтершоковых серий различны даже при близких значениях магнитуд главных событий (табл. 2). На основе сопоставления типов подвижек в очагах главных землетрясений и уровней афтершоковой активности (табл. 2) можно сделать вывод, что характер подвижек в очагах не оказывает заметного влияния на уровень суммарной величины скалярного сейсмического момента афтершоковой деятельности.

Заключение

Максимальные величины магнитуд фоновых землетрясений, зарегистрированных с 1901 г. до главных толчков, имеют наибольшими значениями практически в половине случаев. После афтершоковых серий на рассматриваемых площадках только четыре фоновых землетрясения превысило магнитуду главного события.

Следуя полученным данным (табл. 2, рис. 2), какая-либо строгая линейная связь между уровнем суммарного скалярного сейсмического момента фонового

режима и суммарной величиной скалярного сейсмического момента по афтершоковым последовательностям землетрясений Азии ($m_b \geq 4.5$, 1971-2021 гг.) отсутствует.

Характер подвижек в очагах главных землетрясений не оказывает заметного влияния на уровень суммарной величины скалярного сейсмического момента афтершоковой деятельности.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ № FWZZ-2022-0021 «Региональные особенности структуры земной коры и верхов мантии платформенных и складчатых областей Сибири, их напряженно-деформированное состояние по данным сейсмологии, гравиметрии и геомеханики».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кучай О. А. Афтершоковые последовательности сильнейших внутриплитных землетрясений и фоновые события на территории Центральной Азии // Геофизические технологии. – 2023. – № 3. – С. 36-45.
2. Каталог Геологической службы США [<https://earthquake.usgs.gov>].
3. Каталоги Международного Сейсмологического центра ISC [<http://www.isc.ac.uk>].
4. Global CMT catalog [www.globalcmt.org].
5. Солоненко А. В., Солоненко Н. В., Мельникова В. И., Козьмин Б. М., Кучай О. А., Суханова С. С. Напряжения и подвижки в очагах землетрясений Сибири и Монголии // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. – 1993. – Вып. 1. – С. 113-122.
6. Banghar A. R. Mechanism solution of Kinnaur (Himachal Pradesh, India) earthquake of January 19, 1975 // Tectonophysics. – 1976. – Vol. 1. – P. 5-11.
7. Бачманов Д. М., Кожурин А. И., Трифонов В. Г. База данных активных разломов Евразии // Геодинамика и тектонофизика. – 2017. – Т. 8. – № 4. – С. 711-736.
8. Смирнов В. Б., Пономарёв А. В. Физика переходных режимов сейсмичности. – М. : РАН, 2020. – 412 с.
9. Баранов С. В., Шебалин П. Н. Оценивание области афтершоковой активности по информации об основном толчке // Геофизические исследования. – 2018. – Т 19. – № 2. – С. 34-56.
10. Das Ranjit, Wason H. R., Sharma M. L. Global regression relations for conversion of surface wave and body wave magnitudes to moment magnitude // Natural Hazards. – 2011. – Vol. 59. – P. 801-810.
11. Ризниченко Ю. В. Проблемы сейсмологии. – М. : Наука, 1985. – 406 с.
12. Лутиков А. И., Родина С. Н. Временные и энергетические параметры афтершокового процесса Курило-Камчатских землетрясений // Геофизические исследования. – 2013. – Т. 14. – № 4. – С. 23-35.
13. Bath M. Lateral inhomogeneities of the upper mantle // Tectonophysics. – 1965. – Vol. 2. – № 6. – P. 483-514.
14. Гольдин С. В., Селезнев В. С., Еманов А. Ф., Филина А. Г., Еманов А. А., Новиков И. С., Высоцкий Е. М., Фатеев А. В., Колесников Ю. И., Подкорытова В. Г, Лескова Е. В., Ярыгина М. А. Чуйское землетрясение и его афтершоки // Доклады РАН. – 2004. – Т. 395. – № 4. – С. 534-536.
15. Татевосян Р. Э., Аптекман Ж. Я. Этапы развития афтершоковых последовательностей сильнейших землетрясений мира // Физика Земли. – 2008. – № 12. – С. 3-23.
16. Kuchai O. A. Specific features of fields of stresses associated with aftershock processes in the Altai-Sayan mountainous region // Geodynamics & Tectonophysics. – 2012. – Vol. 3. – № 1. – P. 59-68.

17. Rebetsky Yu. L., Polets A. Yu. The state of stresses of the lithosphere in Japan before the catastrophic Tohoku earthquake of 11 March 2011 // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2014. – Vol. 5. – № 2. – P. 469-506.

18. Кучай О. А., Кальметьева З. А., Козина М. Е., Абдрахматов К. Е. Поля напряжений по афтершокам сильнейших землетрясений Тянь-Шаня // *Геодинамика и тектонофизика*. – 2017. – Т. 8. – № 4. – С. 827-848.

19. Tikhotsky S. A., Tatevosyan R. E., Rebetsky Yu. L., Ovsiuchenko A. N., Larkov A. S. The 2023 Kahramanmaraş Earthquakes in Turkey: Seismic Movements along Conjugated Faults // *Doklady Earth Sciences*. – 2023. – Vol. 511. – P. 703-709.

20. Жалковский Н. Д., Мучная В. И. Зависимость интенсивности процесса афтершоков от уровня фоновой сейсмичности очаговых зон // *Геология и Геофизика*. – 1995. – Т. 36. – №1. – С.126-128.

21. Лутиков А. И., Донцова С. Н., Родина С. Н. Временные и энергетические параметры афтершокового процесса землетрясений Кавказа и сопредельных территорий // *Геофизические исследования*. – 2017. – Т18. – №1. – С. 20-36.

© О. А. Кучай, 2024