

О. А. Кучай¹, Е. А. Мельник¹✉

Структурные особенности афтершоковых процессов землетрясений Центральной Азии и Японии ($7.0 \leq M_w \leq 8.2$)

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: MelnikEA@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Анализировалось пространственно-временное распределения афтершоковых последовательностей 19 сильнейших ($7.0 \leq M_w \leq 7.9$) коровых внутриплитных землетрясений Центральной Азии ($\varphi = 20^\circ - 50^\circ$ с.ш., $\lambda = 57^\circ - 120^\circ$ в.д.) и 5 землетрясений ($7.0 \leq M_w \leq 8.2$) в зоне субдукции Тихоокеанской плиты в пределах территории Японии ($\varphi = 38^\circ - 44^\circ$ с.ш., $\lambda = 137^\circ - 145^\circ$ в.д.) за период наблюдения 1976–2021 гг. Исследование показало, что повторные сейсмические толчки ($m_{b(isc)} \geq 4.5$) шести главных землетрясений Азии развиваются только в рамках области простира-ния афтершоков, образованной в первые сутки, в остальных случаях зоны афтершоков увеличи-ваются. Оценка эволюции сейсмического процесса осуществлялась по значениям суммарных ска-лярных сейсмических моментов афтершоков ($m_{b(isc)} \geq 4.5$), произошедших на участках, получен-ных при разделении линейной протяженности очага на фрагменты в 0.25° при разных временных периодах: сутки, 10 дней, месяц, год. В результате анализа значений суммарных скалярных сей-смических моментов в фрагментах афтершоковых серий вдоль линейной протяженности разрыва главных очагов наибольшие всплески активности отмечены вблизи эпицентра главного события или на конце афтершоковой области. Выявлены особенности простира-ния некоторых афтершо-ковых серий сильных землетрясений на востоке Японии.

Ключевые слова: афтершоковые последовательности, скалярная величина сейсмического мо-мента, сильнейшие землетрясения Центральной Азии и Японии, механизмы очагов землетрясений

О. А. Kuchai¹, E. A. Melnik¹✉

Structural features of aftershock processes of earthquakes in Central Asia and Japan ($7.0 \leq M_w \leq 8.2$)

¹Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: MelnikEA@ipgg.sbras.ru

Abstract. The spatiotemporal distribution of aftershock sequences of 19 strongest ($7.0 \leq M_w \leq 7.9$) crustal intraplate earthquakes in Central Asia ($\varphi = 20^\circ - 50^\circ$ N, $\lambda = 57^\circ - 120^\circ$ E) and 5 earthquakes ($7.0 \leq M_w \leq 8.2$) in the subduction zone of the Pacific Plate within the territory of Japan ($\varphi = 38^\circ - 44^\circ$ N, $\lambda = 137^\circ - 145^\circ$ E) were analyzed for the observation period of 1976–2021. The study showed that repeated seismic tremors ($m_{b(isc)} \geq 4.5$) of the six major Asian earthquakes develop only within the after- shock strike zone formed during the first day, while in other cases the aftershock zones increase. The dynamics of the evolution of the seismic process was assessed based on the values of the total scalar seismic moments of aftershocks ($m_{b(isc)} \geq 4.5$) that occurred in areas obtained by dividing the linear extent of the source into fragments of 0.25° for different time periods: day, 10 days, month, year. An analysis of the total scalar seismic moments in fragments of aftershock sequences along the linear extent of the main shock rupture revealed that the largest bursts of activity were observed near the epicenter of the main event or at the end of the aftershock region. Striking features of some aftershock sequences of large earthquakes in eastern Japan were identified.

Keywords: aftershock sequences, scalar magnitude of the seismic moment, the strongest earthquakes in Central Asia and Japan, mechanisms of earthquake foci

Введение

Афтершоки, возникающие после сильнейших землетрясений часто приводят к дополнительным разрушениям уже поврежденных объектов главными событиями. Наибольший вклад в совокупный разрушительный эффект вносят коровые землетрясения и их афтершоки. Поэтому значительный интерес представляет зона распределения сильных афтершоков коровых землетрясений Центральной Азии, а также влияние повторных толчков коровых Японских землетрясений в погружающейся Тихоокеанской плите. Цель настоящего исследования – анализ временной и пространственной структуры афтершоковых серий внутриплитных коровых землетрясений Центральной Азии ($7.0 \leq M_w \leq 7.9$) и Японии ($7.0 \leq M_w \leq 8.2$) в зоне субдукции Тихоокеанской и Охотоморской плиты в областях земной коры для выяснения влияния разных тектонических условий на развитие афтершокового процесса. Для этого, рассмотрена динамика развития сейсмического процесса путем анализа значений суммарных скалярных сейсмических моментов высвободившихся в течение суток, 10 дней, месяца и года при развитии афтершоковых процессов с $m_{b(isc)} \geq 4.5$.

Материалы и методы

В предыдущие годы вышел целый ряд публикаций со всесторонним анализом афтершокового процесса сильных землетрясений [Hartog, Schwartz, 1996; Гольдин и др., 2004; Susan et al., 2007; Лукк, Дещеревский, 2015; Лутиков, Родина, 2013; Лутиков и др., 2017; Родкин, 2020; Завьялов, Зотов, 2021; Guglielmi et al. 2023] и теоретическим анализом поведения повторных толчков [Шебалин и др., 2018; Баранов, Шебалин, 2018]. Ряд статей направлен на исследование напряженно-деформированного состоянию за счет повторных толчков [Ребецкий, Маринин, 2006; Rebetsky, Polets, 2014; Tikhotsky et al., 2023; Kuchay, Bushenkova, 2025].

Для работы использовались материалы каталога Геологической службы США (<https://earthquake.usgs.gov>), были отобраны 19 сильнейших коровых землетрясениях ($7.0 \leq M_w \leq 7.9$) за временной период 1971–2022 гг. на территории Центральной Азии с координатами (20° – 55° с.ш. и 55° – 120° в.д.) (рис. 1А) (из них 9 главных событий подробно рассмотрены в [Кучай, Мельник, 2026]) и 5 землетрясений ($7.0 \leq M_w \leq 8.2$) в Японии ($\varphi=38^\circ$ – 44° с.ш., $\lambda=137^\circ$ – 145° в.д.) (рис. 1Б). Из них три землетрясения зарегистрированы непосредственно в зоне субдукции Тихоокеанской и Охотоморской плит и два вблизи западной границы Охотоморской плиты (рис. 1Б). По каталогам Международного сейсмологического центра ISC (<http://www.isc.ac.uk>) для всех двадцати четырех сильнейших землетрясений отобраны афтершоки с $m_{b(isc)} \geq 4.5$ на площадках $3^\circ \times 3^\circ$ с эпицентром основного события в центре. Выборка повторных событий ограничена одним годом аналогично публикации [Баранов, Шебалин, 2018]. Из каталога (www.globalcmt.org) использовались материалы о моментной магнитуде (M_w), информация о параметрах механизмов очагов и величине скалярного сейсмического момента сильных землетрясений (M_0).

Аналогично публикациям [Кучай, Бушенкова, 2025; Кучай, Мельник, 2026] в настоящем исследовании магнитуды $m_{b(isc)}$ пересчитаны в моментную магнитуду M_w , далее определяется суммарный скалярный сейсмический момент, высвобождаемый в афтершоковых сериях: $M_{osum\ af}$, выраженный в $\text{дин} \times \text{см}$. Все афтершоки с $m_{b(isc)} \geq 4.5$, расположенные вдоль плоскостей разрыва главных землетрясений, разбиваются на части по 0.25° . В пределах этих фрагментов рассчитывались суммарные величины скалярных сейсмических моментов и строились подробные графики распределения значений для каждого элемента за сутки, 10 дней, месяц и год. В случае, если азимут вытянутости облака повторных толчков составлял угол с параллелью меньше 45° , то данные располагались вдоль оси абсцисс, если угол был больше, то вдоль ординат. Афтершоки японских землетрясений рассматривались как вдоль оси ординат в соответствии с простиранием плоскости разрыва, так и вдоль оси абсцисс в соответствии с направлением погружения этой плоскости.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1А показаны эпицентры 19 сильнейших землетрясений Азии с $M_w \geq 7.0$ и решения их фокальных механизмов за период 1976–2021 гг. Из них афтершоки девяти землетрясений уже рассматривались в публикации [Кучай, Мельник, 2026]. В результате выполненных расчетов были построены графики суммарных величин скалярных сейсмических моментов для каждого фрагмента афтершокового облака за сутки, 10 дней, месяц и год, начиная с первого афтершока.

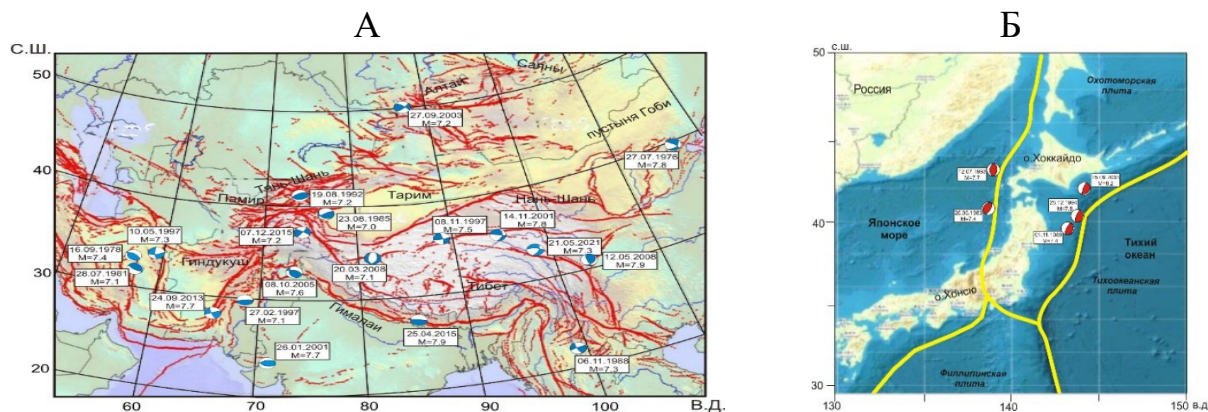


Рис. 1. А – Эпицентры сильнейших землетрясений Азии ($M \leq 7.0$) и решения их фокальных механизмов за период 1976–2021 гг. Голубым цветом закрашены области волн сжатия, белым – растяжения. Решения механизмов очагов (из Global CMT) представлены в верхней полусфере. Красным цветом отмечены линии разломов.

Карта разломов по [Бачманов и др., 2017], разломы: 1 – Чаманский, 2 – Арнимакингский, 3 – Лунмэньшанский разлом, 4 – зона Фронтального разлома Гималаев. Б – Эпицентры сильнейших землетрясений Японии ($M_w \geq 7.0$) и решения их фокальных механизмов за период 1983–2003 гг. Зона конвергентной границы Тихоокеанской плиты с Охотоморской, Амурской плиты и Охотоморской. Красным цветом закрашены области волн сжатия, белым – растяжения. Решения механизмов очагов из (www.globalcmt.org) представлены в верхней полусфере.

В публикации [Кучай, Мельник, 2026] показаны примеры распределения афтершоков наиболее сильных землетрясений Азии, простираание облака которых согласуется с положением плоскости разрыва главного события. На рисунке 2 показано распределение афтершокового процесса для сейсмического события 28.12.1994 г. в зоне конвергентной границы Тихоокеанской и Охотоморской плит. Вытянутость облака афтершоков расположена в крест простираанию обеих нодальных плоскостей главного землетрясения. Фокальный механизм очага показывает субмеридиональное положение нодальных плоскостей (рис. 1Б), в то же время простираание афтершоковой серии близширотное. В течение всех анализируемых периодов максимальная величина суммарных скалярных сейсмических моментов концентрируется в секторе в 0.1° от главного очага, независимо от построения графиков в крест положения нодальных плоскостей или вдоль плоскостей разлома. Форма графиков афтершоковой последовательности не сохраняется в течение следующих временных периодов.

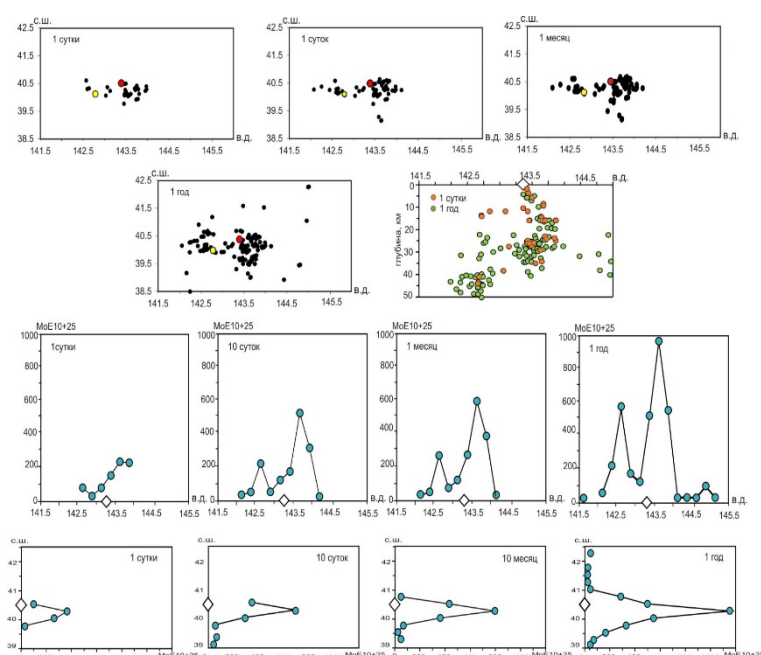


Рис. 2. Распределение афтершоков в районе сильного землетрясения 28.12.1994 г. (M_w (usgs)=7.8), их пространственное расположение по глубине и графики суммарных величин скалярных сейсмических моментов. Красным кружком отмечен эпицентр главного землетрясения, синими точками показаны уровни величин скалярных сейсмических моментов, определенных вдоль плоскости разрыва за сутки, 10 дней, месяца и года. Эпицентр отмечен белым ромбом на осях широт и долгот.

Похожим образом происходит распределение повторных событий при землетрясении 1.11.1989 г. (M_w (usgs)=7.4) и землетрясении 25.09.2003 г. (M_w (usgs)=8.2). В обоих случаях субмеридиональное положение нодальных плоскостей фокальных механизмов не согласуется с субширотной вытянутостью облака афтершоков (рис.1Б). Максимальная величина суммарных скалярных сейсмических моментов

концентрируется по отношению к главному событию в пределах участка в 0.65° (при втором землетрясении в 0.75°) при расположении повторных событий вкрест простирания плоскости разрыва и в 0.25° при распределении их вдоль субмеридиональной нодальной плоскости (при втором землетрясении в 0.1°) (рис. 3).

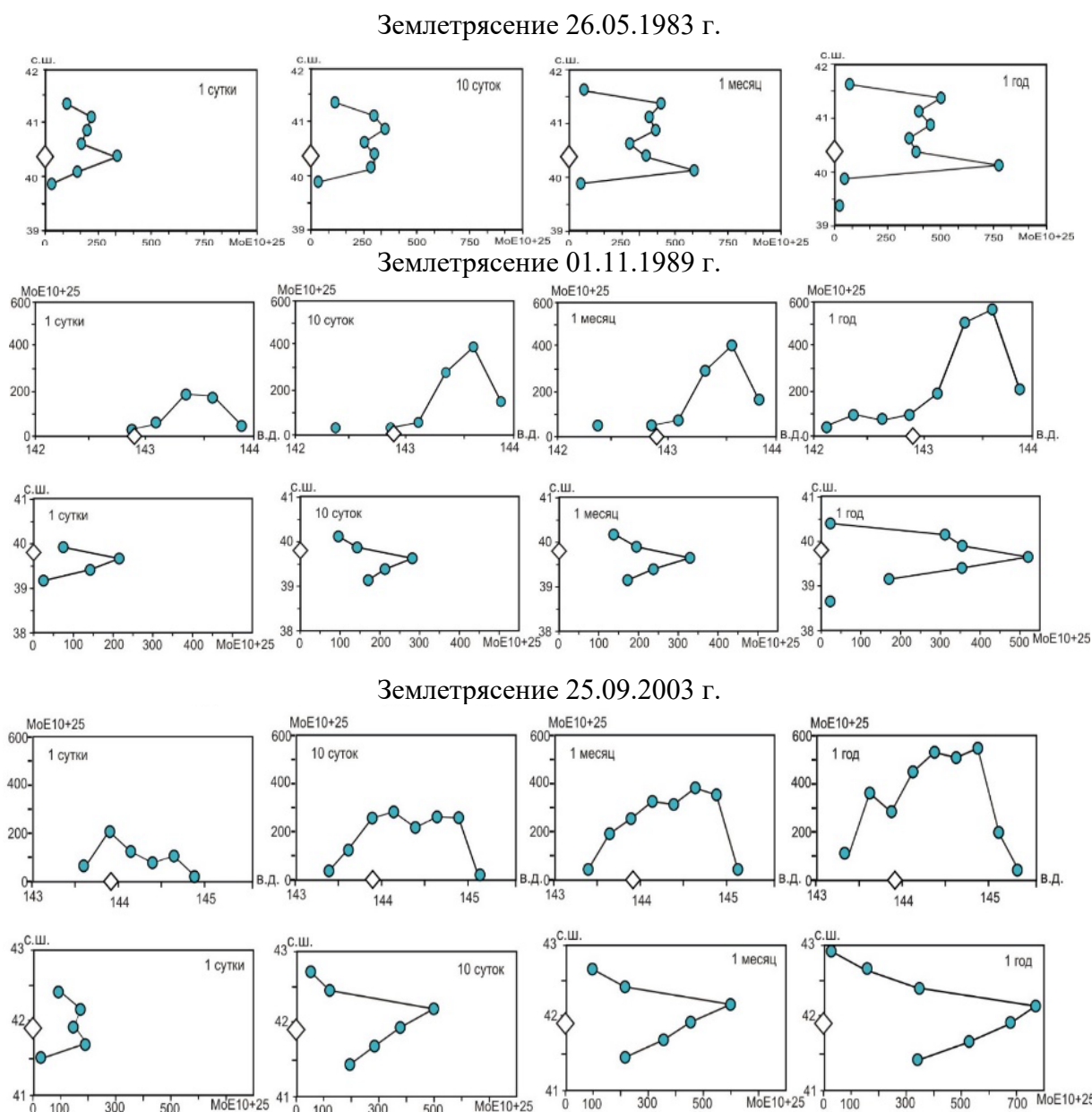


Рис.3. Графики суммарных величин скалярных сейсмических моментов землетрясений Японии. Условные обозначения см. на рис. 2.

Согласно расчетам по афтершоковым последовательностям составлена таблица 1.

Таблица 1. Каталог сильнейших землетрясений Центральной Азии и Японии ($M \geq 7.0$) за 1976–2021 гг. с данными о максимальных магнитудах землетрясений, величинах скалярного сейсмического момента главных событий и накопленных скалярных сейсмических моментов афтершоковых последовательностей M_{0i} аф с $m_{b(isc)} \geq 4.5$ и отношения M_{0i} аф с $m_{b(isc)} \geq 4.5$ к величинам скалярного сейсмического момента главных землетрясений.

N п/п	дата	время	широта	долгота	M_w USGS	H USGS	M_w CMT	H CMT	M_0 глав	$\frac{\sum M_{0i} \text{ аф}}{M_0 \text{ глав}}$	$\sum M_{0i} \text{ аф}$ [дин- см]
Землетрясения Центральной Азии											
1	27.07.1976	19:42	39.36	117.85	7.8	23	7.6	15	2.77e+27	1%	2.8e+25
2	16.09.1978	15:35	33.38	57.33	7.4	33	7.3	11	1.32e+27	0.98%	1.3e+25
3	28.07.1981	17:22	30.01	57.79	7.1	33	7.2	15	9.01e+26	4.55%	4.1e+25
4	23.08.1985	12:41	39.43	75.41	7	7	6.9	15	3.29e+26	2.37%	7.8e+24
5	06.11.1988	13:03	22.87	99.74	7.7	18	7.3	15	3.66e+26	136%	5.0e+26
6	19.08.1992	2:04	42.14	73.57	7.3	27	7.2	17	7.68e+26	91.14%	7.0e+26
7	27.02.1997	21:08	29.85	68.19	7.1	33	7.1	15	5.2e+26	18.46%	9.6e+25
8	10.05.1997	7:57	33.75	59.79	7.3	10	7.2	15	7.35e+26	0.99%	7.3e+24
9	08.11.1997	10:02	35.08	87.41	7.5	33	7.9	16	2.23e+27	0.53%	1.2e+25
10	26.01.2001	3:16	23.38	70.34	7.7	16	7.6	20	3.43e+27	2.3%	7.9e+25
11	14.11.2001	9:45	35.69	93.33	7.8	10	7.8	15	5.9e+27	0.81%	4.8e+25
12	27.09.2003	11:33	49.97	87.76	7.3	16	7.2	15	9.38e+26	66.1%	6.2e+26
13	08.10.2005	3:50	34.49	73.7	7.6	26	7.6	12	2.94e+27	19.38%	5.7e+26
14	20.03.2008	22:32	35.46	81.46	7.2	10	7.1	12	5.43e+26	4.41%	2.4e+25
15	12.05.2008	6:28	30.99	103.39	7.9	19	7.9	13	8.97e+27	6.35%	5.7e+26
16	24.09.2013	11:29	26.91	65.53	7.7	15	7.8	12	5.59e+27	8.4%	4.7e+26
17	25.04.2015	6:11	28.13	84.72	7.8	8	7.9	28	8.39e+27	20.26%	1.7e+27
18	07.12.2015	7:50	38.13	72.89	7.2	22	7.2	12	7.63e+26	0.95%	7.3e+24
19	21.05.2021	18:04	34.6	98.25	7.3	10	7.4	12	1.66e+27	1.92%	3.2e+25
Землетрясения Японии											
1	26.05.1983	2:59	40.46	139.1	7.4	24	7.7	13	4.55e+27	6.65%	3.03e+26
2	12.07.1993	13:17	42.85	139.2	7.7	17	7.7	16	4.65e+27	4.13%	1.92e+26
3	28.12.1994	17:22	40.52	143.42	7.8	26	7.7	28	4.89e+27	6.89%	3.37e+26
4	01.11.1989	18:25	39.84	142.76	7.4	7	7.4	29	1.36e+27	13.3%	1.81e+26
5	25.09.2003	13:03	41.81	143.91	8.2	23	8.3	28	3.05e+28	9.87%	3.01e+26

Основываясь на данных таблицы, суммарная величина скалярного сейсмического момента каждой афтершоковой серии по отношению к сейсмическому моменту главного события на территории Азии составляет от 0.53% до 91%. Землетрясения с наибольшими значениями накопленных суммарных скалярных сейсмических моментов повторных событий произошли в зонах наиболее мощных разломов и имели магнитуду 7.6 и 7.8. В то же время более слабые главные землетрясения с $M_w=7.1-7.3$ происходили в зоне локальных и в зоне основных разломов. Землетрясения Японии характеризуются достаточно близкими значениями отношений суммарной величины скалярного сейсмического момента афтершоковой последовательности к сейсмическому моменту главного события.

Особенности развития афтершоковых серий ($m_{b(isc)} \geq 4.5$) сильнейших землетрясений, оцениваемые за сутки, 10 дней, месяц и год показывают, что только в первом приближении сохраняется форма графиков по высвобождению суммарного скалярного сейсмического момента; со временем увеличиваются лишь их значения (рис. 2, 3).

Процесс развития афтершоковых серий главных землетрясений 28.07.1981 г., 06.11.1988 г., 10.05.1997 г., 26.01.2001 г., 12.05.2008 г. и 21.05.2021 г. реализуется в границах области простираания афтершоков, образованных в первые сутки [Кучай, Мельник, 2026]. Разумеется, более слабые афтершоки происходят также и за границами этой площади. Соответственно, основная перестройка поля напряжений и основная деформация среды для этих землетрясений осуществляется в пределах этой афтершоковой области с $m_{b(isc)} \geq 4.5$. Афтершоковый процесс слабых событий может продолжаться годы, но вклад повторных толчков с $m_{b(isc)} \leq 4.5$ в суммарный скалярный сейсмический момент незначителен. В большинстве остальных случаев спустя сутки отмечается возникновение повторных сейсмических событий с $m_{b(isc)} \geq 4.5$ в краевых частях афтершоковой области, что отражается в графиках величин скалярных сейсмических моментов, а именно на периферии простираания плоскостей разрыва, причем в большинстве случаев с небольшими значениями суммарных скалярных сейсмических моментов. Подобные изменения поля напряжений и соответственно деформаций укладываются в рамки теоретических представлений в публикации [Осокина, Цветкова, 1980].

Заключение

Исследование пространственно-временного распределения афтершоковых последовательностей 19 сильнейших ($7.0 \leq M_w \leq 7.9$) коровых внутриплитных землетрясений Центральной Азии и 5 землетрясений ($7.0 \leq M_w \leq 8.2$) в зоне субдукции Тихоокеанской плиты в пределах территории Японии показало, что в результате анализа фрагментов афтершоковых серий вдоль линейной протяженности разрыва главных очагов наибольший рост значения накопительного скалярного сейсмического момента афтершоков концентрируется вблизи эпицентра главного события или на конце афтершоковой области. Кроме того, повторные сейсмические толчки ($m_{b(isc)} \geq 4.5$) шести главных землетрясений Азии развиваются только в рамках области простираания афтершоков, образованной в первые сутки, в остальных случаях зоны афтершоков увеличиваются. Соответственно высвобождение суммарного

скалярного сейсмического момента в ходе развития афтершокового процесса вдоль плоскости вытянутости разрыва происходит неравномерно. Благодаря этому возникают деформации разного уровня значений и соответственно снимаются напряжения различной величины, которые сказываются на распределении уровня накопительного скалярного сейсмического момента афтершоков, возникающих вдоль плоскости разрыва, что в свою очередь свидетельствует о неоднородности среды.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ FWZZ- FWZZ-2026-0050.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Guglielmi A.V., Zotov O.D., Zavyalov A.D., Klain B.I. On proper time of the source of a strong earthquake. // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2023. – 14(3):0701.
2. Kuchay O.A., Bushenkova N.A. Relationship of seismic processes with the P-wave velocity field // *Russian Geology and Geophysics*. – 2025. – Vol. 66, No 8. – P. 1031-1041.
3. Rebetsky Yu.L., Polets A.Yu. 2014. The state of stresses of the lithosphere in Japan before the catastrophic Tohoku earthquake of 11 March 2011 // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2014. – Vol. 5, No 2. – P. 469-506.
4. Tikhotsky S.A., Tatevosyan R.E., Rebetsky Yu.L., Ovsyuchenko 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.
5. Sun J.B., Xu X.W., Shen Z.K., Shi Y.-L., Liang F. Parameter inversion of the 1997 mani earthquake from insar co-seismic deformation field based on linear elastic dislocation model– i. uniform slip inversion//*Chinese Journal of Geophysics*. – 2007. – Vol.50, No.4. – P. 947-962
6. Hartog J.R. and Schwartz S. Y. Directivity analysis of the December 28, 1994 Sanriku-oki earthquake (Mw = 7.7), Japan// *Geophysical Research Letters*. – 1996. – Vol. 23, No. 1. – P. 2037-2040.
7. Баранов С.В., Шебалин П.Н. Оценивание области афтершоковой активности по информации об основном толчке // *Геофизические исследования*. – 2018. – Т. 19(2). – С. 34-56,
8. Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. База данных активных разломов Евразии // *Геодинамика и тектонофизика*. – 2017. – Т. 8(4). – С. 711-736.
9. 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.
10. Завьялов А.Д., Зотов О.Д. Новый способ определения характерного размера очаговой зоны // *Вулканология и сейсмология*. – 2021. – № 1. – С. 22-29.
11. Кучай О.А., Мельник Е.А. Сильнейшие землетрясения Центральной Азии и их афтершоковые серии // *Геофизические технологии*. – 2026. – №. 1.
12. Лукк А.А., Дещеревский А.В. Колебательный режим афтершоков Джиргатальского землетрясения 1984 г. - проявление внутренней динамики неустойчивой геологической системы // *Физика Земли*. – 2006. – № 1. – С. 16-29.
13. Лутиков А.И., Донцова С.Н., Родина С.Н. Временные и энергетические параметры афтершокового процесса землетрясений Кавказа и сопредельных территорий // *Геофизические исследования*. – 2017. – Т. 18 (1). – С. 20-36.
14. Лутиков А.И., Родина С.Н. Временные и энергетические параметры афтершокового процесса Курило-Камчатских землетрясений // *Геофизические исследования*. – 2013. – Т. 14 (4). – С. 23-35.
15. Осокина Д.Н., Цветкова Н.Ю. Перестройка тектонического поля напряжений в очагах землетрясений и в окрестностях систем тектонических разрывов. // *Физические процессы в очагах землетрясений*: М. Наука 1980, с.187-206.

16. Ребецкий Ю.Л., Маринин А.В. Поле напряжений до Суматра-Андаманского землетрясения 26.12.2004. Модель метастабильного состояния горных пород // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47(11). – С. 1192-1206.
17. Родкин М.В. Типовая фор- и афтершоковая аномалия – эмпирика, интерпретация // Вулканология и сейсмология. – 2020. – Т. 1. – С. 64-76.
18. Шебалин П.Н., Баранов С.В. Дзедобоев Б.А. Закон повторяемости количества афтершонов // Доклады РАН. – 2018. – Т. 481(3). – С. 320-323.

© О. А. Кучай, Е. А. Мельник, 2026