



## СИЛЬНЕЙШИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ И ИХ АФТЕРШОКОВЫЕ СЕРИИ

Ольга Анатольевна Кучай<sup>1</sup>, Елена Александровна Мельник<sup>2</sup>, ✉

<sup>1,2</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

<sup>1</sup>KuchayOA@ipgg.sbras.ru

<sup>2</sup>MelnikEA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6509-623X>

**Аннотация.** Анализировались пространственно-временные распределения афтершоковых последовательностей 9 сильнейших ( $7.5 \leq M_w \leq 7.9$ ) коровых внутриплитных землетрясений Центральной Азии ( $\varphi=20\text{--}50^\circ\text{с.ш.}$ ,  $\lambda=57\text{--}120^\circ\text{в.д.}$ ) за период наблюдения 1976–2016 гг. Оценка динамики эволюции сейсмического процесса осуществлялась по значениям суммарных скалярных сейсмических моментов афтершоков ( $m_{b(\text{ISC})} \geq 4.5$ ), произошедших на участках, полученных при разделении линейной протяженности очага на фрагменты в  $0.25^\circ$ , при разных временных периодах: сутки, 10 дней, месяц, год. В результате анализа фрагментов афтершоковых серий вдоль линейной протяженности разрывов главных очагов наибольшие всплески активности отмечены вблизи эпицентра главного события или на конце афтершоковой области.

**Ключевые слова:** афтершоковые последовательности, скалярная величина сейсмического момента, сильнейшие землетрясения Центральной Азии, механизмы очагов землетрясений

**Финансирование:** работа была выполнена в рамках государственного задания FWZZ-2026-0050.

**Для цитирования:** Кучай О.А., Мельник Е.А. Сильнейшие землетрясения Центральной Азии и их афтершоковые серии // Геофизические технологии. 2026. № 1. С. 25–38. doi:10.18303/2619-1563-2026-1-25.

## THE STRONGEST EARTHQUAKES IN CENTRAL ASIA AND THEIR AFTERSHOCK SERIES

Olga A. Kuchay<sup>1</sup>, Elena A. Melnik<sup>2</sup>, ✉

<sup>1,2</sup>Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Koptyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

<sup>1</sup>KuchayOA@ipgg.sbras.ru

<sup>2</sup>MelnikEA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6509-623X>

**Abstract.** The spatiotemporal distribution of aftershock sequences nine of the strongest ( $7.5 \leq M_w \leq 7.9$ ) crustal intraplate earthquakes in Central Asia ( $\varphi = 20\text{--}50^\circ\text{ N}$ ,  $\lambda = 57\text{--}120^\circ\text{ E}$ ) was analyzed for the observation period of 1976–2016. The dynamics of the seismic process development was assessed based on the values of the total scalar seismic moments released during daily, 10-day, monthly, and annual periods during the development of aftershock series with  $m_{b(\text{ISC})} \geq 4.5$ . As a result of the analysis of fragments of aftershock series along the linear extent of the rupture of the main foci, the largest bursts of activity were noted near the epicenter of the main event or at the end of the aftershock region.

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

**Funding:** the study was carried out within the framework of the project No. FWZZ-2026-0050.

**For citation:** Kuchay O.A., Melnik E.A. The strongest earthquakes in Central Asia and their aftershock series // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2026. No. 1. P. 25–38. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2026-1-25.

## ВВЕДЕНИЕ

Последнее мощнейшее землетрясение Камчатки 29.07.2025 ( $M_{w(USGS)} = 8.8$ ), так же как и Суматранское землетрясение 26.12.2004, сформировавшиеся в зоне контакта плит, сопровождались сильнейшими афтершоками, зафиксированными спустя полтора–два месяца. Поэтому наибольший интерес представляет пространственно-временное распределение афтершоков внутриплитных землетрясений Центральной Азии, уровень их афтершоковой деятельности и максимальные всплески активности вдоль линейной протяженности разрыва главного очага.

Цель настоящего исследования – анализ динамики временной и пространственной структуры афтершоковых серий внутриплитных коровых землетрясений ( $7.5 \leq M_w \leq 7.9$ ) в областях разного напряженно-деформированного состояния земной коры. Для этого необходимо оценить изменение величины скалярного сейсмического момента вдоль линейной протяженности очага, определенной по облаку афтершоков. Динамика развития сейсмического процесса исследуется по значениям суммарных скалярных сейсмических моментов, высвободившихся в течение суток, 10 дней, месяца и годовых периодов при развитии афтершоковых процессов с  $m_{b(ISC)} \geq 4.5$ .

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

За последние годы вышел целый ряд статей с глубоким анализом афтершокового процесса сильных землетрясений [Родкин, 2020; Завьялов, Зотов, 2021], теоретическими исследованиями поведения повторных толчков занимались [Баранов, Шебалин, 2018; Шебалин и др., 2018]. Наиболее известны ранние работы, где выясняются особенности проявления афтершоковых последовательностей, [Жалковский, Мучная, 1984; Гольдин и др., 2004; Татевосян, Аптекман, 2008; Лутиков, Родина, 2013; Лутиков и др., 2017]. Довольно много публикаций посвящено восстановлению напряженно-деформированного состояния объемов земной коры за счет повторных толчков [Ребецкий, Маринин, 2006; Ребецкий, Полец, 2014; Кучай, 2023; Тихотский и др., 2023; Кучай, Бушенкова, 2025].

В работе использовались три каталога: Геологической службы США (USGS, <https://earthquake.usgs.gov>), Международного сейсмологического центра ISC (<http://www.isc.ac.uk>) и международного глобального каталога Global CMT ([www.globalcmt.org](http://www.globalcmt.org)). Из каталога (<https://earthquake.usgs.gov>) выделены 9 сильнейших коровых землетрясениях с  $M_w \geq 7.5$  за временной период 1971–2022 г. на территории Центральной Азии с координатами 20–55° с.ш. и 60–120° в.д. (рис. 1). Афтершоковые серии с  $m_{b(ISC)} \geq 4.5$  отобраны по каталогам (<http://www.isc.ac.uk>) (данные которого являются представительными до 2023 г.) на площадках 3°×3° с эпицентром основного землетрясения в центре. Из каталога CMT ([www.globalcmt.org](http://www.globalcmt.org)) привлечены материалы о моментной магнитуде ( $M_{wCMT}$ ), величине скалярного сейсмического момента сильных землетрясений ( $M_0$ ), а также информация о параметрах механизмов очагов землетрясений.

Очевидно, что продолжительность афтершоковых серий зависит от использования событий с разным магнитудным диапазоном. В то же время наибольший вклад в суммарную величину скалярного сейсмического момента вносят очаги, реализованные с большей энергией. Для того чтобы оценить особенности афтершоковой деятельности, выборки из каталога ограничены одним годом, аналогично публикации [Баранов, Шебалин, 2018].

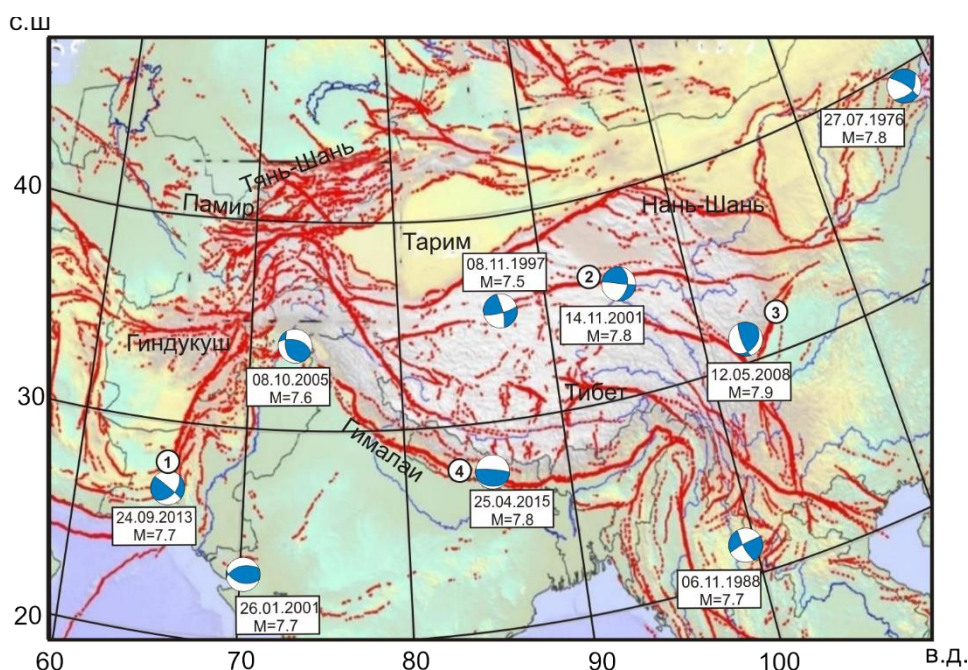
Для настоящего исследования магнитуды  $m_{b(ISC)}$  пересчитаны в моментную магнитуду  $M_w$  по формуле  $M_w = (m_{b(ISC)} - 1.65) / 0.65$  в соответствии с [Das et al., 2011]. Используя зависимость между

скалярным сейсмическим моментом  $\lg M_0$  и  $M_w$ , применена формула расчета Канамори [Kanamori, 1977]  $M_w = 2/3(\lg M_0 - 16.1)$ . Далее определяется суммарный скалярный сейсмический момент, высвобождаемый в афтершоковых сериях:  $M_{0\text{ sum af}} = \sum M_{0i}$ ,  $i = 1 \dots n$ , где  $M_{0i}$  – скалярный сейсмический момент каждого афтершока [Лутиков и др., 2017], выраженный в дин·см.

Поскольку нас интересовал уровень афтершоковой деятельности во времени, то в рамках исследования все афтершоки с  $m_b(\text{ISC}) \geq 4.5$ , расположенные вдоль плоскостей разрыва главных землетрясений, разбивались на части по  $0.25^\circ$ , в пределах этих фрагментов рассчитывались суммарные величины скалярных сейсмических моментов и строились подробные графики распределения значений для каждого элемента за сутки, за 10 дней, месяц и год. В случае если азимут вытянутости облака повторных толчков составлял угол с параллелью меньше  $45^\circ$ , то данные располагались вдоль оси абсцисс, если угол был больше, то вдоль ординат.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

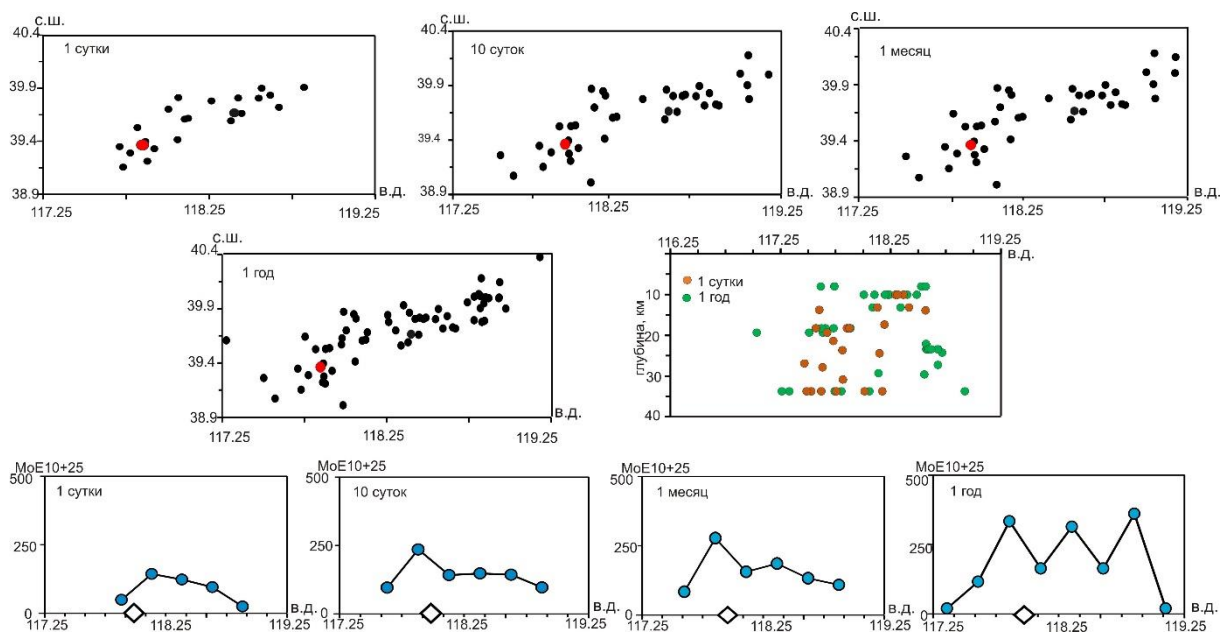
На рисунке 1 показаны эпицентры девяти сильнейших землетрясений Азии с  $M \geq 7.5$  и решения их фокальных механизмов за период 1976–2015 гг. Для них в результате выполненных расчетов были построены графики суммарных величин скалярных сейсмических моментов для каждого фрагмента афтершокового облака за сутки, за 10 дней, месяц и год, начиная с первого афтершока.



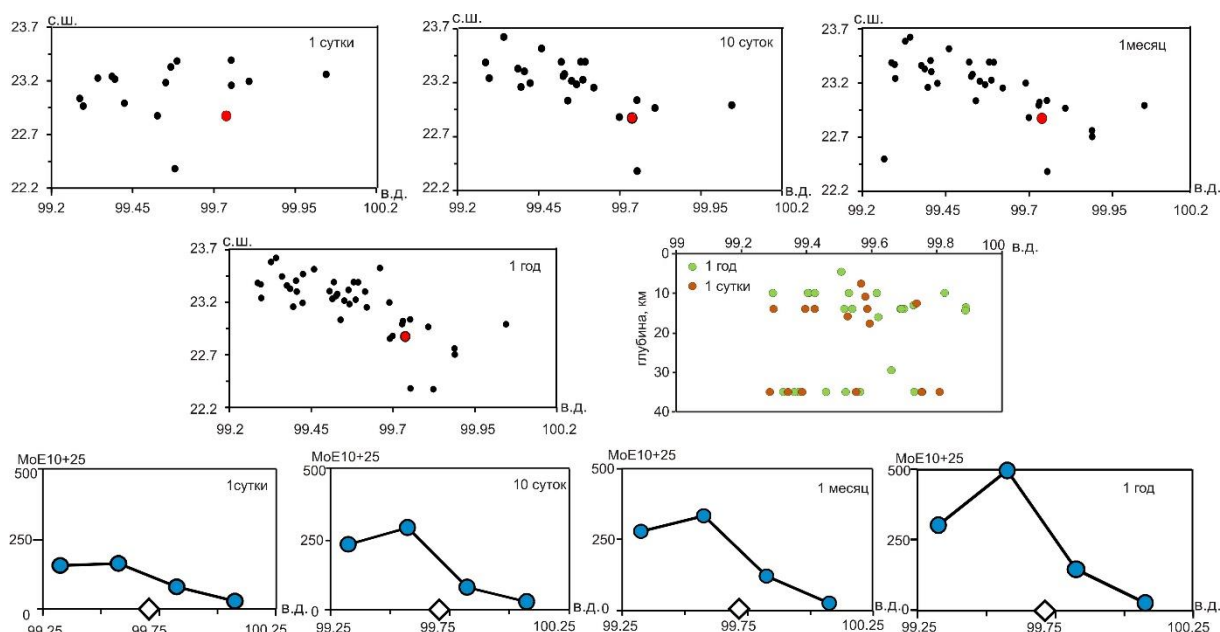
**Рис. 1.** Эпицентры сильнейших землетрясений Азии ( $M_w \geq 7.5$ ) и решения их фокальных механизмов за период 1976–2015 гг. Голубым цветом закрашены области волн сжатия, белым – растяжения. Решения механизмов очагов (из Global CMT) представлены в верхней полусфере. Карта разломов по [Бачманов и др., 2017], линии разломов отмечены красным цветом. Разломы: 1 – Чаманский, 2 – Арнимакингский, 3 – Лунмэньшанский разлом, 4 – зона Фронтального разлома Гималаев.

Землетрясение 27.07.1976 ( $M_w = 7.8$ ) произошло в районе Таншаньской долины на северо-востоке Китая. Фокальный механизм очага и простираение афтершоковой серии указывают на юго-западное–северо-восточное положение плоскости разрыва, по которым возможен сдвиг-сброс (см. рис. 1). Повторные толчки располагаются на глубине от 10 до 35 км. В течение всех анализируемых периодов

максимальная величина суммарных скалярных сейсмических моментов концентрируется в секторе  $0.1^\circ$  от главного очага. Форма графиков афтершоковой последовательности не сохраняется в течение четырех периодов, изменяясь за годовой интервал (рис. 2).



**Рис. 2.** Распределение афтершоков в районе сильного землетрясения 27.07.1976, их пространственное расположение по глубине и графики суммарных величин скалярных сейсмических моментов. Карты эпицентров афтершоков построены за разный временной период: сутки, 10 дней, месяц и год, красным кружком отмечен эпицентр главного землетрясения. На нижних четырех графиках синими точками показаны уровни величин скалярных сейсмических моментов, определенных в пределах участков в  $0.25^\circ$  вдоль плоскости разрыва за сутки, в течение 10 дней, месяца и года, эпицентр отмечен ромбом на оси долгод.

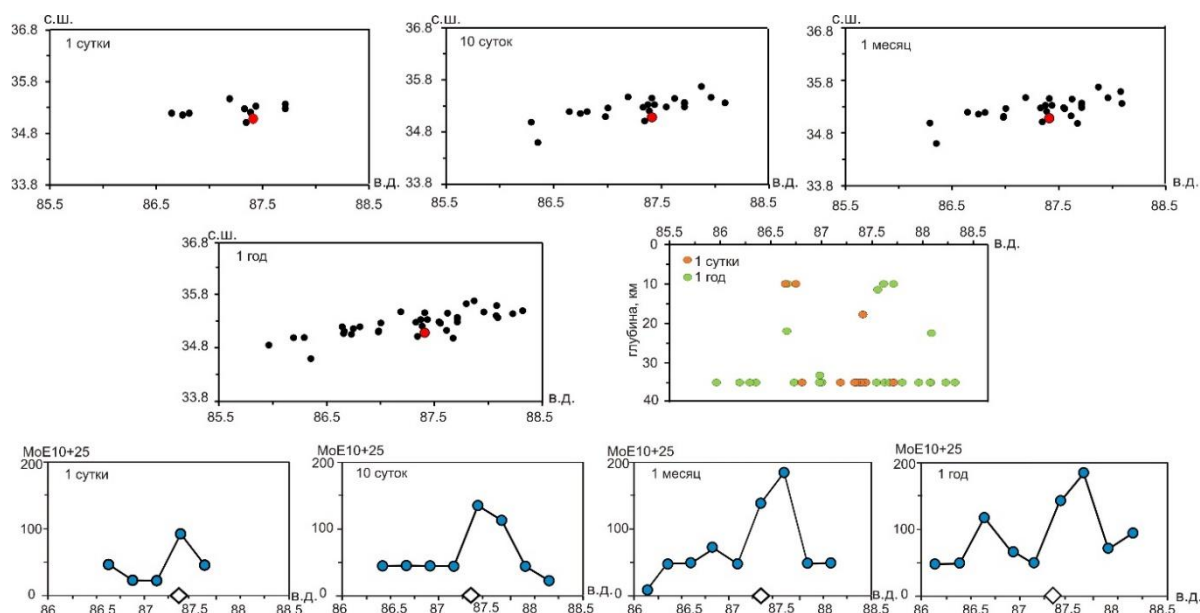


**Рис. 3.** Распределение афтершоков в районе сильного землетрясения 06.11.1988, их пространственное расположение по глубине и графики суммарных величин скалярных сейсмических моментов. Усл. обозн. на рис. 2.

Землетрясение 06.11.1988 произошло на границе Китая (провинция Юньнань) и Мьянмы ( $M_w = 7.7$  (<https://earthquake.usgs.gov>)), по данным каталога ([www.globalcmt.org](http://www.globalcmt.org)) магнитуда 7.0, видимо, поставлена

ошибочно. Нодальная плоскость фокального механизма очага и простираие афтершоковой серии указывают на северо-западное–юго-восточное положение плоскости разрыва, согласующейся с простираием геологических нарушений, по ней возможен сдвиг (см. рис. 1). Повторные толчки располагаются в разных слоях земной коры (5–15 и 35 км). В течение всех анализируемых периодов максимальная величина суммарных скалярных сейсмических моментов концентрируется в секторе в  $0.1^\circ$  от главного очага. Форма графиков афтершоковой последовательности сохраняется в течение четырех периодов (рис. 3). Здесь надо отметить, что скалярная величина сейсмического момента главного очага меньше, чем накопительная скалярная величина афтершоков с  $m_{b(ISC)} \geq 4.5$ . Всегда суммарная энергия афтершоков меньше, чем главного.

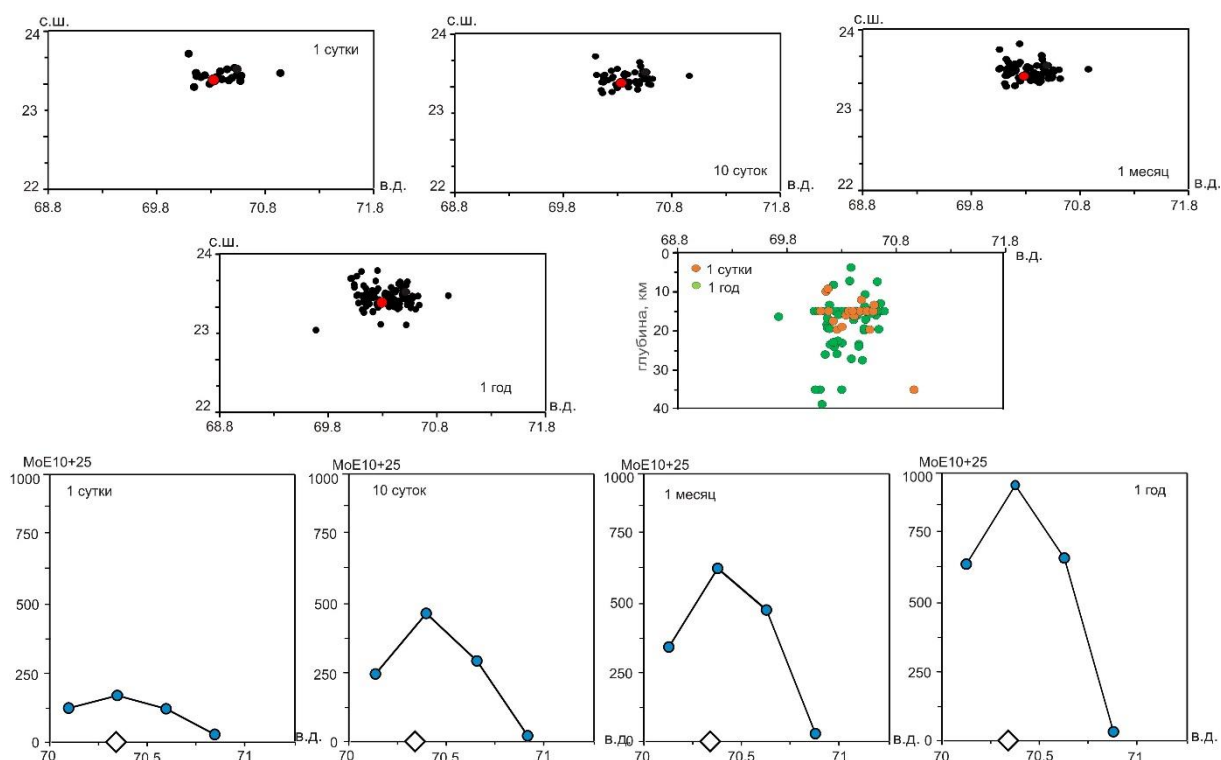
Землетрясение 08.11.1997 ( $M_w = 7.5$ ) зафиксировано западнее окончания зоны разлома Арнимакинг, по субширотному разлому более высокого ранга. Решения фокального механизма очага дает субширотное простираие плоскости разрыва, по которой произошел сдвиг (см. рис. 1). Форма графиков афтершоковой последовательности сохраняется в центральной части афтершокового облака, в окраинных участках конфигурация графиков меняется. Диапазон глубин повторных толчков 10–35 км, с основными глубинами 35 км (рис. 4).



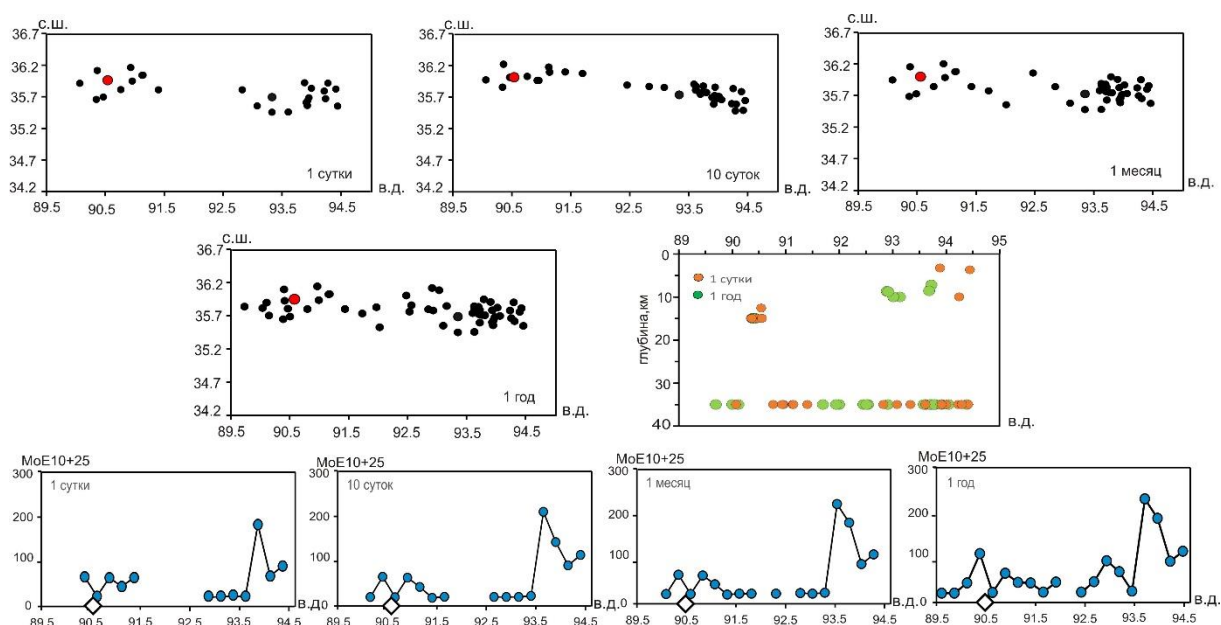
**Рис. 4.** Распределение афтершоков в районе сильного землетрясения 08.11.1997, их пространственное расположение по глубине и графики суммарных величин скалярных сейсмических моментов. Усл. обозн. на рис. 2.

Землетрясение 26.01.2001 ( $M_w = 7.7$ ) произошло в районе впадины Кач на территории Индии. Фокальный механизм очага дает субширотное простираие обеих плоскостей разрыва, поэтому трудно определить, какая плоскость была рабочей. Одна плоскость падает под углом  $45^\circ$  к северу, другая под углом  $51^\circ$  к югу (см. рис. 1). Облако афтершоков занимает небольшую площадь. Разброс по глубинам значительный: от 5 до 40 км. Форма графиков афтершоковой последовательности сохраняется (рис. 5). Максимальная величина скалярных сейсмических моментов фиксируется в районе эпицентра.

Землетрясение 14.11.2001 ( $M_w = 7.8$ ) особенное. В центральной части в течение суток не было повторных толчков с  $m_{b(ISC)} \geq 4.5$ . По-видимому, в верхней части земной коры более жесткий блок не дал развиваться афтершоковому процессу в первые сутки. Землетрясение произошло в зоне Арнимакингского разлома [Бачманов и др., 2017] (см. рис. 1).



**Рис. 5.** Распределение афтершоков в районе сильного землетрясения 26.01.2001, их пространственное расположение по глубине и графики суммарных величин скалярных сейсмических моментов. Усл. обозн. на рис. 2.

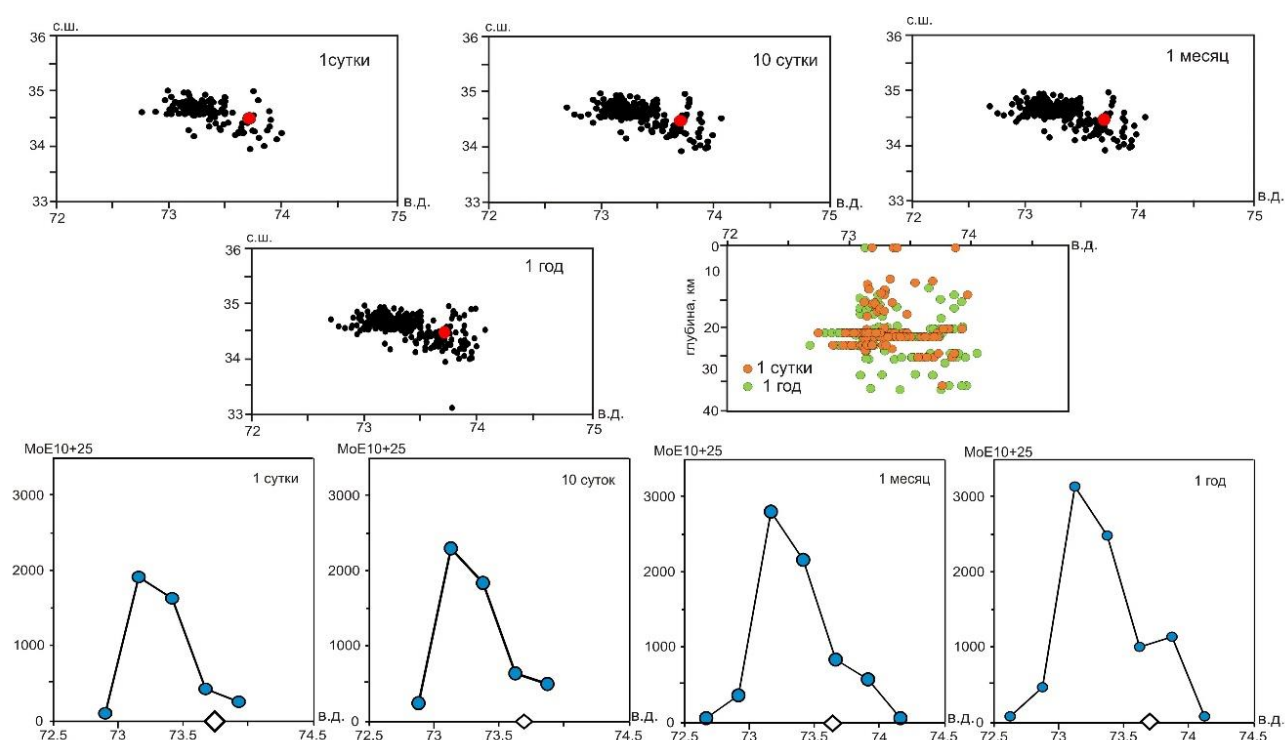


**Рис. 6.** Распределение афтершоков в районе сильного землетрясения 14.11.2001, их пространственное расположение по глубине и графики суммарных величин скалярных сейсмических моментов. Усл. обозн. на рис. 2.

Материалы китайских исследователей показывают, что общая длина сейсмического разрыва поверхности, вызванного землетрясением в Куньлуне 2001 г., составляет около 430 км, что является самым длинным когда-либо откартированным сейсмическим разрывом поверхности для внутриконтинентального землетрясения [Fu et al., 2005]. Решение фокального механизма очага дает субширотное простирание плоскости разрыва, по которой произошел левый сдвиг (см. рис. 1). Форма

графиков афтершоковой последовательности сохраняется, в то же время значения суммарной величины скалярных сейсмических моментов временных графиков значительно ниже, чем при сильнейших землетрясениях такой же магнитуды (рис. 6). Максимальная величина суммарных скалярных сейсмических моментов сосредоточена в сегменте в периферийной части на расстоянии в  $3.1^\circ$  от эпицентра главного очага (см. рис. 6).

Землетрясение 08.10.2005 ( $M_w = 7.6$ ) на западной оконечности Фронтального разлома Гималаев (см. рис. 1). Северо-западному–юго-восточному положению обеих нодальных плоскостей фокального механизма очага соответствует простираание афтершоковой последовательности. Повторные толчки располагаются на глубине от 5 до 35 км и более плотно группируются на уровне 20–25 км. В течение всех анализируемых периодов максимальная величина суммарных скалярных сейсмических моментов концентрируется в секторе в  $0.5^\circ$  к северо-западу от главного очага. С некоторой натяжкой можно отметить, что форма графиков афтершоковой последовательности практически сохраняется (рис. 7).

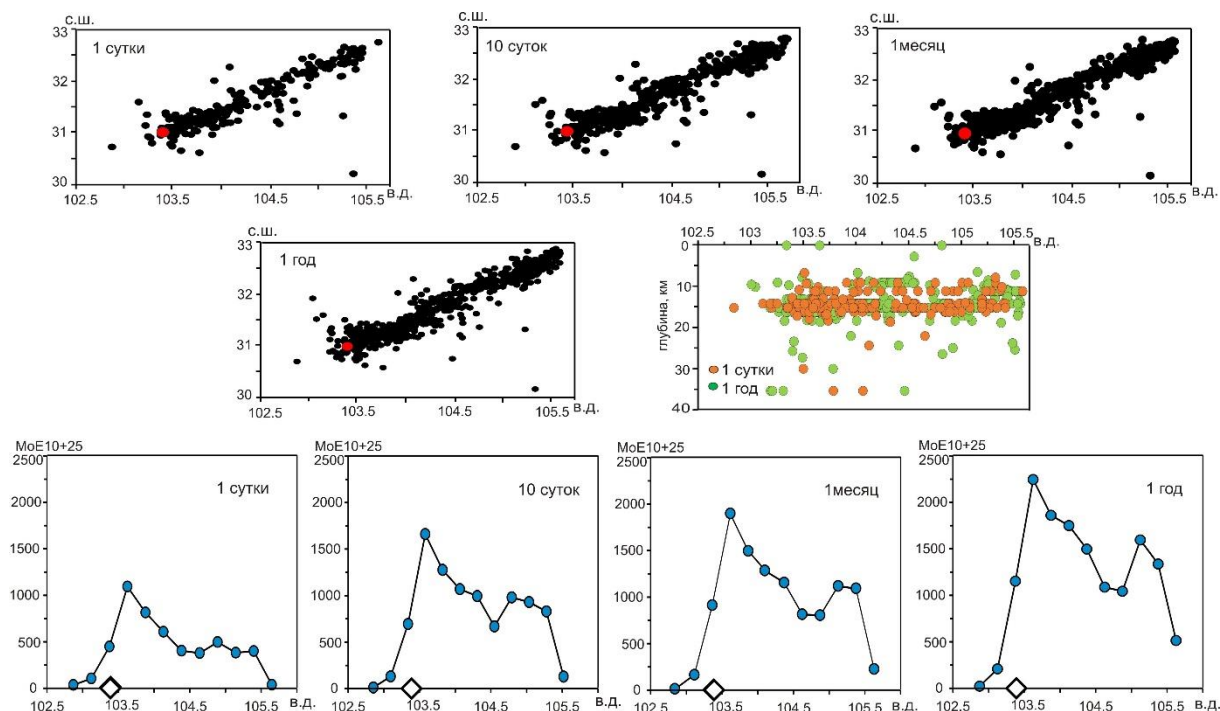


**Рис. 7.** Распределение афтершоков в районе сильного землетрясения 08.10.2005, их пространственное расположение по глубине и графики суммарных величин скалярных сейсмических моментов. Усл. обозн. на рис. 2.

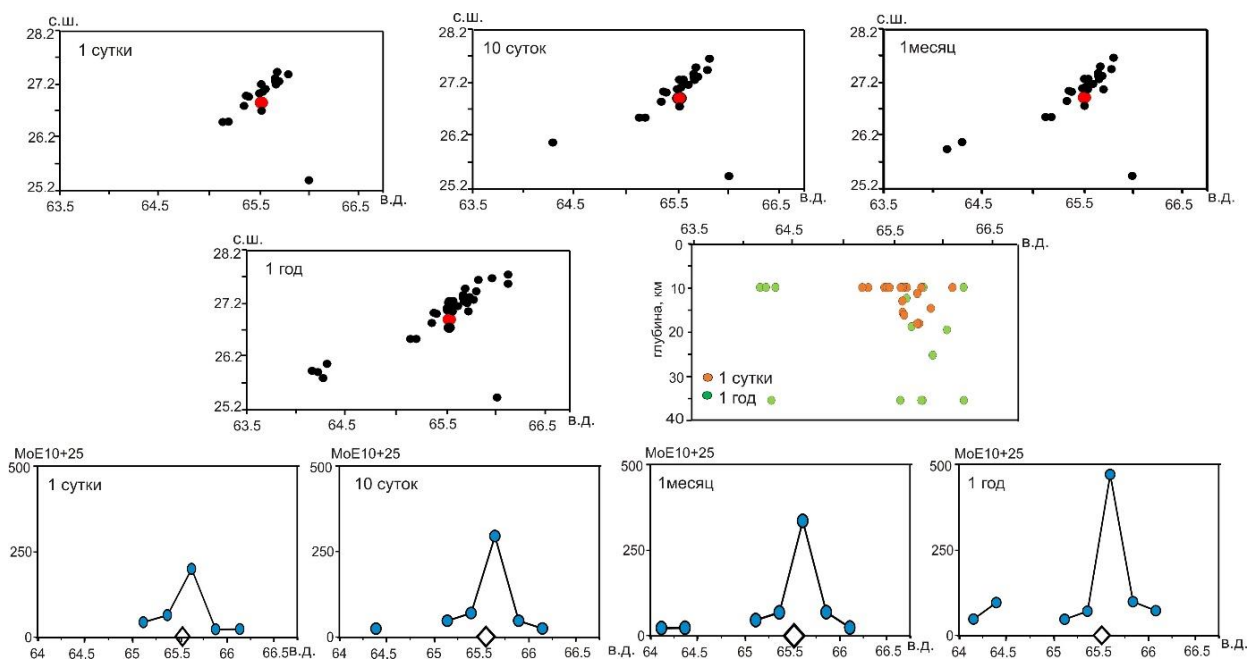
Землетрясение 12.05.2008 с наибольшей магнитудой ( $M_w = 7.9$ ) из всех рассматриваемых в дальнейшем главных событий произошло в зоне Лунмэньшанского разлома (см. рис. 1). Нодальная плоскость механизма очага и простираание афтершоковой серии указывают на северо-восточное–юго-западное положение плоскости разрыва, полого падающей к северо-западу. Основная масса повторных толчков сосредоточена в узком диапазоне глубин. В течение всех анализируемых периодов максимальная величина суммарных скалярных сейсмических моментов концентрируется в секторе  $0.25^\circ$  от главного очага. Особенности развития афтершоковой серии, оцениваемые за сутки, в течение 10 дней, месяца и года, показывают, что сохраняются формы графиков, увеличиваются только значения (рис. 8).

Землетрясение 24.09.2013 ( $M_w = 7.7$ ) произошло в южной части Чаманского разлома. Фокальный механизм очага и простираание афтершоковой серии указывают на северо-восточное–юго-западное

положение плоскости разрыва, падающей к юго-востоку. По этой плоскости произошел сдвиг (см. рис. 1). Подавляющее большинство повторных толчков сосредоточено в слое земной коры 10–20 км. В течение всех анализируемых периодов максимальная величина суммарных скалярных сейсмических моментов сосредоточена в секторе  $0.1^\circ$  от главного события. Особенности развития афтершоковой серии, оцениваемые за сутки, в течение 10 дней, месяца и года, показывают, что сохраняются формы графиков, увеличиваются только значения (рис. 9).

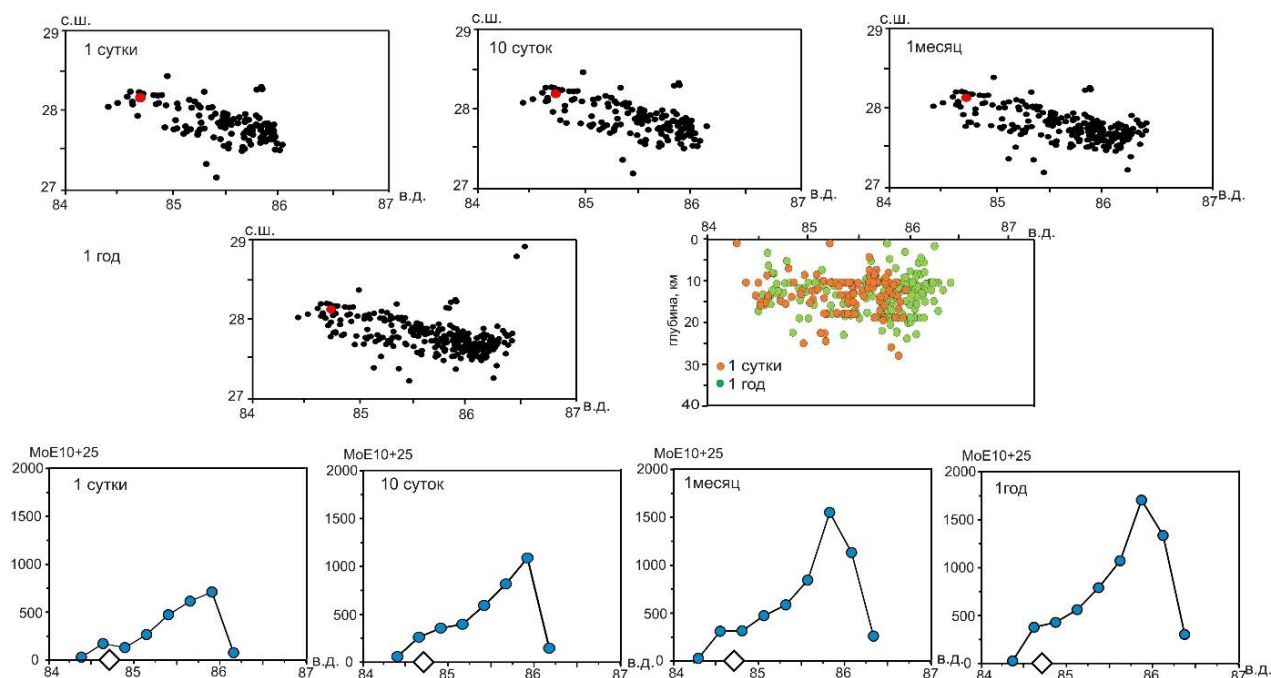


**Рис. 8.** Распределение афтершоков в районе сильного землетрясения 12.05.2008, их пространственное расположение по глубине и графики суммарных величин скалярных сейсмических моментов афтершоков. Усл. обозн. на рис. 2.



**Рис. 9.** Распределение афтершоков в районе сильного землетрясения 24.09.2013, их пространственное расположение по глубине и графики суммарных величин скалярных сейсмических моментов. Усл. обозн. на рис. 2.

Землетрясение 25.04.2015 ( $M_w = 7.8$ ) произошло в зоне Фронтального разлома Гималаев (см. рис. 1). Фокальный механизм очага дает субширотное простираие обеих нодальных плоскостей, поэтому трудно определить какая плоскость была рабочей. По пологой плоскости возможен пологий надвиг, по субвертикальной – взброс. Диапазон глубин афтершоков и их количество увеличивается к востоку, что и определяет возрастание значений суммарных скалярных сейсмических моментов. Максимальная величина суммарных скалярных сейсмических моментов концентрируется в восточном секторе, на достаточно большом расстоянии, в  $1.1^\circ$  от главного очага, на периферии плоскости разрыва. Форма распределений графиков афтершоковой последовательности, рассчитанных за сутки, в течение 10 дней, месяца и года, сохраняется (рис. 10).



**Рис. 10.** Распределение афтершоков в районе сильного землетрясения 25.04.2015, их пространственное расположение по глубине и графики суммарных величин скалярных сейсмических моментов. Усл. обозн. на рис. 2.

Анализ вышеперечисленных сильнейших землетрясений ( $M_w \geq 7.5$ ) Центральной Азии показывает, что семь событий произошли в зонах активных разломов, два других (27.07.1976, 26.01.2001) – в долинах на разломах локального типа. Надо отметить, что определение глубины афтершоков не всегда надежное, особенно когда определяется значение в 35 км, поэтому этот аспект трудно оценивать.

В результате выполненных расчетов составлена таблица с характеристиками сильных землетрясений, их магнитудами, накопленными величинами скалярного сейсмического момента афтершоковых серий и отношением  $\sum M_{0i\text{af}} / M_{0\text{глав}}$  в процентах (табл. 1).

Суммарная величина скалярного сейсмического момента каждой афтершоковой серии по отношению к сейсмическому моменту главного события составляет от 0.56 до 20 % (см. табл. 1). Землетрясения под №№ 6, 7, 8, 9 (см. табл. 1) с наибольшими значениями накопленных суммарных скалярных сейсмических моментов повторных событий произошли в зонах наиболее мощных разломов. Здесь надо отметить, что величина скалярного сейсмического момента землетрясения 06.11.1988 не соответствует действительности, т. к. это значение меньше, чем накопленные суммарные скалярные сейсмические моменты афтершоков.

Особенности развития афтершоковых серий ( $m_{b(ISC)} \geq 4.5$ ) девяти сильнейших землетрясений, оцениваемые за сутки, в течение 10 дней, месяца и года вдоль плоскости разрыва, показывают, что в первом приближении сохраняется форма графиков по высвобождению суммарного скалярного сейсмического момента, лишь со временем увеличиваются их значения.

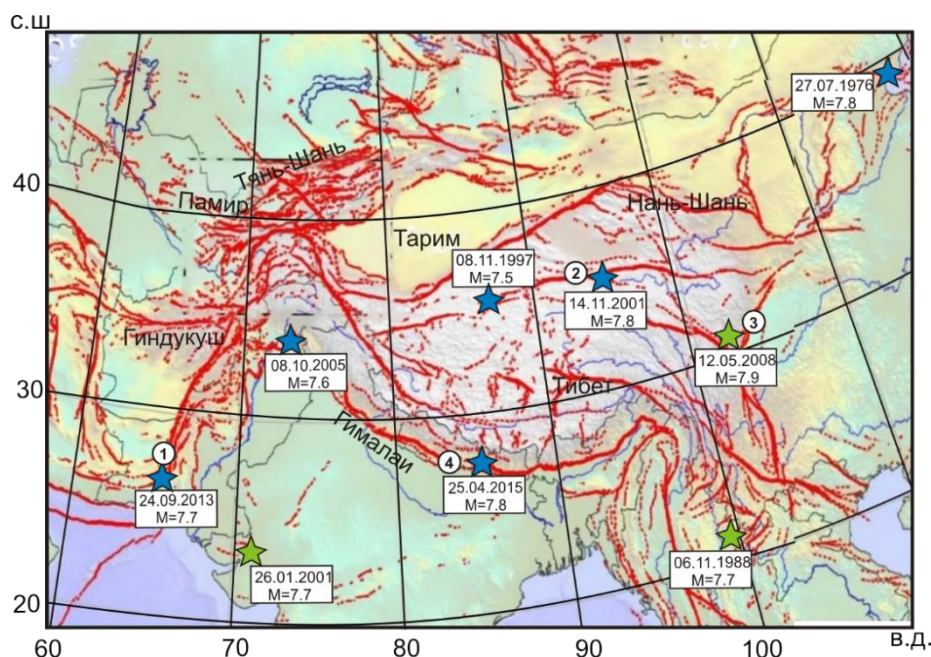
Таблица 1

**Каталог сильнейших землетрясений Центральной Азии ( $M_w \geq 7.5$ ) за 1976–2015 гг. с данными о максимальных магнитудах землетрясений, величинах скалярных сейсмических моментов главных событий, накопленных скалярных сейсмических моментов афтершоковых последовательностей  $M_{oi af}$  с  $m_{b(ISC)} \geq 4.5$  и процентных отношений накопленных скалярных сейсмических моментов афтершоковых последовательностей  $M_{oi af}$  с  $m_{b(ISC)} \geq 4.5$  к величинам скалярного сейсмического момента главных землетрясений**

№ п/п	Дата	Время	Широта	Долгота	$M_w$ USGS	$H$ USGS	$M_w$ CMT	$M_0$ глав [дин·см]	$\sum M_{oi af}$ [дин·см]	$\sum M_{oi af}/$ $M_0$ глав
1	27.07.1976	19:42	39.36	117.85	7.8	23	7.8	2.77e+27	2.8e+25	1 %
2	06.11.1988	13:03	22.87	99.74	7.7	18	7.3	3.66e+26	5.0e+26	136 %
3	08.11.1997	10:02	35.08	87.41	7.5	33	7.9	2.23e+27	1.2e+25	0.53 %
4	26.01.2001	3:16	23.38	70.34	7.7	16	7.6	3.43e+27	7.9e+25	2.3 %
5	14.11.2001	9:45	35.69	93.33	7.8	10	7.8	5.9e+27	4.8e+25	0.81 %
6	08.10.2005	3:50	34.49	73.7	7.6	26	7.6	2.94e+27	5.7e+26	19.38 %
7	12.05.2008	6:28	30.99	103.39	7.9	19	7.9	8.97e+27	5.7e+26	6.35 %
8	24.09.2013	11:29	26.91	65.53	7.7	15	7.8	5.59e+27	4.7e+26	8.4 %
9	25.04.2015	6:11	28.13	84.72	7.8	8	7.9	8.39e+27	1.7e+27	20.26 %

Тем не менее существуют некоторые особенности развития афтершоковых серий. В частности, повторные сейсмические толчки ( $m_{b(ISC)} \geq 4.5$ ) для главных землетрясений 12.05.2008, 06.11.1988 и 26.01.2001 развиваются только в рамках области простираения афтершоков, сформированной в первые сутки (рис. 11). Разумеется, более слабые афтершоки, не рассматриваемые в данном исследовании, происходят также за пределами этой площади. Соответственно, основная перестройка поля напряжений и основная деформация среды для этих трех сильнейших землетрясений осуществляется в пределах этой афтершоковой области.

В остальных шести случаях (землетрясения №№ 1, 3, 5, 6, 8, 9 в табл. 1) через сутки отмечается возникновение повторных сейсмических событий с  $m_{b(ISC)} \geq 4.5$  в краевых частях афтершоковой области, что отражается на графиках величин скалярных сейсмических моментов, а именно на периферии простираения плоскости разрыва. Теоретически в публикации [Осокина, Цветкова, 1980] показано, что каждому конкретному виду исходного поля в области главного очага соответствует два из шести возможных типов локального поля напряжений на концах главной плоскости. Соответственно, процесс деформации активизируется на концах главной плоскости разрыва, возникают вторичные нарушения, происходит изменение полей напряжений и деформаций.



**Рис. 11.** Особенности развития афтершоковых серий. Зеленой звездой показаны повторные сейсмические толчки ( $m_{b(ISC)} \geq 4.5$ ), которые развиваются только в пределах области простираения афтершоков, образованной в первые сутки. Звездой синего цвета отмечено возникновение повторных сейсмических событий с  $m_{b(ISC)} \geq 4.5$  за пределами области первых суток в краевых частях афтершоковой области.

Распределение максимальной величины накопительного скалярного сейсмического момента афтершоков по сегментам  $0.25^\circ$  проявляется в разных частях плоскости разрыва основного землетрясения. Действительно, при расположении эпицентров главных землетрясений на краю афтершоковой зоны (25.04.2015 и 14.11.2001) высвобождение максимального суммарного скалярного сейсмического момента повторных событий с  $m_{b(ISC)} \geq 4.5$  происходило в краевом фрагменте афтершоковых серий, на значительных расстояниях от эпицентров. Заметим, что в первом главном очаге возможен надвиг, во втором – сдвиг. Кроме того, для землетрясений 12.05.2008, 06.11.1988, 27.07.1976 с расположением эпицентра основного очага также в начале афтершоковой серии, максимальное значение суммарного скалярного сейсмического момента повторных толчков сформировано в сегменте вблизи главного события. Для этих трех очагов характерен сдвиг по плоскости разрыва.

Для остальных четырех сильнейших землетрясений, эпицентр располагался преимущественно в центральной части афтершоковой области. Характер смещения в двух очагах – сдвиговый (24.09.2013, 08.11.1997), в других двух надвиговый (26.01.2001, 08.10.2005). Наибольшая величина максимального суммарного скалярного сейсмического момента фрагментов афтершоковых серий для этих очагов отмечается вблизи эпицентров главных землетрясений (24.09.2013, 26.01.2001) или на незначительном расстоянии от эпицентра (08.10.2005, 08.11.1997). Таким образом, высвобождение суммарного скалярного сейсмического момента в ходе развития афтершокового процесса вдоль плоскости разрыва происходит неравномерно. В ряде очагов наибольшие значения накопительного скалярного сейсмического момента афтершоков в секторах по  $0.25^\circ$  концентрируются вблизи эпицентра, в некоторых очагах – в окраинных частях. Полученные результаты демонстрируют неравномерное снятие напряжений вдоль плоскости разрыва главного события из-за различий в строении среды, благодаря чему возникают разнообразные деформации в зоне очага землетрясения, которые сказываются на распределении величин накопительного скалярного сейсмического момента афтершоков, возникающих вдоль плоскости разрыва.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты исследования несколько расширяют наши представления о процессах происходящих в очагах сильнейших землетрясений Центральной Азии. В результате анализа фрагментов афтершоковых серий вдоль линейной протяженности разрыва главных очагов наибольшие всплески активности отмечены вблизи эпицентра главного события или на концах афтершоковой области. Динамика эволюции сейсмического процесса, оцененная по значениям суммарных скалярных сейсмических моментов, высвободившихся в ходе развития повторных толчков с  $m_{b(ISC)} \geq 4.5$  в течение суток, 10 дней, месяца и годовых периодов опосредованно показывает неоднородность среды и снимаемые напряжения, повлиявшие на процесс разрыва в очаге.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Баранов С.В., Шебалин П.Н.** Оценивание области афтершоковой активности по информации об основном толчке // Геофизические исследования. 2018. Т. 19, № 2. С. 34–56. doi:10.21455/gr2018.2-2. EDN: UTKNHN.
- Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г.** База данных активных разломов Евразии // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8, № 4. С. 711–736. doi:10.5800/GT-2017-8-4-0314. EDN:ZWRGNL.
- 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 академии наук. 2004. Т. 395, № 4. С. 534–536. EDN:OQOLZT.
- Жалковский Н.Д., Мучная В.И.** О пространственных и временных распределениях афтершоков // Геология и геофизика. 1984. Т. 25, № 8. С. 108–117. EDN:MOKLGL.
- Завьялов А.Д., Зотов О.Д.** Новый способ определения характерного размера очаговой зоны // Вулканология и сейсмология. 2021. № 1. С. 22–29. doi:10.31857/S0203030621010065. EDN:44573735.
- Кучай О.А.** Афтершоковые последовательности сильнейших внутриплитных землетрясений и фоновые события на территории Центральной Азии // Геофизические технологии. 2023. № 3. С. 36–45. doi: 10.18303/2619-1563-2023-3-36. EDN:UGVDSP.
- Кучай О.А., Бушенкова Н.А.** Связь сейсмических процессов с полем скоростей  $P$ -волн // Геология и геофизика. 2025. Т. 66, № 8. С. 1056–1067. doi:10.15372/GIG2025118. EDN:LBMGMS.
- Лутиков А.И., Родина С.Н.** Временные и энергетические параметры афтершокового процесса Курило-Камчатских землетрясений // Геофизические исследования. 2013. Т. 14, № 4. С. 23–35. EDN:RSTBOZ.
- 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. doi:10.21455/gr2017.1-2. EDN:28768808.
- 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.
- 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. EDN:NDLLJR.
- Ребецкий Ю.Л., Полец А.Ю.** Напряженное состояние литосферы Японии перед катастрофическим землетрясением Тохоку 11.03.2011 г. // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5, № 2. С. 469–506. doi: 10.5800/GT-2014-5-2-0137. EDN:SFQZCD.

**Родкин М.В.** Типовая фор- и афтершоковая аномалия – эмпирика, интерпретация // Вулканология и сейсмология. 2020. № 1. С. 64–76. doi:10.31857/S020303062001006X. EDN:OOTILR.

**Татевосян Р.Э., Аптекман Ж.Я.** Этапы развития афтершоковых последовательностей сильнейших землетрясений мира // Физика Земли. 2008. № 12. С. 3–23. EDN:JUJXZN.

**Шебалин П.Н., Баранов С.В., Дзедобоев Б.А.** Закон повторяемости количества афтершоков // Доклады академии наук. 2018. Т. 481, № 3. С. 320–323. doi:10.31857/S086956520001387-8. EDN:YMRXQL.

**Das R., 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 (2). P. 801–810. doi:10.1007/s11069-011-9796-6.

**Fu B., Awata Y., Du J., Ninomiya Y., He W.** Complex geometry and segmentation of the surface rupture associated with the 14 November 2001 great Kunlun earthquake, northern Tibet, China // Tectonophysics. 2005. Vol. 407 (1–2). P. 43–63. doi:10.1016/j.tecto.2005.07.002.

**Kanamori H.** The energy release in great earthquakes // Journal of Geophysical Research. 1977. Vol. 82 (20). P. 2981–2987. doi:10.1029/JB082i020p02981.

**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 // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 511, № 2. P. 228–235. doi:10.31857/S2686739723600765. EDN:WGONHT.

#### REFERENCES

**Bachmanov D.M., Kozhurin A.I., Trifonov V.G.** The active faults of Eurasia database // Geodynamics & Tectonophysics. 2017. Vol. 8 (4). P. 711–736. (In Russ.). doi:10.5800/GT-2017-8-4-0314.

**Baranov S.V., Shebalin P.N.** Estimating aftershock area based on the mainshock information // Geophysical Research. 2018. Vol. 19 (2). P. 34–56 (In Russ.). doi:10.21455/gr2018.2-2.

**Das R., 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 (2). P. 801–810. doi:10.1007/s11069-011-9796-6.

**Fu B., Awata Y., Du J., Ninomiya Y., He W.** Complex geometry and segmentation of the surface rupture associated with the 14 November 2001 great Kunlun earthquake, northern Tibet, China // Tectonophysics. 2005. Vol. 407 (1–2). P. 43–63. doi:10.1016/j.tecto.2005.07.002.

**Gol'din S.V., Seleznev V.S., Emanov A.F., Filina A.G., Emanov A.A., Novikov I.S., Vysotskii E.M., Fateev A.V., Kolesnikov Yu.I., Podkorytova V.G., Leskova E.V., Yarygina M.A.** The Chuya earthquake and its aftershocks // Doklady Earth Sciences. 2004. Vol. 395 (3). P. 394–396. EDN:LIPUJL.

**Kanamori H.** The energy release in great earthquakes // Journal of Geophysical Research. 1977. Vol. 82 (20). P. 2981–2987. doi:10.1029/JB082i020p02981.

**Kuchay O.A.** Background earthquakes and aftershock sequences of the strongest intraplate earthquakes in Central Asia // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2023. No. 3. P. 36–45. (in Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2023-3-36.

**Kuchay O.A., Bushenkova N.A.** Relationship of seismic processes with the *P*-wave velocity field // Russian Geology and Geophysics. 2025. Vol. 66 (8). P. 1031–1041. doi:10.2113/RGG20254815. EDN:WNAVYCL.

**Lutikov A.I., Rodina S.N.** Temporal and power parameters of aftershock process of the Kuriles-Kamchatka earthquakes // Geophysical Research. 2013. Vol. 14 (4). P. 23–35. (In Russ.).

**Lutikov A.I., Dontsova S.N., Rodina S.N.** Time and energetic parameters of the aftershock process for the earthquakes in the Caucasus and adjacent areas // *Geophysical Research*. 2017. Vol. 18 (1). P. 20–36. (In Russ.). doi:10.21455/gr2017.1-2.

**Osokina D.N., Tsvetkova N.Yu.** Restructuring of the tectonic stress field in earthquake foci and in the vicinity of tectonic fault systems // *Physical processes in earthquake foci*. Nauka, Moscow, 1980. P. 187–206. (In Russ.).

**Rebetsky Yu.L., Marinin A.V.** Preseismic stress field before the Sumatra-Andaman earthquake of 26.12.2004: A model of metastable state of rocks // *Russian Geology and Geophysics*. 2006. Vol. 47 (11). P. 1173–1185.

**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. (In Russ.). doi:10.5800/GT-2014-5-2-0137.

**Rodkin M.V.** A typical foreshock and aftershock anomaly: observations, interpretation, and applications // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2020. Vol. 14 (1). P. 58–69. doi:10.1134/S0742046320010066. EDN:RZFPHH.

**Shebalin P.N., Baranov S.V., Dzeboev B.A.** The Law of repeatability of the number of aftershocks // *Doklady Earth Sciences*. 2018. Vol. 481 (1). P. 963–966. doi:10.1134/S1028334X18070280. EDN: SAYGWP.

**Tatevossian R.E., Aptekman Zh.Ya.** Aftershock sequences of the strongest earthquakes of the world: stages of development // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2008. Vol. 44 (12). P. 945–964. doi: 10.1134/S106935130812001X. EDN:LLFNVN.

**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 (2). P. 703–709. doi:10.1134/s1028334x23600974. EDN:ECXJQK.

**Zavyalov A.D., Zotov O.D.** A new way to determine the characteristic size of the source zone // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2021. Vol. 15 (1). P. 19–25. doi:10.1134/S0742046321010139. EDN:UHUWKX.

**Zhalkovsky N.D., Muchnaya V.I.** On spatial and temporal distributions of aftershocks // *Soviet Geology and Geophysics*. 1984. Vol. 25 (8). P. 108–117. (In Russ.).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*КУЧАЙ Ольга Анатольевна* – кандидат физико-математических наук, ведущий эксперт Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: механизмы очагов землетрясений, сеймотектонические деформации по данным механизмов очагов землетрясений.

*МЕЛЬНИК Елена Александровна* – доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности, ведущий научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: региональное изучение земной коры и верхней мантии платформенных и складчатых областей Сибири методами активной сейсмологии.

*Статья поступила в редакцию 2 марта 2026 г.,  
одобрена после рецензирования 10 апреля 2026 г.,  
принята к публикации 10 апреля 2026 г.*