

СВЯЗЬ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ПОЛЕМ СКОРОСТЕЙ P -ВОЛН

О.А. Кучай, Н.А. Бушенкова ✉

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия*

Поступила в редакцию: 30.09.2024

Принята в печать: 17.03.2025

Опубликована онлайн: 20.03.2025

DOI: [10.15372/GIG2025118](https://doi.org/10.15372/GIG2025118)EDN: [LBMGMS](https://www.edn.ru/LBMGMS)*Ссылка для цитирования:***Кучай О.А., Бушенкова Н.А. (2025).**

Связь сейсмических процессов с полем

скоростей P -волн // Геология и

геофизика, т. 66, № 8, с. 1056–1067,

DOI: [10.15372/GIG2025118](https://doi.org/10.15372/GIG2025118),EDN: [LBMGMS](https://www.edn.ru/LBMGMS).

© О.А. Кучай, Н.А. Бушенкова, 2025

✉ *E-mail*: bushenkovana@ipgg.sbras.ru

Рассмотрено распределение более трех десятков сильнейших внутриплитных коровых землетрясений ($M_w \geq 6.9$), зарегистрированных на территории Центральной Азии ($20\text{--}55^\circ$ с.ш., $55\text{--}120^\circ$ в.д.) за временной период 1973–2022 гг., в том числе уровень их афтершоковой деятельности и фоновая сейсмичность в поле скоростных неоднородностей среды. Анализ фоновой и афтершоковой сейсмичности с $m_{b(\text{ISC})} \geq 4.5$ (по данным Международного сейсмологического центра (ISC), <http://www.isc.ac.uk>) осуществлялась на площадках очаговых областей $3^\circ \times 3^\circ$. В пределах площадок рассчитывалась суммарная величина скалярного сейсмического момента фоновой сейсмичности и афтершоковой последовательности. Фоновая сейсмичность оценивалась за 50-летний временной период до и после главного землетрясения и его афтершоков. Длительность серии повторных толчков ограничена одним годом. На фоне комплексной сейсмотомографической модели Азии (на срезе глубин ~ 50 км) сильные коровые очаги 24 землетрясений в основном тяготеют к зонам смены знака аномалий скорости P -волн, три землетрясения регистрируются в зоне пониженных скоростей и четыре – в зоне повышенных скоростей. Наибольшие значения суммарных скалярных сейсмических моментов, высвободившихся в процессе реализации фоновой сейсмичности, располагаются в пределах отрицательных аномалий скоростей P -волн, а также вдоль границ смены знака аномалий. При высвобождении скалярных сейсмических моментов в процессе афтершоковой и фоновой деятельности, а также главного события преимущественные значения остаются в пределах $E+27$. Повышенные значения ($E+28$) характерны для зон смены знака аномалий и области положительных аномалий скорости P -волн. В очаговой зоне шести областей ($3^\circ \times 3^\circ$) наблюдаются низкие значения суммарных скалярных сейсмических моментов фоновых и афтершоковых событий. Выдвинуто предположение о том, что в этих зонах произошла реализация предельной магнитуды за 100-летний период (1901–2022 гг.), и снятие накопленных напряжений могло осуществиться именно через сильнейшие землетрясения.

Сильнейшие коровые землетрясения, афтершоковая и фоновая сейсмичность, скалярный сейсмический момент, поле аномалий скорости P -волн, Центрально-Азиатский регион

ВВЕДЕНИЕ

Сильные землетрясения часто вызывают значительные разрушения жилых зданий и промышленных сооружений, появляются разрывы грунта и оползни. Последующие за основным толчком сильные афтершоки представляют реальную опасность усугубления ситуации. В XX и начале XXI в. в Центральной Азии произошли сильнейшие разрушительные землетрясения. Исследуемая в нашей работе зона Центральной Азии включает Тянь-Шань, Памир, Гиндукуш, Бирмские горы, Тибет, Гималаи, Алтай и Среднеиранские горы. В течение последних 50 лет на этой территории зарегистрировано более трех десятков землетрясений с балльностью до 8–9. Первостепенное внимание в нашем исследовании уделяется рассмотрению параметров именно этих землетрясений, сопровождавших их афтершоковых последовательностей и фоновой сейсмичности в очаговой области.

Исследование афтершоковых процессов началось практически с началом регистрации сильнейших

землетрясений. В последние годы наиболее детальные исследования представлены в публикациях [Жалковский, Мучная, 1984, 1995; Ромашкова, Кособоков, 2001; Гольдин и др., 2004; Татевосян, Аптектман, 2008; Радзиминович, Очковская, 2013; Лутиков, Родина, 2013; Лутиков и др., 2017; Шебалин и др., 2018; Баранов, Шебалин, 2018, 2019а; Шебалин, Баранов, 2019; Родкин и др., 2020; Завьялов, Зотов, 2021] и монографиях [Арефьев, 2003; Баранов, Шебалин, 2019б; Смирнов, Пономарёв, 2020]. Довольно много работ посвящено исследованию изменения напряженно-деформированного состояния перед главными землетрясениями и восстановлению поля напряжений за счет повторных толчков [Ребецкий, Маринин, 2006; Кучай, 2012; Ребецкий, Полец, 2014; Кучай и др., 2017; Тихоцкий и др., 2023]. В работе [Смирнов, Пономарёв, 2020] авторы отмечают, что выделение афтершоков в какой-то мере носит субъективный характер, поскольку для того, чтобы отнести то или иное землетрясение к афтершокам, необходимо задать адекватный размер временного и пространственного окна.

Важнейшей характеристикой процесса формирования структур является напряженно-деформированное состояние коры и литосферы. Оно определяет характер разрывных деформаций, формирующихся на разных глубинах. Распределение очагов землетрясений и афтершоковые процессы связывают с разломной тектоникой, но глубинные процессы и сама структура литосферной мантии играют не последнюю роль. Поэтому наибольший интерес представляет распределение сильных внутриплитных землетрясений, уровень их афтершоковой деятельности и фоновая сейсмичность в поле скоростных неоднородностей среды. С этой целью привлечены данные сильных коровых землетрясений ($M_w \geq 6.9$), зарегистрированных на территории Центральной Азии. Анализ афтершоковых последовательностей и фоновой сейсмичности осуществляется за счет суммарных скалярных сейсмических моментов, высвободившихся при развитии афтершоковых серий и фоновой сейсмичности. Мы осознаем, что 50-летний период наблюдения фоновой сейсмичности является небольшим, поэтому рассмотрели для каждой очаговой области выбранного основного землетрясения материалы о наиболее сильных сейсмических событиях, зарегистрированных в период 1901–1973 гг.

ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИХ ОБРАБОТКИ

Из каталога Геологической службы США (USGS, <https://earthquake.usgs.gov>) отобраны данные о сильных коровых землетрясениях (31 событие с $M_w \geq 6.9$ за временной период 1973–2022 гг. на территории с координатами 20–55° с.ш. и 55–120° в.д.), которые сопровождались афтершоковыми последовательностями (рис. 1). Анализ фоновой и афтершоковой сейсмичности с $m_{b(isc)} \geq 4.5$, которая является представительной в каталогах ISC (<http://www.isc.ac.uk>), в настоящей работе осуществлялся на площадках $3^\circ \times 3^\circ$ с эпицентром основного землетрясения в центре. Также мы привлекали информацию из международного глобального каталога Global CMT (www.globalcmt.org), в который с 1976 г. вносятся данные о моментной магнитуде (M_w), величине скалярного сейсмического момента сильных землетрясений (M_0), а также материалы о параметрах механизмов очагов землетрясений. Длительность серии повторных толчков, независимо от магнитуды главного землетрясения, была ограничена одним годом, аналогично работе [Баранов, Шебалин, 2018].

Повторные толчки для большинства отобранных ($M_w \geq 7.4$) внутриплитных землетрясений укладываются в пределы года при выборке из каталога ISC с

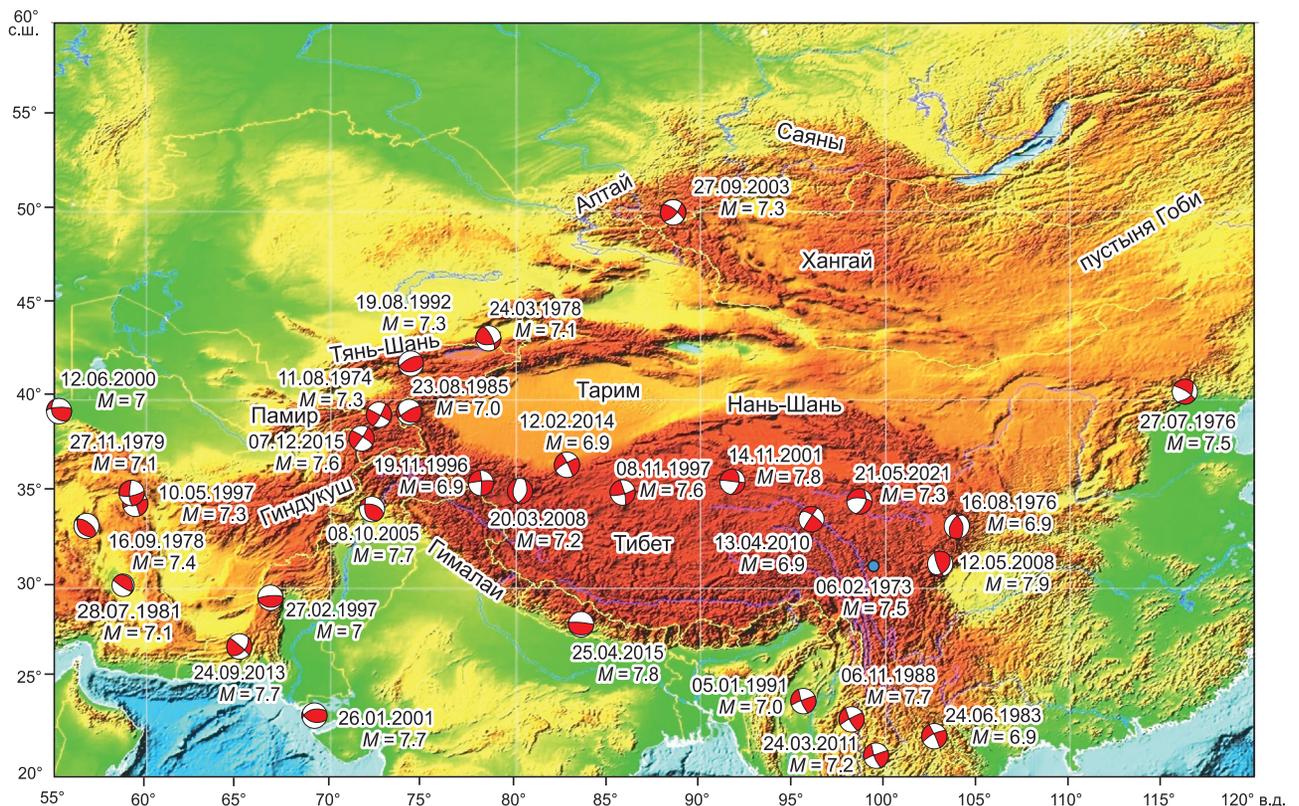


Рис. 1. Эпицентры сильнейших землетрясений Азии ($6.9 \leq M \leq 7.9$) и решения их фокальных механизмов в 1973–2021 гг. Решения механизмов очагов представлены в верхней полусфере по данным каталога Global CMT. Красным цветом закрашены области волн сжатия, белым – растяжения. Голубым кружком отмечено землетрясение с неопределенным механизмом очага.

$m_{b(isc)} \geq 4.5$. Для главных событий с $M_w = 6.9–7.3$ афтершоки фиксировались в течение нескольких месяцев, а завершением афтершокового процесса считалось отсутствие в течение 2–3 мес. сейсмических событий с магнитудой $m_{b(isc)} \geq 4.5$. Предварительно мы рассматривали распределение афтершоков с $m_b = 4–4.4$, которые не являются представительными в используемом каталоге, но также трассируют область разрыва в очаге. Поскольку главные землетря-

сения спустя несколько месяцев начинают сопровождаться повторными толчками с более слабыми афтершоками ($m_b \leq 4.5$), то условный выбор года афтершоковой деятельности и для землетрясений с $M_w = 6.9–7.3$ вполне логичен. Афтершоковый процесс слабых событий может продолжаться годы, но вклад повторных толчков с $m_{b(isc)} \leq 4.5$ в суммарный скалярный сейсмический момент незначителен. Фоновая сейсмичность оценивалась за 50-летний период

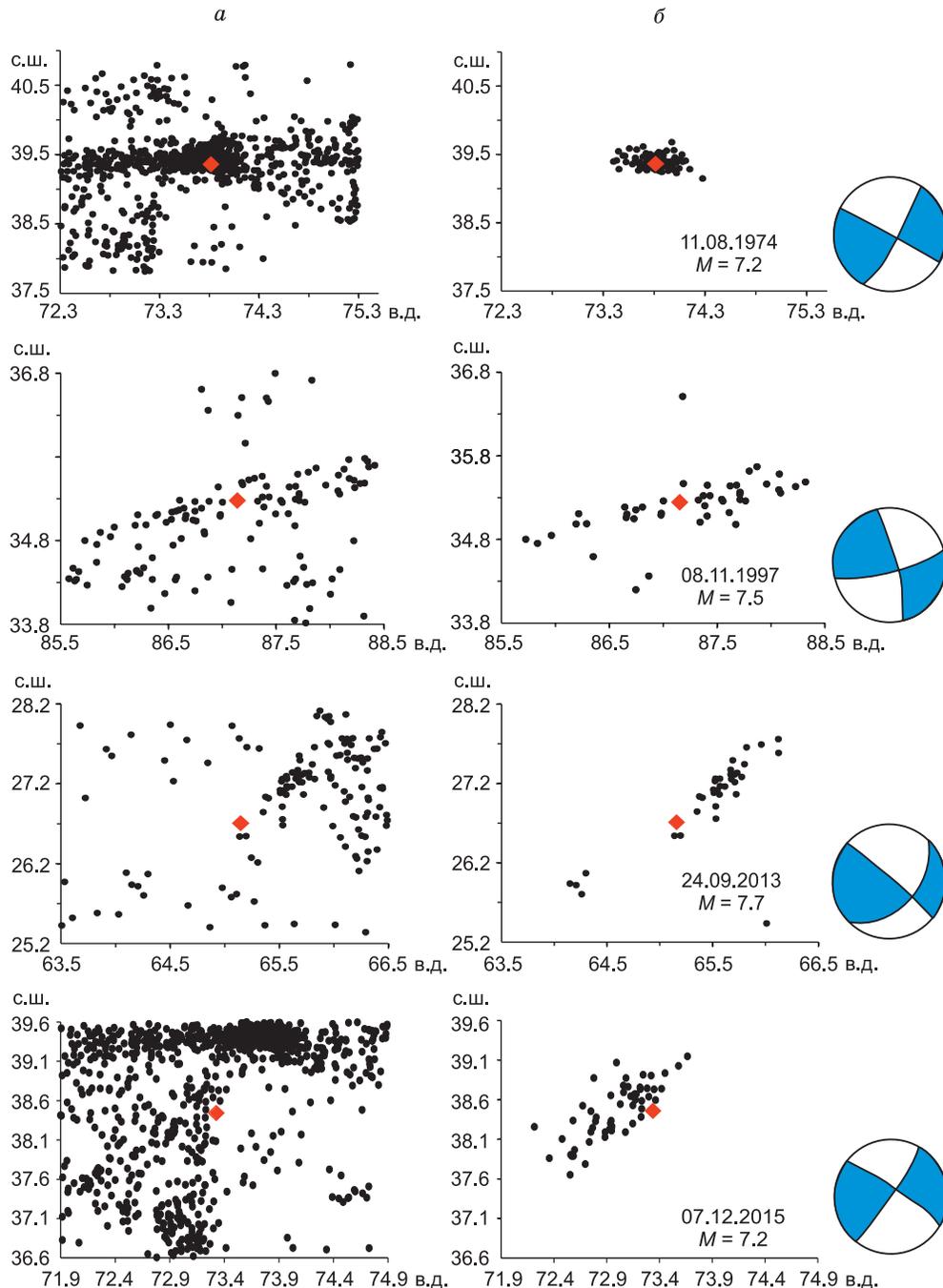


Рис. 2. Распределение землетрясений (слева) и афтершоков (справа) в областях некоторых сильнейших землетрясений. Решения механизмов очагов землетрясений представлены в верхней полушере по данным каталога Global CMT. Красным ромбом показан эпицентр главного землетрясения. Синим цветом закрашены области волн сжатия, белым – волн растяжения.

до главного события и после афтершокового процесса вплоть до 2022 г.

Приведем несколько примеров распределения землетрясений 1973–2022 гг. с $m_{b(\text{ISC})} \geq 4.5$ на площадках $3^\circ \times 3^\circ$ и афтершоковых серий для ряда сильных событий (рис. 2), выделенных из общей сейсмичности.

Остановимся на некоторых используемых в исследовании характеристиках землетрясений. Обычно сейсмологи опираются на величину скалярного сейсмического момента M_0 и моментную магнитуду M_w . Скалярный сейсмический момент: $M_0 = \mu \cdot S \cdot D$, где μ – модуль сдвига горных пород, S – площадь плоскости разрыва в очаге, D – средняя величина подвижки по разрыву. $M_w = 2/3 (\lg M_0 - 16.1)$ [Kanamori, 1977], где M_0 – сейсмический момент, выраженный в дин · см (1 дин · см эквивалентен 10^{-7} Н · м).

Для дальнейшего исследования магнитуды $m_{b(\text{ISC})}$ пересчитаны в моментную магнитуду M_w по формуле $M_w = (m_{b(\text{ISC})} - 1.65)/0.65$, согласно [Das et al., 2011]. Точность расчета M_w , конечно, не идет в сравнение с данными, получаемыми при непосредственном определении по сейсмическим записям. Для определения значения M_0 афтершоков и фоновых событий также можно использовать таблицы Ю.В. Ризниченко с магнитудами землетрясений и их сейсмическими моментами [Ризниченко, 1985]. Затем определялся суммарный скалярный сейсмический момент, высвобождаемый в афтершоковых сериях и в фоновых землетрясениях, $M_{0 \text{ sum af}} = \sum M_{0i}$, $i = 1..n$, где M_{0i} – скалярный сейсмический момент каждого афтершока или фонового землетрясения [Лутиков и др., 2017].

На фоне среза 50 км обобщенной региональной сейсмотомографической модели Азии, построенной на базе региональной томографической инверсии по данным ISC (на основе моделей по событиям 1964–2004 гг. [Koulakov, Bushenkova, 2010; Koulakov, 2011] с добавлением набора данных за 2005–2012 гг.), построены карты-схемы распределений значений суммарных сейсмических моментов фоновых и афтершоковых событий, значений суммарных сейсмических моментов афтершоковой сейсмичности совместно со скалярным сейсмическим моментом главного события, а также совместных значений трех величин: суммарных скалярных сейсмических моментов фоновых и афтершоковых процессов со скалярным сейсмическим моментом главного события. Мы отдаем себе отчет в том, что использовать срез сейсмотомографической модели на глубине 50 км при оценке распределения очагов главных событий в слое 7–35 км формально некорректно, но в целом по территории допустимо, учитывая, что в вертикальном направлении изменения скоростей в модели постепенны, а мощность коры в некоторых районах достигает 70 км, в частности, на Тибете и в Центральном Памире.

ОСОБЕННОСТИ ФОНОВЫХ И АФТЕРШОКОВЫХ ПРОЦЕССОВ

В результате выполненных расчетов составлена таблица с характеристиками сильных землетрясений, суммарными величинами скалярного сейсмического момента афтершоковых серий и фоновой сейсмичности, и совместными значениями трех величин: фоновой сейсмичности с главным событием и афтершоковым процессом. Ранее были проанализированы сильнейшие ($M \geq 7.5$) землетрясения Центральной Азии и их афтершоки, возникшие за последние 50 лет [Кучай, 2023], а также часть значительно более слабых событий [Кучай, 2024]. Некоторые из этих данных представлены в табл. 1 и 2.

Каталог USGS (<https://earthquake.usgs.gov>) содержит данные по сильным землетрясениям Азии с 1901 г., из него были отобраны землетрясения с максимальными значениями магнитуд за период 1901–1973 гг. Проведен временной анализ возникновения сильнейших землетрясений для каждого участка $3^\circ \times 3^\circ$. С 1901 г. до главных толчков происходили землетрясения с меньшими значениями магнитуд (см. табл. 1), тем не менее в шести случаях (до землетрясений 05.01.1991, 27.02.1997, 12.02.2014, 07.12.2015, 21.05.2021 и 16.08.1976) зарегистрированы очаги с большими значениями магнитуд в основном за первый 50-летний период. После афтершоковой деятельности на рассматриваемых площадках только одно землетрясение (27.11.1979) превысило магнитуду главного события (см. табл. 1).

Сведения о магнитудах сильнейших афтершоков каждой серии позволили проанализировать выполнение экспериментального закона Бота [Båth, 1965], согласно которому разность между магнитудой главного события и максимальной магнитудой сильнейшего афтершока близка к единице. По приведенным данным (см. табл. 1), этот параметр меняется в достаточно широких пределах от 0.1 до 2.2. Наименьшие значения (0.1 и 0.5) – у землетрясений, произошедших 27.07.1976 и 27.09.2003 в зоне слабой фоновой сейсмичности (см. табл. 2, рис. 3). Таким образом, экспериментальный закон Бота соблюдается не всегда, на что указывали Р.Э. Татевосян, Ж.Я. Аптекман [2008] при исследовании сильнейших землетрясений в зоне контакта литосферных плит.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Очаги 24 сильных коровых землетрясений на фоне комплексной сейсмотомографической модели Азии (срез глубины 50 км) в основном тяготеют к зонам смены знака аномалий скорости P -волн, три землетрясения регистрируются в зоне пониженных скоростей и четыре – в зоне повышенных скоростей. Определенной закономерности в распределении значений

Таблица 1. Каталог сильнейших землетрясений Центральной Азии ($M \geq 6.9$) с данными о максимальных магнитудах землетрясений, зарегистрированных с 1901 г. до рассматриваемых главных событий, и сильнейших афтершоков в каждой серии

№	Дата	Время	Координаты		M_w (USGS)	H (USGS)	M_w (CMT)	H (CMT)	M_w max (USGS) (год) с 1901 г. до главного события	M_w max (USGS) (год) после афтершоков до 2023 г.	M_w max (USGS) афтершок
			с.ш.	в.д.							
1	06.02.1973	10:37	31.34	100.54	7.4	33	–	–	7.1 (1955)	6.8 (1981)	5.8
2	11.08.1974	1:13	39.36	73.81	7.3	9	–	–	7.2 (1911)	7.2 (2015)	6.1
3	27.07.1976	23:17	39.36	117.85	7.5	23	7.6	15	6.3 (1945)	5.0 (1982)	7.4
4	24.03.1978	21:05	42.81	78.62	7.1	33	6.9	35	6.5 (1970)	6.4 (1990)	5
5	16.09.1978	15:35	33.38	57.33	7.4	33	7.3	11	6.9 (1947)	5.9 (1980)	5
6	27.11.1979	17:10	34.02	59.79	7.1	10	7	25	7.1 (1968)	7.3 (1997)	6
7	28.07.1981	17:22	30.01	57.79	7.1	33	7.2	15	6.1 (1923)	6.6 (1998)	5.1
8	23.08.1985	12:41	39.43	75.41	7	7	6.9	15	6.9 (1955)	6.6 (2016)	5.2
9	06.11.1988	13:03	22.87	99.74	7.7	18	7.3	15	7.3 (1923)	6.8 (1995)	6.4
10	05.01.1991	14:57	23.58	95.86	7	20	6.9	21	7.5 (1946)	6.8 (2012)	5.2
11	19.08.1992	2:04	42.14	73.57	7.3	27	7.2	17	5.9 (1928)	5.5 (2015)	6.6
12	27.02.1997	21:08	29.85	68.19	7.1	33	7.1	15	7.2 (1931)	6.4 (2008)	6
13	10.05.1997	7:57	33.75	59.79	7.3	10	7.2	15	7.1 (1979)	5.8 (2012)	5.4
14	08.11.1997	10:02	35.08	87.41	7.5	33	7.9	16	6.9 (1973)	5.9 (2001)	5.3
15	06.12.2000	17:11	39.47	54.82	7	30	7	33	7.0 (1946)	5.4 (2016)	4.9
16	26.01.2001	3:16	23.38	70.34	7.7	16	7.6	20	6.3 (1940)	5.5 (2006)	5.8
17	14.11.2001	9:45	35.69	93.33	7.8	10	7.8	15	6.4 (1986)	5.6 (2006)	5.6
18	27.09.2003	11:33	49.97	87.76	7.3	16	7.2	15	5.9 (1923)	5.3 (2013)	6.7
19	08.10.2005	3:50	34.49	73.7	7.6	26	7.6	12	6.3 (2002)	5.6 (2019)	5.9
20	20.03.2008	22:32	35.46	81.46	7.2	10	7.1	12	6.5 (1955)	6.9 (2014)	5.6
21	12.05.2008	6:28	30.99	103.39	7.9	19	7.9	13	7.4 (1933)	6.6 (2013)	6.1
22	13.04.2010	23:49	33.14	96.69	6.9	17	6.9	16	6.1 (1915)	5.4 (2021)	6.1
23	24.03.2011	13:55	20.68	99.82	6.9	8	6.8	13	6.9 (1950)	6.1 (2014)	5.7
24	24.09.2013	11:29	26.91	65.53	7.7	15	7.8	12	6.3 (1942)	5.6 (2016)	6.8
25	12.02.2014	9:19	35.9	82.58	6.9	10	6.9	18	7.3 (1924)	6.3 (2020)	5.7
26	25.04.2015	6:11	28.13	84.72	7.8	8	7.9	28	6.9 (1936)	5.3 (2020)	7.3
27	07.12.2015	7:50	38.13	72.89	7.2	22	7.2	12	7.3 (1974)	6.9 (2023)	5.4
28	21.05.2021	18:04	34.6	98.25	7.3	10	7.4	12	7.8 (1937)	4.9 (2022)	5.5
29	16.08.1976	14:06	32.68	104.1	6.9	7.8	6.7	15	7.4 (1933)	6.5 (2017)	6.7
30	24.06.1983	3:28	21.78	103.43	6.9	15	6.2	10	6.8 (1935)	5.7 (2021)	5.1
31	19.11.1996	10:44	35.29	78.14	6.9	35	6.8	15	6.4 (1938)	5.5 (2006)	5.0

Примечание. Прочерк – нет данных.

фоновой сейсмичности за 50-летний период не прослеживается (см. рис. 3, табл. 1). В сопоставлении использованы результаты томографии по P -волнам, поскольку в каталогах ISC данных о временах их прихода значительно больше, и точность получаемых моделей, согласно тестированию, выше, чем по S -волнам.

Распределения фоновой сейсмичности на этой же карте (разные значения и, соответственно, цвета кружков) за 50-летний временной период определенной закономерностью не обладают. Однако заметим, что наибольшие значения суммарных скалярных сейсмических моментов $E+27$ – $E+28$, высвободившихся в процессе реализации фоновой сейсмичности, располагаются в пределах отрицательных аномалий

малой скорости P -волн (Памир, Тянь-Шань), а также вдоль границ смены знака аномалий (Памир, Тибет, Бирмские горы) (см. рис. 3, табл. 2).

Интересные результаты получены при анализе карты значений суммарных скалярных сейсмических моментов афтершоковых последовательностей. Так, в пределах 28 – 39° с.ш. на границах смены знака аномалий скорости P -волн в 13 случаях высвобождаются суммарные величины скалярных сейсмических моментов за счет афтершоковых последовательностей, близких к $E+25$, независимо от магнитуды главного события. Три землетрясения, расположенные на Памире и Тянь-Шане в зоне пониженных значений скорости P -волн, принимают значения, близкие к $E+24$ (см. рис. 4, табл. 2).

Таблица 2. Каталог с данными о величинах скалярного сейсмического момента главных событий $M_{0 \text{ глав}}$, фоновых событий $M_{0i \text{ фон}}$, афтершоковых последовательностей $M_{0i \text{ аф}}$ и совместных значениях трех величин: суммарных скалярных сейсмических моментов фоновых и афтершоковых процессов со скалярным сейсмическим моментом главного события

№	Дата	$M_{0 \text{ глав}}$	$\sum M_{0i \text{ фон}}$	$\sum M_{0i \text{ аф}}$	$\sum M_{0i \text{ аф}} + M_{0 \text{ глав}}$	$\sum M_{0i \text{ фон}} + \sum M_{0i \text{ аф}} + M_{0 \text{ глав}}$	Тип подвижки в очаге
		дин · см					
1	06.02.1973	–	1.2E+27	1.5E+26	–	–	–
2	11.08.1974	–	2.5E+27	1.9E+26	–	–	Сдвиг
3	27.07.1976	2.77E+27	4.7E+24	2.8E+25	2.798E+27	2.8E+27	Сдвиго-сброс
4	24.03.1978	2.54E+26	7.8E+26	8.8E+24	2.63E+26	1.04E+27	Сдвиго-надвиг
5	16.09.1978	1.32E+27	1.2E+26	1.3E+25	1.33E+27	1.45E+27	Надвиг
6	27.11.1979	4.61E+26	7.7E+26	6.9E+25	5.3E+26	1.3E+27	Сдвиг
7	28.07.1981	9.01E+26	8.1E+27	4.1E+25	9.42E+26	9E+27	Пологий надвиг по одной плоскости, взброс по другой
8	23.08.1985	3.29E+26	9.1E+26	7.8E+24	3.37E+26	1.25E+27	Сдвиго-надвиг по одной плоскости, взброс – по другой
9	06.11.1988	3.66E+26	7.3E+26	5.0E+26	8.66E+26	1.6E+27	Сдвиг
10	05.01.1991	3.11E+26	7.4E+26	4.9E+24	3.16E+26	1.05E+27	Сдвиго-надвиг
11	19.08.1992	7.68E+26	1.2E+27	7.0E+26	1.468E+27	2.66E+27	Надвиг
12	27.02.1997	5.2E+26	7.1E+26	9.6E+25	6.16E+26	1.32E+27	Надвиг и взброс
13	10.05.1997	7.35E+26	8.3E+26	7.3E+24	7.42E+26	1.57E+27	Сдвиг
14	08.11.1997	2.23E+27	2.6E+26	1.2E+25	2.24E+27	2.5E+27	Сдвиг
15	06.12.2000	3.9E+26	3.0E+25	9.0E+24	3.99E+26	4.29E+26	Надвиг
16	26.01.2001	3.43E+27	1.2E+25	7.9E+25	3.51E+27	3.51E+27	Надвиг
17	14.11.2001	5.9E+27	2.6E+26	4.8E+25	5.94E+27	6.2E+27	Сдвиг
18	27.09.2003	9.38E+26	7.9E+24	6.2E+26	1.558E+27	1.63E+27	Сдвиг
19	08.10.2005	2.94E+27	7.6E+26	5.7E+26	3.51E+27	4.27E+27	Надвиг
20	20.03.2008	5.43E+26	7.4E+26	2.4E+25	5.67E+26	1.3E+27	Сброс
21	12.05.2008	8.97E+27	8.8E+26	5.7E+26	9.54E+27	1.04E+28	Сдвиго-надвиг
22	13.04.2010	2.53E+26	9.8E+25	4.3E+25	2.96E+26	3.94E+26	Сдвиг
23	24.03.2011	2.26E+26	4.4E+27	3.2E+26	3.46E+26	4.74E+27	Сдвиг
24	24.09.2013	5.59E+27	3.1E+26	4.7E+26	6.06E+27	6.37E+27	Взброс и надвиг
25	12.02.2014	2.87E+26	6.0E+27	1.8E+25	3.05E+26	6.3E+27	Сдвиг
26	25.04.2015	8.39E+27	6.1E+26	1.7E+27	1.009E+28	1.02E+28	Взброс и надвиг
27	07.12.2015	7.63E+26	3.1E+27	7.3E+24	7.7E+26	3.87E+27	Сдвиг
28	21.05.2021	1.66E+27	7.2E+24	3.2E+25	1.69E+27	1.7E+27	Сдвиго-надвиг
29	16.08.1976	1.29E+26	1.2E+28	8.1E+27	8.23E+27	2.02E+28	Надвиг
30	24.06.1983	2.84E+25	1.1E+27	1.66E+25	4.5E+25	1.104E+27	Сдвиг
31	19.11.1996	2.37E+26	4.19E+26	1.3E+25	2.5E+26	6.69E+26	Сдвиг

Примечание. Суммарной величине скалярного сейсмического момента фоновой сейсмичности E+26–E+27 соответствует диапазон афтершоковых серий E+24–E+26. Прочерк – нет данных.

В результате расчетов обнаружена следующая особенность: при высвобождении скалярных сейсмических моментов в процессе афтершоковой деятельности совместно с главным событием получены два значения (E+26 и E+27) (см. рис. 5, табл. 2). Так, землетрясения и их афтершоки с большими значениями располагаются в областях положительных аномалий скорости *P*-волн (Тибет) и контрастных зонах смены знака аномалий, а с меньшими значениями – в пределах областей отрицательных аномалий скорости *P*-волн (Памир, Тянь-Шань) и на границах смены знака аномалий.

На карте (см. рис. 6, табл. 2) цветом кружков показана высвободившаяся за 50-летний период совокупная суммарная величина скалярных сейсмических моментов при развитии афтершоковых последовательностей, фоновых событий и сильнейших землетрясений. Преимущественные значения соответствуют E+27. Участки, где отображается эта величина, располагаются как в зонах относительно пониженных, так и повышенных значений скорости *P*-волн. Надо отметить, что повышенные значения величин скалярных сейсмических моментов (E+28) характерны для зон смены знака аномалий и областей повышенных значений скорости *P*-волн.

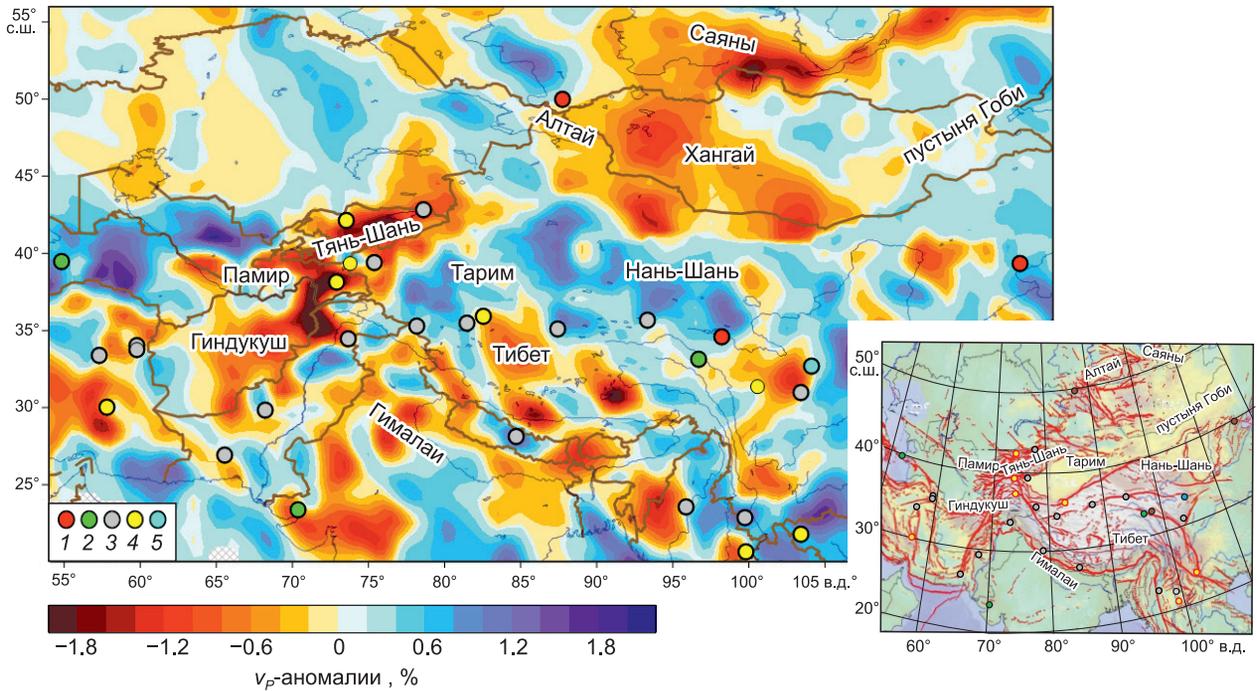


Рис. 3. Распределение значений суммарных скалярных сейсмических моментов фоновых событий с $m_{b(isc)} \geq 4.5$, высвободившихся в пределах выделенных областей ($3^\circ \times 3^\circ$) вокруг главных событий, на карте аномалий скоростей P -волн (срез глубины 50 км, слева) и на карте сети разломов (красные линии, по [Бачманов и др., 2017], справа). Здесь и на рис. 4–6: кружками обозначены эпицентры главных землетрясений; $\sum M_{0i \text{ фон}}$ (суммы скалярных сейсмических моментов фоновых землетрясений, дин·см) показаны цветом с округлением значений: 1 – до E+24, 2 – до E+25, 3 – до E+26, 4 – до E+27, 5 – до E+28 (см. табл. 2).

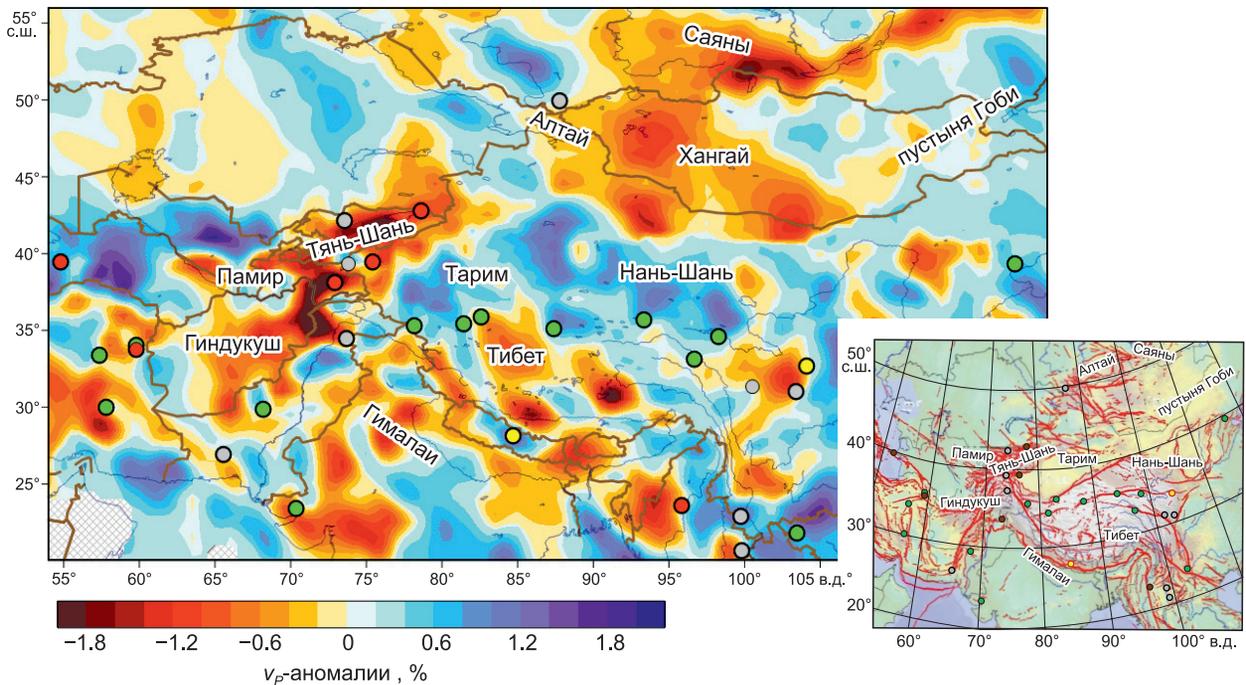


Рис. 4. Распределение значений суммарных скалярных сейсмических моментов афтершоковых последовательностей с $m_{b(isc)} \geq 4.5$, высвободившихся в пределах выделенных областей ($3^\circ \times 3^\circ$), на карте аномалий скоростей P -волн (срез глубины 50 км, слева) и на карте сети разломов (красные линии, по [Бачманов и др., 2017], справа); значения суммарных скалярных сейсмических моментов ($\sum M_{0i \text{ аф}}$, дин·см) показаны цветом с округлением значений (аналогично рис. 3).

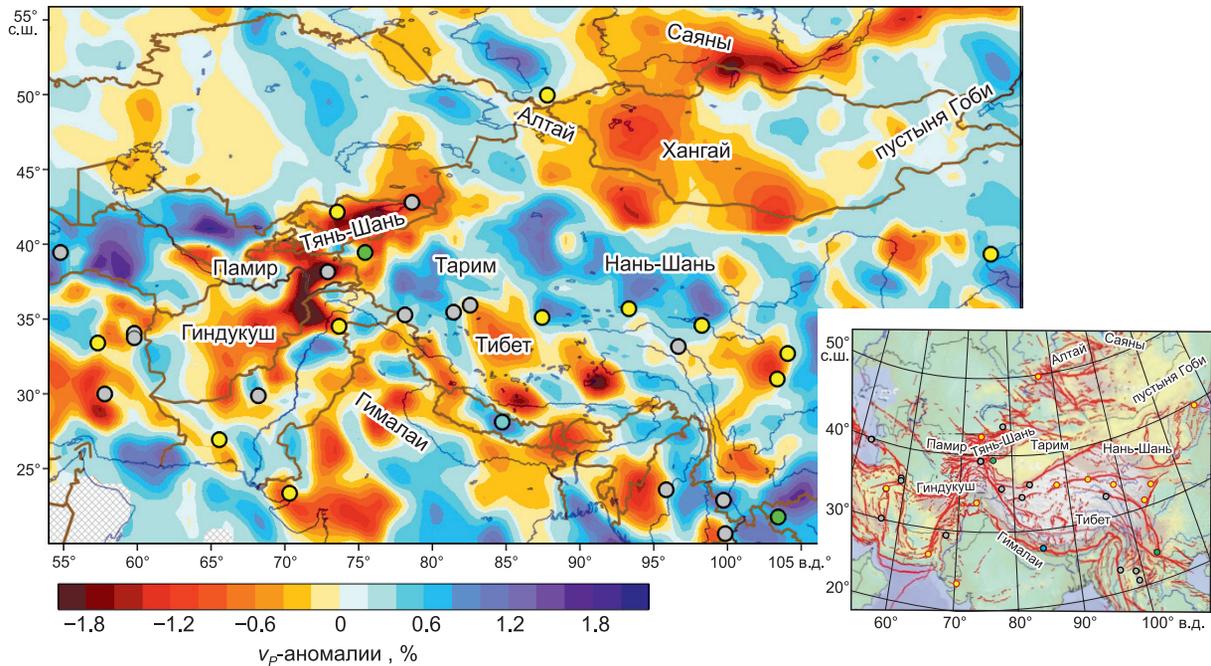


Рис. 5. Распределение значений суммарных скалярных сейсмических моментов афтершоковых последовательностей с $m_{b(isc)} \geq 4.5$ в комплексе со значениями скалярного сейсмического момента главных событий на карте аномалий скоростей P -волн (срез глубины 50 км, слева) и на карте сети разломов (красные линии, по [Бачманов и др., 2017], справа); значения суммарных скалярных сейсмических моментов ($\sum M_{0i\text{ аф}} + M_{0i\text{ глав}}$, дин · см) показаны цветом с округлением значений (аналогично рис. 3).

Таким образом, детальный анализ распределения суммарных скалярных сейсмических моментов фоновой сейсмичности, афтершоковых серий, главных событий и их совместных значений при сопоставлении с полем аномалий скоростей P -волн показывает, что подавляющее большинство сильных землетрясений проявляется в зоне смены знака аномалий скоростей P -волн, и каждое сильное землетрясение возникает в определенной тектонической обстановке, соответственно, каждая афтершоковая последовательность развивается по-особенному, также существенно различается и фоновая сейсмичность в очаговых областях сильных землетрясений. Кроме того, в региональных томографических построениях области смены знака аномалий скоростей P -волн на литосферных глубинах чаще всего маркируют глубинные разломы (например, Авачинский трансформный разлом и/или разломы на границах грабеноподобной структуры в центральной зоне Камчатки [Bushenkova et al., 2023; Бушенкова, Кучай, 2023]), поэтому приуроченность большинства сильнейших землетрясений к таким областям говорит об активации зон разломов, проникающих в литосферную мантию.

На рисунке 7 представлена диаграмма, построенная нами на основе значений из табл. 2. Диаграмма выполнена с учетом коэффициентов (например, $1.45E+27$), рассчитанных с использованием значений суммарных скалярных сейсмических моментов, высвободившихся при развитии комплекса событий

(фоновых, главных очагов и афтершоков) по отношению к значениям только главных событий.

Для областей ($3^\circ \times 3^\circ$), где наблюдаются близкие значения скалярного сейсмического момента главного события и суммарного скалярного сейсмического момента, высвободившегося в процессе реализации фоновой и афтершоковой сейсмичности совместно с главным событием (см. табл. 2, даты: 27.07.1976, 16.09.1978, 26.01.2001, 14.11.2001, 12.05.2008, 24.09.2013), мы предполагаем, что произошла реализация предельной магнитуды за 100-летний период (см. табл. 1) в связи с тем, что в очаговой области отмечены низкие значения фоновых и афтершоковых событий и накопленные напряжения могли сняться именно за счет сильнейших землетрясений.

В недавно опубликованном исследовании В.Г. Трифонов с соавторами [2021] также показали, что особенности активной тектоники Азии связаны со строением верхней мантии, поэтому мы проанализировали, как связаны характеристики отобранных нами сильнейших землетрясений со строением верхней мантии, полученным в этой работе. На схему строения верхней мантии и переходного слоя кора–мантия в Центральной Азии на глубине 67 км были нанесены эпицентры сильнейших землетрясений за последние 50 лет (см. табл. 1) с обозначением величины суммарного скалярного сейсмического момента афтершоковой последовательности (рис. 8). При таком сопоставлении хорошо видно, что суммарные ска-

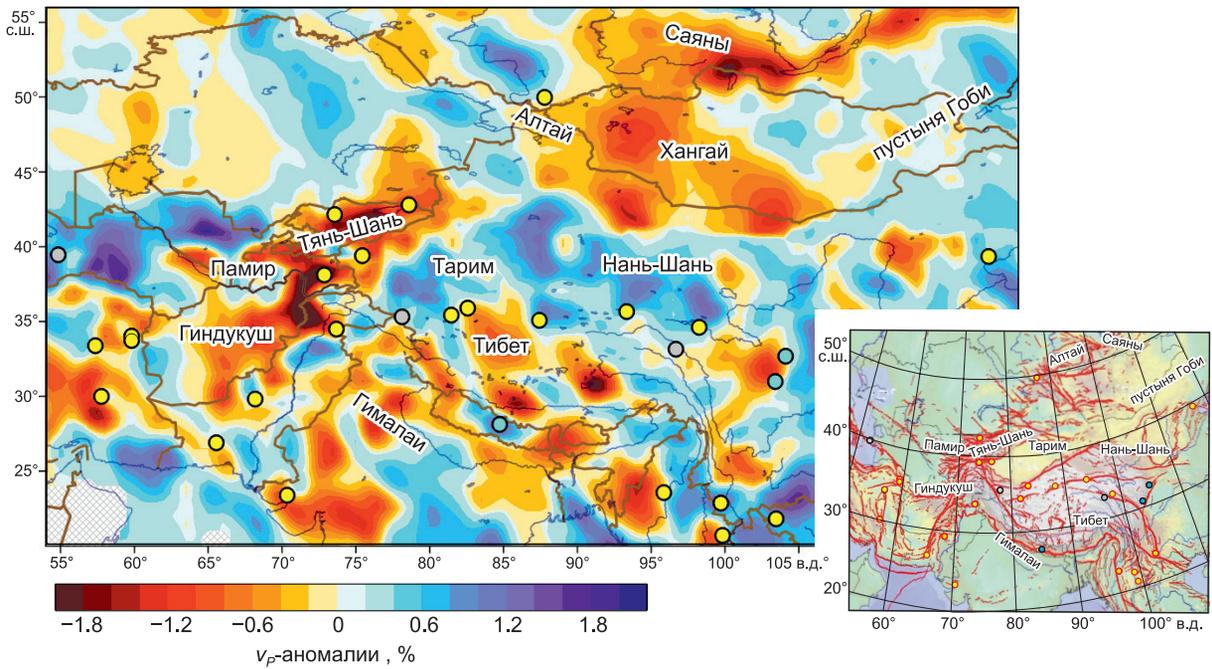


Рис. 6. Распределение значений суммарных скалярных сейсмических моментов, высвободившихся при развитии фоновых событий в комплексе с суммарными скалярными сейсмическими моментами афтершоковых последовательностей и значениями скалярных сейсмических моментов главных событий на карте аномалий скоростей P -волн (срез глубины 50 км, слева) и на карте сети разломов (красные линии, по [Бачманов и др., 2017], справа); значения суммарных скалярных сейсмических моментов ($\sum M_{0i \text{ фон}} + \sum M_{0i \text{ аф}} + M_{0i \text{ глав}}$, дин·см) показаны цветом с округлением значений (аналогично рис. 3).

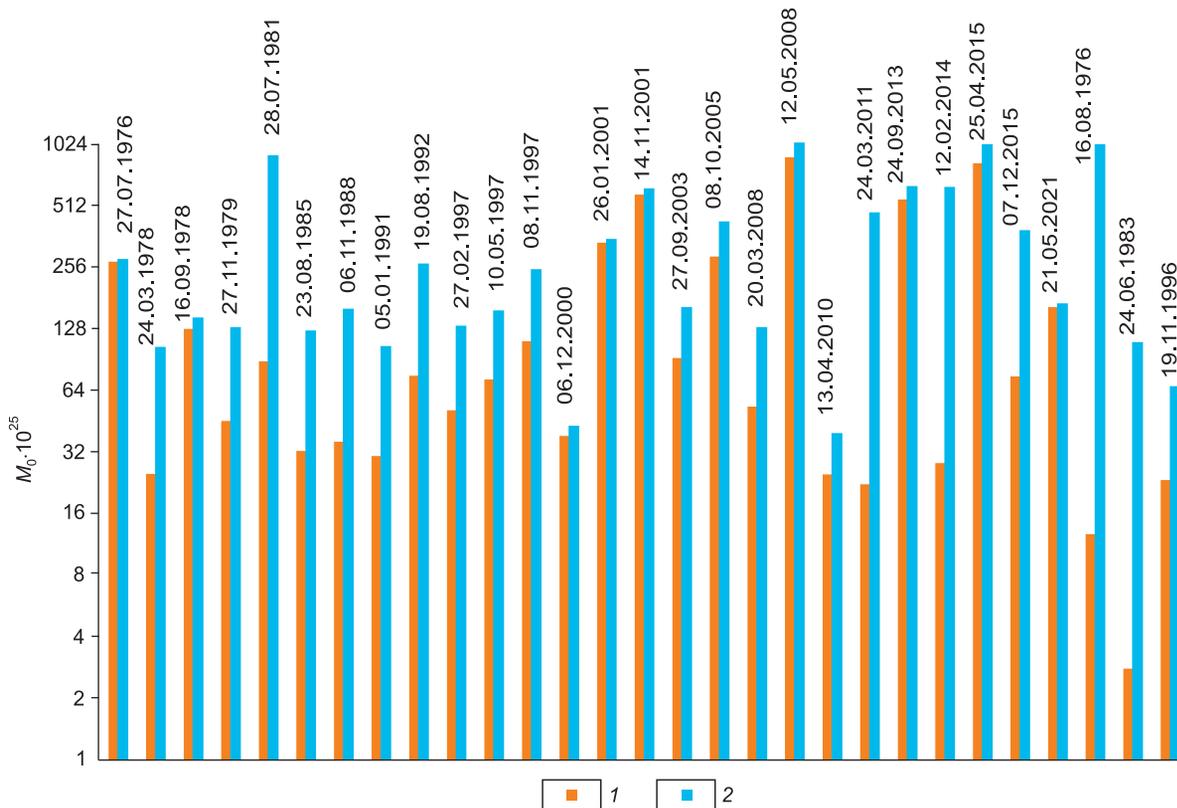


Рис. 7. Диаграмма суммарных величин скалярных моментов. 1 – суммарные величины скалярных сейсмических моментов фоновой сейсмичности и афтершоковых последовательностей совместно со скалярными сейсмическими моментами главных событий, 2 – скалярные сейсмические моменты сильнейших землетрясений.

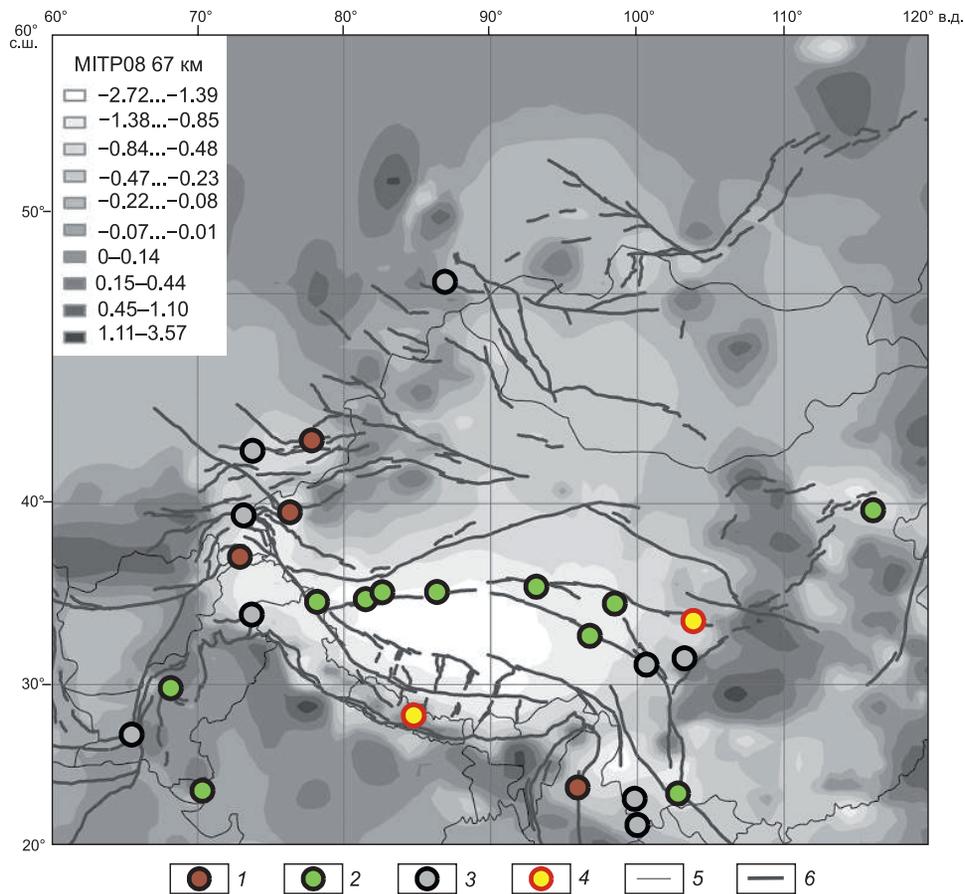


Рис. 8. Распределение эпицентров (показаны кружками) сильнейших землетрясений за последние 50 лет на фоне модели аномалий скорости P -волн в верхней мантии на глубине 67 км [Трифонов и др., 2021], значения суммарных скалярных сейсмических моментов (дин·см) афтершоковых последовательностей показаны цветом с округлением значений: 1 – до $E+24$, 2 – до $E+25$, 3 – до $E+26$, 4 – до $E+27$ (см. табл. 2), 5 – границы, 6 – разломы.

лярные сейсмические моменты афтершоков с величиной $E+25$ фиксируются в зоне наиболее пониженных значений скоростей P -волн в районе Тибета. Афтершоковые последовательности с другими величинами ($E+24$ и $E+26$) имеют место как в зоне отрицательных, так и положительных значений аномалий скоростей P -волн.

На следующем этапе исследования привлекались механизмы очагов сильнейших землетрясений, которые были разделены на три группы по положению осей напряжений P и T (Global CMT, www.globalcmt.org): надвиги и сдвиго-надвиги, сбросы и сдвиго-сбросы, сдвиги (см. табл. 2, рис. 9).

В результате сопоставления типов подвижек в очагах землетрясений и суммарной величины скалярного сейсмического момента афтершоковых последовательностей выявлено, что для очагов со сдвиговой подвижкой суммарные значения сейсмических моментов афтершоковых серий различны даже при близких значениях магнитуд главных событий, аналогичная ситуация наблюдается и для землетрясений с надвиговым и сдвиго-надвиговым характером смещения в очаге (см. табл. 2). При этом землетрясе-

ния сбросового и сдвиго-сбросового типов имеют достаточно близкие значения суммарных скалярных сейсмических моментов афтершоковых серий. Следовательно, характер подвижек в очагах не оказывает заметного влияния на уровень суммарной величины скалярного сейсмического момента афтершоковой деятельности. По всей видимости, типы подвижек в очагах сильнейших землетрясений Центральной Азии связаны в основном с напряженно-деформированным состоянием региона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ фоновой и афтершоковой сейсмичности осуществлен на площадках ($3^\circ \times 3^\circ$) с $m_{b(\text{fsc})} \geq 4.5$ для 31 сильнейшего внутриплитного корового землетрясения ($M_w \geq 6.9$), зарегистрированного на территории Центральной Азии в пределах $20^\circ\text{--}55^\circ$ с.ш. и $55^\circ\text{--}120^\circ$ в.д. за временной период 1973–2022 гг. Полученные таким образом значения суммарной величины скалярных сейсмических моментов фоновой сейсмичности, афтершоковой деятельности и скалярных сейсмических моментов главных событий фиксировались

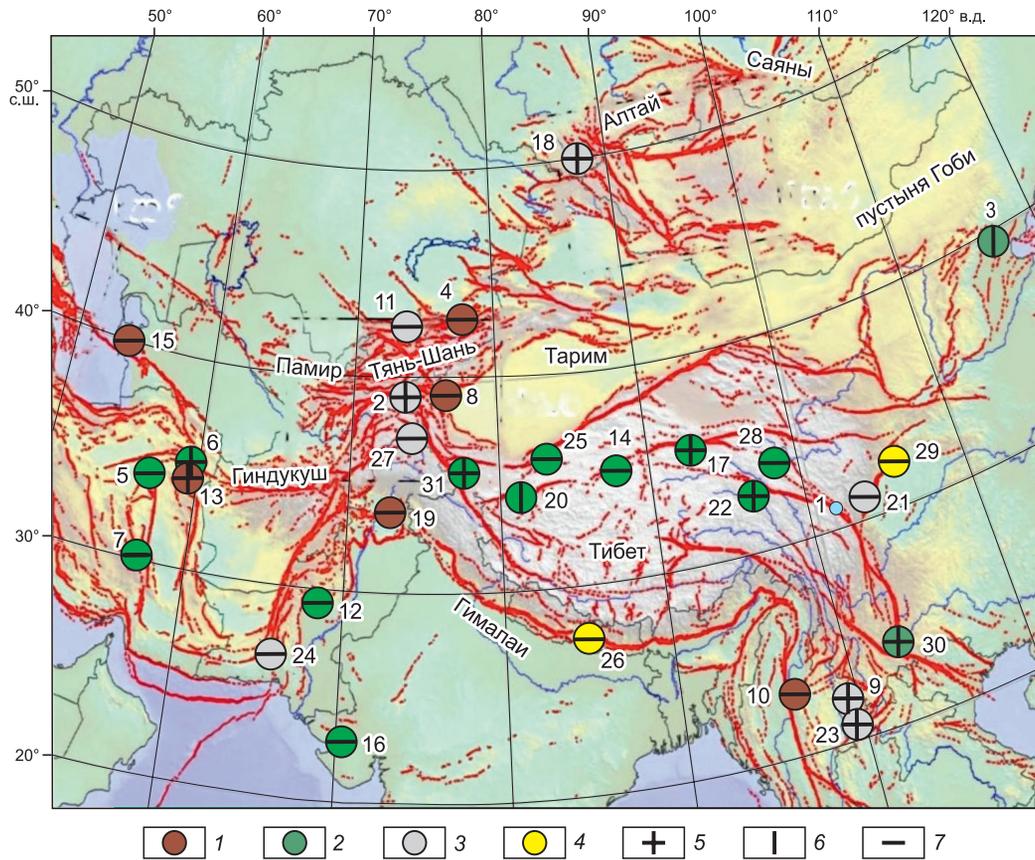


Рис. 9. Распределение эпицентров (показаны кружками) и механизмов очагов сильнейших землетрясений за последние 50 лет на карте сети разломов (красные линии, по [Бачманов и др., 2017]), значения суммарных скалярных сейсмических моментов (дин·см) показаны цветом с округлением значений: 1 – до E+24, 2 – до E+25, 3 – до E+26, 4 – до E+27 (см. табл. 2), 5 – сдвиг, 6 – сброс, 7 – надвиг. Голубым кружком отмечено землетрясение с неопределенным механизмом очага.

на карте на фоне среза 50 км комплексной сейсмо-мографической модели Азии.

Получено, что очаги 24 сильных коровых землетрясений в основном тяготеют к зонам смены знака аномалий скорости *P*-волн, три землетрясения регистрируются в зоне пониженных скоростей и четыре землетрясения – в зоне повышенных скоростей. Наибольшие значения суммарных скалярных сейсмических моментов, высвободившихся в процессе реализации фоновой сейсмичности, располагаются в пределах отрицательных аномалий скоростей *P*-волн, а также вдоль границ смены знака аномалий. При высвобождении скалярных сейсмических моментов в процессе афтершоковой и фоновой деятельности совместно с главным событием преимущественные значения остаются в пределах E+27. Надо отметить, что повышенные значения (E+28) характерны в зоне смены знака аномалий и в области повышенных значений скорости *P*-волн. Из этого следует, что каждое сильное внутриплитное землетрясение Центральной Азии возникает в определенной тектонической обстановке, о чем свидетельствуют механизмы очагов сильнейших землетрясений, соответственно, каждая

афтершоковая последовательность развивается по-особенному, как и фоновая сейсмичность.

Предполагается, что произошла реализация предельной магнитуды за 100-летний период (1901–2022 г.) для шести областей (3° × 3°), в связи с тем, что в их очаговой области отмечены низкие значения суммарных скалярных сейсмических моментов фоновых и афтершоковых событий, и снятие накопленных напряжений могло осуществиться именно за счет сильнейших землетрясений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке проектов ФНИ FWZZ-2022-0021 и FWZZ-2022-0017.

ЛИТЕРАТУРА

- Арефьев С.С. (2003). Эпицентральные сейсмические исследования. М., ИКЦ «Академкнига», 375 с.
- Баранов С.В., Шебалин П.Н. (2018). Оценивание области афтершоковой активности по информации об основном толчке // Геофизические исследования, т. 19, № 2, с. 34–56, DOI: 10.21455/gr2018.2-2.

- Баранов С.В., Шебалин П.Н. (2019а).** Глобальная статистика афтершоков сильных землетрясений: независимость времен и магнитуд // *Вулканология и сейсмология*, № 2, с. 67–76, DOI: [10.31857/S0205-96142019267-76](https://doi.org/10.31857/S0205-96142019267-76).
- Баранов С.В., Шебалин П.Н. (2019б).** Закономерности постсейсмических процессов и прогноз опасности сильных афтершоков. М., РАН, 217 с.
- Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. (2017).** База данных активных разломов Евразии // *Геодинамика и тектонофизика*, т. 8, № 4, с. 711–736, DOI: [10.5800/GT-2017-8-4-0314](https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0314).
- Бушенкова Н.А., Кучай О.А. (2023).** Структура краевых областей Малко-Петропавловской разломной зоны по данным локальной сейсмотомографии и механизмам очагов землетрясений // *Геология и геофизика*, т. 64, № 10, с. 1485–1496, DOI: [10.15372/GiG2023130](https://doi.org/10.15372/GiG2023130), EDN: CPNMVS.
- 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. (2004).** Чуйское землетрясение и его афтершоки // *ДАН. Науки о Земле*, т. 395, № 4, с. 534–536.
- Жалковский Н.Д., Мучная В.И. (1984).** О пространственных и временных распределениях афтершоков // *Геология и геофизика*, № 8, с. 108–117.
- Жалковский Н.Д., Мучная В.И. (1995).** Зависимость интенсивности процесса афтершоков от уровня фоновой сейсмичности очаговых зон // *Геология и геофизика*, т. 36, № 1, с. 126–129.
- Завьялов А.Д., Зотов О.Д. (2021).** Новый способ определения характерного размера очаговой зоны // *Вулканология и сейсмология*, № 1, с. 22–29, DOI: [10.31857/S0203030621010065](https://doi.org/10.31857/S0203030621010065).
- Кучай О.А. (2012).** Особенности поля напряжений афтершоковых процессов землетрясений Алтае-Саянской горной области // *Геодинамика и тектонофизика*, т. 3, № 1, с. 59–68, EDN: PBPJRR.
- Кучай О.А. (2023).** Афтершоковые последовательности сильнейших внутриплитных землетрясений и фоновые события на территории Центральной Азии // *Геофизические технологии*, № 3, с. 36–45, DOI: [10.18303/2619-1563-2023-3-36](https://doi.org/10.18303/2619-1563-2023-3-36).
- Кучай О.А. (2024).** Умеренно сильные землетрясения и их афтершоки ($M_W = 6.7–6.9$) // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь – XX Международный научный конгресс. Международная научная конференция «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология»*. Сборник материалов. Новосибирск, СГУГиТ, т. 2, № 2, с. 160–167, DOI: [10.33764/2618-981X-2024-2-2-160-167](https://doi.org/10.33764/2618-981X-2024-2-2-160-167).
- Кучай О.А., Кальметьева З.А., Козина М.Е., Абдрахматов К.Е. (2017).** Поля напряжений по афтершокам сильнейших землетрясений Тянь-Шаня // *Геодинамика и тектонофизика*, т. 8, № 4, с. 827–848, DOI: [10.5800/GT-2017-8-4-0319](https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0319).
- Лутиков А.И., Родина С.Н. (2013).** Временные и энергетические параметры афтершокового процесса Курило-Камчатских землетрясений // *Геофизические исследования*, т. 14, № 4, с. 23–35.
- Лутиков А.И., Донцова С.Н., Родина С.Н. (2017).** Временные и энергетические параметры афтершокового процесса землетрясений Кавказа и сопредельных территорий // *Геофизические исследования*, т. 18, № 1, с. 20–36, DOI: [10.21455/gr2017.1-2](https://doi.org/10.21455/gr2017.1-2).
- Радзиминович Н.А., Очковская М.Г. (2013).** Выделение афтершоковых и роевых последовательностей землетрясений Байкальской рифтовой зон // *Геодинамика и тектонофизика*, т. 4, № 2, с. 169–186, EDN: QBAQJR.
- Ребецкий Ю.Л., Маринин А.В. (2006).** Поле напряжений до Суматра-Андаманского землетрясения 26.12.2004. Модель метастабильного состояния горных пород // *Геология и геофизика*, т. 47, № 11, с. 1192–1206, EDN: NDLLJR.
- Ребецкий Ю.Л., Полец А.Ю. (2014).** Напряженное состояние литосферы Японии перед катастрофическим землетрясением Тохоку 11.03.2011 г. // *Геодинамика и тектонофизика*, т. 5, № 2, с. 469–506, DOI: [10.5800/GT-2014-5-2-0137](https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0137).
- Ризниченко Ю.В. (1985).** Проблемы сейсмологии. Избранные труды. М., Наука, 408 с.
- Родкин М.В., Андреева М.Ю., Григорьева О.О. (2020).** Анализ обобщенной окрестности сильного землетрясения по региональным данным, Курило-Камчатский регион // *Вулканология и сейсмология*, № 6, с. 67–77, DOI: [10.31857/S0203030620060176](https://doi.org/10.31857/S0203030620060176).
- Ромашкова Л.Л., Кособоков В.Г. (2001).** Динамика сейсмической активности до и после сильнейших землетрясений мира, 1985–2000 // *Вычислительная сейсмология*, № 32, с. 162–189.
- Смирнов В.Б., Пономарёв А.В. (2020).** Физика переходных режимов сейсмичности. М., РАН, 412 с.
- Татевосян Р.Э., Аптекман Ж.Я. (2008).** Этапы развития афтершоковых последовательностей сильнейших землетрясений мира // *Физика Земли*, № 12, с. 3–23.
- Тихоцкий С.А., Татевосян Р.Э., Ребецкий Ю.Л., Овсяченко А.Н., Ларьков А.С. (2023).** Караманмарашские землетрясения 2023 г. в Турции: сейсмическое движение по сопряженным разломам // *Докл. РАН. Науки о Земле*, т. 511, № 2, с. 228–235, DOI: [10.31857/S2686739723600765](https://doi.org/10.31857/S2686739723600765).
- Трифонов В.Г., Зеленин Е.А., Соколов С.Ю., Бачманов Д.М. (2021).** Активная тектоника Центральной Азии // *Геотектоника*, № 3, с. 60–77, DOI: [10.31857/S0016853X21030097](https://doi.org/10.31857/S0016853X21030097).
- Шебалин П.Н., Баранов С.В. (2019).** О прогнозировании афтершоковой активности. 5. Оценка длительности опасного периода // *Физика Земли*, № 5, с. 22–37, DOI: [10.31857/S0002-33372019522-37](https://doi.org/10.31857/S0002-33372019522-37).
- Шебалин П.Н., Баранов С.В., Дзедобоев Б.А. (2018).** Закон повторяемости количества афтершоков // *ДАН*, т. 481, № 3, с. 320–323, DOI: [10.31857/S086956520001387-8](https://doi.org/10.31857/S086956520001387-8).
- Båth M. (1965).** Lateral inhomogeneities of the upper mantle // *Tectonophysics*, v. 2 (6), p. 483–514, DOI: [10.1016/0040-1951\(65\)90003-X](https://doi.org/10.1016/0040-1951(65)90003-X).
- Bushenkova N., Koulakov I., Bergal-Kuvikas O., Shapiro N., Gordeev E., Chebrov D., Abkadyrov I., Jakovlev A., Stupina T., Novgorodova A., Droznina S., Huang H. (2023).** Connections between arc volcanoes in Central Kamchatka and the subducting slab inferred from local earthquake seismic tomography // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, v. 435, 107768, DOI: [10.1016/j.jvolgeores.2023.107768](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107768).
- Das R., Wason H.R., Sharma M.L. (2011).** Global regression relations for conversion of surface wave and body wave magnitudes to moment magnitude // *Nat. Hazards*, v. 59, p. 801–810, DOI: [10.1007/s11069-011-9796-6](https://doi.org/10.1007/s11069-011-9796-6).
- Kanamori H. (1977).** The energy release in great earthquakes // *J. Geophys. Res.*, v. 82 (20), p. 2981–2987, DOI: [10.1029/JB082i020p02981](https://doi.org/10.1029/JB082i020p02981).
- Koulakov I. (2011).** High-frequency P and S velocity anomalies in the upper mantle beneath Asia from inversion of worldwide traveltimes data // *J. Geophys. Res.*, v. 116 (B4), B04301, DOI: [10.1029/2010JB007938](https://doi.org/10.1029/2010JB007938).
- Koulakov I., Bushenkova N. (2010).** Upper mantle structure beneath the Siberian craton and surrounding areas based on regional tomographic inversion of P and PP travel times // *Tectonophysics*, v. 486 (1–4), p. 81–100, DOI: [10.1016/j.tecto.2010.02.011](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.02.011).