

УДК 550.348. (470.62)

СПЕКТРАЛЬНЫЕ и ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА в 2021 году

И.П. Габсатарова, А.С. Зверева

ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия, ira@gstras.ru

Аннотация. Определены спектральные параметры очагов 42 землетрясений Северного Кавказа с $K_p=9.0-12.9$ за 2021 год. Параметры определялись по спектрам смещения S -волн на записях станций, удаленных от эпицентров землетрясений на 50–250 км. Расчет очаговых спектров проводился в программе SEISAN с использованием частотно-зависимой добротности $Q(f)$. Получены значения спектральной плотности Ω_0 , угловой частоты f_0 и динамических параметров очагов – скалярного сейсмического момента M_0 , сброшенного напряжения $\Delta\sigma$, моментной магнитуды M_w , а также доверительные интервалы для каждого из параметров. Для 31 землетрясения Северного Кавказа с $K_p=9.0-12.9$ и одного землетрясения с $K_p=13.0$ на территории Армении рассчитаны механизмы очагов, из них 72% представлены взбросами (включая сдвиго-взбросы), 9% – сбросами (включая сдвиго-сбросы) и 19% – сдвигами (включая взбросо- и сбросо-сдвиги). Такие типы механизмов согласуются с кинематикой активных глубинных разломов, оцененной по геологическим признакам в базе данных активных разломов (БД AFEAD), и в целом с характером деформационных процессов в зоне коллизии Аравийской и Евразийской плит.

Ключевые слова: модель Брюна, сейсмический момент, сброшенное напряжение, длина разрыва, динамические параметры очага, SEISAN, механизм очага, взброс, сброс, сдвиг, Северный Кавказ.

Для цитирования: Габсатарова И.П., Зверева А.С. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Северного Кавказа в 2021 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2025. – Вып. 28 (2021). – С. 238–247. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2025.28.22> EDN: RPXHUJ

Введение. Как отмечено в [1, 2], количественная оценка спектральных и очаговых параметров землетрясений важна для полноты представления о процессах в очагах, особенно такого сложного в тектоническом отношении региона, как Северный Кавказ. В 2021 г. регион характеризовался умеренной сейсмичностью [3, Приложение 2], основная часть относительно сильных землетрясений произошла в восточной части Северного Кавказа. Интерпретация станционных и очаговых спектров проводилась с использованием теоретической дислокационной модели Брюна [4], которая традиционно используется во многих регионах для получения спектральных и динамических параметров очагов слабых и умеренных землетрясений. Сочетание оценок спектральных параметров с параметрами механизмов очагов расширяет наши знания об очаговых процессах. В 2021 г. построены механизмы очагов для 32 землетрясений с использованием знаков первых вступлений в P -волне, проведена их интерпретация с установлением типов движений в очагах и сопоставлением с известной кинематикой активных разломов в регионе.

Составление представительного каталога землетрясений является одним из основных результатов проведения сейсмологических наблюдений в регионе, а большой объем накопленных данных позволяет проводить расчет инструментальных, а не пересчетных энергетических оценок землетрясений. Локальная магнитуда вошла в перечень стандартных типов магнитуд, определенных Рабочей Группой IASPEI, как представлено в NMSOP (новом руководстве по обработке результатов сейсмических наблюдений) [5]. Разработанная шкала (калибровочная функция) для определения локальной магнитуды ML землетрясений Северного Кавказа позволила начать расчет локальной магнитуды для землетрясений территории Северного Кавказа с учетом затухания и геометрического расхождения [6]. Прямое инструментальное определение ML и M_w позволяет более точно оценивать силу землетрясений.

Таким образом, целью настоящей статьи является комплексный анализ полученных спектральных, очаговых параметров, магнитудных определений и механизмов очагов землетрясений 2021 г. для пополнения ранее созданной базы данных и расширения информативности каталога землетрясений Северного Кавказа.

Исходные данные. Для исследования было выбрано 42 наиболее сильных ($K_p=9.0-12.9$) землетрясения Северного Кавказа за 2021 г. (рис. 1). Параметры гипоцентров этих землетрясений были определены по данным региональных сетей сейсмических станций Северо-Осетинского филиала (NOGSR), Дагестанского филиала (DAGSR) и Центрального отделения ФИЦ ЕГС РАН (OBGSR) ([Приложение 2] к [3]). Для расчета локальной магнитуды ML использовались записи

землетрясений с гипоцентрными расстояниями $r=50-500$ км, для спектрального анализа – с $r=50-250$ км соответственно.

Методика спектрального анализа. Проведение спектрального анализа включает в себя расчет стационарных спектров, приведение их к очаговым спектрам за счет введения поправок за влияние прибора и затухание сейсмических волн, аппроксимацию спектров согласно модели Брюна [4] для определения спектральных параметров очагов, таких как значения спектральной плотности Ω_0 и угловой частоты f_0 . Эти оценки используются для определения очаговых параметров, включающих скалярные сейсмические моменты M_0 , сброшенное напряжение $\Delta\sigma$ и моментную магнитуду M_w , являющуюся наиболее предпочтительной магнитудой в каталогах землетрясений, как рекомендовано IASPEI [5]. По записям сильнейших землетрясений (рис. 1) были построены стационарные спектры с помощью методики и процедур, заложенных в программе SEISAN [7]. Спектральный анализ в SEISAN основан на модели сейсмического источника по Дж. Брюну [4]. Процедура обработки [8] подразумевает вычисление амплитудных спектров Фурье для смещения по объемной S -волне с поправкой за затухание в коре и верхней мантии и геометрическое расхождение. Потери на неупругое затухание определялись при использовании частотно-зависимой добротности $Q(f)$ [9], приповерхностное затухание к задавалось постоянным значением $\kappa=0.02$.

Сейсмический момент оценивался по спектрам землетрясений станций, удаленных от эпицентра на расстояния 50–250 км, при условии превышения сигнала над уровнем шума не менее, чем в два раза:

$$M_0 = \frac{\Omega_0 4\pi\rho V^3}{0.6 \times 2.0 \times G(\Delta, h)} \quad (1)$$

где $G(\Delta, h)$ – геометрическое расхождение (Δ – эпицентральное расстояние, км; h – глубина, км), Ω_0 – спектральная плотность ($m \cdot c$), ρ – плотность среды (kg/m^3), V – скорость распространения поперечной S -волны (km/c), 0.6 – коэффициент, учитывающий средний эффект радиального расхождения сейсмических лучей, 2.0 – коэффициент, учитывающий влияние эффекта свободной поверхности.

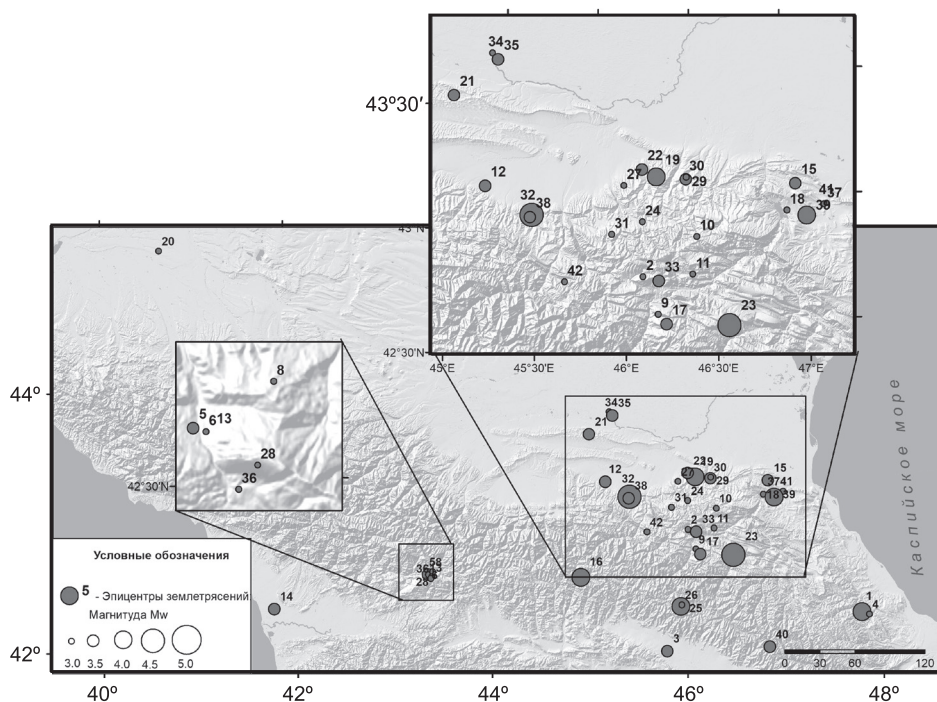


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений 2021 г. на Северном Кавказе, для которых проведен спектральный анализ. Номера возле эпицентров соответствуют номеру события в [Приложение 6] к [3]

Спектральная плотность Ω_0 определялась интерактивно по низкочастотному уровню очагового спектра S -волн, рассчитанного по горизонтальной компоненте. Межстанционные средние значения вместе с определенными сейсмическими моментами M_0 и моментными магнитудами M_w приведены в [Приложение 6]. На рис. 2 показан пример расчета спектральных параметров в программе SEISAN для землетрясения 3 сентября 2021 г. в 03^h34^m с $K_r=12.4$ в районе Большого Кавказа. Результаты расчета представлены в табл. 1.

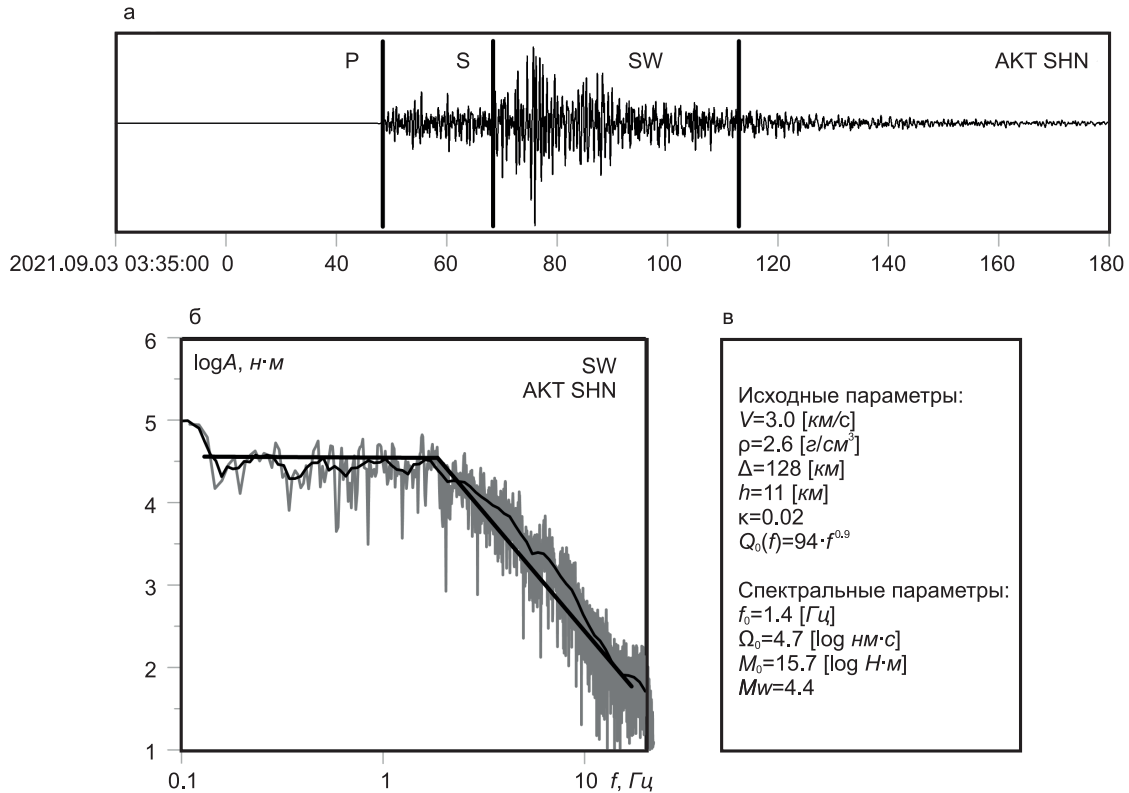


Рис. 2. Пример расчета спектральных параметров очага землетрясения 3 сентября 2021 г. на записи горизонтальной (N) компоненты сейсмической станции «Акты» (АКТ) в соответствии с моделью Брюна [4]:

а – фрагмент сейсмограммы и временной интервал для расчета спектра смещений S -волны; б – спектр смещений с поправками за затухание и геометрическое расхождение, серым цветом показан исходный спектр сейсмического сигнала, тонкой черной линией – сглаженный спектр, черными прямыми линиями – асимптоты по модели Брюна; в – исходные параметры для расчета очагового спектра и сейсмического момента (V – скорость распространения S -волны, ρ – плотность, Δ – эпицентрального расстояние, h – глубина, κ – приповерхностное затухание, $Q_0(f)$ – частотно-зависимая добротность) и рассчитанные спектральные параметры (f_c – угловая частота, Ω_0 – уровень площадки спектра, M_0 – сейсмический момент, Mw – моментная магнитуда).

Для тех же 42 землетрясений рассчитаны значения локальных магнитуд ML , которые также представлены в [Приложение 6].

Таблица 1. Спектральные очаговые параметры для сильнейших землетрясений Северного Кавказа за 2021 г.

№	Дата и время (UTC) дд.мм.гггг ч:мин	$\lg M_0, H \cdot M$	$\Delta \sigma, бар$	Ω_0	$f_c, Гц$	$R, км$	Mw
1	2	3	4	5	6	7	8
1	02.01.2021 01:05	15.4±0.2	211±65	4.5±0.2	2.9±0.4	0.39±0.06	4.2±0.1
2	07.01.2021 09:49	14.2±0.3	4.7±1.2	3.0±0.3	2.8±0.5	0.52±0.10	3.4±0.2
3	09.01.2021 04:59	14.7±0.2	22±10	3.6±0.2	2.6±0.6	0.50±0.10	3.8±0.2
4	02.03.2021 00:56	13.7±0.2	5.3±1.8	2.7±0.2	3.2±0.8	0.37±0.10	3.1±0.1
5	13.03.2021 09:46	14.7±0.3	6.4±1.5	4.0±0.3	1.4±0.3	0.71±0.15	3.7±0.2
6	13.03.2021 10:55	13.9±0.2	8.1±1.0	3.2±0.2	2.8±0.3	0.34±0.04	3.2±0.1
7	13.03.2021 22:15	14.1±0.3	13±3	2.7±0.3	3.8±0.6	0.35±0.06	3.3±0.2
8	15.03.2021 15:25	14.2±0.2	4.4±1.2	3.3±0.2	2.0±0.3	0.55±0.08	3.4±0.1
9	30.03.2021 21:54	14.2±0.3	18±4	3.2±0.2	4.2±0.8	0.35±0.06	3.4±0.2
10	03.04.2021 08:48	14.1±0.3	7.1±0.8	3.4±0.3	2.1±0.4	0.45±0.08	3.4±0.2
11	04.04.2021 04:44	14.2±0.2	3.9±1.9	2.9±0.2	2.5±0.7	0.60±0.16	3.4±0.2
12	06.04.2021 20:00	15.0±0.4	121±23	3.8±0.3	4.0±1.2	0.34±0.09	3.9±0.2
13	07.04.2021 09:02	13.4±0.2	1.8±0.5	2.7±0.1	2.5±0.4	0.41±0.07	2.9±0.1
14	17.04.2021 20:46	14.7±0.2	38±13	3.8±0.2	2.7±0.5	0.41±0.08	3.8±0.1

1	2	3	4	5	6	7	8
15	26.04.2021 01:02	14.3±0.1	21±1	3.3±0.2	3.3±0.3	0.35±0.03	3.5±0.1
16	24.05.2021 21:43	15.5±0.3	130±25	4.4±0.4	2.6±0.6	0.51±0.12	4.3±0.2
17	29.05.2021 10:02	14.8±0.3	36±4	3.7±0.3	3.5±0.9	0.44±0.11	3.8±0.2
18	11.06.2021 16:37	13.6±0.2	5.2±0.7	2.8±0.2	3.1±0.5	0.32±0.04	3.0±0.1
19	28.06.2021 16:53	15.1±0.2	11±1	4.4±0.2	1.3±0.3	0.83±0.17	4.0±0.2
20	01.07.2021 17:38	13.8±0.2	37±22	2.7±0.2	5.4±1.4	0.23±0.06	3.2±0.1
21	11.07.2021 05:14	14.7±0.3	4.7±1.2	3.7±0.3	1.6±0.4	0.82±0.17	3.8±0.2
22	11.07.2021 18:16	15.0±0.2	30±6	3.8±0.2	2.3±0.3	0.54±0.08	3.9±0.1
23	28.07.2021 00:41	15.9±0.2	317±79	4.6±0.3	3.0±0.5	0.48±0.08	4.5±0.1
24	29.07.2021 22:16	13.5±0.2	6.9±2.5	2.8±0.2	3.4±0.7	0.30±0.07	3.0±0.2
25	03.09.2021 03:34	15.5±0.2	332±129	4.6±0.2	3.2±0.5	0.37±0.06	4.3±0.1
26	06.09.2021 02:04	13.9±0.2	7.1±1.8	2.9±0.2	3.1±0.6	0.39±0.08	3.2±0.1
27	08.09.2021 06:22	13.9±0.2	20±4	3.0±0.2	4.7±0.8	0.26±0.05	3.2±0.1
28	26.09.2021 15:07	14.1±0.2	2.2±0.6	3.4±0.2	1.5±0.2	0.64±0.10	3.3±0.1
29	27.09.2021 11:00	14.4±0.2	2.7±1.0	3.5±0.2	1.5±0.2	0.75±0.12	3.5±0.1
30	27.09.2021 17:26	14.0±0.2	14±2	3.0±0.2	3.6±0.6	0.32±0.05	3.3±0.2
31	17.10.2021 17:19	13.7±0.2	12±3	2.6±0.2	4.7±0.7	0.27±0.04	3.1±0.1
32	20.10.2021 04:45	15.9±0.2	260±92	5.0±0.3	2.3±0.5	0.54±0.13	4.5±0.1
33	24.10.2021 15:17	14.3±0.3	13±2	3.1±0.2	3.7±0.9	0.41±0.10	3.5±0.2
34	31.10.2021 09:28	13.9±0.2	2.9±1.0	2.7±0.3	2.6±0.6	0.52±0.13	3.2±0.1
35	01.11.2021 10:16	14.3±0.2	4.3±1.5	3.3±0.2	2.1±0.4	0.61±0.10	3.5±0.1
36	04.11.2021 09:50	14.2±0.3	8.2±3.9	3.2±0.3	2.7±0.7	0.45±0.12	3.4±0.2
37	13.11.2021 08:51	13.9±0.3	17±4	2.8±0.3	4.7±0.6	0.27±0.04	3.2±0.2
38	15.11.2021 00:16	14.3±0.3	24±6	3.2±0.3	3.8±0.8	0.35±0.08	3.5±0.2
39	02.12.2021 23:22	15.0±0.1	14±3	4.2±0.1	1.4±0.1	0.71±0.08	4.0±0.1
40	07.12.2021 03:38	14.4±0.3	19±6	3.2±0.3	3.6±0.5	0.39±0.06	3.5±0.2
41	23.12.2021 03:59	13.1±0.2	7.3±0.8	2.5±0.2	4.4±0.6	0.20±0.03	2.7±0.1
42	29.12.2021 01:29	14.1±0.4	6.6±2.0	2.9±0.4	3.2±1.1	0.46±0.14	3.3±0.2

Примечание. В столбцах 3–8 кроме значений параметров указаны их среднеквадратические отклонения, после символа (\pm).

Механизмы очагов. Расчет механизмов очагов, как и ранее, проводился по программе FA А.В. Ландера [10] с учетом знаков первого вступления в P -волне на региональных станциях Северного Кавказа. Для улучшения окружения эпицентра добавлялись знаки на станциях Крыма, Грузии, Армении, Азербайджана и Турции. Как правило, данные о знаках по этим станциям были заимствованы с сайта Международного сейсмологического центра ISC [11], а для ряда станций обрабатывались цифровые записи, например, записи станций Крыма и Грузии, находящиеся в открытом доступе. В целом для каждого землетрясения собирались от 13 до 69 знаков вступлений в P -волне на станциях, хорошо окружающих эпицентр.

По выполненным расчетам для 31 землетрясения Северного Кавказа с $K_p=9.0-12.9$ и для одного землетрясения 5 февраля с $K_p=13.0$ на территории Армении были построены диаграммы механизмов очагов в нижней полусфере, которые показаны на рис. 3. Параметры механизмов приведены в [Приложение 3] в отдельной вкладке.

Интерпретация полученных решений и определение типов движений в очагах проводились на основании определений, предложенных в программе FA для каждой нодальной плоскости. Кроме того, использовались материалы статьи [14], в которых тип движения в очаге сопоставлен с величинами углов наклона осей главных напряжений для различных деформационных режимов. Таким образом, проведена классификация типов движений в очаге землетрясений 2021 г. на Северном Кавказе, которая сопоставлена с типами движений в очагах за предыдущие четыре года, начиная с 2017 г. (табл. 2).

За пять лет в период 2017–2021 гг. в регионе были определены параметры механизмов очагов 145 землетрясений. Из них 59.3% ($N=86$) имели взбросовый тип движения совместно со сдвиго-взбросами; чистые сбросы и сдвиго-сбросы отмечены у 11.7% ($N=17$) землетрясений, чистые сдвиги, взбросо- и сбросо-сдвиги отмечены у 29.0% ($N=42$). Непосредственно в 2021 г. в количественном отношении преобладали взбросы (72%), которые реализовались в очагах землетрясений в основном центральной и восточной частей Северного Кавказа (рис. 3). 9% очагов представлены сбросами и сдвиго-сбросами, чисто сдвиговый и сбросо-сдвиговый характер имели 19% очагов.

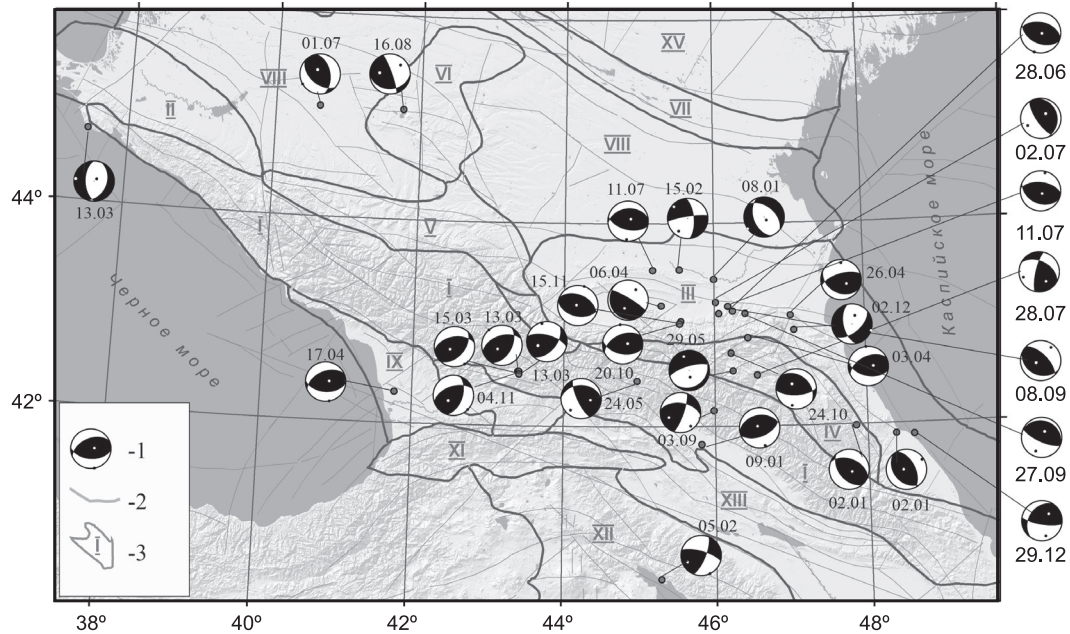


Рис. 3. Карта эпицентров землетрясений Северного Кавказа в 2021 г., для которых рассчитаны механизмы очагов

1 – диаграмма механизма очага; 2 – разломы по [12]; 3 – границы тектонических зон [13]: I – Большой Кавказ, II – Западно-Кубанский передовой прогиб, III – Терско-Каспийский передовой прогиб, IV – Дагестанский клин, V – моноклинал Предкавказья, VI – Ставропольский свод, VII – Кумо-Манычский прогиб, VIII – структуры Скифской платформы, IX – Рионский межгорный прогиб, X – Джавахетское нагорье, XI – Аджаро-Триалетская складчатая область, XII – мегантиклинорий Малого Кавказа, XIII – Куринский и Нижнеараксинский прогибы, XV – Донецко-Каспийская погребенная складчатая область.

Таблица 2. Распределение механизмов очагов землетрясений Северного Кавказа за период 2017–2021 гг. по типам подвижки в зависимости от величин углов наклона осей главных напряжений для различных деформационных режимов

Тип движения	Интервал углов наклона осей			Количество землетрясений по годам					
	<i>P-PL</i>	<i>N-PL</i>	<i>T-PL</i>	2017	2018	2019	2020	2021	Итого
Взбросовый	$\leq 30^\circ$	$\leq 30^\circ$	$\geq 45^\circ$	10	14	8	20	21	73
Сбросовый	$\geq 45^\circ$	$\leq 30^\circ$	$\leq 30^\circ$	2	4	2	4	3	15
Сдвиговый	$\leq 30^\circ$	$\geq 45^\circ$	$\leq 30^\circ$	7	5	5	2	2	21
Взбросо-сдвиговый	$\leq 30^\circ$	$> 30^\circ$	$> 30^\circ$	1	5	2	2	3	13
Сбросо-сдвиговый	$> 30^\circ$	$> 30^\circ$	$\leq 30^\circ$	–	–	4	3	1	8
Сдвига-сбросовый	$> 45^\circ$	$< 30^\circ$	$> 45^\circ$	2	–	–	–	–	2
Сдвига-взбросовый	$45^\circ \geq P-PL > 30^\circ$	$< 30^\circ$	$> 45^\circ$	4	–	4	3	2	13
Итого				26	28	25	34	32	145

Самое сильное землетрясение в регионе в 2021 г. произошло 28 июля в 00^h41^m с $K_p=12.9$. Эпицентр находился на территории Республики Дагестан, в Хунзахском районе. Землетрясение получило название Хунзахское и более детальные сведения о нем опубликованы в [15]. Что касается типа движения в очаге, то по нодальной плоскости *NP1* с юго–юго-западным простиранием оно характеризуется как взбросо-сдвиг, взбросовая и сдвиговая компоненты почти равны (правосторонний сдвиг). Вторая нодальная плоскость *NP2* запад–северо-западного простирания представлена левосторонним сдвигом. Положение эпицентра совпадает с Левантийско-Тбилиско-Аграханской сдвиговой зоной в соответствии с картой основных глубинных разломов на территории Дагестана (рис. 4) [16]. Простирание нодальной плоскости *NP1* близко к ориентации этой зоны с точностью до ошибок расчета. ($\pm 15^\circ$).

Механизмы трех землетрясений в районе Сунженского хребта и зоне влияния регионального Срединного глубинного разлома: 8 января в 13^h56^m с $K_p=10.0$ и $h=106$ км, 15 февраля в 15^h58^m с $K_p=11.0$ и $h=156$ км и 11 июля в 05^h14^m с $K_p=10.5$ и $h=19$ км – подтверждают ранее установленные различия в типах механизмов очагов землетрясений с коровыми глубинами и с заглубленными очагами. Для коровых, как правило, устанавливаются типичные для Кавказа взбросовые типы движений, для заглубленных отмечается преобладание сбросов и сдвига-сбросов [14].

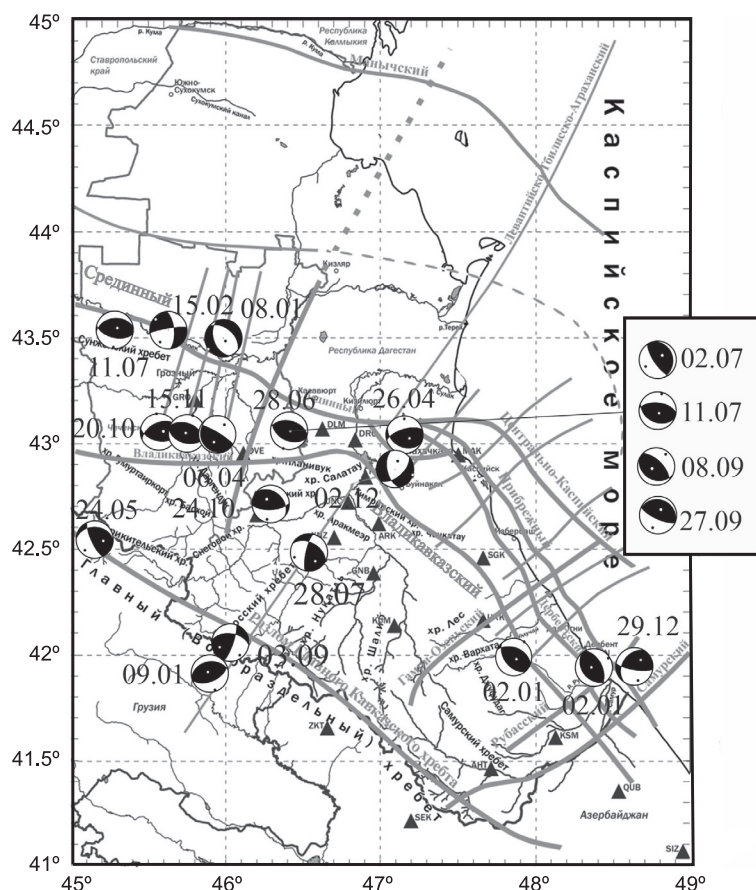


Рис. 4. Диаграммы механизмов очагов землетрясений восточной зоны Северного Кавказа в 2021 г. на фоне карты глубинных разломов из [16], рядом с диаграммой указана дата землетрясения (число и месяц)

Близко к эпицентральной зоне Черногорского-1 землетрясения 12.12.2020 г. [17] реализовалась серия землетрясений в зоне влияния Владикавказского (Черногорского) разлома (рис. 4). Для основного толчка 20 октября в $04^{\text{h}}45^{\text{m}}$ с $K_p=12.1$ и $h=13$ км получен тип движения в очаге – взброс с близширотным простиранием нодальных плоскостей, соответствующих простиранию разлома в этом месте. Такой же тип движения сохраняется и для последующего толчка в этой серии – 15 ноября в $00^{\text{h}}16^{\text{m}}$ с $K_p=10.0$ и $h=23$ км. В соответствии с описанием Черногорского разлома в БД «База данных активных разломов Евразии и прилегающих акваторий» (AFEAD) [18], этот разлом имеет взбросовую кинематику с поднятым южным крылом, что согласуется с нодальной плоскостью NP2 полученного нами механизма для землетрясения 20 октября. Таким образом, подтверждается активизация Черногорского (Владикавказского) разлома, начавшаяся в 2020 г.

Несколько восточнее, примерно в 50 км от эпицентров вышеописанных землетрясений, с 28 июня по 27 сентября реализовалась серия из пяти землетрясений, которая продолжает подчеркивать активность Черногорского (Владикавказского) разлома (табл. 3).

Таблица 3. Параметры механизмов очагов землетрясений 28 июня, 2 и 11 июля, 8 и 27 сентября 2021 г., определенных по знакам первого движения в P-волне в ФИЦ ЕГС РАН

Дата, дд.мм.гггг	t_0 , ч.мин.с	h , км	K_p	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости					
				T		N		P		NP1			NP2		
				PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP
28.06.2021	16:53:38.1	5	10.3	84	108	6	288	0	198	114	45	98	283	45	82
02.07.2021	09:04:37.3	85	9.9	62	46	6	148	27	241	146	72	83	347	19	110
11.07.2021	18:16:46.7	14	10.7	78	149	9	282	9	14	276	54	79	114	37	104
08.09.2021	06:22:10.0	13	9.8	70	245	9	131	18	38	315	63	100	114	28	72
27.09.2021	17:26:35.2	5	9.9	63	27	2	294	27	203	114	72	92	289	18	84

Событие 2 июля в $09^{\text{h}}04^{\text{m}}$ с $K_p=12.1$ и $h=85$ км имеет механизм, согласующийся по типу движения «взброс» с остальными толчками этой серии, но отличающийся диагональным простиранием нодаль-

ных плоскостей. Это может быть связано с более глубоким залеганием очага и его принадлежностью к каким-то более заглубленным структурам.

Отличный тип движения имеет механизм очага землетрясения 2 декабря, эпицентр которого расположен еще восточнее (рис. 4). Согласно БД AFEAD [18], в зоне, где Черногорский (Владикавказский) разлом меняет направление с субширотного на диагональное с северо-запада на юго-восток, выделяются разломные структуры в его составе, меняющие свою кинематику на сбросовый тип и простирание с юго-запада на северо-восток, что и наблюдается на диаграмме механизма землетрясения 2 декабря.

Механизмы очагов четырех землетрясений (табл. 4, рис. 5), зарегистрированных в эпицентральной зоне сильнейшего в прошлом веке Рачинского землетрясения 29 апреля 1991 г. с $M_w=6.9$, представлены взбросами. Известно, что в этой зоне, согласно ранее проведенным исследованиям [19], преобладают взбросы с «общекавказским» простиранием нодальных плоскостей. В сравнении с ранее построенными механизмами очагов в этой зоне, простирание нодальных плоскостей исследуемых землетрясений 2021 г. поменяло ориентацию в полученных нами решениях. Если ранее большинство механизмов очагов имело простирание с северо-запада на юго-восток, то теперь произошел разворот на северо-восток–юго-запад. Предположительно это связано с активизацией локальных разломов, образовавшихся в раздробленной среде обширной эпицентральной области Рачинского землетрясения.

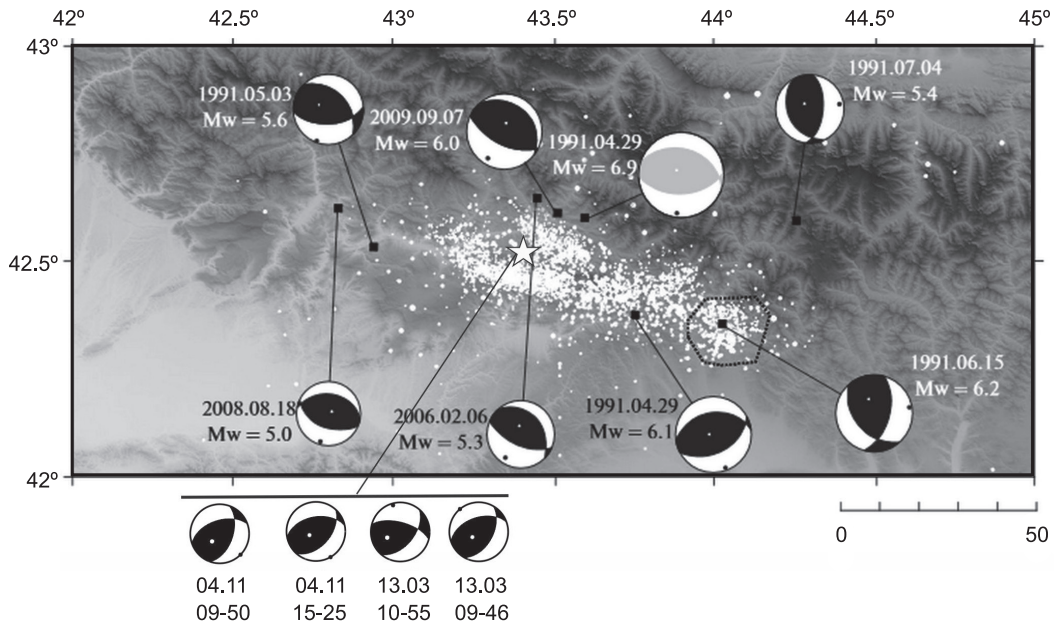


Рис. 5. Механизмы очагов землетрясений центральной части Северного Кавказа в 2021 г. (положение эпицентров показано звездой) на фоне рисунка из работы [19] с механизмами землетрясений в Рача-Джавской зоне сильнейшего землетрясения 29.04.1991 г. с $M_w=6.9$

Таблица 4. Параметры механизмов очагов землетрясений 13 марта, 15 марта и 4 ноября 2021 г., определенных в ФИЦ ЕГС РАН по знакам первого движения в P -волне

Дата, дд.мм.гггг	t_0 , ч:мин:с	h , км	K_p	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости					
				T		N		P		$NP1$			$NP2$		
				PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	$SLIP$	STK	DP	$SLIP$
13.03.2021	09:46:15.8	5	10.7	67	230	23	50	0	320	252	49	121	29	49	59
13.03.2021	10:55:40.4	5	10.3	50	246	39	81	7	345	285	63	135	40	51	36
15.03.2021	15:25:15.5	6	10.1	70	240	20	60	0	150	41	49	62	260	48	118
04.11.2021	09:50:35.8	5	9.8	60	225	30	45	0	135	18	52	51	252	52	129

Механизм очага сильнейшего в 2021 г. землетрясения на Кавказе 5 февраля 2021 г. с $K_p=13.0$ в Армении построен по знакам 60 станций и представлен сдвигом, по близмеридиональной плоскости $NP1$ север–северо-восточного простирания – левосторонним, по плоскости $NP2$ близширотного простирания – правосторонним. Подобное решение получено и в Республиканском центре сейсмологической службы НАН Азербайджана с применением другого программного обеспечения [20].

В западной зоне Северного Кавказа, в прибрежной зоне близ Малого Утриша, рассчитан механизм очага землетрясения 13 марта в $22^{\text{h}}15^{\text{m}}$ с $K_p=9.5$ (рис. 3), тип движения при котором представляет сброс. В соответствии с БДАFEAD [18], крупные региональные разломы взбросового типа, простирающиеся вдоль Черноморского побережья, секутся многочисленными поперечными локальными разломами, подвижки по которым – «вертикальные, когда установлено наличие вертикального смещения, но не определен его сбросовый или взбросовый тип». Можно предположить, что именно к такому локальному разлому и принадлежит очаг 13 марта в $22^{\text{h}}15^{\text{m}}$.

Деформационный режим на Северном Кавказе в 2021 г., как и ранее, традиционно характеризовался большей частью взбросами.

Заключение. БД спектральных и динамических параметров очагов землетрясений Северного Кавказа пополнена оценками параметров 42 землетрясений за 2021 г., полученных с использованием модели очага по Брюну. Определены средние сетевые значения для каждого из спектральных параметров и моментной магнитуды M_w (табл. 1).

Рассчитаны механизмы очагов 32 землетрясений 2021 г. с $K_p \geq 9.0$, 17 из которых произошли в Терско-Каспийском прогибе. Движение в очагах этих землетрясений произошло под действием сил сжатия, тип движения – взброс. Простирание нодальных плоскостей большинства событий 2021 г. субширотно, что является типичным для этой тектонической зоны.

Анализ механизмов очагов 145 землетрясений региона, построенных за пятилетний период 2017–2021 гг., показал, что в 59.3% случаев наблюдался взбросовый тип движения, включающий взбросы и сдвиг-взбросы. Сбросы отмечены у 11.7% землетрясений, сдвиги – у 29%. В исследуемом 2021 г. 72% землетрясений имели взбросовый тип движения, 9% – сбросы и 19% – сдвиги. Взбросовый тип движения в очагах землетрясений, полученный при преобладании сил сжатия, отвечает общей геодинамической обстановке в зоне коллизии Евразийской и Аравийской плит, остальные кинематические типы механизмов, вероятно, связаны с проявлением активности локальных разломов.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00604-25) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Электронное приложение App05_North_Caucasus_2021 (<http://www.gsras.ru/zse/app-28.html>): 1 – Сейсмические станции ФИЦ ЕГС РАН, работавшие на территории Северного Кавказа в 2021 г.; 2 – Каталог землетрясений Северного Кавказа за 2021 г.; 3 – Каталог механизмов очагов землетрясений Северного Кавказа за 2021 г.; 4 – Макросейсмический эффект ощутимых землетрясений Северного Кавказа в 2021 г.; 5 – Сведения о пунктах, для которых имеется информация о макросейсмических проявлениях ощутимых землетрясений Северного Кавказа за 2021 г.; 6 – Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Северного Кавказа в 2021 г. (S -волны), рассчитанные по сети станций с применением программы SEISAN.

Л и т е р а т у р а

1. Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии: Избранные труды. – М.: Наука, 1985. – 408 с.
2. Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э., Бондарь М.Н. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона в 2021 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2025. – Вып. 28 (2021). – С. 228–237. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2025.28.21> EDN: RJCUEW
3. Габсатарова И.П., Королежки Л.Н., Саяпина А.А., Багаева С.С., Адилов З.М., Асманов О.А. Сейсмичность Северного Кавказа в 2021 году // Землетрясения Северной Евразии. – 2025. – Вып. 28 (2021). – С. 69–80. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2025.28.06> EDN: GNNBIA
4. Brune J.V. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // Journal of Geophysical Research. – 1970. – V. 75, N 26. – P. 4997–5009.
5. Bormann P., Dewey J.W. The new IASPEI standards for determining magnitudes from digital data and their relation to classical magnitudes // New manual of seismological observatory practice 2 (NMSOP-2). – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 2012. – P. 1–44.
6. Габсатарова И.П., Селиванова Е.А., Зверева А.С. Шкала локальных магнитуд M_L для землетрясений Северного Кавказа // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XVIII Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2024. – С. 24. EDN: BHYSMP
7. Havskov J., Voss P.H., Ottemöller L. Seismological observatory software: 30 Yr of SEISAN // Seismological Research Letters. – 2020. – V. 91, N 3. – P. 1846–1852. DOI: <https://doi.org/10.1785/0220190313>
8. Зверева А.С., Собисевич А.Л., Лиходеев Д.В. К вопросу о взаимосвязи моментных и локальных магнитуд землетрясений Северо-Западного Кавказа // Доклады Российской Академии Наук. Науки о Земле. – 2023. – Т. 508, № 1. – С. 98–107. DOI: <https://doi.org/10.31857/S2686739722601922> EDN: GIHZSN

9. Зверева А.С., Габсатарова И.П., Лиходеев Д.В. Региональные особенности затухания сейсмических волн на территории Северного Кавказа // Физика Земли. – 2024. – Т. 60, № 6. – С. 1026–1038.
10. Ландер А.В. Программа расчёта и графического представления механизмов очагов землетрясений по знакам первых вступлений P -волн (FA) / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018662004 от 25 сентября 2018 г.
11. International Seismological Centre. (2025). On-line Bulletin. <https://doi.org/10.31905/D808B830>
12. Трифонов В.Г., Соболева О.В., Трифонов Р.В., Востриков Г.А. Современная геодинамика Альпийско-Гималайского коллизийного пояса. – М.: ГЕОС, 2002. – 225 с
13. Хаин В.Е. Кавказ. Тектоническая карта. М: 1:5 500 000 // Большая Советская Энциклопедия. – 1973. – Т. 11. – С. 112–114.
14. Вольфман Ю.М., Пустовитенко Б.Г., Колесникова Е.Я. Новые результаты тектонофизического анализа фокальных механизмов землетрясений Крымско-Черноморского региона // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. – 2022. – Т. 8, № 4. – С. 163–206.
15. Адиллов З.А., Асманов О.А., Магомедов Х.Д. Ощутимые землетрясения Дагестана в 2021 году // Землетрясения Северной Евразии. – 2025. – Вып. 28 (2021). – С. 248–258. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2025.28.23> EDN: SHJBEK
16. Черкашин В.И., Сабанаев К.А., Гаврилов Ю.О., Панов Д.И. Тектоника Дагестана (объяснительная записка). Глава 5. Геодинамика и сейсмичность // Труды института геологии ДНЦ РАН. Вып. 60 / Отв. ред. Леонов Ю.Г. – Махачкала: АЛЕФ, 2012. – С. 85–94.
17. Габсатарова И.П., Дмитриева И.Ю., Саяпина А.А. Багаева С.С., Гайсумов М.Я. Черногорское-1 землетрясение 12 декабря 2020 г. с $K_p=12.9$, $M_w=4.8$ (ГСМТ), $I_0=5-6$ баллов // Землетрясения Северной Евразии. – 2024. – Вып. 27 (2020). – С. 335–346. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2024.27.30> EDN: WLTFEI
18. 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: <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0314>
19. Вакарчук Р.Н., Татевосян Р.Э., Аптекман Ж.Я., Быкова В.В. Рачинское землетрясение 1991 г. на Кавказе: многоактная модель очага с компенсационным типом движения // Физика Земли. – 2013. – № 5. – С. 58–64.
20. Етирмишли Г.Д., Исмаилова С.С., Казымова С.Э., Исламова Ш.К. Сейсмичность Азербайджана и прилегающих территорий в 2021 году // Землетрясения Северной Евразии. – 2025. – Вып. 28 (2021). – С. 52–60. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2025.28.04> EDN: BHRRBE

SPECTRAL and SOURCE PARAMETERS of NORTH CAUCASUS EARTHQUAKES in 2021

I.P. Gabsatarova, A.S. Zvereva

Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Obninsk, Russia, ira@gsras.ru

Abstract. The spectral parameters of the foci of 42 earthquakes in the North Caucasus with $K_p=9.0-12.9$ for 2021 were determined. The source spectra were calculated in the SEISAN program using the frequency-dependent quality factor $Q(f)$. The values of the spectral density Ω_0 , corner frequency f_0 and dynamic parameters of the foci – scalar seismic moment M_0 , stress dropped $\Delta\sigma$, moment magnitude M_w and standard deviation for each of the parameters were obtained. Focal mechanisms were calculated for 31 earthquakes with $K_p=9.0-12.9$ and one earthquake with $K_p=13.0$ that occurred in Armenia, of which 72% are represented by reverse faults (including with strike-slip components), 9% – by normal faults (including with strike-slip components) and 19% – by strike-slip faults (including with reverse- and normal-slip components). Such types of mechanisms are consistent with the kinematics of active deep faults estimated from geological features in the active faults database (AFEAD DB) and, in general, with the nature of deformation processes in the collision zone of the Arabian and Eurasian plates.

Keywords: Brune source model, seismic moment, stress drop, rupture length, source dynamic parameters, SEISAN, fault plane solution, reverse fault, normal faults, strike-slip, North Caucasus.

For citation: Gabsatarova, I.P., & Zvereva, A.S., (2025). [Spectral and source parameters of North Caucasus earthquakes in 2021]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 28(2021), 238–247. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2025.28.22> EDN: RPXHJ

References

1. Riznichenko, Yu.V. (1985). *Problemy seismologii: Izbrannyye trudy* [Problems of Seismology: Selected Works]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 408 p. (In Russ.).
2. Pustovitenko, B.G., Eredzhepov, E.E., & Bondar, M.N. (2025). [Spectral and focal parameters of earthquakes in the Crimean-Black Sea region in 2021]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 28(2021), 228–237. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2025.28.21> EDN: RJCUN
3. Gabsatarova, I.P., Koroletsky, L.N., Sayapina, A.A., Bagaeva, S.S., Adilov, Z.M., & Asmanov, O.A. (2025). [Seismicity of the North Caucasus in 2021]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 28(2021), 69–80. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2025.28.06> EDN: GNNBIA
4. Brune, I. V. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Geophysical Research*, 75(26), 4997–5009.
5. Bormann, P., & Dewey, J.W. (2012). The new IASPEI standards for determining magnitudes from digital data and their relation to classical magnitudes. *New manual of seismological observatory practice 2 (NMSOP-2)*. *Deutsches GeoForschungszentrum GFZ*, 1–44.
6. Gabsatarova, I.P., Selivanova, E.A., & Zvereva, A.S. (2024). [Scale of local magnitudes M_L for earthquakes in the North Caucasus]. In *Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh. Tezisy XVIII Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Abstracts of the XVIII International Seismological Workshop] (p. 24). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. EDN: BHYSMP (In Russ.).
7. Havskov, J., Voss, P.H., & Ottemöller, L. (2020). Seismological observatory software: 30 Yr of SEISAN. *Seismological Research Letters*, 91(3), 1846–1852. DOI: <https://doi.org/10.1785/0220190313>
8. Zvereva, A.S., Sobisevich, A.L., & Likhodeev, D.V. (2022). Moment and Local Magnitudes Calibration for Earthquakes in the Northwest Caucasus. *Doklady Earth Sciences*, 507(2), 304–312.
9. Zvereva, A.S., Gabsatarova, I.P., & Likhodeev, D.V. (2024). Regional features of seismic wave attenuation in the North Caucasus. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 60(6), 1026–1038.
10. Lander, A.V. (2018). [The program for calculating and graphically representing the mechanisms of earthquake sources by the signs of the first arrivals of P -waves (FA)]. Certificate of state registration of the computer program № 2018662004. (In Russ.).
11. International Seismological Centre. (2025). On-line Bulletin. Retrieved from <https://doi.org/10.31905/D808B830>
12. Trifonov, V.G., Soboleva, O.V., Trifonov, R.V., & Vostrikov, G.A. (2002). *Sovremennaya geodinamika Al'piysko-Gimalayskogo kollizionnogo poyasa* [Modern geodynamics of the Alpine-Himalayan collision belt]. Moscow, Russia: GEOS Publ., 225 p. (In Russ.).
13. Khain, V.E. (1973) [Caucasus. Tectonic map. – M: 1:5 500 000]. In *Bol'shaia Sovetskaya Entsiklopediya*. T. 11 [Great Soviet Encyclopedia, V. 11] (pp. 112–114). Moscow, Russia: Soviet Encyclopedia Publ. (In Russ.).
14. Volfman, Yu.M., Pustovitenko, B.G., & Kolesnikova, E.Ya. (2022). [New results of tectonophysical analysis of focal mechanisms of earthquakes in the Crimean-Black Sea region]. *Uchenyye zapiski Tavricheskogo natsional'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Series "Geography. Geology"* [Scientific notes of the Taurida National University named after V.I. Vernadsky. Series "Geography. Geology"], 8(4), 163–206. (In Russ.).
15. Adilov, Z.A., Asmanov, O.A., & Magomedov, Kh.D. (2025). [Tangible earthquakes in Dagestan in 2021]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 28(2021), 248–258. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2025.28.23> EDN: SHJBEK
16. Cherkashin, V.I., Sabanaev, K.A., Gavrillov, Yu.O., & Panov, D.I. (2012). *Tektonika Dagestana (ob'iasnitel'naya zapiska)*. Glava 5. *Geodinamika i seismichnost'* *Trudy instituta geologii DNTs RAN* [Tectonics of Dagestan (explanatory note). Chapter 5. Geodynamics and seismicity]. Makhachkala, Russia: ALEF Publ., 85–94. (In Russ.).
17. Gabsatarova, I.P., Dmitrieva, I.Yu., Bagaeva, S.S., Sayapina, A.A., & Gaisumov, M.Ya. (2024). [Chernogorsk-I earthquake on December 12, 2020 with $K_R=12.9$, $M_w=4.8$ (GCMT), $I_0=5-6$ in the Chechen Republic]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 27(2020), 335–346. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2024.27.30> EDN: WLTFEI (In Russ.).
18. Bachmanov, D.M., Kozhurin, A.I., & Trifonov, V.G. (2017). [Database of active faults of Eurasia]. *Geodynamics and tectonophysics* [Geodynamics and tectonophysics], 8(4), 711–736. DOI: <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0314> (In Russ.).
19. Vakarchuk, R.N., Tatevosyan, R.E., Aptekman, Z.Y., & Bykova, V.V. (2013). The 1991 Racha earthquake, Caucasus: multiple source model with compensative type of motion. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 49(5), 653–659.
20. Etirmishli, G.D., Ismailova, S.S., Kazimova, S.E., & Islamova, Sh.K. (2025). [Seismicity of Azerbaijan and adjacent territories in 2021]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in North Eurasia], 28(2021), 52–60. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2025.28.04> EDN: BHRRBE