

УДК 550.348. (470.62)

СПЕКТРАЛЬНЫЕ и ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА в 2020 году

А.С. Зверева¹, А.А. Скоркина², И.П. Габсатарова³

¹ФИЦ ЕГС РАН, г. Пермь, Россия, zvereva.as59@gmail.com

²ИТПЗ РАН, г. Москва, Россия, anna@mitp.ru

³ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия, ira@gstras.ru

Аннотация. Определены спектральные параметры очагов 38 землетрясений Северного Кавказа с $K_r=9.3-12.9$ за 2020 год. Параметры определялись по спектрам смещения S -волн на записях станций, удаленных от эпицентров землетрясений на 50–250 км. Дополнительно к этому рассчитаны значения локальных магнитуд M_L с использованием новой калибровочной кривой. 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 30 землетрясений с $K_r=9.0-12.9$ рассчитаны механизмы очага, из них 73 % представлены взбросами (включая взбросо-сдвиги и сдвиго-взбросы), 20 % – сбросами (включая сбросо-сдвиги) и 7 % – сдвигами, что согласуется 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: Зверева А.С., Скоркина А.А., Габсатарова И.П. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Северного Кавказа в 2020 году // Землетрясения Северной Евразии. – 2024. – Вып. 27 (2020). – С. 242–254. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2024.27.22> EDN: NZRLES

Введение. Регион Северного Кавказа в 2020 г. характеризовался умеренной сейсмичностью, однако 38 землетрясений имели $K_r \geq 8.7$ [Прил. 2]. В 2020 г. продолжены работы по оценке очаговых спектров региональных землетрясений Северного Кавказа и расчету спектральных и динамических параметров очагов землетрясений этого региона. Проведение спектрального анализа включает в себя расчет стационарных спектров, приведение их к очаговым за счет корректировки за влияние прибора и затухание сейсмических волн, аппроксимацию спектров согласно модели Брюна [1] для определения спектральных параметров очагов, таких как значения спектральной плотности Ω_0 и угловой частоты f_0 . Эти оценки использованы 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 [2]. Для 30 землетрясений с использованием знаков первых вступлений в P -волне построены механизмы очагов и проведена их интерпретация с установлением типов движений в очагах.

Целью настоящей статьи является комплексный анализ полученных спектральных и очаговых параметров землетрясений 2020 года.

Исходные данные. Для исследования было выбрано 38 наиболее сильных ($K_r=9.3-12.9$) землетрясений Северного Кавказа в 2020 г. (рис. 1, Прил. 2 к [3]). Параметры гипоцентров исследуемых землетрясений были определены по данным сетей региональных сейсмических станций Северо-Осетинского филиала (NOGSR), Дагестанского филиала (DAGSR) и Центрального отделения ФИЦ ЕГС РАН (OBGSR) (Прил. 2 к [3]). Для расчета энергетического класса K_r и локальной магнитуды M_L использовались записи землетрясений с гипоцентрными расстояниями $r=50-500$ км, для спектрального анализа – с $r=50-250$ км соответственно.

Методика спектрального анализа. Сильнейшие землетрясения (рис. 1) были обработаны с помощью методики и процедур, заложенных в программе SEISAN [4]. Спектральный анализ в SEISAN основан на модели сейсмического источника по Дж. Брюну [1]. Процедура обработки [5] подразумевает вычисление спектра смещений объемной S -волны с поправкой за затухание

в коре и верхней мантии и геометрическое расхождение. Потери на неупругое затухание задавались частотно-зависимой добротностью Q [6], приповерхностное затухание к задавалось постоянным значением $\kappa=0.02$.

Сейсмический момент определялся по записям землетрясений с эпицентральных расстояний 50–250 км и с превышением 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, h – глубина), Ω_0 – спектральная плотность ($m\cdot c$), ρ – плотность (kg/m^3), V – скорости P - или S -волн ($км/с$) в зависимости от типа спектра, 0.6 – коэффициент, учитывающий средний эффект радиального расхождения лучей, 2.0 – коэффициент, учитывающий влияние эффекта свободной поверхности.

Значения скорости распространения волн и плотности, используемые в формуле для определения сейсмического момента, соответствуют скоростному разрезу по профилю ГСЗ из [7] (табл. 1) и выбирались при расчете в соответствии с глубиной конкретного землетрясения.

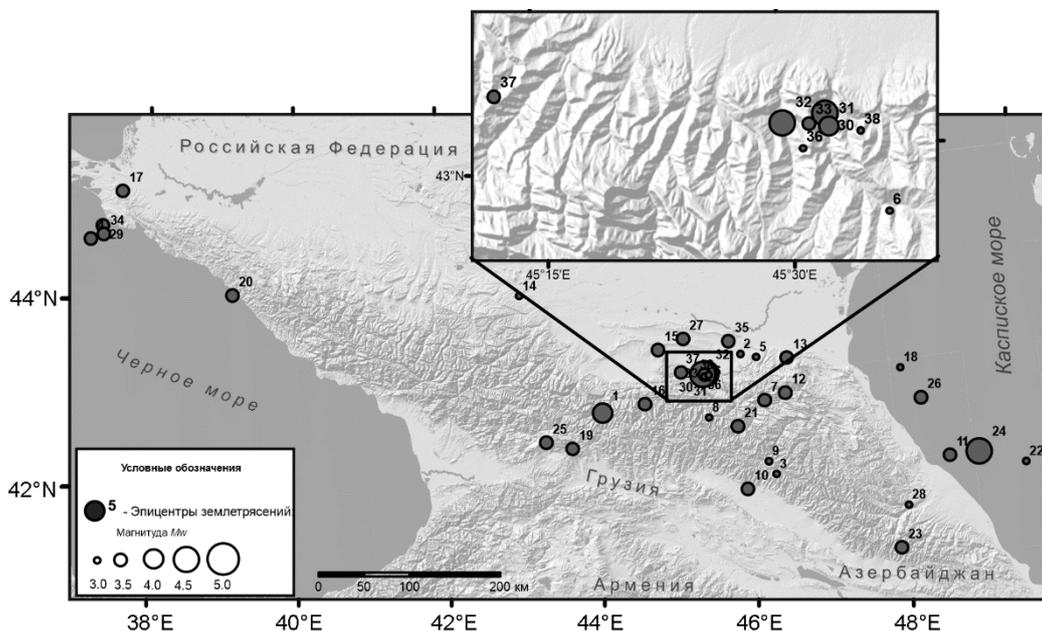


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений 2020 г. на Северном Кавказе, для которых проведен спектральный анализ

Номера возле эпицентров соответствуют номеру события в табл. 2 и в Приложениях 2, 3 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 (Прил. 2) и в табл. 2, в которой также указаны доверительные интервалы для каждого из параметров и количество станций, по которым были определены средние значения соответствующих параметров. На рис. 2 показан расчет спектральных параметров в программе SEISAN на примере землетрясения 12 декабря 2020 г. в 21^h29^m с $K_p=12.9$ в Чеченской республике.

Таблица 1. Скоростной разрез для Северного Кавказа, использованный при расчете сейсмического момента

$h, км$	$V_s, м/с$	$\rho, г/см^3$
3	2400	2400
15	3400	2700
24	3400	2700
80	4100	3000
171	4400	3400

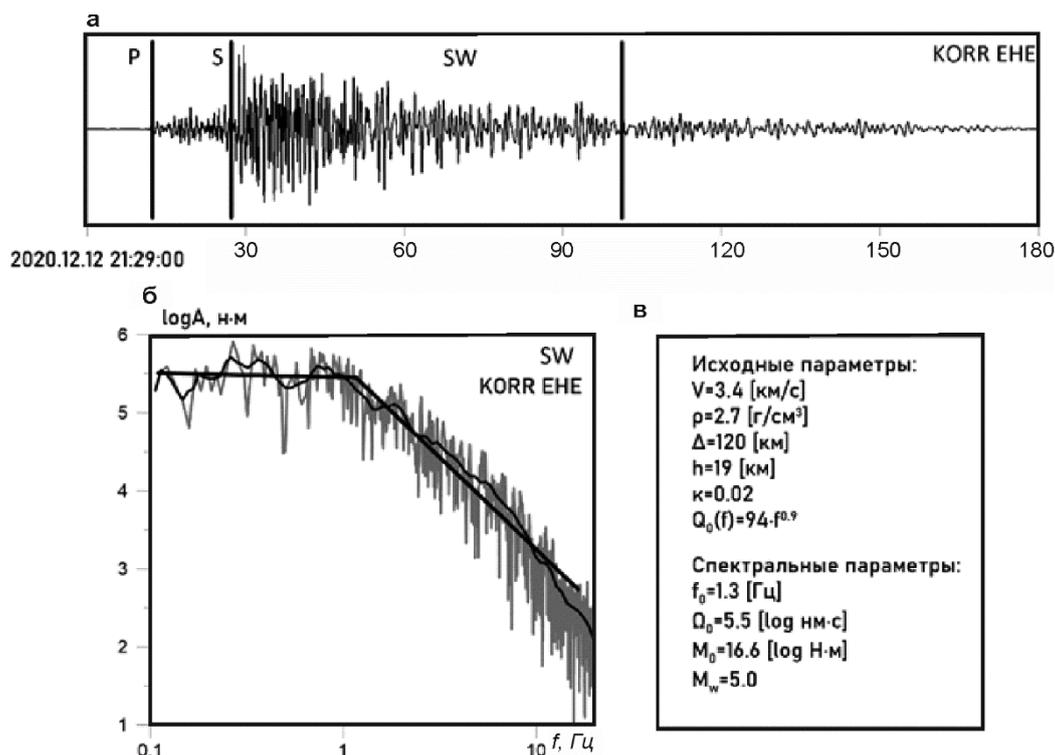


Рис. 2. Пример расчета спектральных параметров очага землетрясения 12 декабря 2020 г. на записи горизонтальной (E) компоненты сейсмической станции «Кора» (KORR) в соответствии с моделью Брюна [1]

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 – эпицентральный расстояние, h – глубина, κ – приповерхностное затухание, $Q_0(f)$ – частотно-зависимая добротность) и рассчитанные спектральные параметры (f_0 – угловая частота, Ω_0 – уровень площадки спектра, M_0 – сейсмический момент, M_w – моментная магнитуда).

Магнитуды M_L также определены в программе SEISAN на основе замеров в максимуме колебаний на записи в целом, предварительно преобразованных в записи прибора Wood-Ander-son (A_{WA}), и применения построенной в [8] калибровочной функции, характеризующей затухание максимальных амплитуд S или Lg -волн в регионе Северного Кавказа, в виде соотношения:

$$M_L = \lg(A_{WA}) + 1.161 \times \lg(R) + 0.001636 \times (R) - 2.157 + S \quad (2)$$

где S – станционная поправка.

Отметим, что M_L в 2020 г. рассчитывалась только по опорным станциям, в то время как критериями выбора станции для расчета M_w являлись гипоцентральный расстояние (50–250 км), уровень превышения сигнала над уровнем шума в анализируемом диапазоне частот (0.5–7 Гц), а также соответствие формы очагового спектра модели Брюна.

Оценка сброшенных напряжений в барах (табл. 2) проводилась по формуле [9]:

$$\Delta\sigma = (7/16) \cdot M_0 \cdot (1 / (0.37 \cdot V / f_0)^3) \cdot 10^{-14}. \quad (3)$$

Параметр известен высокой степенью неустойчивости индивидуальных значений (см. доверительные интервалы в колонке $\Delta\sigma$, бар), которые, в первую очередь, обусловлены точностью определения угловой частоты f_0 . Другим параметром, увеличивающим доверительный интервал, является скорость распространения поперечных волн. Отметим, что для более сильных землетрясений именно параметр скорости может играть существенную роль, поскольку для более сильных землетрясений сложнее определить глубину в связи с большим размером очага, а соответственно, и скорость распространения поперечных волн в зоне очага землетрясения. В расчете использовали значение скорости из табл. 1, соответствующее глубине очага из каталога.

Таблица 2. Спектральные очаговые параметры для сильнейших землетрясений Северного Кавказа за 2020 г.

№	Дата и время	K_p	M_L	N_{sta}	M_w^{SS}	N_{sta}	$f_0, Гц$	$\Delta\sigma, бар$
1	26.01 21:01	11.1	3.9±0.3	18	4.1±0.1	10	2.7±0.7	75±52
2	06.02 15:25	9.5	3.0±0.4	13	3.1±0.3	13	3.5±0.9	14±12
3	06.03 13:22	9.6	3.2±0.3	17	3.3±0.1	9	2.5±0.7	6±5
4	15.03 05:36	10.8	3.9±0.2	8	3.9±0.1	4	2.0±0.7	15±12
5	28.03 02:26	9.9	3.3±0.3	15	3.2±0.1	10	3.4±1.0	16±10
6	02.04 11:32	9.7	2.6±0.4	11	3.0±0.3	9	4.5±1.5	7±8
7	06.04 21:36	9.7	3.1±0.3	12	3.6±0.2	6	3.9±1.0	28±19
8	17.04 17:45	9.5	3.0±0.3	16	3.4±0.1	7	3.6±0.7	17±8
9	20.04 12:53	9.6	3.3±0.3	10	3.4±0.2	10	3.1±1.1	14±16
10	21.04 06:08	10.6	3.6±0.3	17	3.8±0.1	14	2.5±0.7	26±29
11	23.04 01:52	10.4	3.5±0.3	17	3.7±0.2	8	4.9±1.0	128±134
12	02.05 16:05	9.8	3.4±0.3	16	3.5±0.1	8	2.1±0.8	16±24
13	13.05 14:51	10.7	3.9±0.4	12	3.9±0.2	16	2.1±0.9	64±105
14	18.05 07:24	9.7	3.2±0.2	6	3.1±0.2	3	5.0±1.0	19±7
15	23.05 19:32	10.1	3.5±0.3	16	3.7±0.2	18	2.6±1.0	28±31
16	24.05 12:33	10.7	3.7±0.3	14	3.7±0.2	17	3.0±0.7	42±49
17	01.06 13:25	9.9	3.6±0.5	4	3.5±0.2	4	2.8±0.4	28±26
18	24.07 12:38	9.5	3.2±0.3	9	3.4±0.2	6	4.5±0.8	35±38
19	18.08 11:50	10.5	3.6±0.3	13	3.6±0.2	19	2.0±0.6	13±9
20	01.09 00:59	10.8	3.8±0.3	6	3.8±0.2	11	3.2±0.7	78±46
21	15.09 14:51	10.0	3.4±0.2	17	3.5±0.1	10	3.2±0.9	31±30
22	04.10 11:39	9.6	3.3±0.3	14	3.4±0.1	5	3.5±0.9	14±6
23	22.10 12:53	10.0	3.6±0.3	10	3.5±0.1	11	2.5±1.1	22±31
24	03.11 12:16	12.3	4.7±0.3	18	4.5±0.2	12	3.0±1.0	403±269
25	04.11 17:09	10.8	3.7±0.4	17	3.7±0.2	13	1.9±0.8	18±20
26	11.11 09:29	9.9	3.4±0.4	12	3.5±0.2	5	3.7±0.7	29±26
27	03.12 22:03	10.5	3.6±0.3	18	3.9±0.1	15	2.1±0.6	16±11
28	04.12 13:25	9.6	3.4±0.2	10	3.4±0.1	10	3.3±1.0	11±6
29	12.12 14:54	10.5	3.8±0.3	9	3.8±0.1	6	3.0±1.0	45±40
30	12.12 21:29	12.9	4.8±0.3	19	4.7±0.2	19	1.7±0.6	216±243
31	12.12 23:50	10.8	4.0±0.3	19	4.0±0.2	24	2.1±0.8	48±52
32	13.12 11:34	12.3	4.5±0.3	18	4.5±0.2	17	2.6±1.3	291±286
33	14.12 00:12	9.8	3.3±0.3	19	3.5±0.2	18	1.9±1.1	7±12
34	14.12 10:32	9.3	3.2±0.3	5	3.5±0.1	2	2.5±0.3	6±1
35	20.12 18:36	9.7	3.3±0.3	18	3.6±0.2	16	2.7±1.2	16±15
36	22.12 13:21	9.5	3.1±0.3	15	3.4±0.2	9	2.8±1.0	9±7
37	23.12 02:52	10.3	3.3±0.2	16	3.5±0.2	12	2.1±0.9	11±10
38	23.12 16:01	9.7	3.1±0.3	14	3.3±0.1	8	3.0±0.8	12±9

Примечание. Жирным шрифтом выделены дата и время в очаге землетрясений с преобладающим количеством записей, соответствующих уровню сигнал–шум >3. M_w^{SS} – моментная магнитуда, определенная по очаговому спектру S-волны (S-spectrum).

Магнитудные соотношения. Накопившийся к 2020 г. объем индивидуальных оценок M_L и M_w позволяет провести более детальное изучение межмагнитудных соотношений для используемых на Северном Кавказе магнитудных шкал. Нами была сопоставлена магнитуда M , полученная пересчетом из K_p , с другими магнитудными шкалами M^* : mb^{ISC} и mb^{GSRAS} (телесеismicкие магнитуды по объемной P-волне, рассчитанные в «Международном сейсмологическом центре» [10] и «Службе срочных донесений» (ССД) ФИЦ ЕГС РАН [11], соответственно), а также с моментной магнитудой M_w и локальной магнитудой M_L .

В предположении линейной связи типа $M^*=bM+a$, между различными типами магнитуд был выполнен регрессионный анализ с помощью стандартной линейной (метод наименьших квадратов) (табл. 3, рис. 3) и ортогональной (табл. 4) регрессий.

Таблица 3. Коэффициенты магнитудных зависимостей вида $M^*=bM+a$, полученных с помощью стандартной линейной регрессии с фиксацией наклона $b=1.0$

Магнитуда	Линейная регрессия с фиксированным наклоном $b=1.0$			Линейная регрессия				
	a	Δa	σ	a	Δa	b	Δb	σ
mb^{ISC}	0.17	± 0.32	0.35	0.65	± 0.31	0.87	± 0.08	0.34
$mb^{GS RAS}$	0.56	± 0.19	0.25	1.4	± 0.17	0.76	± 0.05	0.22
M_w	0.18	± 0.14	0.2	0.47	± 0.14	0.92	± 0.04	0.19
M_L	0.16	± 0.17	0.21	-0.24	± 0.16	1.11	± 0.04	0.2

Примечание. Δa , Δb – стандартные отклонения для коэффициентов регрессии a и b ; σ – остаточное стандартное отклонение.

Таблица 4. Коэффициенты магнитудных зависимостей вида $M^*=bM+a$, полученных с помощью ортогональной регрессии

Магнитуда	Ортогональная регрессия				
	a	Δa	b	Δb	σ
mb^{ISC}	-0.3	± 0.33	1.13	± 0.09	0.37
$mb^{GS RAS}$	1.06	± 0.17	0.86	± 0.05	0.23
M_w	0.21	± 0.14	0.99	± 0.04	0.2
M_L	-0.6	± 0.17	1.22	± 0.05	0.2

Примечание. Δa , Δb – стандартные отклонения для коэффициентов регрессии a и b ; σ – остаточное стандартное отклонение.

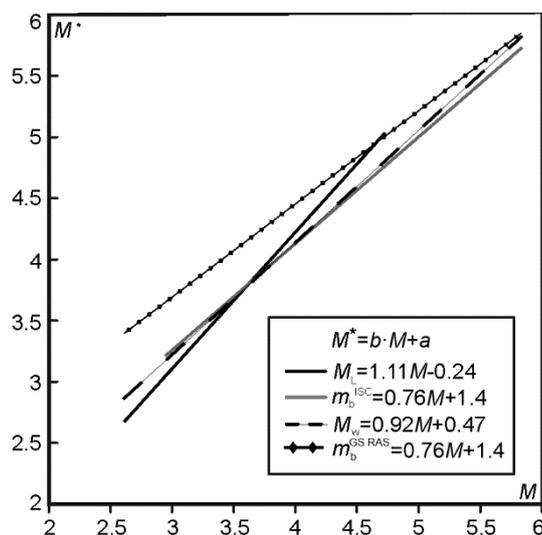


Рис. 3. Зависимости типа $M^*=bM+a$ между магнитудой M , полученной пересчетом из K_r , и другими магнитудными шкалами M^* , установленные методом стандартной линейной регрессии

Шкала магнитуд M_w является физической шкалой, так как определяется по величине сейсмического момента, и именно она является предпочтительной, например, при унификации каталогов по одному значению магнитуды. Из табл. 3 и 4 видно, что для связи M с M_w получается минимальное остаточное стандартное отклонение σ для всех анализируемых событий, а также наблюдается линейная зависимость с углом наклона, близким к единице (0.88 и 0.95 для стандартной линейной и ортогональной регрессии соответственно). Соотношение M с региональной шкалой локальных магнитуд M_L , так же как и с M_w , показывает меньшее значение остаточных стандартных отклонений σ и тоже представляет собой линейный тренд с наклоном, близким к единице. Отметим, что по оценкам межстанционного разброса для средних значений, оценки M_w являются более устойчивыми, чем M_L (рис. 4). С другой стороны, оценки M_L позволяют получить магнитуды для более слабых землетрясений, чем M_w : порог определения M_w для Северного Кавказа при данной конфигурации сейсмической сети может быть сейчас определен как $M_w=2.9$, тогда как порог для локальной магнитуды – $M_L=1.5$ на всей территории и $M_L=0.5-1.0$ для отдельных зон [12]. Предварительно заметим, что в связи с этим применение станционных поправок к оценкам M_L более актуально, чем к M_w , что связано с частотным диапазоном, в котором определяются оценки. Таким образом, несмотря на близость полученных оценок M_L и M_w , обе шкалы важны и дополняют друг друга для получения более точной картины очага землетрясений.

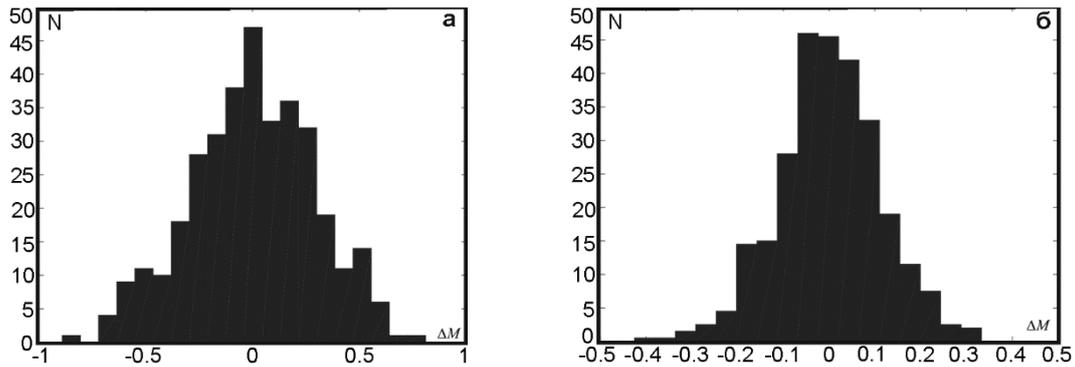


Рис. 4. Распределение значений отклонений $\Delta M = M_{st} - \bar{M}_{net}$ станционных магнитуд M_{st} от среднесетевых оценок \bar{M}_{net} для M_L (а) и M_w (б)

В практике сейсмологических исследований, как показано в работах [13, 14], для районов с малым количеством магнитуд M_w^{GCMT} в качестве аналога M_w (при отсутствии прямого определения моментной магнитуды другими способами) на небольших магнитудах выступает магнитуда mb^{ISC} . Именно эту магнитуду ISC использует в своей практике для получения оценок «квази M_w » в диапазоне $M < 5.0$ [13]. Из рис. 3 видно, что для магнитудного диапазона $M=3-5$ землетрясений Северного Кавказа, использованного в настоящей работе, наблюдается сопоставимая общая линейная зависимость между M_w и mb^{ISC} . Однако из табл. 3 и 4 видно, что стандартные отклонения σ у полученного соотношения $mb^{ISC}(M)$ заметно выше, чем для $M_L(M)$ и $M_w(M)$, поэтому использовать индивидуальные оценки mb^{ISC} следует с осторожностью, несмотря на сопоставимую с M_L и M_w среднюю разность с M .

В исследовании [14] показано, что согласно [15] предполагалось, что относительные логарифмические оценки магнитуды будут преобразованы в абсолютные оценки энергии путем добавления константы (const) в виде выражения $M=M+const$. В настоящей работе мы, следуя данному принципу, также определяем константы для перехода от магнитудных оценок (M) к условно «энергетическим» (mb^{ISC} при $M < 5$, M_w) и представляем оценки в виде линейной регрессии с фиксацией наклона $b=1.0$ (рис. 5).

Проведенный регрессионный анализ подтверждает тот факт, что прямое определение M_L и M_w является предпочтительным. Параллельное получение таких оценок позволяет оценить подобие очагов кавказских землетрясений в широком магнитудном диапазоне.

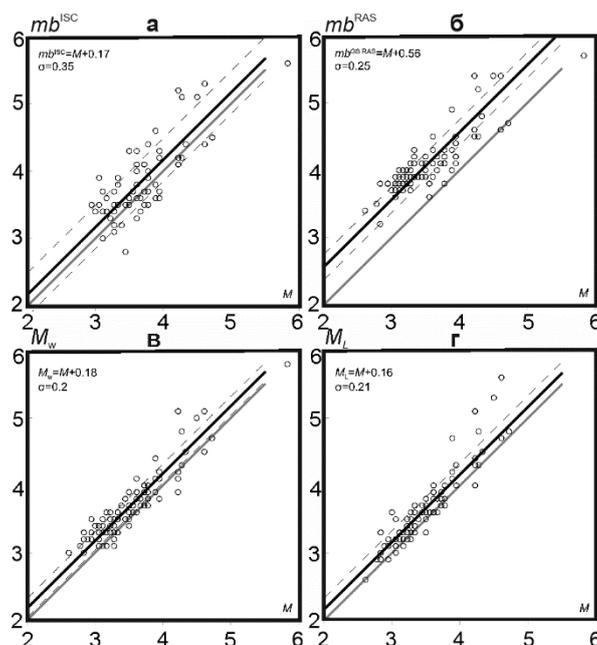


Рис. 5. Соотношения между магнитудами M и M^* , где $M^*=mb^{ISC}$ (а); mb^{GSRAS} (б); M_w (в); M_L (г)

Сплошная черная линия соответствует зависимости $y=x+const$ с фиксированным углом наклона $b=1.0$ (в верхних левых углах), пунктиром даны стандартные отклонения σ , сплошные серые линии соответствуют связи типа 1:1, когда $M=M$.

Механизмы очагов. Расчет механизмов очагов проводился по программе FA А.В. Ландера [16] 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 [10], а для ряда станций обрабатывались цифровые записи, например, станции Крыма и Грузии, находящиеся в открытом доступе. В целом для каждого землетрясения собирались от 20 до 80 знаков вступлений в *P*-волне на станциях, хорошо окружающих эпицентр.

По выполненным расчетам были построены диаграммы механизмов очагов в нижней полусфере для 30 землетрясений с $K_p=9.0-12.9$, которые показаны на рис. 6. Параметры механизмов приведены в [Прил. 3].

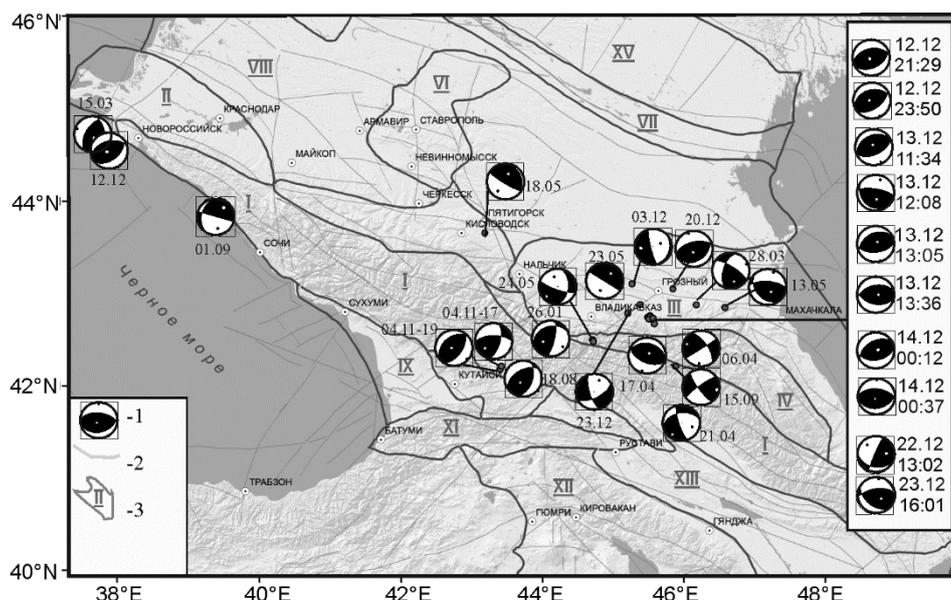


Рис. 6. Карта эпицентров землетрясений Северного Кавказа, для которых рассчитаны механизмы

1–диаграмма механизма очага; 2– разломы по [17]; 3–границы тектонических зон [18]: I – Большой Кавказ, II – Западно-Кубанский передовой прогиб, III – Терско-Каспийский передовой прогиб, IV – Дагестанский клин, V – моноклираль Предкавказья, VI – Ставропольский свод, VII – Кумо-Маньгский 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. На врезке справа представлены механизмы очагов основного толчка и афтершоков Черногорского-I землетрясения 12 декабря 2020 г. с $M_w^{SS}=4.7$, $M_w^{GCMT}=4.8$.

Интерпретация полученных решений и определение типов движений в очагах проводилась на основании классификации, используемой в программе FA, а также с использованием материалов статей [19, 20]. В частности, в [20] приводится таблица типов движений в соответствии с величинами углов наклона осей главных напряжений для различных деформационных режимов. Воспользовавшись такой градацией, мы провели классификацию исследуемых землетрясений по типам движений в очагах в последние пять лет, начиная с 2016 г. на Северном Кавказе (табл. 6).

Таблица 5. Величины углов наклона осей главных напряжений для различных деформационных режимов [21] и распределение механизмов очагов землетрясений Северного Кавказа за период 2016–2020 гг. по типам подвижки

Тип движения	Интервал углов наклона осей			Типы механизмов Северного Кавказа					
	<i>P</i>	<i>N</i>	<i>T</i>	2016	2017	2018	2019	2020	Итого
Взбросовый	$\leq 30^\circ$	$\leq 30^\circ$	$\geq 45^\circ$	7	10	14	8	20	58
Сбросовый	$\geq 45^\circ$	$\leq 30^\circ$	$\leq 30^\circ$	9	2	4	2	4	20
Сдвиговый	$\leq 30^\circ$	$\geq 45^\circ$	$\leq 30^\circ$	6	7	5	5	2	25
Взбросо-сдвиговый	$\leq 30^\circ$	$> 30^\circ$	$> 30^\circ$	3	1	5	2	2	13
Сбросо-сдвиговый	$> 30^\circ$	$> 30^\circ$	$\leq 30^\circ$	2	–	–	4	3	9
Сдвиго-сбросовый	$> 45^\circ$	$< 30^\circ$	$> 45^\circ$	–	2	–	–	–	2
Сдвиго-взбросовый	$30^\circ \geq \text{DIP} > 45^\circ$	$< 30^\circ$	$> 45^\circ$	4	4	–	4	3	15
Итого									142

За пять лет в период 2016–2020 гг. в регионе были определены параметры механизмов очагов 142 землетрясений. Из них 60 % имели взбросовый тип движения совместно с взбросо-сдвигами и сдвиго-взбросами, чистые сбросы отмечены у 15 % землетрясений, сдвиги – у 17 %. Диаграмма распределения всех землетрясений по типам механизмов очагов представлена на рис. 7. Для сравнения приведем классификацию очагов по типам движения в Крымско-Черноморском регионе (1927–2018 гг.) по [20]: ~58 % очагов являются взбросами, включая взбросо-сдвиги, ~36 % – сбросы, сбросо-сдвиги и сдвиго-сбросы. Можно говорить о согласованности сейсмогенерирующих полей напряжений и типов подвижек в очагах землетрясений Северного Кавказа и Крымско-Черноморского региона, что объясняется принадлежностью обоих регионов к одному тектоническому поясу. Преобладание взбросов в обоих регионах связано с коллизией Аравийской и Евразийской плит.



Рис. 7. Диаграмма распределения землетрясений по типам механизмов очагов на Северном Кавказе в 2016–2020 гг.

Самое сильное землетрясение в регионе в 2020 г. произошло 12 декабря в 21^h29^m с $K_p=12.9$. Эпицентр находился на территории Чеченской Республики [21]. Землетрясение реализовалось в районе Черногорского разлома, где 28.07.1976 г. произошло Черногорское землетрясение с $M_w=6.2$ – одно из сильнейших землетрясений на территории Чеченской Республики в XX веке [22]. Определены механизмы очагов основного толчка и девяти сильнейших афтершоков (табл. 6). Установлено, что движение в очагах землетрясений произошло под действием сил сжатия, направленных субмеридионально, тип движения в очаге взброс, у афтершоков иногда с небольшими сдвиговыми компонентами, простирание нодальных плоскостей субширотно, что является типичным для этой тектонической зоны.

Таблица 6. Параметры механизмов очагов основного толчка и афтершоков Черногорского-I землетрясения 12 декабря 2020 г. с $M_w^{SS}=4.7$, $M_w^{GCMT}=4.8$

Дата	t_0 , ч:мин:с	h , км	K_p	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Диаграмма
				T		N		P		$NP1$			$NP2$			
				PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	$SLIP$	STK	DP	$SLIP$	
12.12.2020	21:29:48	20	12.9	84	252	6	72	0	162	66	45	82	257	45	98	
12.12.2020 GCMT*	21:29:50	13	$M_w=4.8$	68	130	14	259	16	353	104	31	118	252	63	74	
12.12.2020	23:50:20	11	10.8	75	281	12	63	9	155	55	55	76	259	38	109	
13.12.2020	11:34:18	10	12.3	81	325	2	66	9	156	65	54	88	248	36	93	
13.12.2020	12:08:26	20	9.2	62	176	9	282	26	17	280	72	81	127	20	116	
13.12.2020	13:05:01	21	11.7	78	33	9	257	8	166	84	54	101	246	37	76	
13.12.2020	13:36:42	19	9.2	79	90	11	270	0	180	101	46	105	259	46	75	
14.12.2020	00:37:16	20	9.0	76	229	11	90	9	358	278	55	103	75	37	72	
14.12.2020	00:12:59	16	9.8	84	69	6	252	0	161	246	45	82	77	45	98	
22.12.2020	13:21:02	20	9.5	39	80	36	207	30	322	106	37	171	203	85	54	
23.12.2020	16:01:11	11	9.7	59	115	30	278	7	13	258	59	54	132	46	134	

Примечание. GCMT* – механизм Черногорского-I землетрясения 12 декабря 2020 г. по данным GCMT [23].

В западной зоне Северного Кавказа, близ Анапы, рассчитаны механизмы для двух землетрясений с близкими эпицентрами (рис. 6): 15 марта в 05^h36^m с $K_p=10.8$ и 12 декабря в 14^h54^m с $K_p=10.5$. Оба имели взбросовый тип движения с незначительными сдвиговыми компонентами, который согласуется с механизмом сильного Анапского землетрясения 12.07.1966 г. с $mb=5.8$ в этом районе (табл. 7) [24], которое, согласно [25], приурочено к сейсмогенерирующей структуре, связанной с поперечной зоной разломов (Анапская флексура), пересекающих сейсмоактивную зону вдоль береговой линии. Анапская флексура имеет более глубокое заложение (в нижней коре и, вероятно, в мантии) и поперечное простирание [26], что сопровождается сжатием вдоль структур общекавказского простирания. Такую картину можно наблюдать у механизма очага землетрясения 15 марта (табл. 8).

Таблица 7. Параметры механизмов очагов землетрясения 15 марта и 12 декабря 2020 г., определенных по знакам первого движения в *P*-волне в ФИЦ ЕГС РАН, а также сильного Анапского землетрясения 12.07.1966 г. [24]

Дата, дд мм гggg	t_0 , ч мин с	h , км	K_p	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Диаграмма
				<i>T</i>		<i>N</i>		<i>P</i>		<i>NP1</i>			<i>NP2</i>			
				<i>PL</i>	<i>AZM</i>	<i>PL</i>	<i>AZM</i>	<i>PL</i>	<i>AZM</i>	<i>STK</i>	<i>DP</i>	<i>SLIP</i>	<i>STK</i>	<i>DP</i>	<i>SLIP</i>	
12.07.1966	18:53:12.0	55	$mb=5.8$	70	70	19	234	5	326	219	53	66	75	43	118	
15.03.2020	05:36:0.9	40	10.5	72	170	16	21	9	288	212	56	109	0.2	39	65	
12.12.2020	14:54:23.6	31	10.8	78	243	12	63	0	153	52	46	74	255	46	106	

В Туапсинской зоне со стороны Туапсинского прогиба Черноморской впадины реализовалось землетрясение 1 сентября в 00^h59^m с $K_p=10.8$, для которого также рассчитан механизм, представленный сдвиго-сбросом (рис. 6): сброс с элементами правостороннего сдвига по крутопадающей нодальной плоскости *NP1* и сдвиго-сбросом по-горизонтальной плоскости *NP2*. Движения растяжения отмечаются в Туапсинской зоне по наблюдениям глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [27].

В пределах моноклинали Предкавказья построен механизм очага землетрясения 18 мая в 07^h24^m с $K_p=9.7$. Почти вертикально падающая нодальная плоскость имеет юго-восточное простирание, что согласуется с простиранием Армави́ро-Ессенту́кского разлома, продолжающегося в сторону Нальчика.

Деформационный режим на Большом Кавказе в 2020 г., как и традиционно ранее, характеризовался большей частью взбросами, лишь в области Загатальских землетрясений на границе с Кури́нской депрессией 21 апреля в 06^h08^m зарегистрирован сбросо-сдвиг с $K_p=10.6$. Такие типы наблюдались здесь и ранее, например, при Загатальском-IV землетрясении 7.05.2012 г. в 14^h15^m с $M_w=5.3$ [28].

В области Дагестанского клина получены сдвиги при землетрясениях 6 апреля в 21^h35^m с $K_p=9.7$ и 24 мая в 12^h33^m с $K_p=10.7$.

Заключение. Построены очаговые спектры 38 землетрясений Северного Кавказа за 2020 год. Выполнены оценки спектральных и динамических параметров очагов землетрясений этого региона с использованием модели очага по Брюну, получены стационарные и средние сетевые значения для каждого из спектральных параметров и моментной магнитуды M_w . Проведено детальное изучение межмагнитудных соотношений для использующихся на Северном Кавказе магнитудных шкал, в предположении линейной связи выполнен регрессионный анализ. Выявлено, что соотношения между магнитудой M , рассчитанной из энергетического класса K_p , и региональными шкалами локальных M_L и моментных M_w магнитуд показывают наименьшие значения остаточного стандартного отклонения σ и представляют собой линейный тренд с наклоном, близким к единице. При этом по оценкам межстанционного разброса для средних значений, оценки M_w являются более устойчивыми, чем M_L . Проведенный регрессионный анализ подтверждает тот факт, что прямое определение M_L и M_w является предпочтительным по сравнению с пересчетными значениями по установленным соотношениям. Параллельное получение таких оценок позволяет оценить подобие очагов кавказских землетрясений в широком магнитудном диапазоне.

Рассчитаны механизмы очагов 30 землетрясений 2020 г. с $K_p \geq 9.0$, 17 из них произошли в Терско-Каспийском прогибе, большая часть из них являются основным толчком или афтершоками Черногорского-I землетрясения 12 декабря с $K_p=12.9$. Движение в этих очагах землетрясений произошло под действием сил сжатия. Тип движения в очаге – взброс, у афтершоков часто с небольшими сдвиговыми компонентами. Простираение нодальных плоскостей большинства декабрьских событий 2020 г. субшироотно, что является типичным для этой тектонической зоны. Сопоставление азимутов простираения нодальных плоскостей с линиями разломов показывает согласованность одной из нодальных плоскостей с Черногорским разломом, в зоне влияния которого произошли декабрьские события.

Анализ механизмов очагов 142 землетрясений региона, построенных за пятилетний период 2016–2020 гг., показал, что в 60 % случаев наблюдался взбросовый тип движения, совместно с взбросо-сдвигами и сдвиго-взбросами, сбросы отмечены у 15 % землетрясений, сдвиги – у 17 %. В исследуемом 2020 г. 73 % землетрясений имели взбросовый тип движения, включая взбросо-сдвиги и сдвиго-взбросы, 20 % – сбросы и сбросо-сдвиги, 7 % – сдвиги. Взбросовый тип движения в очагах землетрясений, полученный при преобладании сил сжатия, отвечает общей геодинамической обстановке в зоне коллизии Евразийской и Аравийской плит.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания 075-00682-24) 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 App03c_North_Caucasus_2020 (<http://www.gsras.ru/zse/app-27.html>): 1 – Сейсмические станции ФИЦ ЕГС РАН, работающие на территории Северного Кавказа в 2020 г.; 2 – Каталог землетрясений Северного Кавказа за 2020 г.; 3 – Каталог механизмов очагов землетрясений Северного Кавказа за 2020 г.; 4 – Макросейсмический эффект ощутимых землетрясений Северного Кавказа в 2020 г.; 5 – Сведения о пунктах, для которых имеется информация о макросейсмических проявлениях ощутимых землетрясений Северного Кавказа за 2020 г.; 6 – Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Северного Кавказа в 2020 г. (S-волны).

Л и т е р а т у р а

1. Brune I.V. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // *Journal of Geophysical Research*. – 1970. – V. 75, N 26. – P. 4997–5009.
2. 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.
3. Габсатарова И.П., Королецки Л.Н., Саяпина А.А., Багаева С.С., Адилов З.М., Асманов О.А. Сейсмичность Северного Кавказа в 2020 году // *Землетрясения Северной Евразии*. – 2024. – Вып. 27 (2020). – С. 69–80. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2024.27.06> EDN: DPWUCN
4. 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>
5. 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: GINZSN.
6. Зверева А.С., Габсатарова И.П., Лиходеев Д.В. Региональные особенности затухания сейсмических волн на территории Северного Кавказа // *Физика Земли*. – 2024. – № 6. (в печати).
7. Электронное издание «Атлас «Опорные геолого-геофизические профили России». Глубинные сейсмические разрезы по профилям ГСЗ, отработанным в период с 1972 по 1995 год». [Электронный ресурс]. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2013. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – URL: <https://vsegei.ru/ru/info/seismic/rukovodstvo.php>
8. 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: XDVYEE

9. Eshelby J.D. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems // Proceedings of the royal society of London. Series A. Mathematical and physical sciences. – 1957. – V. 241, N 1226. – P. 376–396. DOI: <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.1957.0133>
10. International Seismological Centre. (2024). On-line Bulletin. <https://doi.org/10.31905/D808B830>
11. Сейсмологический бюллетень (сеть телесеизмических станций), 2020. (2024) // ФИЦ ЕГС РАН [сайт]. – URL: http://www.gsras.ru/ftp/Teleseismic_bulletin/2018
12. Маловичко А.А., Габсатарова И.П., Дягилов Р.А., Мехрюшев Д.Ю., Зверева А.С. Оценка регистрационных возможностей сейсмической сети в западной части Северного Кавказа через геометрию сети и локальный уровень микросейсмических шумов // Сейсмические приборы. – 2020. – Т. 56, № 3. – С. 35–60. DOI: <https://doi.org/10.21455/si2020.3-3> EDN QLUUFQ
13. Di Giacomo D., Bondár I., Storchak D.A., Engdahl E.R., Bormann P., Harris J. ISC-GEM: Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009), III. Re-computed *MS* and *mb*, proxy *MW*, final magnitude composition and completeness assessment // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 2015. – V. 239. – P. 33–47.
14. Gvishiani A.D., Vorobieva I.A., Shebalin P.N., Dzeboev B.A., Dzeranov B.V., Skorkina A.A. Integrated Earthquake Catalog of the Eastern Sector of the Russian Arctic // Applied Sciences. – 2022. – V. 12, N 6. – P. 5010. DOI: <https://doi.org/10.3390/app1210501014>
15. Richter C.F. An instrumental earthquake magnitude scale // Bulletin of the seismological society of America. – 1935. – V. 25, N. 1. – P. 1–32.
16. 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.
17. Трифонов В.Г., Соболева О.В., Трифонов Р.В., Востриков Г.А. Современная геодинамика Альпийско-Гималайского коллизийного пояса. – М.: ГЕОС, 2002. – 225 с.
18. Хаин В.Е. Кавказ. Тектоническая карта. М: 1:5 500 000 // Большая Советская Энциклопедия. – 1973. – Т. 11. – С. 112–114.
19. Лукк А.А., Шевченко В.И. Сейсмичность, тектоника и GPS-геодинамика Кавказа // Физика Земли. – 2019. – № 4. – С. 99–123.
20. 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.
21. Габсатарова И.П., Дмитриева И.Ю., Багаева С.С., Саяпина А.А., Гайсумов М.Я. Черногорское-I землетрясение 12 декабря 2020 г. с $K_p=12.9$, $M_w=4.8$ (GCMT), $I_0=5-6$ баллов в Чеченской Республике // Землетрясения Северной Евразии. – 2024. – Вып. 27 (2020). – С. 335–346. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2024.27.30> EDN: WLTFEI
22. Несмеянов С.А., Лутиков А.И., Щукин Ю.К., Донцова Г.Ю. Сейсмогенерирующие структуры // Комплексная оценка сейсмической опасности территории г. Грозного. – М.: Минстрой России, 1996. – С. 38–47.
23. Global Centroid Moment Tensor (GCMT). Catalog Search. (2024). [Site]. – URL: <https://www.glob-alcmt.org>
24. Пустовитенко Б.Г. Сейсмические процессы в Черноморском регионе и сейсмическая опасность Крыма: Дисс. на соиск. уч. степ. д-ра ф.-м. наук. – Киев: ИГ НАНУ, 2003. – С. 58–71.
25. Татевосян Р.Э., Плетнев К.Г., Бяков А.Ю., Шестопалов В.Л. Нижнекубанское землетрясение 9 ноября 2002 г.: результаты макросейсмического обследования // Физика Земли. – 2003. – № 11. – С. 42–53.
26. Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Лутиков А.И., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Горбатиков А.В. Эндеогенные опасности Большого Кавказа. – М.: ИФЗ РАН, 2014. – 256 с. EDN: ZPKBCV
27. Милюков В.К., Миронов А.П., Овсяченко А.Н., Горбатиков А.В., Стеблов Г.М., Корженков А.М., Ergintav S. Современные тектонические движения Западного Кавказа и Предкавказья по ГНСС наблюдениям // Геотектоника. – 2022. – № 1. – С. 51–67.
28. Етирмишли Г.Д., Казымова С.Э., Исмаилова С.С., Гаравелиев Э.С. Загатальское-III землетрясение 7 мая 2012 г. в $04^{\text{h}}40^{\text{m}}$ с $K_p=13.2$, $M_{L_{\text{азр}}}=5.6$, $M_w=5.6$, $I_0=7$ и Загатальское-IV в $14^{\text{h}}15^{\text{m}}$ с $K_p=13.3$, $M_{L_{\text{азр}}}=5.7$, $M_w=5.3$, $I_0=7$ (Азербайджан) // Землетрясения Северной Евразии. – 2018. – Вып. 21 (2012 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – С. 332–344.

SPECTRAL and SOURCE PARAMETERS of NORTH CAUCASUS EARTHQUAKES in 2020

A.S. Zvereva¹, A.A. Skorkina², I.P. Gabsatarova³

¹Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia, zvereva.as59@gmail.com

²Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of
the Russian Academy of Sciences, anna@mitp.ru

³Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Obninsk, Russia, ira@gsras.ru

Abstract. The spectral parameters of the sources of 38 earthquakes in the North Caucasus were determined from the displacement spectra of *S*-waves for the period 2020. The calculations used events with an energy classes $K_R=9.3-12.9$ and waveforms from stations with epicentral distances 50–250 km. The values of local magnitudes M_L were calculated using a new calibration curve. The calculation of source spectra was carried out in the SEISAN program based on the frequency-dependent quality factor $Q(f)$. The following values were obtained: Ω_0 – spectral density, f_0 – corner frequency, M_0 – scalar seismic moment, M_w – moment magnitude, $\Delta\sigma$ – stress drop, and RMS for each of the parameters. For 30 earthquakes with $K_R=9.0-12.9$ focal mechanisms were calculated, which are represented by reverse faults (including reverse faults with strike-slip components – 73 %), normal faults – 20 % and strike-slip – 7 %, which corresponds to deformation processes in the collision zone of the Arabian and Eurasian plates.

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

For citation: Zvereva, A.S., Skorkina, A.A., & Gabsatarova, I.P. (2024). [Spectral and source parameters of North Caucasus earthquakes in 2020]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 27(2020), 242–254. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2024.27.22> EDN: NZRLES

R e f e r e n c e s

1. Brune, I.V. (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 75(26), 4997–5009.
2. 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.
3. Gabsatarova, I.P., Koroletski, L.N., Saiapina, A.A., Bagaeva, S.S., Adilov, Z.M., & Asmanov, O.A. (2024). [Seismicity of the North Caucasus in 2020]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 27(2020). 69–80. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2024.27.06> EDN: DPWUCN
4. 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>
5. 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.
6. Zvereva, A.S., Gabsatarova, I.P., & Likhodeev, D.V. (2024b). Regional features of the attenuation of seismic waves in the North Caucasus. *Physics of the Earth*, 6, . (In print).
7. *Opornye geologo-geofizicheskie profili Rossii. Glubinnye seismicheskie razrezy po profilyam GSZ, otrabotannym v period s 1972 po 1995 god* [Reference geological and geophysical profiles of Russia. Deep seismic sections along DSS profiles developed from 1972 to 1995]. (2013). Retrieved from <https://vsegei.ru/ru/info/seismic/rukovodstvo.php> (In Russ.).
8. Gabsatarova, I.P., Selivanova E.A., & Zvereva, A.S. (2024). [Scale of local magnitudes *ML* for earthquakes in the North Caucasus]. In *Sovremennye 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: EDN: XDVEEE (In Russ.).
9. Eshelby, J.D. (1957). The Determination of the Elastic Field of an Ellipsoidal Inclusion and Related Problems. *Proceedings of the royal society of London. Series A. Mathematical and physical sciences*, 241(1226), 376–396. DOI: <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.1957.0133>
10. International Seismological Centre. (2024). On-line Bulletin. Retrieved from <https://doi.org/10.31905/D808B830>
11. GS RAS, Bulletin of Teleseismic Stations, 2020. (2024). Retrieved from http://www.gsras.ru/ftp/Teleseismic_bulletin/2020

12. Malovichko, A.A., Gabsatarova, I.P., Dyagilev, R.A., Mekhryushev, D.Yu., & Zvereva, A.S. (2021). Evaluation of the Detection and Location Capability of the Seismic Network in the Western Part of the North Caucasus Using Network Layout and Local Microseismic Noise Level. *Seismic Instruments*, 57, 209–230. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0747923921020274>
13. Di Giacomo, D., Bondár, I., Storchak, D.A., Engdahl, E.R., Bormann, P., & Harris, J. (2015). ISC-GEM: Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009). III. Re-computed *MS* and *mb*, proxy *MW*, final magnitude composition and completeness assessment. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 239, 33–47.
14. Gvishiani, A.D., Vorobieva, I.A., Shebalin, P.N., Dzeboev, B.A., Dzeranov, B.V., & Skorkina, A.A. (2022). Integrated Earthquake Catalog of the Eastern Sector of the Russian Arctic. *Applied Sciences*, 12(10), 5010. DOI: <https://doi.org/10.3390/app1210501014>
15. Richter, C.F. (1935). An instrumental earthquake magnitude scale. *Bulletin of the seismological society of America*, 25(1), 1–32.
16. 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.).
17. 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.).
18. Khain, V.E. (1973). [Caucasus. Tectonic map. – M: 1:5 500 000]. In *Bol'shaia Sovetskaia Entsiklopediia*. T. 11 [Great Soviet Encyclopedia, V. 11] (pp. 112–114). Moscow, Russia: Soviet Encyclopedia Publ. (In Russ.).
19. Lukk, A.A., & Shevchenko, V.I. (2019). Seismicity, tectonics, and GPS geodynamics of the Caucasus. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 55, 626–648.
20. 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.).
21. 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. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2024.27.30> EDN: WLTFEI
22. Nesmeyanov, S.A., Lutikov, A.I., Shchukin, Yu.K., & Dontsova, G.Yu. (1996). [Seismogenic structures]. *Kompleksnaya otsenka seysmicheskoy opasnosti territorii g. Groznogo*. [Comprehensive assessment of seismic hazard of the territory of Grozny] (pp. 38–47). Moscow, Russia: Ministry Rossii Publ. (In Russ.).
23. Global Centroid Moment Tensor (GCMT). Catalog Search. (2024). Retrieved from <https://www.globalcmt.org>
24. Pustovitenko, B.G. (2003). *Seismicheskie protsessy v Chernomorskom regione i seismicheskaia opasnost' Kryma. Dis. na soisk. uch. step. d-ra f.-m. nauk* [Seismic processes in the Black Sea region and seismic hazard of the Crimea. Dr. phys. and math. sci. diss.]. Kiev, Ukraine: IG NANU Publ., 58–71. (In Russ.).
25. Tatevosyan, R., Pletnev, K., Byakov, A., & Shestopalov, V. (2003). Nizhnnekubanskoe earthquake on November 9, 2002: results of macroseismic survey. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 11, 42–53.
26. Rogozhin, E.A., Ovsyuchenko, A.N., Lutikov, A.I., Sobisevich, A.L., Sobisevich, L.E., & Gorbatikov, A.V. (2014). *Endogennye opasnosti Bol'shogo Kavkaza* [Endogenous hazards of the Greater Caucasus]. Moscow, Russia: IFZ RAS Publ., 256 p. (In Russ.). EDN: ZPKBCV
27. Milyukov, V.K., Mironov, A.P., Ovsyuchenko, A.N., Gorbatikov, A.V., Steblov, G.M., Korzhenkov, A.M., & Ergintav, S. (2022). Contemporary tectonic movements of the Western Caucasus and the Ciscaucasia based on satellite-geodetic observations. *Geotectonics*, 56(1), 41–54.
28. Etirmishli, G.D., Kazymova, S.E., Ismailova, S.S., & Garaveliev, E.S. (2018). [Zagatala-III earthquake on May 7, 2012 in 04^h40^m, $K_R=13.2$, $ML_{Azer}=5.6$, $M_W=5.6$, $I_0=7$ and Zagatala-IV in 14^h15^m, $K_P=13.3$, $ML_{Azer}=5.7$, $M_W=5.3$, $I_0=7$ (Azerbaijan)]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii*. [Earthquakes in Northern Eurasia], 21(2012), 332–344. (In Russ.).