

УДК 632.126

## К ВОПРОСУ О ВЗАИМОСВЯЗИ МОМЕНТНЫХ И ЛОКАЛЬНЫХ МАГНИТУД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО КАВКАЗА

© 2023 г. А. С. Зверева<sup>1</sup>, член-корреспондент РАН А. Л. Собисевич<sup>2</sup>, Д. В. Лиходеев<sup>2,\*</sup>

Поступило 19.09.2022 г.  
После доработки 21.09.2022 г.  
Принято к публикации 23.09.2022 г.

Впервые для территории Северо-Западного Кавказа по данным действующей сети сейсмических станций ФИЦ ЕГС РАН выполнен расширенный анализ спектральных и динамических параметров очагов региональных сейсмических событий с выходом на сравнительные оценки величин моментных и локальных магнитуд, в том числе и с привлечением данных Крымской сети сейсмостанций. Для землетрясений малой и средней силы на исследуемой территории установлены зависимости между локальными и моментными магнитудами и рекомендуется к применению линейная зависимость  $M_w = M_L + 0.16$ . Также получена взаимозависимость между значениями энергетических классов и локальных магнитуд, что в совокупности дает основания для дальнейшего совершенствования процедур обработки данных сейсмологического мониторинга на кавказских станциях и подготовки универсальных региональных каталогов.

*Ключевые слова:* сейсмичность Западного Кавказа, спектральные параметры очага землетрясения, моментная магнитуда, локальная магнитуда

DOI: 10.31857/S2686739722601922, EDN: G1HZSN

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных результатов длительных сейсмологических наблюдений на исследуемой территории принято считать создание каталогов землетрясений, включающих оценки их силы, выраженные в единой магнитудной шкале. При этом наиболее универсальными энергетическими характеристиками сейсмических событий представляются их моментные магнитуды ( $M_w$ ), рассчитываемые по соответствующим значениям сейсмического момента очага  $M_0$ , являющегося, в свою очередь, фундаментальной физической величиной, непосредственно связанной с площадью разломной зоны и средней подвижкой по разлому [1].

Для энергетической оценки землетрясений на Кавказе обычно используется локальная магнитуда ( $M_L$ ) по Рихтеру [2], представляющая собой одну из стандартных магнитудных оценок для от-

носительно слабых землетрясений, регистрируемых в региональном масштабе [3]. Помимо локальной магнитуды в рутинной практике подготовки каталогов кавказских землетрясений сохраняются и оценки их энергетических классов ( $K_p$ ) по номограмме Т.Г. Раутиан [4].

Отметим, что для территории Северо-Западного Кавказа исследования по сопоставлению магнитуд  $M_L$  и  $M_w$  ранее не проводились, однако известны результаты аналогичных исследований на других территориях [5].

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве исходных данных для расчета были отобраны сорок наиболее сильных землетрясений на территории Северо-Западного Кавказа, за период 2016–2021 гг., с  $M_L > 2.7$  и  $h < 40$  км. Данные события зарегистрированы сетью сейсмических станций ФИЦ ЕГС РАН. Все станции сети оснащены широкополосной и короткопериодной аппаратурой. Географическое расположение эпицентров землетрясений и мест установки сейсмических станций, данные с которых были использованы в данной работе, представлено на рис. 1.

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр “Единая геофизическая служба Российской академии наук”, Обнинск, Россия

<sup>2</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: dmitry@ifz.ru

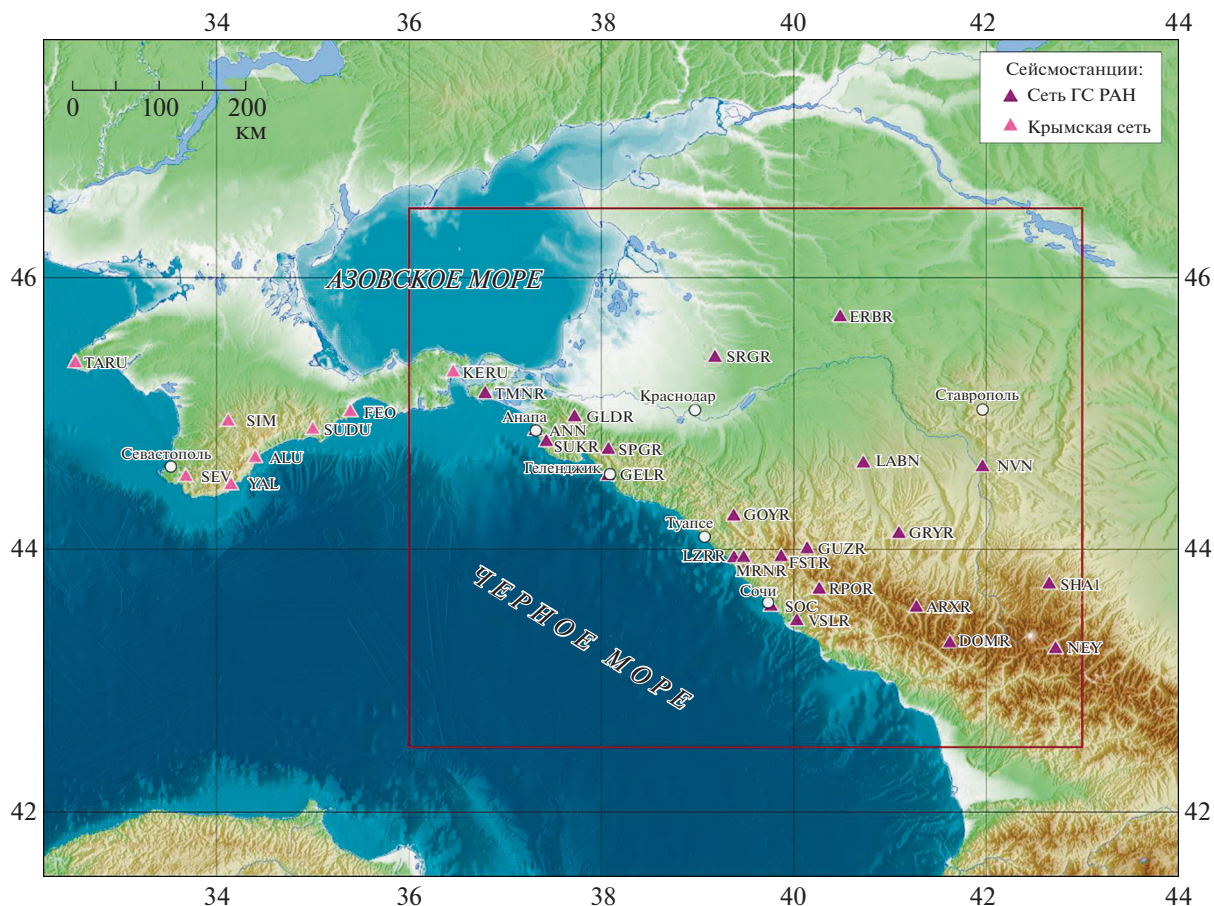


Рис. 1. Карта территории Северо-Западного Кавказа с сейсмическими станциями сети ФИЦ ЕГС РАН и Крымской сети. Здесь и далее карты построены с использованием программного комплекса Generic Mapping Tools (GMT) [6]. Для построения рельефа использовались данные General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) [7].

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ С ВЫХОДОМ НА ОЦЕНКИ МОМЕНТНЫХ МАГНИТУД $M_w$

Впервые для территории Северо-Западного Кавказа выполнен расширенный анализ спектральных параметров очагов местных землетрясений по данным действующей сети сейсмических станций ФИЦ ЕГС РАН. Ранее подобные расчеты для данного региона проводились лишь для отдельных сейсмических станций в соответствии с методикой [8].

В качестве модели сейсмического очага использовалась модель Брюна [9], согласно которой спектр смещений источника  $S(f)$  определяется как:

$$S(f) = \frac{M_0}{\left(1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right) 4\pi\rho v^3}, \quad (1)$$

где  $M_0$  – сейсмический момент [Н м],  $\rho$  – плотность ( $\text{кг/м}^3$ ),  $v$  – скорость в очаге (м/с) ( $v_p$  или  $v_s$ ),  $f$  – частота (Гц) и  $f_0$  – угловая частота (Гц). На низких частотах отмечается плато, уровень которого пропорционален  $M_0$ , а далее амплитуды спектральных компонент линейно убывают по мере приближения к угловой частоте ( $f = f_0$ ), на которой амплитуда вдвое меньше уровня плато. Поскольку спектр смещений приемника видоизменяется под влиянием геометрического расхождения и неупругого затухания, теоретический спектр имеет следующий вид:

$$D(f) = \frac{M_0 \times KK}{4\pi\rho v^3 \left(1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right)} G(\Delta, h) * d(f), \quad (2)$$

где  $G(\Delta, h)$  – геометрическое расхождение ( $\Delta$  – эпицентральное расстояние,  $h$  – глубина),  $d(f)$  – функция уменьшения амплитуды за счет неупругого затухания, а  $KK = 0.6 \times 2.0$ , где 0.6 – коэффициент, учитывающий средний эффект радиального

расхождения лучей, а 2.0 – коэффициент, учитывающий влияние эффекта свободной поверхности.

Функция уменьшения амплитуды за счет неупругого затухания определяется как:

$$d(f) = P(f) e^{-\pi f \text{trtime}/Q(f)}, \quad (3)$$

где  $\text{trtime}$  – время от времени в очаге до времени начала окна спектрального анализа и  $P(f) = e^{(-\pi k f)}$ , предназначенная для приповерхностных потерь с постоянной  $k$  (каппа). Неупругое затухание, определяется добротностью среды  $Q$ , которая зависит от частоты ( $Q = Q_0 f^\alpha$ ) для значений  $f$  более 1 Гц.

Для вычисления сейсмического момента в наблюдаемый спектр вносится поправка на затухание, после чего он используется для получения наблюдаемых параметров угловой частоты  $f_0$  и уровня плато  $\Omega_0$  (м с):

$$D_c(f) = \frac{\Omega_0}{\left(1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right)} = \frac{M_0 \times 0.6 \times 2.0}{4\pi r v^3 \left(1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right)} G(\Delta, h). \quad (4)$$

Далее вычисляется сейсмический момент  $M_0$ :

$$M_0 = \frac{\Omega_0 4\pi r v^3}{0.6 \times 2.0 \times G(\Delta, h)}. \quad (5)$$

Из полученных спектральных параметров можно рассчитать радиус очага и статический сброс напряжений. Согласно дислокационной модели Брюна с разрывом в виде круга радиус очага  $R$  (км) вычисляется по формуле:

$$R = 0.37v/f_0, \quad (6)$$

где  $v$  – скорости  $P$  или  $S$  волн, в зависимости от типа спектра. Статический сброс напряжений определяется как:

$$\Delta\sigma = \frac{0.44M_0}{R^3}. \quad (7)$$

Моментные магнитуды  $M_w$  определяются формулой Канамори [1]:

$$M_w = 2/3(\lg M_0) - 6.06. \quad (8)$$

Полный цикл обработки исходных данных реализован в рамках свободно распространяемого программного комплекс SEISAN [10]. Процедура обработки подразумевает вычисление спектра смещений объемной  $S$ -волны, при этом длительность фрагмента сейсмограммы выбиралась от вступления до момента, когда амплитуда данной группы волн снижалась до  $\sim 1/3$  от максимальной. После удаления постоянной составляющей с последующим применением синусного тейпера к краевым частям сигнала, длительностью 10% от фрагмента записи, выполнялось быстрое преобразование Фурье, а также вносились поправки на

затухание и амплитудно-частотные характеристики сейсмологической аппаратуры. Для расчетов использовались только сейсмограммы с соотношением сигнал/шум  $> 3$ , потери за неупругое затухание задавались в виде функции (3). Согласно [11], представляется возможным оценить значение угловой частоты, при которой спектральные амплитуды соответствуют половине уровня плато, как результат влияния приповерхностного затухания  $k$ , и тогда по формуле (3) получаем  $f_0 = \frac{0.221}{k}$ .

Для всех рассматриваемых сейсмических событий ( $M_L \geq 2.7$ ) значение угловой частоты  $f_0$  не превышало 4 Гц и, соответственно, значение приповерхностного затухания задавалось постоянным и равным 0.02, также задавалось частотно-зависимое соотношение  $Q = 91f^{1.05}$ , определяющее добротность геофизической слоистой среды Северо-Западного Кавказа [12]. Поправки на геометрическое расхождение рассчитывались в зависимости от расстояния и глубины [11]:

$$G(\Delta, h) = \frac{1}{g_d}, \quad (9)$$

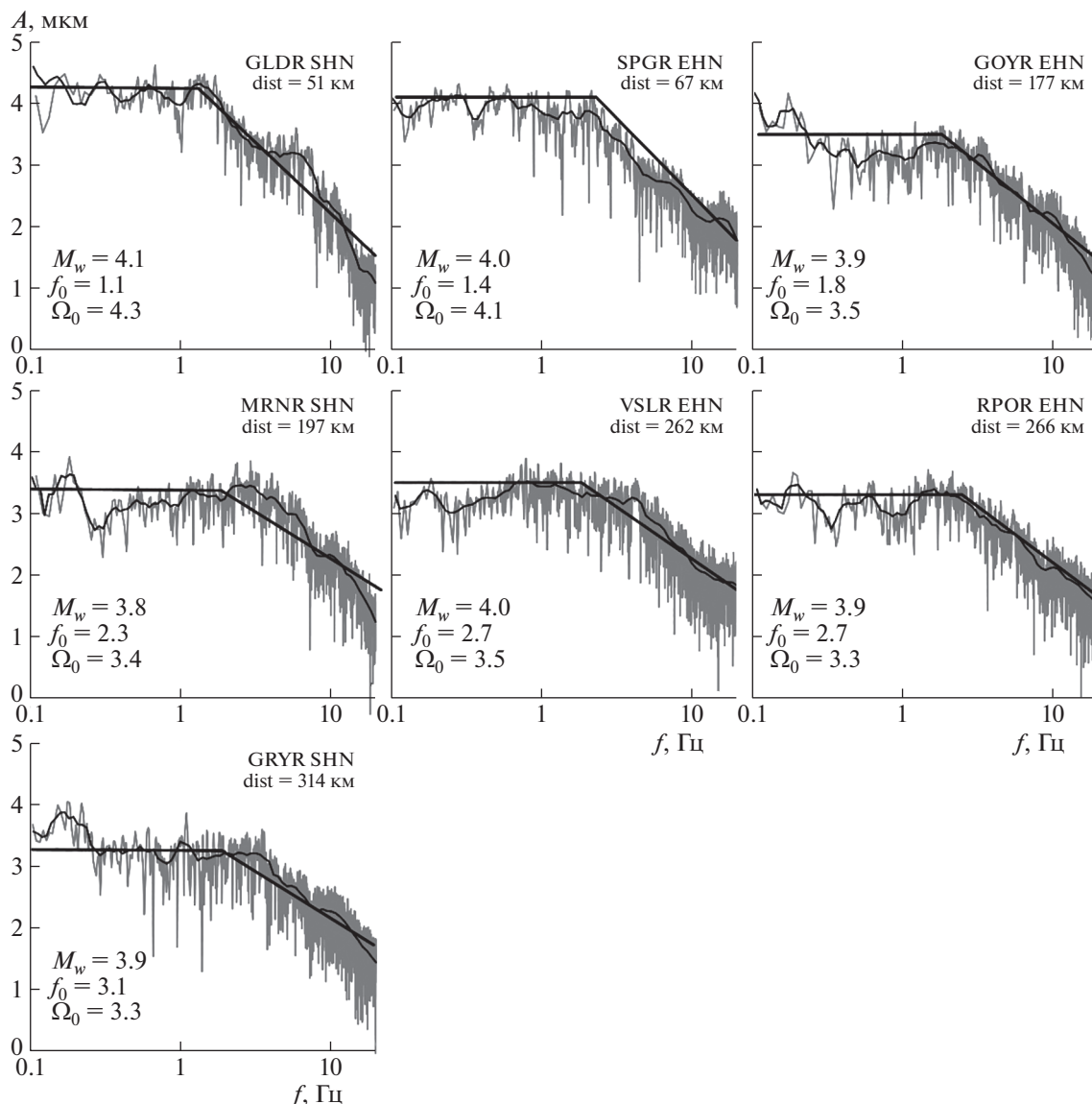
где  $g_d$  называется “георасстоянием” (geodistance) и определяется как:

$$\begin{aligned} P\text{-волны: } g_d &= r \quad \text{при любых } \Delta \text{ и } h; \\ S\text{-волны: } g_d &= r \quad \text{при } \Delta < \Delta_0 \text{ и любых } h; \\ g_d &= r \quad \text{при любых } \Delta \text{ с } h < h_2; \\ g_d &= \sqrt{\Delta\Delta_0} \quad \text{при } \Delta > \Delta_0 \text{ и } h < h_1; \\ g_d &= \left(1 - \frac{h-h_1}{h_2-h_1}\right) \sqrt{\Delta\Delta_0 + \frac{h-h_1}{h_2-h_1}r} \\ &\quad \text{при } \Delta \geq \Delta_0 \text{ и } h_1 \leq h < h_2. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь параметры  $h_1$ ,  $h_2$  и  $\Delta_0$  варьируются в зависимости от региона,  $r$  – гипоцентральное расстояние.

Расчет сейсмического момента  $M_0$  проводился по формуле (5) для всех спектров смещения  $S$ -волн в соответствии с моделью Брюна на каждой сейсмической станции в отдельности (рис. 2). Далее определялся уровень плоского участка спектра  $\Omega_0$  как полный вектор смещения  $S$ -волны (м с), приведенный к условиям однородного упругого полупространства. Плотность среды  $\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$  и скорость  $S$ -волн  $v = 3400 \text{ м/с}$  определяются данными ГСЗ [13]. Использование средней диаграммы направленности позволило для каждого землетрясения проводить осреднение оценок по станциям, значение  $\Omega_0$  определяется через сумму квадратов спектров  $Z$ ,  $N$ ,  $E$  компонент.

Таким образом, для каждого из сорока землетрясений были получены соответствующие зна-



**Рис. 2.** Примеры спектров смещения объемной  $S$ -волны для фрагмента записи землетрясения 15.03.2020 г. на различных сейсмических станциях. Серым цветом показан исходный спектр сейсмического сигнала, тонкой черной линией – сглаженный спектр, черными прямыми линиями – асимптоты по модели Брюна. В левых нижних углах приведены рассчитанные значения угловой частоты  $f_0$ , уровень площадки спектра  $\Omega_0$  и моментная магнитуда  $M_w$ .

чения спектральных параметров для каждой сейсмической станции, также общее среднее значение для каждого из параметров не менее чем по трем сейсмическим станциям (табл. 1). Далее по формуле (8) вычислялись величины моментной магнитуды  $M_w$ .

### ОЦЕНКИ ВЕЛИЧИН ЛОКАЛЬНЫХ МАГНИТУД $M_L$

Локальная магнитуда  $M_L$  была первой шкалой магнитуд, разработанной Рихтером [2] в попытке количественно описать размер очага землетрясе-

ния применительно к геотектоническим условиям Южной Калифорнии:

$$M_L = \log A - \log A_0, \quad (11)$$

где  $A$  – максимальная амплитуда (в миллиметрах) горизонтального смещения грунта при землетрясении на точке наблюдения с фильтрацией данных, подобной частотному отклику стандартного сейсмографа Вуда–Андерсона,  $A_0$  – соответствующая амплитуда опорного события на выбранном эталонном эпицентрально-расстоянии. В методе Рихтера использовалась наибольшая амплитуда горизонтальной составляющей сейсмического сигнала независимо от фазы [2]. Од-

**Таблица 1.** Основные параметры землетрясений, локальная магнитуда  $M_L$ , магнитуда Канамори  $M_w$ , энергетический класс по Раутиан  $K_p$  и спектральные параметры: логарифм сейсмического момента  $\lg M_0$ , статический сброс напряжений  $\sigma$  и радиус очага  $R$

N	Дата и время (UTC)	Широта град.	Долгота град.	$h$ , км	$M_L$	$M_w$	$K_p$	$\lg M_0$ , Н м	$\sigma$ , бар	$R$ , км
1	07.02.2016 0: 50	44.91	39.44	30	3.5	3.7	10.4	14.6	45.5	0.43
2	23.02.2016 10: 47	43.39	41.54	8	3.4	3.3	9.9	14.1	17.5	0.43
3	06.03.2016 0: 57	43.23	41.76	9	3.3	3.2	9.5	13.9	15.6	0.41
4	23.05.2016 2: 04	43.41	40.98	4	3.5	3.4	9.4	14.2	4.7	0.67
5	28.07.2016 6: 05	42.95	41.00	6	4.0	4.0	11.1	15.1	28.9	0.87
6	27.08.2016 18: 00	43.36	41.03	21	3.5	3.9	10.2	14.9	9.6	1.02
7	31.08.2016 21: 05	43.33	40.99	5	2.9	3.1	9.2	13.7	7.9	0.54
8	03.09.2016 11: 53	43.34	40.99	6	3.5	3.8	10.1	14.8	3.3	1.08
9	21.09.2016 19: 27	42.47	41.04	13	4.4	4.2	11.6	15.4	148.0	0.55
10	16.10.2016 20: 41	43.36	40.97	9	2.7	3.1	9.0	13.7	5.6	0.42
11	21.10.2016 21: 17	45.00	41.22	26	3.4	3.6	10.0	14.5	20.4	0.45
12	30.10.2016 5: 27	44.20	39.66	15	4.5	4.4	11.0	15.7	54.5	0.94
13	30.04.2017 3: 40	43.83	38.97	13	3.2	3.3	9.9	14.0	3.3	0.59
14	16.06.2017 18: 17	44.82	36.99	32	3.8	4.0	10.7	15.1	14.8	0.82
15	24.08.2017 9: 14	44.21	41.60	5	3.9	3.9	11.6	15.0	86.7	0.58
16	28.09.2017 3: 35	43.94	39.42	11	3.7	3.8	10.5	14.8	5.8	1.01
17	17.10.2017 1: 59	44.35	41.57	20	3.3	3.4	9.9	14.2	50.2	0.27
18	26.10.2017 10: 24	43.35	41.12	17	3.1	3.4	9.3	14.2	9.4	0.55
19	25.11.2017 14: 17	43.24	41.76	16	3.0	3.2	9.3	13.9	7.1	0.44
20	27.11.2017 15: 55	44.90	37.05	39	2.8	3.2	9.1	13.8	8.1	0.38
21	20.01.2018 16: 28	44.76	37.39	39	3.2	3.4	9.6	14.2	7.6	0.50
22	31.01.2018 4: 28	44.79	37.26	19	3.4	3.6	10.3	14.6	14.4	0.54
23	24.04.2018 20: 47	44.75	37.59	40	3.7	3.9	10.5	14.9	40.3	0.56
24	26.08.2018 19: 07	42.58	41.01	9	3.3	3.1	9.9	13.7	11.5	0.37
25	15.10.2018 10: 42	46.22	37.36	13	4.0	4.1	11.0	15.2	26.6	0.74
26	24.11.2018 22: 55	44.88	38.67	2	3.5	3.8	10.3	14.9	2.0	1.46
27	25.11.2018 0: 05	44.86	38.69	6	3.6	4.0	10.5	15.1	1.5	1.95
28	21.05.2019 12: 06	43.32	41.41	14	3.2	3.3	9.8	14.1	22.7	0.39
29	15.07.2019 6: 00	44.69	37.67	36	3.0	3.3	9.2	14.1	13.6	0.45
30	18.12.2019 13: 24	43.97	39.81	10	3.4	3.4	10.3	14.1	27.5	0.37
31	15.03.2020 5: 36	44.68	37.24	39	3.8	3.8	10.8	14.9	39.2	0.57
32	01.06.2020 13:25	45.02	37.65	17	3.4	3.7	9.9	14.6	18.4	0.66
33	01.09.2020 0: 59	44.00	39.17	11	3.8	3.9	10.8	14.9	18.6	0.80
34	12.12.2020 14: 54	44.72	37.39	31	3.8	3.8	10.5	14.9	35.5	0.64
35	14.12.2020 10: 32	44.65	37.35	41	3.1	3.5	9.3	14.3	5.7	0.55
36	13.03.2021 22: 15	44.69	37.46	35	3.0	3.3	9.5	14.0	13.2	0.42
37	18.04.2021 10: 58	44.72	37.50	35	3.1	3.3	9.1	14.0	5.7	0.48
38	05.09.2021 23: 36	44.55	38.23	38	2.9	3.2	9.6	13.8	53.3	0.25
39	11.09.2021 6: 33	44.46	36.80	18	3.0	3.5	9.0	14.3	34.4	0.46
40	15.12.2021 22: 54	43.40	38.34	5	3.1	3.3	9.6	14.0	10.6	0.47

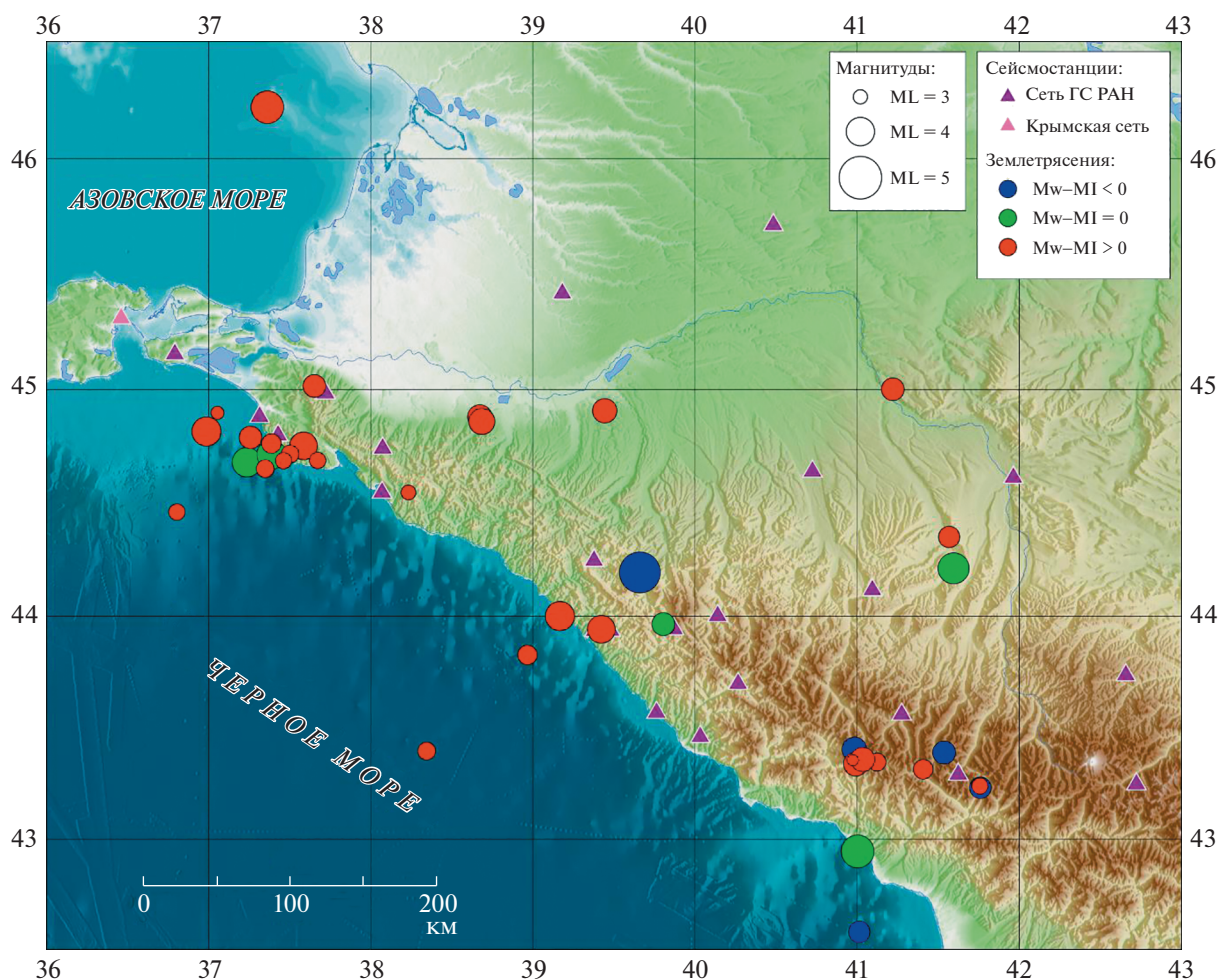


Рис. 3. Карта расположения сейсмических станций сети ФИЦ ЕГС РАН и эпицентров сейсмических событий, выбранных для последующего анализа. Выполнен пространственный анализ анизотропии невязки между этими величинами.

нако на практике чаще используют вертикальную составляющую [5]. В работе [11] показано, что в скальных породах максимальные амплитуды вертикальной и горизонтальной компонент сейсмического сигнала практически одинаковы, в то время как на рыхлом грунте из-за приповерхностного усиления амплитуды горизонтальных смещений, как правило, значительно превосходят вертикальные.

В общем виде расчет локальной магнитуды  $M_L$  производится по формуле:

$$M_L = \log(A) + a \log(r) + br + c + d, \quad (12)$$

где  $r$  – эпицентральный расстояние в километрах,  $a$ ,  $b$  и  $c$  – константы, представляющие соответственно геометрическое расхождение, затухание и базовый уровень,  $d$  – станционная поправка.

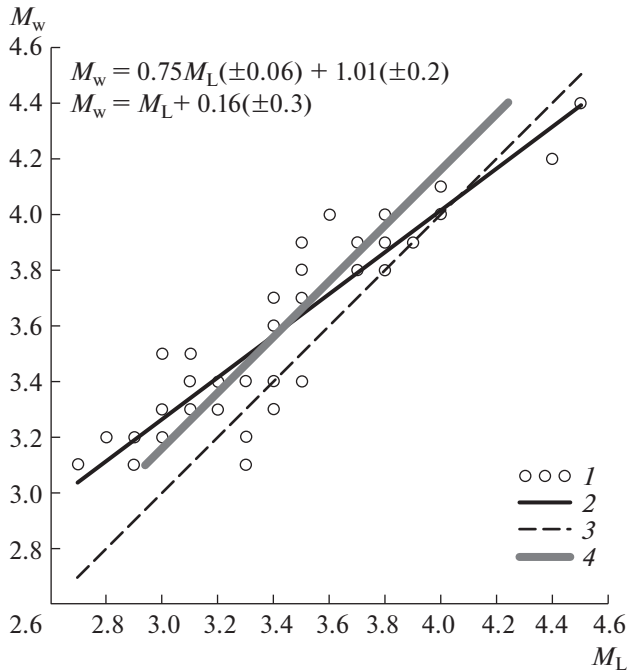
Стандартная процедура обработки сейсмических событий на территории Северо-Западного Кавказа в силу своих особенностей не позволяет

включать рассчитанные значения локальных магнитуд в итоговые каталоги данных. Таким образом, по мере накопления массивов данных инструментальных наблюдений и последующего определения констант  $a$ ,  $b$  и  $c$  калибровочной кривой для территории Северо-Западного Кавказа [14] потребовалась новая методика для расчетов  $M_L$ . Нами был выбран ранее упомянутый вычислительный комплекс SEISAN для определения локальных магнитуд и дальнейшего корректного сравнения со шкалой моментных магнитуд.

Процедура обработки для всех отобранных землетрясений (рис. 1) включала в себя перерасчет локальной магнитуды согласно [3] с калибровочными коэффициентами, определенными в работе [14] с учетом станционной поправки ( $d = 0$ ):

$$M_L = \log(A) + 1.22 \log(r) + 0.00175r - 2.29. \quad (13)$$

Строго говоря, значения  $M_L$  могут существенно различаться от станции к станции в зависимо-

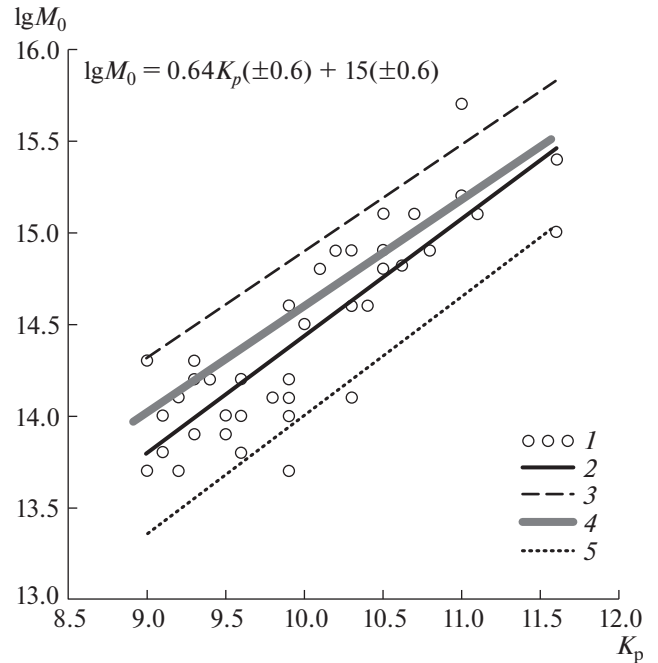


**Рис. 4.** Сравнение магнитуд  $M_w$  и  $M_L$  для всех событий. 1 – параметры землетрясений западной зоны Северного Кавказа, полученные по результатам расчетов в программе SEISAN; 2 – линейная зависимость между  $M_w$  и  $M_L$  по методу наименьших квадратов; 3 – линия при соотношении 1:1 ( $M_w = M_L$ ); 4 – линейная зависимость ( $M_w - M_L$ ) при наилучшем соответствии, параллельная линии 1:1, предполагающая наклон, равный 1. В левом верхнем углу представлены уравнения для зависимостей 2 и 4 соответственно.

сти от диаграммы направленности и пути распространения волнового фронта, поэтому они и рассчитывались на нескольких станциях в разных азимутах, а полученные таким образом значения усреднялись [5]. Из-за различных особенностей глубинного строения геофизической среды в пунктах наблюдения, для получения более согласованной оценки локальных магнитуд на каждой станции использовалась средняя максимальная амплитуда перемещений по всем трем компонентам (см. табл. 1).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обратимся к рис. 3, на котором представлены три группы эпицентров из числа исследуемых землетрясений. Тримя цветами обозначены основные группы событий, характеризующиеся вариациями разности величин моментной и локальной магнитуд ( $M_w - M_L$ ), причем для большинства из них ( $M_w - M_L \geq 0$ ), однако, в восточной части Черного моря и Чхалтинско-Тебердинской сейсмоактивной зоне наблюдается тенденция к преобладанию событий со значениями ( $M_w - M_L \leq 0$ ).



**Рис. 5.** Зависимость энергетического класса  $K_p$  (по Раутиан) от сейсмического момента  $M_0$  и сравнение полученных в настоящей работе данных по Северо-Западному Кавказу с долговременными значениями по другим районам Кавказа (значения  $M_0$  переведены в единицы Н м): 1 – параметры землетрясений западной зоны Северного Кавказа; 2 – линейная зависимость для землетрясений Западного Кавказа; 3 – Дагестан; 4 – Крым; 5 – Средняя по Кавказу. В левом верхнем углу уравнение зависимости  $M_0$  от  $K_p$ .

Известно [5, 15], что чем дальше сейсмическая волна взаимодействует с неоднородностями земной коры по пути распространения, тем больше следует ожидать расхождения в оценках  $M_w$  и  $M_L$ . Естественно предположить, что и в нашем случае наиболее заметные различия в магнитудах обусловлены локальными неоднородностями строения геологической среды.

На рис. 4 показана зависимость  $M_w$  от  $M_L$  для всех 40 событий. Сплошная черная линия представляет собой линейную зависимость, полученную методом наименьших квадратов  $M_w = 0.75M_L(\pm 0.06) + 1.01(\pm 0.2)$ , пунктирная линия представляет отношение 1:1 между  $M_w$  и  $M_L$  (что предполагает  $M_w = M_L$ ), сплошная серая линия представляет собой линию наилучшего соответствия, параллельную линии 1:1  $M_w = M_L + 0.16(\pm 0.03)$ . Смещение для линии наилучшего соответствия вычисляется путем взятия среднего значения невязок между  $M_w$  и линией 1:1, а дисперсия невязок используется в качестве ошибки [5]. Видно, что линия наилучшего соответствия хорошо описывает большую часть событий, что позволяет говорить об устойчивой связи между маг-

**Таблица 2.** Сравнение спектральных параметров землетрясений и моментной магнитуды  $M_w$  по данным, полученным в настоящей работе и по Крымской сети станций. Агенсу: NC – Северо-Западный Кавказ (настоящая работа), К – Крымская сеть сейсмических станций [Пустовитенко, Эреджепов, 2017, 2021; Пустовитенко и др., 2018, 2021]; N – количество сейсмических станций, участвующих в расчете среднего значения параметра

Дата и время (UTC)	Широта град.	Долгота град.	$h$ , км	Агентство	$M_w$	$M_0 \times 10^{13}$ , Н м	$\Delta\sigma \times 10^5$ , Па	$R$ , км	N
16.06.2017 18: 17	44.82	36.99	32	NC	4.0	125.9	14.8	0.82	6
				К	3.99	120.6	8.4	0.86	5
31.01.2018 4: 28	44.79	37.26	19	NC	3.6	39.8	14.4	0.54	4
				К	3.96	108.0	7.9	0.85	4
24.04.2018 20: 47	44.75	37.59	40	NC	3.9	79.4	40.3	0.56	8
				К	3.95	105.0	11.3	0.74	5
15.10.2018 10: 42	46.22	37.36	13	NC	4.1	158.5	26.6	0.74	7
				К	4.13	190.0	5.4	1.16	5
15.03.2020 5: 36	44.68	37.24	39	NC	3.8	79.4	39.2	0.57	9
				К	4.02	132.0	17.1	0.70	8
01.06.2020 13: 25	45.02	37.65	17	NC	3.7	39.8	18.4	0.66	5
				К	3.11	5.7	1.3	0.58	2
12.12.2020 14: 54	44.72	37.39	31	NC	3.8	79.4	35.5	0.64	5
				К	3.67	36.0	4.4	0.73	3

нитудами, за исключением двух событий с  $M_L > 4.4$  (рис. 3).

К сожалению, недостаточное количество высокомагнитудных событий не позволяет сделать

надежную оценку для зависимости  $M_w - M_L$  при  $M_L > 4.0$ , по мере накопления экспериментальных данных исследование будет продолжено.

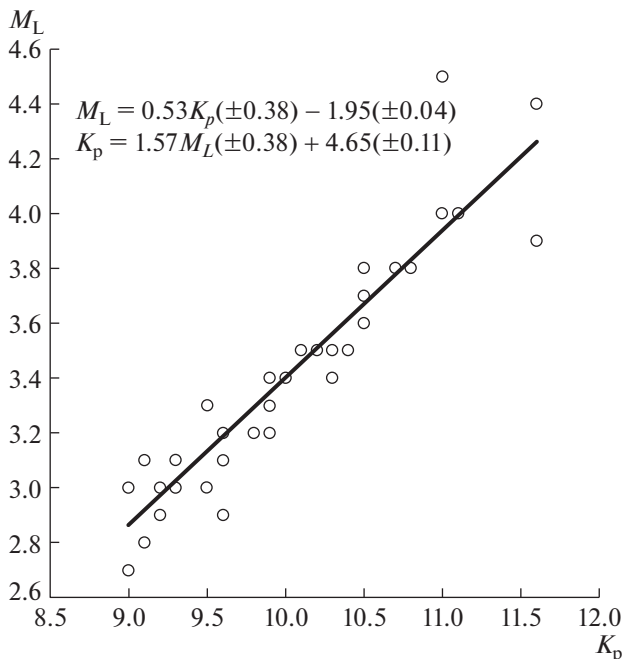
Таким образом, в настоящее время для землетрясений Северо-Западного Кавказа в диапазоне локальных магнитуд  $M_L = 2.7 - 4.0$  представляется возможным рекомендовать к применению линейную зависимость  $M_w = M_L + 0.16$ .

На рис. 5. представлено сравнение полученных значений  $\lg M_0$  в зависимости от  $K_p$  с долговременными зависимостями для различных территорий Кавказа [16]. Для корректного сопоставления энергетического класса  $K_{\Pi}$  (по Б.Г. Пустовитенко) и  $K_p$ , (по Т.Г. Раутиан) используется следующее соотношение [ЗСЕ]:

$$K_p = 0.8964 (\pm 0.37) K_{\Pi} + 0.90 (\pm 0.29). \quad (14)$$

Из рис. 5 видно, что данные по землетрясениям западной зоны (кружки), и полученная линейная зависимость (сплошная черная линия), удовлетворительно согласуются с Крымской долговременной зависимостью (серая сплошная линия). Результаты сравнения рассчитанных спектральных параметров и моментной магнитуды  $M_w$ , данными Крымской сети сейсмостанций [17–20], представлены в табл. 2.

Отметим, что значения моментной магнитуды  $M_w$  для большей части событий близки по величине, однако, в ряде случаев наблюдаются заметные различия. Последнее может быть обусловлено количеством сейсмических станций в эксперимен-



**Рис. 6.** Зависимость энергетического класса по Раутиан ( $K_p$ ) от локальной магнитуды  $M_L$  для территории Северо-Западного Кавказа.



те, как, например, для события 1 июня 2020 г., зарегистрированного всего лишь двумя станциями Крымской сети. Подобные различия могут быть связаны и с местоположением отдельных станций, и с эпицентрными расстояниями для каждого из событий. В целом же можно говорить об удовлетворительном согласии среднесетевых значений по данным обеих геофизических служб.

В качестве одного из практически значимых результатов на рис. 6 представлена взаимозависимость локальных магнитуд и энергетических классов (по Раутиан) сейсмических событий, зарегистрированных на территории Северо-Западного Кавказа, которая служит для удобства пересчета при рутинной обработке первичных инструментальных данных и составлении итоговых региональных каталогов.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить И.П. Габсатарову за ценные замечания и рекомендации в процессе написания работы.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания № 075-01471-22 (ФИЦ ЕГС РАН) и 075-00693-22-00 (ИФЗ РАН), а так же с использованием данных, полученных на уникальной научной установке “Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира”.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kanamori H.* The energy release in great earthquakes // *J. Geophys. Res.* 1977. V. 82. № 20. P. 2981–2987.
2. *Richter C.F.* An instrumental earthquake magnitude scale // *Bull. Seism. Soc. Am.* 1935. V. 25. P. 1–32.
3. *Bormann P., Wendt S., DiGiacomo D.* Seismic Sources and Source Parameters / In: Bormann, P. (Ed.), *New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP2)*. 2013. Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 1–259. [https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2\\_ch3](https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch3)
4. *Раутиан Т.Г.* Об определении энергии землетрясений на расстояниях до 3000 км // *М.: Труды ИФЗ АН СССР.* 1964. № 32 (199). С. 88–93.
5. *Ristau J., Rodgers G.C., Cassidy J.F.* Moment magnitude – Local magnitude calibration for earthquakes off Canada’s west coast // *Bull. Seismol. Am.* 2003. V. 93. P. 2296–2300.
6. *Wessel P., Luis J.F., Uieda L., Scharroo R., Wobbe F., Smith W.H.F., Tian D.* The Generic Mapping Tools version 6 // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems.* 2019. V. 20. P. 5556–5564. <https://doi.org/10.1029/2019GC008515>
7. *GEBCO Compilation Group (2022) GEBCO\_2022 Grid* // <https://doi.org/10.5285/e0f0bb80-ab44-2739-e053-6c86abc0289c>
8. *Малянова Л.С., Габсатарова И.П.* Спектральные и очаговые параметры землетрясений Северного Кавказа // *Землетрясения Северной Евразии.* Вып. 23 (2014 г.). Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН. 2020. С. 263–270.
9. *Brune J.N.* Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // *J. Geophys. Res.* 1970. V. 75. № 26. P. 4997–5009.
10. *Havskov J., Voss P.H., Ottemöller L.* Seismological observatory software: 30 Yr of SEISAN // *Seism. Res. Lett.* 2020. V. 91 (3). P. 1846–1852. <https://doi.org/10.1785/0220190313>
11. *Havskov J., Ottemöller L.* Routine data processing in earthquake seismology: with sample data, exercises and software. Springer Science & Business Media. 2010.
12. *Zvereva A.S., Havskov J., Gabsatarova I.P.* Regional variation of coda Q in Northwest Caucasus // is a preprint, under review in *Journal of Seismology.* <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1935783/v1>
13. 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). <https://vsegei.ru/ru/info/seismic/rukovodstvo.php>
14. *Заклюковская А.С., Габсатарова И.П.* Уточнение шкалы локальных магнитуд  $M_L$  для западной части Северного Кавказа / В сб. *Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Десятой Международной сейсмологической школы. Геофизическая служба РАН, Республиканский центр сейсмологической службы при Национальной академии наук Азербайджана.* 2015. С. 132–136.
15. *Baruah S., Baruah S., Bora P.K. et al.* Moment Magnitude (M W) and Local Magnitude (M L) Relationship for Earthquakes in Northeast India // *Pure Appl. Geophys.* 2012. V. 169. P. 1977–1988. <https://doi.org/10.1007/s00024-012-0465-9>
16. *Пустовитенко Б.Г., Пантелеева Т.А.* Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. Киев: “Наукова Думка”. 1990. 252 с.
17. *Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э.* Очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона 2016 года // *Ученые записки Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. География. Геология.* Т. 3 (69). № 4. 2017. С. 51–69.
18. *Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э.* Скорректированные очаговые параметры землетрясений Крыма 2018–2019 гг. // *Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология.* Т. 7 (73). № 4. 2021. С. 164–175.

19. Пустовитенко Б.Г., Эреджеев Э.Э., Бондарь Н.М. Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма 2017 года // Ученые записки Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. География. Геология. Т. 4 (70). № 4. 2018. С. 69–83.
20. Пустовитенко Б.Г., Эреджеев Э.Э., Бондарь М.Н. Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма 2020 года // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. Т. 7 (73). № 4. 2021. С. 70–86.

## ON THE MOMENT MAGNITUDE–LOCAL MAGNITUDE CALIBRATION FOR EARTHQUAKES IN THE NORTHWESTERN CAUCASUS

A. S. Zvereva<sup>a</sup>, Corresponding Member of the RAS A. L. Sobisevich<sup>b</sup>, and D. V. Likhodeev<sup>b,#</sup>

<sup>a</sup>*Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation*

<sup>b</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>#</sup>*E-mail: dmitry@ifz.ru*

The spectral and dynamic parameters of the sources of regional seismic events have been studied for the territory of the Northwestern Caucasus using stations from the network of the Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences and Crimean network. This is the first study for the region using such a large dataset. Moment magnitudes-Local magnitude calibration have been established for earthquakes of small and medium magnitude in the study area and linear dependence  $M_w = M_L + 0.16$  is recommended for use. An interdependence between the values of energy classes and local magnitudes was also obtained, which can help to further improve the procedures for processing seismological monitoring data at Caucasian stations and the formation of regional catalogs.

*Keywords:* seismicity of the Western Caucasus, spectral parameters of the earthquake source, moment magnitude, local magnitude