

УДК 550.348. (470.62)

СПЕКТРАЛЬНЫЕ и ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

СЕВЕРНОГО КАВКАЗА в 2018–2019 гг.

А.С. Зверева¹, Л.С. Малянова²,

И.П. Габсатарова²

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

²ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия, ira@gsras.ru

Аннотация. Определены спектральные параметры очагов 44 землетрясений Северного Кавказа по спектрам смещения *S*-волн за период 2018–2019 гг. с $K_p=9.1-14.1$. Для расчета использованы записи землетрясений региональных цифровых сейсмических станций сети Северного Кавказа с эпицентрными расстояниями не более 300 км. Расчет очаговых спектров проводился на основании частотно-зависимой добротности: $Q(f)=90f^{1.02}$ для землетрясений западной зоны и $Q(f)=97f^{0.89}$ для восточной зоны. Для спектрального исследования 31 землетрясения применена программа SEISAN. Получены значения спектральной плотности Ω_0 , угловой частоты f_0 , скалярного сейсмического момента M_0 , моментной магнитуды M_w , длины разрыва L или радиуса круговой площадки r , сброшенного напряжения $\Delta\sigma$. Построены графики зависимости $\lg M_0$ (K_p) и M_w (K_p).

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

Для цитирования: Зверева А.С., Малянова Л.С., Габсатарова И.П. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Северного Кавказа в 2018–2019 гг. // Землетрясения Северной Евразии. – 2023. – Вып. 26 (2018–2019 гг.). – С. 257–263. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.22> EDN: JQНТЕХ

Введение. В 2018–2019 гг. продолжены работы по построению очаговых спектров региональных землетрясений Северного Кавказа и расчету спектральных и динамических параметров очагов землетрясений этого региона. Проведение спектрального анализа очагов землетрясений включает в себя корректное построение очаговых спектров, их аппроксимацию согласно модели Брюна [1] и определение динамических параметров очагов, включающих скалярные сейсмические моменты M_0 и иные очаговые параметры землетрясений. Полученные параметры показывают особенности очагов землетрясений в районе исследования, необходимые для дальнейшего изучения сейсмической опасности региона и составления прогнозов. Также важной задачей является расчет значений моментной магнитуды M_w [2], являющейся наиболее предпочтительной магнитудой в каталогах землетрясений, как рекомендовано IASPEI [3]. Для территории Северного Кавказа расчет спектральных параметров выполняется по данным всей действующей сети сейсмических станций ФИЦ ЕГС РАН, что стало возможным благодаря полученным интегральным оценкам частотно-зависимой добротности $Q_c(f)$ в целом для района [4, 5]. Расчет проводился с применением двух методик: первая изложена подробно в [1, 6–9], вторая в программном комплексе SEISAN [10, 11], ранее опробованная в экспериментальном режиме и показавшая хороший результат [12].

Исходные данные. Для исследования были выбраны наиболее сильные ($K_p=9.1-14.1$) землетрясения Северного Кавказа в 2018–2019 гг. (рис. 1, Прил. 1) 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) (Приложение к [13]). Сейсмические станции в основном оснащены короткопериодными сейсмометрами, и лишь некоторые (KIV, MAK, ANN, SOC) – широкополосными.

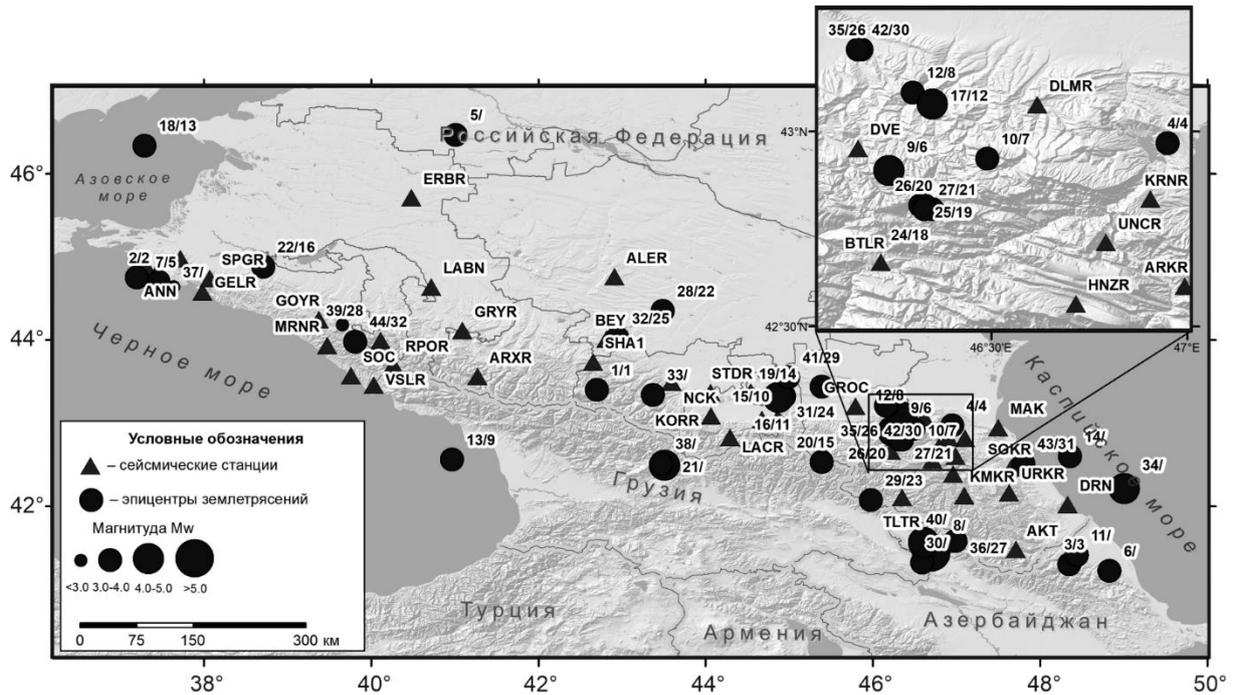


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений 2018–2019 гг. на Северном Кавказе, для которых проведен спектральный анализ

Номера возле эпицентров соответствуют номеру события в Прил. 2/Прил. 3.

Методика. Для выполнения построений и расчетов использовалась методика, изложенная подробно в [1, 6–9]. Значение Q_{cp} для S -волн Северо-Западного Кавказа по записям станций «Анапа» (ANN), «Сочи» (SOC), «Кисловодск» (KIV) и «Махачкала» (МАК), определенное О.В. Павленко [14–17], использовалось для расчета спектров. Для полосы частот $\Delta f=1-8$ Гц оно находится из зависимостей: $Q(f)\sim 90 f^{0.7}$ – для ANN, $Q(f)\sim 80 f^{0.9}$ – для SOC, $Q(f)\sim 85 f^{0.9}$ – для KIV и $Q(f)\sim 100 f^{0.9}$ – для МАК.

Кроме того, большая часть землетрясений (рис. 1), была подвергнута обработке с помощью методики и процедур, заложенных в программе SEISAN [11], основы которой в целом совпадают с ранее используемой методикой. Основные отличия наблюдаются в расчете поправки за геометрическое расхождение (подробнее изложено в [11]), а также в определении уровня плоского участка спектра Ω_0 , который находится как полный вектор смещения S -волны (m/s), приведенный к условиям однородного упругого полупространства, через сумму квадратов спектров Z , N , E компонент. Подробнее методика расчета спектральных параметров описана в работе [18]. Большим преимуществом SEISAN относительно используемой ранее технологии расчета спектральных параметров является возможность получения и использования средних значений добротности $Q_{cp}(f)$ для определенного района, а не только для каждой станции. Такие работы были проведены и получены значения частотно-зависимой добротности $Q(f)=90f^{1.02}$ для западной зоны [4] и $Q(f)=97f^{0.89}$ для восточной зоны [4] Кавказа. Также в SEISAN возможна автоматизация процесса расчета спектральных и динамических параметров по сети станций. Для этих работ проводилось одновременно и ручное, и автоматическое определение параметров с последующим сравнением. Программа SEISAN находится в опытной эксплуатации в регионе Северного Кавказа.

Замеры спектральной амплитуды Ω_0 осуществлялись также на обеих горизонтальных компонентах, максимальные значения приведены в Прил. 2 вместе с сейсмическими моментами M_0 и моментными магнитудами M_w .

На рисунке 2 показан расчет спектральных параметров в программе SEISAN на примере землетрясения 17 октября 2018 г. в 15^h55^m с $K_p=11.7$ в Ингушетии. Всего расчет был проведен для 32 землетрясений, результаты представлены в Приложении 3 к настоящей статье.

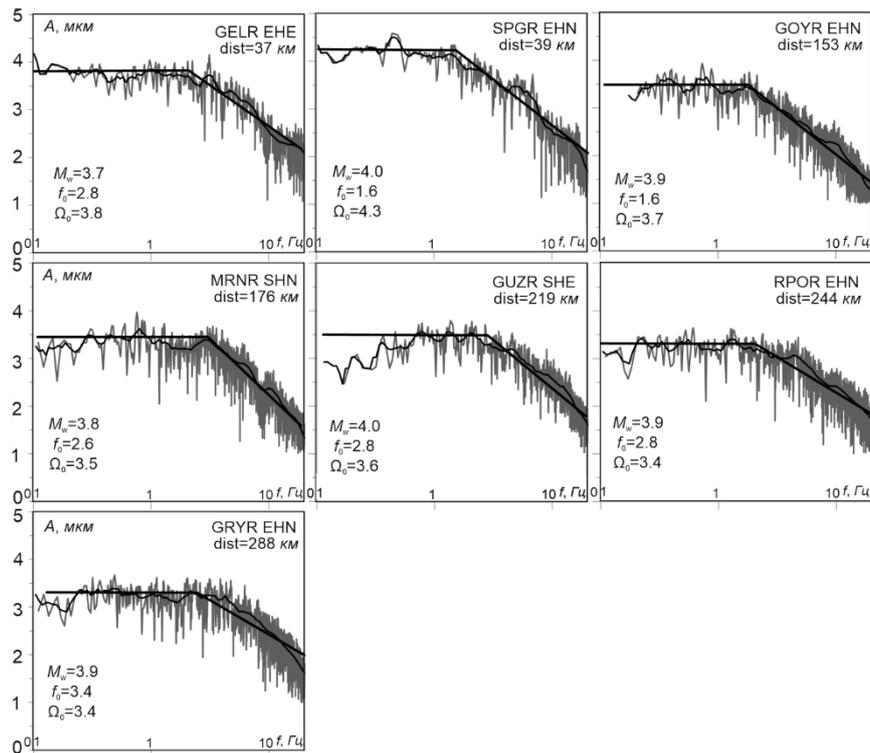


Рис. 2. Примеры амплитудных спектров для фрагментов записи землетрясения 17 октября 2018 г., построенных по результатам работы программы SEISAN, с асимптотами в соответствии с моделью Брюна

Серым показан исходный спектр, тонкой черной линией – сглаженный спектр, жирными прямыми линиями – асимптоты по модели Брюна.

Расчет динамических параметров. Для 44 землетрясений из Прил. 1 амплитудные спектры аппроксимировались двумя асимптотами: в длиннопериодной части спектра – прямой, параллельной оси частот, а в области коротких периодов – наклонной прямой с угловым коэффициентом $\gamma \approx -2$ (рис. 2). Для всех спектров в соответствии с моделью Брюна [1] определены уровень плоской части спектра Ω_0 и угловая частота f_0 (точка его пересечения с высокочастотным склоном), которые использованы для расчета динамических параметров очагов и моментной магнитуды M_w (Прил. 2). В таблице (Прил. 2) представлены следующие параметры землетрясений: Δ – эпицентральное расстояние, Ω_0 – спектральная плотность, f_1 – частота перегиба спектра, f_0 – угловая частота, M_0 – сейсмический момент, M_w – моментная магнитуда, L – длина разрыва, $\Delta\sigma$ – сброшенное напряжение, $\eta\sigma$ – кажущееся напряжение, \bar{u} – средняя подвижка по разрыву.

По программе SEISAN для 32 землетрясений получены следующие параметры: $\lg M_0$ (логарифм сейсмического момента в единицах $H\cdot m$), $ST=\Delta\sigma$ (сброшенное напряжение в барах), f_0 (угловая частота в $Гц$), r (радиус круговой площадки), M_w (моментная магнитуда) и скалярный сейсмический момент (Прил. 3).

Обсуждение результатов. Проведено сравнение полученных значений $\lg M_0$ в зависимости от K_p , на рисунке 3 кривая «Восточный Кавказ» построена по данным настоящей работы, «Западный Кавказ» – по результатам, представленным в работе [18], а «Центральный Кавказ» – по совместным результатам текущего исследования и [18]. Сравнение проводилось со следующими долговременными зависимостями (формулы 1–3) для разных зон Кавказа, установленными в [19] для событий в диапазоне энергетических классов K (K_n, K_p)=6.5–13.0 (M_0 в единицах $дин\cdot см$):

$$\lg M_0 = 0.58 K_n + 15.8 \text{ Крым}, \quad (1)$$

$$\lg M_0 = 0.58 K_p + 16.1 \text{ Дагестан}, \quad (2)$$

$$\lg M_0 = 0.65 K_p + 14.5 \text{ Кавказ}. \quad (3)$$

Как видно из рис. 3, данные по землетрясениям западной зоны близки к Крымской долговременной зависимости. Параметры землетрясений восточной зоны находятся ниже ранее полученной зависимости для Дагестана. В целом результаты (4)–(7), полученные в настоящей работе при использовании программы SEISAN, занимают промежуточное положение между зависимостями из [19] (1)–(3) по Крыму, Дагестану и всему Кавказу. Рассчитанные нами зависимости имеют аналитическое выражение (формулы 4–7):

$$\lg M_0 = 0.7K_p + 14.5 \text{ Западная зона Северного Кавказа,} \quad (4)$$

$$\lg M_0 = 0.55K_p + 15.7 \text{ Центральная зона Северного Кавказа,} \quad (5)$$

$$\lg M_0 = 0.67K_p + 14.5 \text{ Восточная зона Северного Кавказа,} \quad (6)$$

$$\lg M_0 = 0.61K_p + 15.2 \text{ Северный Кавказ в целом (среднее значение).} \quad (7)$$

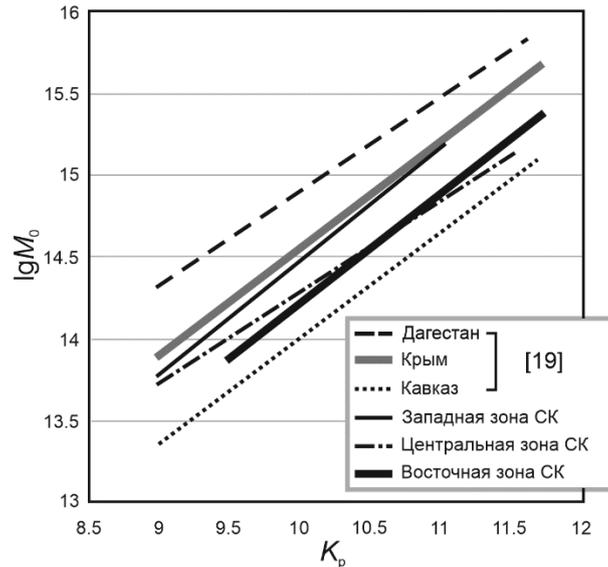


Рис. 3. Сравнение полученных в 2018–2019 гг. и в [18] данных в виде зависимостей $\lg M_0 = f(K_p)$ по Северному Кавказу с долговременными значениями по разным регионам [19] (значения M_0 переведены в единицы Н·м)

Нами была получена средняя взаимозависимость между моментной магнитудой M_w и энергетическим классом K_p сейсмических событий, зарегистрированных за период 2018–2019 гг. на территории Северного Кавказа, которая может служить для пересчета при рутинной обработке первичных инструментальных данных и составлении итоговых региональных каталогов, содержащих значения M_w (рис. 4).

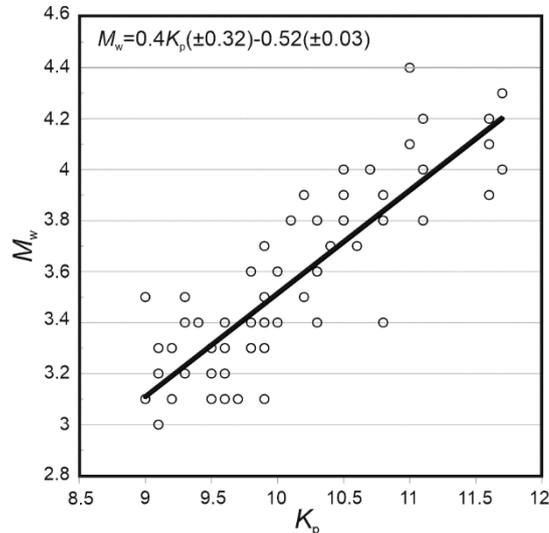


Рис. 4. Взаимосвязь моментной магнитуды M_w и K_p для землетрясений Северного Кавказа по данным, полученным в 2018–2019 гг., с добавлением событий из [18]

Заключение. Как и ранее, полученные в 2018–2019 гг. данные по спектральным и динамическим параметрам очагов землетрясений дополнили информационный ряд для землетрясений Северного Кавказа.

Исследования по применению программы SEISAN в западной зоне Северного Кавказа показали удовлетворительный результат и будут расширены на другие зоны Северного Кавказа. Для этого проводятся работы по расчету частотно зависимой добротности $Q(f)$, лежащей в основе вычисления поправки за затухание S -волн в коре и верхней мантии. В дальнейшем для расчета спектральных параметров землетрясений Северного Кавказа будет использована методика, основанная на применении программы SEISAN.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01271-23) 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_2018–2019 (<http://www.gsras.ru/zse/app-26.html>): 1 – Список землетрясений Северного Кавказа в 2018–2019 гг., для которых рассчитаны спектры S -волн; 2 – Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Северного Кавказа в 2018–2019 гг.; 3 – Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Северного Кавказа в 2018–2019 гг. (S -волны), рассчитанные по сети станций с применением программы SEISAN.

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. Kanamori H. The energy release in great earthquakes // *Journal of Geophysical Research*. – 1977. – V. 82, № 20. – P. 2981–2987.
3. 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.
4. Zvereva A.S., Havskov J., Gabsatarova I.P. Regional variation of coda Q in Northwest Caucasus // *Journal of Seismology*. – 2023. – V. 27. – P. 363–384. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10950-023-10154-8>
5. Габсатарова И.П., Зверева А.С., Бабкова Е.А. Добротность среды в некоторых районах Северного Кавказа // *Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XVI Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко*. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. – С. 31. – EDN: IDTAVI
6. Аптекман Ж.Я., Дараган С.К., Долгополов В.В., Захарова А.И., Зобин В.М., Коган С.Я., Корчагина О.А., Москвина А.Г., Поликарпова Л.А., Чепкунас Л.С. Спектры P -волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений. Унификация исходных данных и процедуры расчета амплитудных спектров // *Вулканология и сейсмология*. – 1985. – № 2. – С. 60–70.
7. 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. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2020.23.26>
8. Ризниченко Ю.В., Джибладзе Э.А., Болквандзе И.Н. Спектры колебаний и параметры очагов землетрясений Кавказа // *Исследования по физике землетрясений*. – М.: Наука, 1976. – С. 74–86.
9. 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.
10. 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>
11. Зверева А.С. Применение программного комплекса SEISAN для расчета добротности литосферы и спектральных параметров очагов землетрясений Северного Кавказа // *Современные техника и технологии в научных исследованиях: Сб. материалов XV Междунар. конф. молодых ученых и студентов*. – Бишкек: НС РАН, 2023. – С. 51–57.
12. Малянова Л.С., Зверева А.С., Габсатарова И.П. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Северного Кавказа // *Землетрясения Северной Евразии*. – 2022. – Вып. 25 (2016–2017 гг.). – С. 253–260. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2022.25.23>. EDN: FWVHYN

13. Габсатарова И.П., Королецки Л.Н., Иванова Л.Е., Саяпина А.А., Багаева С.С., Адилов З.М., Асманов О.А. Сейсмичность Северного Кавказа в 2018–2019 гг. // *Землетрясения Северной Евразии*. – 2023. – Вып. 26 (2018–2019 гг.). – С. 73–91. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.06> EDN: ZOYJVU
14. Павленко В.А., Павленко О.В. Поглощение сейсмических волн в коре и верхней мантии в окрестностях сейсмостанции «Кисловодск» // *Физика Земли*. – 2016. – № 4. – С. 24–24.
15. Павленко О.В. Характеристики излучения и распространения сейсмических волн на Северном Кавказе, оцененные по записям сейсмостанций «Сочи» и «Анапа» // *Вопросы инженерной сейсмологии*. – 2016. – Т. 43, № 1. – С. 49–61.
16. Павленко О.В. Изучение региональных характеристик излучения и распространения сейсмических волн на Северном Кавказе посредством моделирования акселерограмм // *Физика Земли*. – 2009. – № 10. – С. 38–48.
17. Павленко О.В. Характеристики поглощения сейсмических волн в восточной части Северного Кавказа, оцененные по записям сейсмостанции «Махачкала» // *Физика Земли*. – 2020. – № 5. – С. 36–45.
18. 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.
19. Пустовитенко Б.Г., Пантелеева Т.А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. – Киев: Наукова Думка, 1990. – 252 с.

SPECTRAL and SOURCE PARAMETERS

of NORTH CAUCASUS EARTHQUAKES in 2018–2019

A.S. Zvereva¹, L.S. Malyanova², I.P. Gabsatarova²

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

²*Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Obninsk, Russia, ira@gsras.ru*

Abstract. The dynamic parameters of the sources of 44 earthquakes in the North Caucasus were determined from the amplitude spectra of *S*-waves for the period 2018–2019 with an energy class according to T.G. Rautian scale $K_R=9.1-14.1$. Earthquake records from regional digital seismic stations of the North Caucasus network, with epicentral distances of no more than 300 km were used for the calculation. The source spectra were calculated based on the frequency-dependent quality factor $Q(f)$ for earthquakes in the North Caucasus western zone – $Q(f)=90f^{1.02}$ – and eastern zone – $Q(f)=97f^{0.89}$. The SEISAN program was used for the spectral analysis of 31 earthquakes. The following values were obtained: Ω_0 – spectral density, f_0 – corner frequency, M_0 – scalar seismic moment, M_w – moment magnitude, L – length of the rupture at the source of an earthquake, or r – radius of the circular area, $\Delta\sigma$ – stress drop. Relationships between $\lg M_0$ and K_R and M_w and K_R are obtained.

Keywords: Brun source model, seismic moment, stress drop, fracture length, source dynamic parameters, SEISAN, North Caucasus.

For citation: Zvereva, A.S., Malyanova, L.S., & Gabsatarova, I.P. (2023). [Spectral and source parameters of North Caucasus earthquakes in 2018–2019]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 26(2018–2019), 257–263. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.22> EDN: JQHTEX

References

1. Brune, J.N. (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of geophysical research*, 75(26), 4997–5009.
2. Kanamori, H. (1977). The energy release in great earthquakes. *Journal of geophysical research*, 82(20), 2981–2987.
3. 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.
4. Zvereva, A.S., Havskov, J., & Gabsatarova, I.P. (2023). Regional variation of coda Q in Northwest Caucasus. *Journal of Seismology*, 27, 363–384. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10950-023-10154-8>
5. Gabsatarova, I.P., Zvereva, A.S., & Babkova, E.A. (2022). [The quality factor of the environment in some regions of the North Caucasus]. In *Materialy XVI Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly "Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh"* [Proceedings of the XVI International Seismological Workshop "Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data"]. Obninsk, Russia: GS RAS Publ., P. 31. EDN: IDTAVI (In Russ.).

6. Aptekman, Zh.Ya., Belavina, Yu.F., Zakharova, A.I., Zobin, V.M., Kogan, S.YA., Korchagina, O.A., Moskvina, A.G., Polikarpova, L.A., & Chepkunas, L.S. (1989). [P-wave spectra in the problem of determining the dynamic parameters of earthquake focuses. Transition from the station spectrum to the focal and calculation of the dynamic parameters of the focus]. *Vulkanologiya i seismologiya* [Journal of Volcanology and Seismology], 2, 66–79. (In Russ.).
7. Malyanova, L.S., & Gabsatarova, I.P. (2020). [Spectral and focal parameters of Northern Caucasus earthquakes]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), 263–270. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2020.23.26>
8. Riznichenko, Yu.V., Dzhibladze, E.A., & Bolkvadze, I.N. (1976). [Oscillation spectra and parameters of foci of earthquakes in the Caucasus]. In *Issledovaniia po fizike zemletriasenii* [Studies in the physics of earthquakes] (pp. 74–86). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
9. Pustovitenko, B.G. (2003). *Seismicheskie protsessy v Chernomorskom regione i seismicheskaia opasnost' Kryma. Dis. na soisk. uch. step. d-ra fiz. -mat. nauk* [Seismic processes in the Black Sea region and seismic hazard of the Crimea. Dr. Phys.-math. Sci. diss.]. Kiev, Ukraine: IG NANU Publ., 58–71. (In Russ.).
10. 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>
11. Zvereva, A.S. (2023). *Primenenie programmnogo kompleksa SEISAN dlia rascheta dobrotnosti litosfery i spektral'nykh parametrov ochagov zemletriasenii Severnogo Kavkaza* [Using the SEISAN software to calculate the coda Q of the lithosphere and spectral parameters of earthquake sources in the North Caucasus]. In *Sovremennye tekhnika i tekhnologii v nauchnykh issledovaniakh: Sb.materialov XV Mezhdunar. konf. molodykh uchenykh i studentov* [Modern equipment and technologies in scientific research: Collection of materials of the XV International. conf. young scientists and students] (pp. 51–57). Bishkek, Kyrgyzstan: SS RAS Publ. (In Russ.).
12. Malyanova, L.S., Zvereva, A.S., & Gabsatarova, I.P. (2022). [Spectral and focal parameters of North Caucasus earthquakes in 2016–2017]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 25(2016–2017), 253–260. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2022.25.23>. EDN: FWVHYN
13. Gabsatarova, I.P., Koroletski, L.N., Ivanova, L.E., Saiapina, A.A., Bagaeva, S.S., Adilov, Z.M., & Asmanov, O.A. (2023). [Seismicity of the North Caucasus in 2018–2019]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 26(2018–2019), 73–91. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.06> EDN: ZOYJVU
14. Pavlenko, V.A., & Pavlenko, O.V. (2016). The seismic wave absorption in the crust and upper mantle in the vicinity of the Kislovodsk seismic station. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 52(4), 492–502.
15. Pavlenko, O.V. (2016). [Characteristics of the seismic waves attenuation in the Northern Caucasus estimated from records at seismic stations «Sochi» and «Anapa»]. *Voprosy inzhenernoy seysmologii* [Seismic Instruments], 43(1), 49–61. (In Russ.).
16. Pavlenko, O.V. (2009). The study of the radiation characteristics and propagation of seismic waves in the North Caucasus by modeling the accelerograms of the recorded earthquakes. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 45(10), 874–884.
17. Pavlenko, O.V. (2020). Seismic Wave Absorption in the Eastern Part of the North Caucasus Estimated from the Records of Seismic Station «Makhachkala». *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 56(5), 635–643.
18. Zvereva, A.S., Sobisevich, A.L., & Likhodeev, D.V. (2023). Moment and Local Magnitudes Calibration for Earthquakes in the Northwest Caucasus. *Doklady Earth Sciences*, 507(S2), S304–S312. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028334X2260116X>
19. Pustovitenko, B.G., & Panteleeva, T.A. (1990). *Spektral'nye i ochagovye parametry zemletrjasenij Kryma* [Crimea earthquakes Spectral and focal parameters]. Kiev, Ukraine: Naukova Dumka Publ., 251 p.