

СПЕКТРАЛЬНЫЕ и ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**СЕВЕРНОГО КАВКАЗА в 2016–2017 гг.****Л.С. Малянова¹, А.С. Зверева², И.П. Габсатарова¹**¹ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия, lmal@gsras.ru²ФИЦ ЕГС РАН, г. Пермь, Россия, zvereva.as59@gmail.com

Аннотация. Приведены динамические параметры очагов 39 землетрясений Северного Кавказа за 2016–2017 гг. с $K_p=10.0–13.8$, определенные по 39 амплитудным спектрам S -волн. Используются записи четырех региональных цифровых сейсмических станций – «Анапа», «Кисловодск», «Махачкала» и «Сочи», удаленных от очагов не более чем на 300 км. Для среды вблизи этих станций ранее были получены значения частотно-зависимой добротности $Q(f)$, необходимой для пересчета станционных спектров в очаговые. В 2016–2017 гг. большинство исследуемых землетрясений находилось на территории Восточного Кавказа. Впервые для землетрясений западной зоны, записанных сетью станций ($N=4–7$), применена программа SEISAN. Получены значения скалярного сейсмического момента M_0 , удовлетворительно согласованные с Крымскими данными для Керченско-Кубанской зоны.

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

DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.23 EDN: FWVHYN

Для цитирования: Малянова Л.С., Зверева А.С., Габсатарова И.П. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Северного Кавказа в 2016–2017 гг. // Землетрясения Северной Евразии. – 2022. – Вып. 25 (2016–2017 гг.). – С. 253–260. DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.23. EDN: FWVHYN

Введение. В 2016–2017 гг. продолжены работы по построению очаговых спектров региональных землетрясений Северного Кавказа и расчету спектральных и динамических параметров очагов землетрясений этого региона. Проведение работ стало возможным после расчета оценок добротности Q_{cp} для S -волн Северного Кавказа по записям станций «Анапа», «Сочи», «Кисловодск» и «Махачкала» [1–4]. Впервые в экспериментальном режиме для расчета спектральных параметров землетрясений западной зоны опробована программа SEISAN, которая позволила рассчитывать среднесетевые параметры землетрясений западной зоны Северного Кавказа. В анализ кроме станций «Анапа» и «Сочи» были включены «Сукко», «Гладковский», «Шапсут», «Лазаревская», «Веселый», «Фишт». Проведено сравнение соотношений M_0 и M_w с энергетическим классом для Северного Кавказа с корреляционными уравнениями $\lg M_0=f(K_p)$ за продолжительный период, полученными в Керченско-Кубанской зоне [5].

Исходные данные. Для исследования были выбраны наиболее сильные ($K_p=10.0–13.8$) землетрясения Северного Кавказа в 2016–2017 гг., эпицентры которых удалены не более чем на 300 км от станций «Кисловодск», «Анапа», «Сочи» и «Махачкала». Все эти станции оснащены широкополосной и короткопериодной аппаратурой (см. Приложение 1 к статье «Сейсмичность Северного Кавказа в 2016–2017 гг.» настоящего журнала). Параметры и положение эпицентров землетрясений приводятся в Приложении 1 и на рис. 1.

26 землетрясений произошли в восточной зоне – в Ингушетии, Чечне, Дагестане и приграничной области Грузии и Азербайджана (№№ 1, 3–4, 6–8, 12, 14–16, 18, 21–23, 25–32, 34–36, 38), одно землетрясение – в Северной Осетии (№ 5), пять – в Краснодарском крае (№№ 2, 19, 20, 37, 39), два – в западной и центральной частях Грузии (№№ 13, 24), три – в Черном море (№№ 1, 17, 33); по одному – в шельфовой части Азовского (№ 11) и Каспийского (№ 17) морей (Прил. 1 и рис. 1).

Для анализируемых землетрясений Северного Кавказа (Прил. 1) построены станционные спектры S -волн по записям станций «Кисловодск», «Анапа», «Сочи» и «Махачкала», которые были трансформированы в очаговые спектры по методике [6, 7], примененной ранее [8] в этом же регионе.

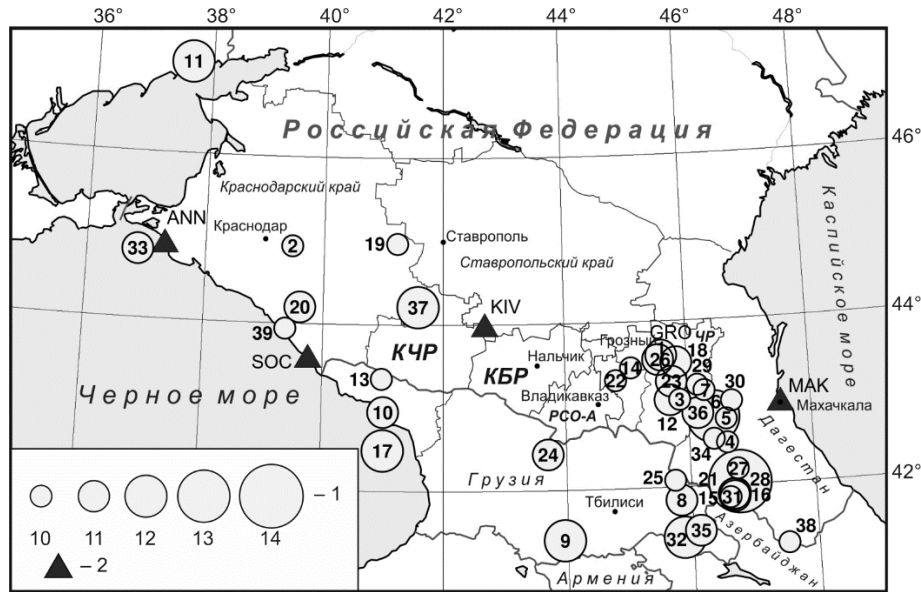


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений 2016–2017 гг. на Северном Кавказе, для которых проведен спектральный анализ

1 – энергетический класс K_p ; 2 – сейсмические станции опорной сети: «Кисловодск» (KIV) с широкополосным сейсмографом STS-1, «Анапа» (ANN), «Сочи» (SOC) и «Махачкала» (МАК), оснащенные широкополосными приборами СМ-3-ОС. Номера кружков соответствуют номеру события в Прил. 1.

Методика. Для выполнения построений и расчетов использовалась методика, изложенная подробно в [9]. Повторим лишь коротко основные ее элементы.

Построенные с использованием преобразования Фурье стационарные спектры корректируются за амплитудно-частотные характеристики приборов, по ним выполняются замеры спектральной плотности Ω_0 . В соответствии с дислокационной моделью Бруна [10] спектральная плотность Ω_0 участвует в определении скалярного сейсмического момента M_0 :

$$M_0 = \Omega_0 (4\pi\rho \cdot V^3) / R_{\theta\phi} \cdot G(\Delta, h) \cdot C(\omega) \cdot S_m(f), \quad (1)$$

где Ω_0 – максимальное значение спектральной плотности при $\omega \rightarrow 0$; V – скорость распространения P - или S -волны; ρ – плотность пород в окрестности очага; $R_{\theta\phi}$ – функция, характеризующая направленность излучения из очага на станцию; $G(\Delta, h)$ – поправка за геометрическое расхождение; $C(\omega)$ – частотная характеристика земной коры под станцией, $S_m(f)$ – поправка за неупругое затухание S -волны в мантии.

Учет направленности излучения проводится с использованием среднего значения $R_{\theta\phi}=0.6$ [11]. Геометрическое расхождение фронта волны учитывается с использованием функции $G(\Delta, h)$, значение которой для близких землетрясений на расстояниях от станции регистрации $r < 1000$ км оценено как $1/r$, где r – гипоцентральное расстояние [12]. Частотная характеристика земной коры под станцией принимается в среднем равной $C(\omega)=2$. Поправка за неупругое затухание $S_m(f)$ рассчитывается по формуле (2) из [13]:

$$S_m(f) = e^{-t_s^* \pi f}, \quad (2)$$

где t_s^* – отношение времени t_s пробега S -волны до станции регистрации к средней добротности среды Q_{cp} вдоль луча по [13]:

$$t_s^* = t_s / Q_{cp}. \quad (3)$$

Геометрические размеры очага определялись по угловой частоте f_0 амплитудного спектра смещения. Для дислокационной модели Бруна с разрывом в виде круга радиус дислокации r_0 вычисляется по формуле:

$$r_0 = 2.34 \frac{V_p}{2\pi f_0} \quad (4)$$

По найденным значениям сейсмического момента M_0 и размеров разрыва r_0 с использованием формул из работ [6–9] определялись другие динамические параметры очагов: L – длина разрыва, $\Delta\sigma$ – сброшенное напряжение, $\eta\sigma$ – кажущееся напряжение, u – средняя подвижка по разрыву и моментная магнитуда M_w .

Значения моментной магнитуды M_w рассчитывались по формуле (5) Канамори из [13]:

$$M_w = 2/3(\lg M_0 + 7) - 10.7. \quad (5)$$

Используется значение Q_{cp} для S -волн Северо-Западного Кавказа по записям станций «Анапа», «Сочи», «Кисловодск» и «Махачкала», определенное О.В. Павленко [1–4]: для полосы частот $\Delta f = 1–8$ Гц Q_{cp} находится из зависимости $Q(f) \sim 90 f^{0.7}$ – для «Анапы», $Q(f) \sim 80 f^{0.9}$ – для «Сочи», $Q(f) \sim 85 f^{0.9}$ – для «Кисловодска» и $Q(f) \sim 100 f^{0.9}$ – для «Махачкалы».

Кроме того, землетрясения №№ 2, 10, 17, 19, 20, 33, 37, 39, произошедшие в западной зоне Северного Кавказа, были подвергнуты в экспериментальном порядке обработке с помощью методики и процедур, заложенных в программе SEISAN [14, 15], основы которой в целом совпадают с ранее используемой методикой, однако есть и различия. Например, учет геометрического расхождения при расчете спектров S -волн ранее использовался одинаково для всех расстояний как $1/r$. В SEISAN используются разные формулы в зависимости от расстояния и глубины [14].

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

где g_d называется георасстоянием (geodistance) и определяется как:

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

Параметры h_1 , h_2 и Δ_0 варьируются в зависимости от региона. Как правило, $h_1 = 40$ км (граница Мохо), $h_2 = 60$ км, $\Delta_0 = 100$ км.

Большим преимуществом SEISAN [15] относительно используемой ранее технологии получения 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 для западной зоны Северного Кавказа, а их предварительные результаты описаны в [15]. Результаты исследования $Q_{cp}(f)$ для западной зоны получены А.С. Зверевой совместно с Navskov J. и в настоящее время находятся в печати. Также в SEISAN возможна автоматизация процесса расчета спектральных и динамических параметров по сети станций. На нашем этапе проводилось одновременно и ручное, и автоматическое определение параметров с последующим сравнением. Программа SEISAN находится в опытной эксплуатации в регионе Северного Кавказа.

Построение спектров. Как и ранее, для построения станционных спектров выбирался фрагмент записи S -волны от ее вступления до момента, когда амплитуда этой группы волн достигла примерно $1/3 A_{Smax}$ [12]. Примеры записей землетрясений на горизонтальных компонентах станций «Кисловодск», «Анапа» и «Сочи» представлены на рис. 2. Длительность анализируемых фрагментов записи изменялась в зависимости от удаленности станции от очага и варьировала от 35 до 100 с от вступления S -волны.

Для трех записей, показанных на рис. 2, приводятся сглаженные станционные спектры S -волн горизонтальных компонент станций KIV, SOC, ANN (рис. 3). Для исследуемых землетрясений корректно проведены две асимптоты в соответствии с моделью Бруна [10].

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 .

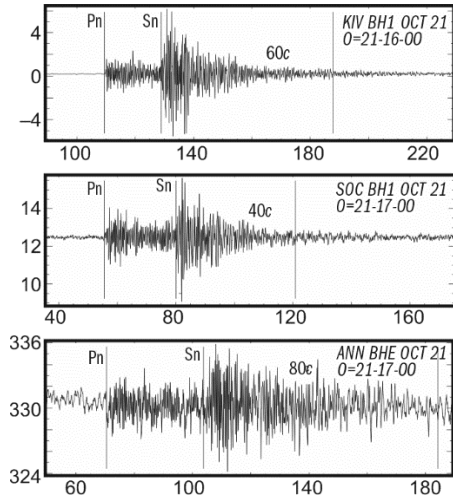


Рис. 2. Примеры записей землетрясений 2016 г.

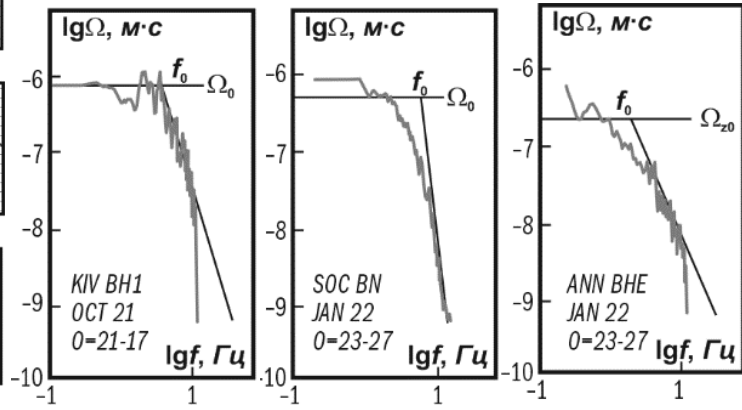


Рис. 3. Примеры амплитудных спектров для фрагментов записей на рис. 2 с асимптотами в соответствии с моделью Бруна

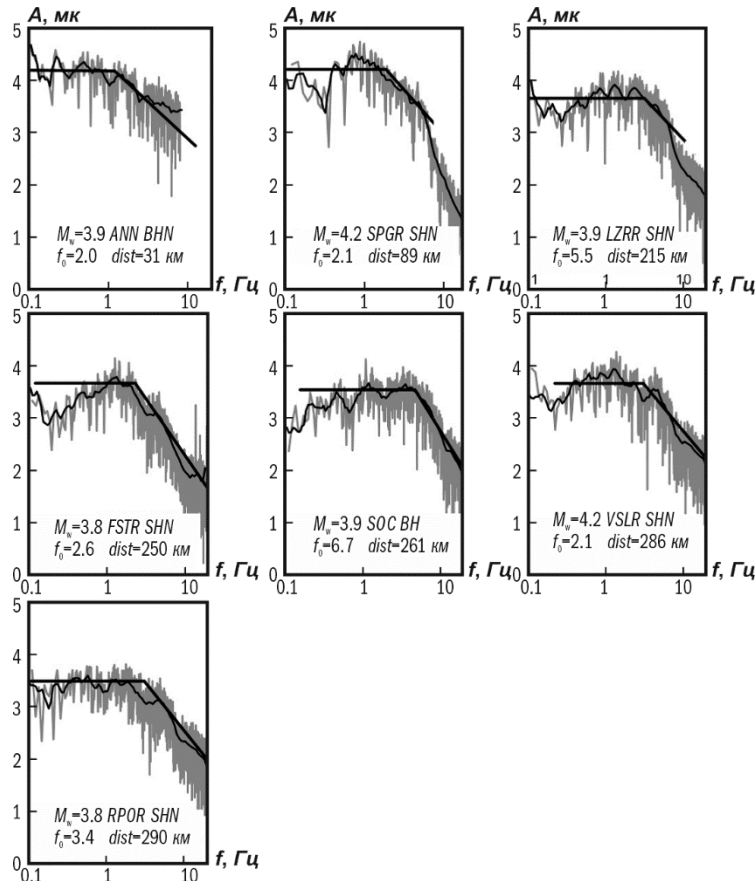


Рис. 4. Примеры амплитудных спектров для фрагментов записи землетрясения 16.06.2017 г. с асимптотами в соответствии с моделью Бруна, построенных по результатам работы программы SEISAN [15]. Серым показан исходный спектр, тонкой черной линией – сглаженный спектр, жирными прямыми линиями – асимптоты по модели Бруна

Расчет динамических параметров. Для 39 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. 3). Для всех спектров в соответствии с моделью Бруна [10] 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_{II} – 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 [15] получены следующие параметры: $\lg M_0$ (логарифм 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) (Прил. 3).

Для корректного сравнения со спектральными параметрами по Крымской сети станций [16] предварительно проведено сопоставление значений K_{II} и K_P для одних и тех же событий в каталогах за 2020–2021 гг. ($N=57$).

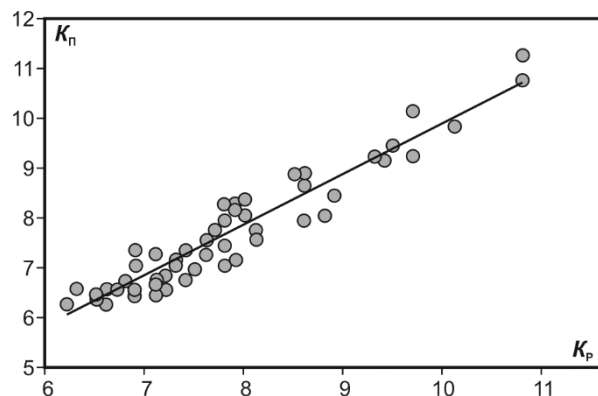


Рис. 5. График корреляции значений K_{II} и K_P для одних и тех же событий в каталогах за 2020–2021 гг.

В аналитическом виде методом наименьших квадратов получены уравнения:

$$K_P = 0.8964 (\pm 0.37) \cdot K_{II} + 0.90 (\pm 0.29) \quad (6),$$

$$K_{II} = 1.019 (\pm 0.04) \cdot K_P - 0.26 (\pm 0.34) \quad (7),$$

при коэффициенте корреляции $R=0.96$. Это соотношение будет использоваться при сравнении зависимостей $\lg M_0$ от K_P для вышеуказанных территорий.

Обсуждение результатов. Спектральные и динамические параметры землетрясения 16 июня 2017 г. в 18^h17^m (№ 13) определены также по пяти станциям Крымской сети [16]. Параметры, полученные по пяти станциям Северного Кавказа (ANN, FSTR, LZRR, RPOR,

SOC) ($\Delta=31$ –290 км) по программе SEISAN для землетрясения 16 июня (Прил. 3), удовлетворительно согласуются со средними сетевыми значениями по станциям Крыма [16] (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение спектральных и динамических параметров очага землетрясения 16 июня 2017 г. в западной зоне Северного Кавказа, полученных авторами, и результатов из [16]

	$M_0 \cdot 10^{13}$, $H\cdot m$	r_0 , км	$\Delta\sigma \cdot 10^5$, Па	M_w^*
Землетрясение (№ 13) 16 июня 2017 г., $t_0=18^h17^m34.8^s$; $\varphi=44.72^\circ$, $\lambda=36.74^\circ$; $h=9$ км; $K_{II}=11.0$, $N=5$ станций				
Среднее по станциям Крымской сети (ALU, SEV, SUDU, YAL, SIM)	150	0.86	10.4	4.05
Стандартное отклонение δS	0.03	0.01	0.04	0.05
Землетрясение 16 июня 2017, $t_0=18^h17^m34.3^s$; $\varphi=44.82^\circ$, $\lambda=36.86^\circ$; $h=5$ км; $K_P=10.7$, $N=5$ станций				
Среднее по станциям Северного Кавказа (ANN, FSTR, LZRR, RPOR, SOC)	83.7	0.58	30.1	3.98
Стандартное отклонение	0.253	–	0.35	0.12

Примечание. M_w^* – среднее значение моментной магнитуды M_w , рассчитанное как среднее арифметическое с соответствующей погрешностью [16].

Большая часть анализируемых в 2016–2017 гг. землетрясений произошла на Восточном Кавказе (рис. 1). Проведем сравнение полученных значений $\lg M_0$ в зависимости от K_P с долговременными зависимостями для разных зон Кавказа, установленными в [5] для событий в диапазоне классов K (K_{II} , K_P)=6.5–13.0 (M_0 в единицах $дин\cdot см$):

$$\lg M_0 = 0.58 K_{II} + 15.8$$

Крым

$$\lg M_0 = 0.58 K_P + 16.1$$

Дагестан

$$\lg M_0 = 0.65 K_P + 14.5$$

Кавказ

$$\lg M_0 = 0.889 K_P + 11.84$$

среднемировая зависимость.

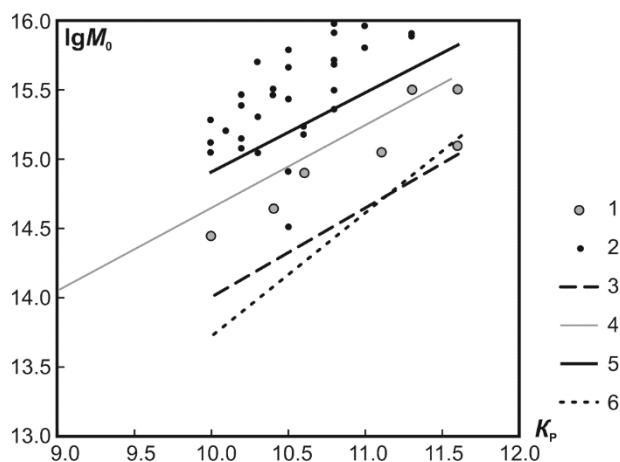


Рис. 6. Сравнение полученных в 2016–2017 гг. данных $\lg M_0 = f(K_p)$ по Северному Кавказу с долговременными значениями по разным регионам (значения M_0 переведены в единицы $H \cdot M$):

1 – параметры землетрясений западной зоны Северного Кавказа, полученные по SEISAN; 2 – параметры землетрясений восточной зоны, полученные по ранее отработанной методике [8, 9]; долговременные зависимости из [5]; 3 – по Кавказу, 4 – по Крыму, 5 – по Дагестану, 6 – среднемировая.

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.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01471-22) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Электронное приложение App05_North_Caucasus_2016–2017 (<http://www.gsras.ru/zse/app-25.html>): 1 – Список землетрясений Северного Кавказа в 2016–2017 гг., для которых рассчитаны спектры S -волн; 2 – Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Северного Кавказа в 2016–2017 гг.; 3 – Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Северного Кавказа в 2016–2017 гг. (S -волны), рассчитанные по сети станций с применением программы SEISAN.

Л и т е р а т у р а

1. 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.
2. 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.
3. Павленко О.В. Изучение региональных характеристик излучения и распространения сейсмических волн на Северном Кавказе посредством моделирования акселерограмм // Физика Земли. – 2009. – № 10. – С. 38–48.
4. Павленко О.В. Характеристики поглощения сейсмических волн в восточной части Северного Кавказа, оцененные по записям сейсмостанции «Махачкала» // Физика Земли. – 2020. – № 5. – С. 36–45.
5. Пустовитенко Б.Г., Пантелеева Т.А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. – Киев: Наукова Думка, 1990. – 252 с.
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.

Как видно из рис. 6, данные по землетрясениям западной зоны, полученные по программе SEISAN (серые кружки), удовлетворительно согласуются с Крымской долговременной зависимостью (серая сплошная линия). Параметры землетрясений восточной зоны имеют значительный разброс и находятся выше ранее полученной зависимости для Дагестана. В перспективе и для восточной зоны расчеты будут переведены на SEISAN. Уже проведены работы по расчету частотно зависимой добротности $Q(f)$ для сети станций в Терско-Каспийском прогибе и ближайшем его окружении. Получены устойчивые предварительные результаты [17]. Переход на расчет спектральных и динамических параметров по программе SEISAN позволит получать средние оценки по нескольким станциям сети в этой зоне.

Заключение. Как и ранее, полученные в 2016–2017 гг. данные по спектральным и динамическим параметрам очагов землетрясений могут дополнить ряд параметров для землетрясений Северного Кавказа.

7. Аптекман Ж.Я., Белавина Ю.Ф., 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. Переход от стационарного спектра к очаговому и расчет динамических параметров очага // Вулканология и сейсмология. – 1989. – № 2. – С. 66–79.
8. Малянова Л.С., Габсатарова И.П., Пономарева Н.Л. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Северного Кавказа в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – С. 237–244. doi: 10.35540/1818-6254.2021.24.23
9. 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: 10.35540/1818-6254.2020.23.26
10. 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.
11. Ризниченко Ю.В., Джибладзе Э.А., Болквадзе И.Н. Спектры колебаний и параметры очагов землетрясений Кавказа // Исследования по физике землетрясений. – М.: Наука, 1976. – С. 74–86.
12. Пустовитенко Б.Г. Сейсмические процессы в Черноморском регионе и сейсмическая опасность Крыма: Дис. на соиск. уч. степ. д-ра ф.-м. наук. – Киев: ИГ НАНУ, 2003. – С. 58–71.
13. Anderson D.L., Hart R.S. Q of the Earth // Journal of Geophysical Research. – 1978. – V. 83, N B12. – P. 5869–5882.
14. Havskov J., Ottemoller L. Routine data processing in earthquake seismology: with sample data, exercises and software. – Springer Science & Business Media, 2010.
15. Havskov J., Ottemoller L. SEISAN earthquake analysis software // Seismological Research Letters. – 1999. – V. 70, N 5. – С. 532–534.
16. Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э., Бондарь М.Н. Очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона в 2016–2017 гг. // Землетрясения Северной Евразии. – 2022. – Вып. 25 (2016–2017 гг.). – С. 242–252. DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.22. EDN: DMTVLR
17. Габсатарова И.П., Бабкова Е.А., Зверева А.С. Опыт применения программы SEISAN для расчета добротности среды в Терско-Каспийском прогибе // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Том XI / Под ред. И.А. Керимова, В.А. Широковой, В.Б. Заалишвили, В.И. Черкашина. – М.: ИИЕТ РАН, 2021. – С. 227–233. doi: 10.34708/GSTOU.2021.61.64.036

SPECTRAL and FOCAL PARAMETERS
of NORTH CAUCASUS EARTHQUAKES in 2016–2017
L.S. Malyanova¹, A.S. Zvereva², I.P. Gabsatarova¹

¹*Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Obninsk, Russia, ira@gsras.ru*

²*Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia, zvereva.as59@gmail.com*

Abstract. The source spectral and dynamic parameters for 39 earthquakes with $K_R=10.0–13.8$ occurred in the North Caucasus for 2016–2017 are given. The parameters were determined from S -wave amplitude spectra. Records of four regional digital seismic stations («Анапа», «Kislovodsk», «Makhachkala» and «Sochi») located no more than 300 km from the sources were used. The values of the frequency-dependent quality factor $Q(f)$ for the environment near these stations were obtained earlier. This is necessary to take into account the attenuation of S -wave energy in the Earth's crust and upper mantle in order to recalculate the station spectra into the source spectra. In 2016–2017, most of the studied earthquakes were located in the Eastern Caucasus. For the first time, for western zone earthquakes recorded by a network of stations ($N=4–7$), the SEISAN program was applied and satisfactory results were obtained when compared with the Crimean data for the Kerch-Kuban zone.

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

DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.23 **EDN:** FWVHYN

For citation: 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: 10.35540/1818-6254.2022.25.23. EDN: FWVHYN

R e f e r e n c e s

1. 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.

2. 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 seismologii* [Seismic Instruments], 43(1), 49–61. (In Russ.).
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Korchagina, O.A., Moskvina, A.G., Polikarpova, L.A., & Chepkunas, L.S. (1985). [P-wave spectra in the problem of determining the dynamic parameters of earthquake focuses. Unification of the initial data and the procedure for calculating the amplitude spectra]. *Vulkanologiya i seismologiya* [Journal of Volcanology and Seismology], 2, 60–70. (In Russ.).
7. 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.).
8. Malyanova, L.S., Gabsatarova, I.P., & Ponomareva, N.L. (2021). [Spectral and source parameters of earthquakes on Northern Caucasus]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 237–244. (In Russ.). doi: 10.35540/1818-6254.2021.24.23
9. Malyanova, L.S., & Gabsatarova, I.P. (2020). [Spectral and source parameters of earthquakes on Northern Caucasus]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), 263–270. (In Russ.). doi: 10.35540/1818-6254.2020.23.26
10. Brune, I.V. (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 75(26), 4997–5009.
11. 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.).
12. Pustovitenko, B.G. (2003). *Seismicheskie protsessy v Chernomorskom regione i seismicheskaiia 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.).
13. Anderson, D.L., & Hart, R.S. (1978). Q of the Earth. *Journal of Geophysical Research*, 83(B12), 5869–5882.
14. Havskov, J., & Ottemoller, L. (2010). Routine data processing in earthquake seismology: with sample data, exercises and software. *Springer Science & Business Media*.
15. Havskov, J., & Ottemoller, L. (1999). SEISAN earthquake analysis software. *Seismological Research Letters*, 70(5), 532–534.
16. Pustovitenko, B.G., Eredzhepov, E.E., & Bondar, M.N. (2021). [Focal parameters of earthquakes in the Crimean-Black Sea region in 2016–2017]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 25(2016–2017), 242–252. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.22. EDN: DMTVLR
17. Gabsatarova, I.P., Babkova, E.A., & Zvereva, A.S. (2021). [Experience in using the SEISAN program to calculate the quality factor of the medium in the Terek-Caspian trough]. *Sovremennyye problemy geologii, geofiziki i geo-ekologii Severnogo Kavkaza. T. XI* [Modern problems of geology, geophysics and geo-ecology of the North Caucasus. V. XI]. Moscow, Russia: IIET RAN Publ., 227–233. (In Russ.). doi:10.34708/GSTOU.2021.61.64.036