

УДК 550.34

DOI: 10.46698/VNC.2025.59.15.006

Оригинальная статья

Землетрясение 12.12.2020 г. с $M_w=4,8$ в очаговой зоне сильного Черногорского землетрясения 28.07.1976 г. с $M_w=6,4$ на Восточном Кавказе

И.Ю. Дмитриева¹, И.П. Габсатарова², А.А. Саяпина¹,
С.С. Багаева¹, М.Я. Гайсумов³

¹ Северо-Осетинский филиал ФИЦ ЕГС РАН, Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: sofgras@gmail.com;

² Единая геофизическая служба РАН, Россия, 249035, г. Обнинск, пр. Ленина, 189, e-mail: frc@gsras.ru;

³ Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН, Россия, 364051, г. Грозный, ул. В. Алиева, 21а, e-mail: gro_ss@bk.ru

Статья поступила: 11.10.2024, доработана: 27.01.2025, принята к публикации: 31.01.2025

Резюме: Актуальность работы. В статье рассматривается ощутимое землетрясение с магнитудой $M_w=4,8$, произошедшее 12 декабря 2020 г. в 21^h29^m по Гринвичу на территории Чечни. Очаговая область основного толчка и последующих афтершоков расположена в районе сочленения южного борта Терско-Каспийского передового прогиба со структурами северного склона Большого Кавказа и связана с Черногорской зоной ВОЗ ($M_{\max}=6,5$) Терско-Сунженской сейсмогенерирующей области. Исследование подобных землетрясений представляет интерес для понимания происходящих тектонических процессов. Полученные материалы могут быть использованы при исследовании сейсмической опасности Чеченской Республики и сопредельных территорий. **Цель исследования.** Целью публикации является комплексный анализ полученных сведений об ощутимом землетрясении 12 декабря 2020 г., включающий в себя параметры гипоцентра, афтершоковый процесс, механизм очага, спектральные параметры и макросейсмические исследования о проявлении основного толчка и афтершоков. **Методы.** Для первичной станционной обработки цифровых записей применялась методика, реализованная в программно-вычислительном комплексе WSG. Для определения параметров гипоцентров землетрясений использована программа hypo71 с заданной скоростной моделью для исследуемого района. Для уточнения параметров афтершоков дополнительно применен метод «двойных разностей». Механизм очага землетрясения рассчитан по знакам первых вступлений продольных волн. Спектральные исследования проведены с помощью программы SEISAN. **Результаты.** Вычислены и проанализированы параметры землетрясения. Определен тип механизма очага землетрясения – «взброс». Приведены исторические сведения и дана сравнительная оценка проявления сейсмичности с другим сильным Черногорским землетрясением 1976 года. Исследованы форшоковый и афтершоковый процессы с привлечением современных методов обработки сейсмических событий. Описана геолого-геофизическая привязка эпицентральной зоны события. Проведено сравнение механизмов очагов основного толчка и отдельных афтершоков. Получены значения спектральной плотности, сейсмического момента и моментной магнитуды землетрясения. На основе собранных макросейсмических сведений о проявлении землетрясения построена карта пунктов-баллов и изосейст равной балльности.

Ключевые слова: Северный Кавказ, землетрясение, макросейсмические и инструментальные данные, механизм очага, афтершок.

Благодарности: 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».

Для цитирования: Дмитриева И.Ю., Габсатарова И.П., Саяпина А.А., Багаева С.С., Гайсумов М.Я. Землетрясение 12.12.2020 г. с $M_w=4,8$ в очаговой зоне сильного Черногорского землетрясения 28.07.1976 г. с $M_w=6,4$ на Восточном Кавказе. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(1): 65-81. DOI: 10.46698/VNC.2025.59.15.006

GEOPHYSICS

DOI: 10.46698/VNC.2025.59.15.006

Original paper

Earthquake on 12.12.2020 with $M_w=4.8$ in the focal zone of the strong Chernogorsky earthquake on 07.28.1976 with $M_w=6.4$ in the Eastern Caucasus

I.Yu. Dmitrieva¹, I.P. Gabsatarova², A.A. Sayapina¹,
S.S. Bagaeva¹, M.Ya. Gaisumov³

¹ North Ossetian branch, Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences,
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation,
e-mail: sofgsras@gmail.com;

² Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, 189 Lenin Ave., Obninsk 249035,
Russian Federation, e-mail: frc@gsras.ru;

³ Kh.I. Ibragimov Complex Institute, Russian Academy of Sciences, 21a V. Alieva Str., Grozny
364051, Russian Federation, e-mail: gro_ss@bk.ru

Received: 11.10.2024, revised: 27.01.2025, accepted: 31.01.2025

Abstract: Relevance. The article discusses a significant earthquake that occurred on 12.12.2020 at 21:29 GMT in the Chechen Republic with a magnitude of $M_w = 4.8$. The epicenter of this earthquake and subsequent aftershocks is located in the junction between the southern part of the Tersko-Caspian trough and the structures of the northern slopes of the Greater Caucasus. This area is associated with the Chernogorsky earthquake sources occurrence zone, which has a maximum magnitude of 6.5 and is a seismic generating region in the Tersky-Sunzha area. Studying such earthquakes is essential for understanding ongoing tectonic processes and can provide valuable data for assessing seismic hazards in the Chechnya region and its surrounding areas. **Aim.** The purpose of this publication is a comprehensive analysis of the information received about the significant earthquake on 12.12.2020, including the parameters of the hypocenter, the aftershock process, the source mechanism, spectral parameters and macroseismic studies on the manifestation of the main shock and aftershocks. **Methods.** For the primary processing of digital records, a standard technique implemented in the software computing complex WSG was used. The hypo71 program with a given velocity model for the studied area was used to determine the parameters of earthquake hypocenters. To clarify the parameters of aftershocks, the “double differences” method was additionally applied. The mechanism of the earthquake origin was calculated based on the characteristics of the first arrivals of the primary waves. Spectral analysis was performed using the SEISAN software. **The results** were processed and analyzed, leading to the determination of the type of seismic source mechanism as “reverse fault”. Historical information was provided, as well as a comparison of seismic activity in Chernogorsky and another significant earthquake that occurred in 1976. Foreshock and aftershocks processes were studied using modern methods for processing seismic data. The geological and geophysical characteristics of the epicentral region were described. The mechanisms of the main shock source and individual aftershocks were compared.

The values of the spectral density, seismic moment and moment magnitude of the earthquake were obtained. Based on macroseismic data collected about the earthquake, a map of equal-magnitude points and isoseisms was constructed.

Keywords: North Caucasus, earthquake, macroseismic and instrumental data, source mechanism, aftershocks.

Acknowledgement: *The work was supported by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. The data used in the work were obtained with large-scale research facilities "Seismic infrasound array for monitoring Arctic cryolitozone and continuous seismic monitoring of the Russian Federation, neighbouring territories and the world".*

For citation: Dmitrieva I.Yu., Gabsatarova I.P., Sayapina A.A., Bagaeva S.S., Gaisumov M.Ya. Earthquake on 12.12.2020 with $M_w=4.8$ in the focal zone of the strong Chernogorsky earthquake on 07.28.1976 with $M_w=6.4$ in the Eastern Caucasus. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(1): 65-81. DOI: 10.46698/VNC.2025.59.15.006

Введение

12 декабря 2020 г. в 21^h29^m по Гринвичу на территории Урус-Мартановского района Чеченской Республики произошло ощутимое 5–6-балльное землетрясение с $K_p=12,9$. Его эпицентр локализован в районе сочленения южного борта Терско-Каспийского передового прогиба со структурами северного склона Большого Кавказа и связан с Черногорской зоной ВОЗ ($M_{\max}=6,5$) Терско-Сунженской сейсмогенерирующей области [Несмеянов и др., 1996]. Здесь происходит пересечение тектонических структур кавказского и диагонального простирания. Известно, что Терско-Сунженская сейсмогенерирующая область высокосейсмична. Положение эпицентров наиболее сильных исторических и современных землетрясений показано на рисунке 1.

Проявление возросшей сейсмической активности в 2020 г. произошло вблизи очаговой зоны 8–9-балльного Черногорского землетрясения 28.07.1976 г. с $M_w=6,4$, которое входит в десятку сильнейших на Северном Кавказе в XX–XXI веках. Материалы, содержащие инструментальную и макросейсмическую информацию о Черногорском землетрясении 1976 г., описаны в статьях дагестанских сейсмологов [Асманов и др., 1979; Левкович, Амиров, 2010] и геологов [Борисов, Рейснер, 1977]. В названных статьях отмечалось, что землетрясение 28.07.1976 г. сопровождалось небольшим числом сильных афтершоков, что при довольно высоком значении магнитуды $M_w=6.4$ по данным сейсмологического бюллетеня агентства MOS (URL: http://www.gsras.ru/ftp/Teleseismic_bulletin/1976), характеризовало «вялый» афтершоковый процесс, но с распространенным полем афтершоков (до 100 км от эпицентра). Современный взгляд на сохранившиеся данные по этому землетрясению, позволяет скорее говорить о неудовлетворительной точности определения параметров более слабых землетрясений, да и варианты положения эпицентра основного толчка по данным разных служб значительно расходятся. Сложно доверять и значениям глубин $h=20$ км для основного толчка и $h=10–20$ км для афтершоков, так как эти значения определялись по определенному набору годографов (5, 10 и 15 и 20 км), а ближайшая станция Грозный находилась примерно в 50 км от эпицентра и зарегистрировала далеко не все события; более удаленные станции региональной сети были расположены на расстояниях свыше 100 км. В бюллетене ISC сообщается глубина, определенная по глубинным фазам « $pP_DEPTH=16\pm1$ км», что близко и к глубинам основного толчка и афтершоков исследуемого землетрясения 2020 года.

Инструментальные данные и методика обработки. Параметры гипоцентра исследуемого землетрясения были определены по данным сетей сейсмических станций региональных сейсмологических центров: Северо-Осетинского (NOGSR сеть N0) и Дагестанского (DAGSR сеть DA) филиалов, а также Центрального отделения (ЦО) ФИЦ ЕГС РАН (OBGSR сеть RU). В 2020 г. сейсмическая сеть на Северном Кавказе состояла из 63 сейсмических станций. Все станции оснащены цифровым оборудованием и передают информацию в центры обработки в режиме, близком к реальному времени. Непосредственно на территории Чеченской Республики установлено всего две станции: «Грозный» (GROC) – в 15 км к юго-востоку от Грозного в п. Чечен-Аул и «Ведено» (DVE) в п. Дышне-Ведено. Однако, на соседних территориях Дагестана и Республики Северная Осетия-Алания развернуты сети из 16 и 12 станций соответственно, что позволяет обеспечивать представительность землетрясений на территории Чеченской Республики с $K_{pmin}=6,5$ и выше.

Для определения основных параметров главного толчка и его афтершоков использовалась стандартная методика станционной обработки цифровых записей, реализованная в программно-вычислительном комплексе WSG (Акимов А.П., Красилов С.А. Программный комплекс WSG «Система обработки сейсмических данных». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664678 от 16.11.2020 г.). Локализация с получением параметров гипоцентров производилась по программе huro71 [Lee, Lahr, 1975] с заданной скоростной моделью для исследуемого района [Краснопевцева, 1984].

Параметры землетрясения 12 декабря 2020 г., полученные в различных сейсмологических центрах, приведены в таблице 1. Как видно, имеются расхождения в инструментальных определениях координат эпицентра по разным источникам, не превышающие $0,2^\circ$ по широте и долготе и 10 км – по глубине. Значения параметров регионального центра СОФ ФИЦ ЕГС РАН (NOGSR) близки к значениям ЦО ФИЦ ЕГС РАН (OBGSR), которые признаны наиболее приемлемыми, в связи с наибольшим количеством станций, участвующих в обработке.

Таблица 1 / Table 1

Основные параметры землетрясения 12 декабря 2020 г. с $K_p=12,9$, $M_w=4,8$ по данным различных агентств / The main parameters of the earthquake on December 12, 2020 with $K_p=12,9$, $M_w=4,8$ according to various agencies

Агентство/ The Agency	t_0 ч:мин:с/ h:min:s	Гипоцентр/ Hypocenter			Класс и магнитуда/ Class and magnitude	Источник/ A source
		φ° , N	λ° , E	h , км		
NOGSR	21:29: 49	43.02	45.56	17	$K_p=12.4$	
OBGSR	21:29:48.6	43.04	45.54	19.7	$K_p=12.9$, $M_w=4.8$	
TIF	21:29:48.3	43.146	45.434	11.3	$ML=5$	(https://doi.org/10.31905/D808B830)
USGS (NEIC)	21:29:48	43.155	45.529	10	$mb=4.7$	(https://doi.org/10.31905/D808B830)
EMSC	21:29:51	43.23	45.67	20	$mb=4.7$	(https://doi.org/10.31905/D808B830)
GCMT	21:29:49.9	43.16	45.40	12.6	$M_w=4.8$	(https://doi.org/10.31905/D808B830)

Агентство/ The Agency	t_0 ч:мин:с/ h:min:s	Гипоцентр/ Hypocenter			Класс и магнитуда/ Class and magnitude	Источник/ A source
		φ° , N	λ° , E	h , км		
IDC	21:29:46.79	43.04	45.47	0.0f	$mb=4.2$, $ML=4.1$, $Ms=4.0$	(https://doi.org/10.31905/D808B830)
ISC	21:29:49.04	43.111	45.536	13.4 $h_{sP}=14.0\pm 3.5$	$mb=4.5$, $Ms=4.1$	(https://doi.org/10.31905/D808B830)

Примечания: NOGSR – информационно-обрабатывающий центр Северо-Осетинского филиала ФИЦ ЕГС РАН; OBGSR (код MOS в ISC (<https://doi.org/10.31905/D808B830>)) – сеть и обрабатывающий центр ЦО ФИЦ ЕГС РАН, где составляется региональный бюллетень Северного Кавказа; TIF – Институт наук о Земле Национального центра сейсмического мониторинга, Грузия; IDC – International Data Centre, Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBTO), Austria; EMSC – European-Mediterranean Seismological Centre; NEIC – National Earthquake Information Center, USA; ISC – International Seismological Center, UK; GCMT – Lamont Doherty Earth Observatory, USA; f – фиксированная глубина.

Notes: NOGSR – information processing center North Ossetia (Alania) Branch, Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences; OBGSR (code MOS в ISC (<https://doi.org/10.31905/D808B830>)) – network and processing center Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences; TIF – Institute of Earth Sciences/ National Seismic Monitoring Center, Georgia; IDC – International Data Centre, Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBTO), Austria; EMSC – European-Mediterranean Seismological Centre; NEIC – National Earthquake Information Center, USA; ISC – International Seismological Center, UK; GCMT – Lamont Doherty Earth Observatory, USA; f – fixed depth.

Форшоки и афтершоки. Почти за полчаса до основного толчка в его очаговой зоне зарегистрирован слабый форшок 12 декабря в 20^h53^m с $K_p=6,7$ с координатами эпицентра $\varphi=42,98^\circ\text{N}$, $\lambda=45,53^\circ\text{E}$ и глубиной $h=16$ км.

После главного толчка последовала серия афтершоков.

Для уточнения параметров афтершоков дополнительно применен метод «двойных разностей» [Waldhauser, Ellsworth, 2000; Waldhauser, 2001]. Он базируется на том факте, что, если для одной станции различие между гипоцентрными расстояниями от двух землетрясений мало, по сравнению с самим гипоцентрным расстоянием и размерами скоростной неоднородности, то пути луча между исходной областью и общей станцией подобны вдоль почти всего пути луча. Уточнение положения гипоцентра основывается на вычислении взаимной корреляции пар временных отклонений для всех возможных пар событий.

Метод «двойных разностей» эффективен при уточнении положения гипоцентров в случае совокупности близко расположенных очагов (например, афтершоков) и позволяет одновременно переопределять местоположения большого числа гипоцентров землетрясений на относительно больших удалениях от наблюдающих станций, объединяя разности времен пробега P - и S -волн, полученные из кросскорреляционного анализа, с разностями времен пробега, полученными из каталога. Минимизируя остаточные разности (или двойные разности) для пар землетрясений, можно минимизировать и векторную разницу между положениями их гипоцентров. Таким образом, можно уточнить расстояние между событиями без использования станционных поправок, т.е. удастся избавиться от влияния неоднородностей среды на пути очаг–станция, которые, как правило, недостаточно хорошо могут быть учтены.

На Северном Кавказе метод «двойных разностей» был успешно применен для уточнения координат гипоцентров землетрясений в центральной части Терско-Каспийского прогиба и позволил уменьшить разброс эпицентров афтершоков Курчалойского землетрясения 11 октября 2008 года [Габсатарова, 2014].

Для землетрясения 12 декабря 2020 г. уточнение методом «двойных разностей» проводилось по выборке из 563 событий с декабря 2020 г. по апрель 2021 г. с $M \geq 2,0$ в рамках $42,5\text{--}44,5^\circ\text{N}$ и $43,5\text{--}47,5^\circ\text{E}$. Эти землетрясения были зарегистрированы в целом 77 станциями. На записях этих станций для названного числа событий были выделены по 26759 фаз P -волн и S -волн. Установлено, что связанных пар оказалось 1728, в среднем по 18 связей для пары событий, среднее расстояние между связанными событиями 3,25 км, максимальное отклонение между связанными событиями 10 км.

Было кластеризовано 414 событий, из них первый кластер объединил 200 событий. Именно к этому кластеру было отнесено главное землетрясение и его основные афтершоки. Центроид кластера имел координаты $42,99^\circ\text{N}$ и $45,56^\circ\text{E}$, $h=14,74$ км. Положение основного толчка и афтершоков показано на рисунке 2. Можно заключить, что землетрясение реализовалось в компактной области ($42,98\text{--}43,06^\circ\text{N}$; $45,5\text{--}45,6^\circ\text{E}$), в тектоническом плане, согласно [Несмеянов и др., 1996] в месте пересечения диагональной Даттых–Ахловской погребенной шовно-сдвиговой зоны и Черногорского глубинного разлома. Глубины основного толчка и афтершоков в среднем составили 15 ± 4 км. Ошибки вычисления оценены как: $1,5 \pm 0,5$ км по широте, $1,8 \pm 0,6$ км по долготе и $2,3 \pm 1$ км по глубине.

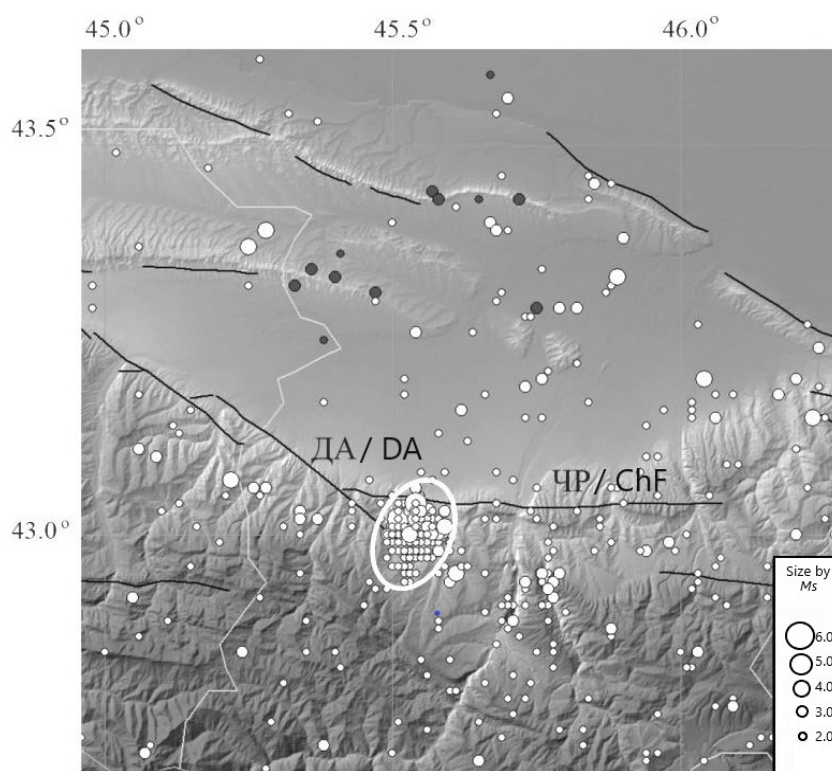


Рис. 2. Положение эпицентров землетрясений 2020 г. в эпицентральной области землетрясения 12 декабря и ее окружении на фоне основных глубинных разломов по [Трифонов и др., 2002]: ДА – Даттых–Ахловская погребенная шовно-сдвиговая зона; ЧР – Черногорский разлом (или Владикавказская флексурно-разрывная зона); белым эллипсом отмечена афтершоковая область, выделенная по методу Прозорова [Прозоров, 1986] /

Fig. 2. The position of the epicenters of the 2020 earthquake in the epicentral region of the December 12 earthquake and its surroundings against the background of the main deep faults according to [Trifonov et al., 2002]: DA – Datty–Akhlovskaya buried suture-shear zone; ChF – Chernogorsky fault (or Vladikavkaz flexure-rupture zone); a white ellipse marks the aftershock area, highlighted by the Prozorov method [Prozorov, 1986]

Афтершоковая область по методу Прозорова [Прозоров, 1986], реализованному в программе EEDB [Михеева и др., 2013], может быть описана эллипсом с размерами: большая ось равна 20 км, малая ось – 15 км. Инструментальный очаг смещен к северу от центра эллипса примерно на 4 км. Эллипс слабо вытянут и явно не приурочен к какому-то глубинному разлому.

График распределения афтершоков во времени и по энергетическому классу изображен на рисунке 3, из которого хорошо видно, что большинство афтершоков произошло в первые сутки после главного толчка, а наиболее сильные афтершоки реализовались в первые 11 дней. Сильнейший афтершок реализовался через 13 часов после основного толчка 13 декабря в 11^h34^m с $K_p=12,3$. Величина энергетической ступени между ними составила $\Delta K_{aft}=12,9-12,3=0,6$. Таким образом, землетрясение характеризуется быстрым спадом афтершоковой активности, что возможно связано с его относительно невысокой энергией.

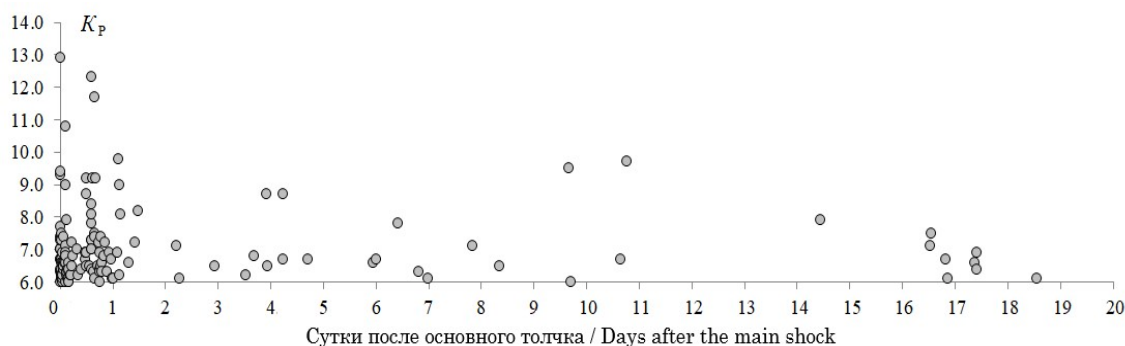


Рис. 3. Распределение во времени от основного толчка афтершоков землетрясения 12.12.2020 г. с представительного уровня $K_p=6,0$ за период с 12 декабря 2020 г. по 31 декабря 2020 г. /

Fig. 3. Time distribution from the main shock of the earthquake aftershocks on 12.12.2020 from a representative level of $K_p=6,0$ for the period from December 12, 2020 to December 31, 2020

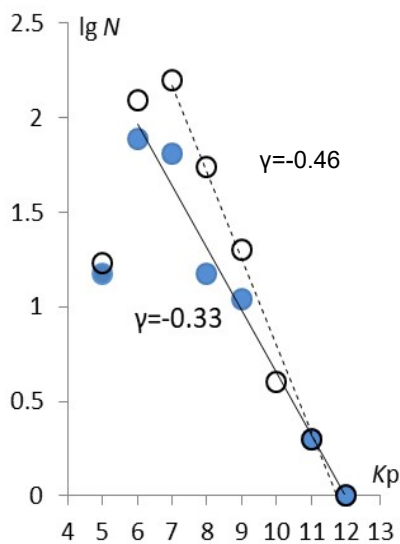


Рис. 4. График повторяемости афтершоков землетрясения 12 декабря 2020 г. (сплошная линия) в сравнении с графиком за предыдущий период с января по ноябрь 2020 г. (пунктирная линия) /

Fig. 4. The recurrence chart of the earthquake aftershocks on December 12, 2020 (solid line) compared with the chart for the preceding period from January to November 2020 (dotted line)

Уравнение графика повторяемости для афтершоков (рис. 4), рассчитанное для его линейной части, имеет вид: $\lg N=3,94-0,33K_p$. Наклон графика, равный $\gamma=-0,33$, ниже значения $\gamma=-0,46$, рассчитанного для этого региона в 2020 г.

Механизм очага землетрясения 12 декабря 2020 г. рассчитан в программе FA (Ландер А.В. Программа расчёта и графического представления механизмов очагов землетрясений по знакам первых вступлений P -волн (FA). Свидетельство о государ-

ственной регистрации программы для ЭВМ № 2018662004 от 25 сентября 2018 г.) по знакам первых вступлений продольных волн на 40 региональных станциях, расположенных на расстояниях от 28 до 326 км от эпицентра, из них на 15 станциях зарегистрированы волны сжатия, на 25 – волны растяжения. Землетрясение возникло под преобладающим действием близгоризонтальных сжимающих напряжений, ориентированных на юг-юго-восток (табл. 2). Одна из нодальных плоскостей *NP1* имеет север-северо-восточное простирание, другая плоскость *NP2* – запад-юго-западное простирание. Тип движения по обеим плоскостям – взброс.

Таблица 2 / Table 2

**Параметры механизма очага землетрясения 12 декабря 2020 года
по данным разных источников /
Parameters of the mechanism of the earthquake on December 12, 2020
according to various sources**

Дата/ Date δ м/ d m	t_0 , ч:мин:с/ h:min:s	h , км/ km	K_p	Оси главных напряжений/ Principal axes						Нодальные плоскости/ Nodal planes						Диаграмма/ Chart	Источник/ A source
				T		P		N		$NP1$			$NP2$				
				PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	$SLIP$	STK	DP	$SLIP$		
12.12	21:29:49	10	12.4	81	325	9	156	2	66	65	54	88	248	36	93		NOGSR
12.12	21:29:48.6	10	12.9	84	252	0	162	6	72	66	45	82	257	45	98		OBGSR
12.12	21:29:49.9			68	130	16	353	14	259	104	31	118	252	63	74		GCMT

В таблице 2 приведены также решения механизма очага, рассчитанные в GCMT и в ЦО ФИЦ ЕГС РАН (OBGSR). Региональное решение близко к решению, полученному в ЦО ФИЦ ЕГС РАН. Как видно из диаграммы по данным GCMT в очаге также произошел взброс, но с незначительной сдвиговой компонентой смещения. Несмотря на небольшие различия в приведенных решениях, можно предположить, что в очаге землетрясения произошел взброс активного блока земной коры под действием горизонтальных сжимающих напряжений.

Для девяти афтершоков с $K_p \geq 9$ также были получены решения фокальных механизмов (табл. 3), которые показали подобный тип подвижки в очаге. 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.

Взбросовый тип движения в очагах характерен для структур Большого Кавказа, а простирание обеих нодальных плоскостей механизма очага землетрясения близко к субширотной ориентации Черногогорского разлома.

Таблица 3/ Table 3

**Параметры механизмов очагов афтершоков землетрясения 12.12.2020 г. /
Parameters of mechanisms of earthquake aftershock on 12.12.2020**

Дата/ Date	t_0 , ч:мин:с/ h:min:s	h , км/ km	K_p	Оси главных напряжений/ Principal axes						Нодальные плоскости/ Nodal planes						Диаграмма/ Chart
				T		N		P		$NP1$			$NP2$			
				PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	$SLIP$	STK	DP	$SLIP$	
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	

Сравнение механизма очага землетрясения 12 декабря 2020 г. с механизмом очага 8–9-балльного Черногорского землетрясения 28.07.1976 г. (табл. 4) показало подобие в типе движения – взброс. Ориентация же нодальных плоскостей этого механизма ближе к ориентации диагональной Даттых-Ахловской разломной зоны.

Таблица 4 / Table 4

**Параметры механизма очага Черногорского землетрясения 1976 г. /
Parameters of the mechanism of the hearth of the Montenegrin earthquake of 1976**

Дата/ Date	t_0	h , км/ km	M	Оси главных напряжений/ Principal axes						Нодальные плоскости/ Nodal planes						Диаграмма/ Chart	Источник/ A source
				T		N		P		$NP1$			$NP2$				
				PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	$SLIP$	STK	DP	$SLIP$		
28.07.1976	20:17	15	6.4	60	196	0	286	30	16	286	75	90	107	15	91		GCMT

Спектральные параметры основного толчка. В ЦО ФИЦ ЕГС РАН для спектральных исследований в настоящее время применяется программа SEISAN [Havskov, Ottemoller, 2010], одним из элементов которой является построение спектров сейсмических фаз [Brune, 1970], вычисление сейсмического момента и магнитуды Канамори [Hanks, Kanamori, 1979]. Предварительно с помощью программы CODAQ [Havskov et al., 1989], входящей в этот же комплекс, проведены работы по расчету добротности среды в литосфере восточной части Северного Кавказа, включающей Терско-Каспийский (ТК) прогиб и структуры Дагестанского клина, по методу огибающей коды-волн для поперечных S -волн. В [Зверева и др., 2024а] получена средняя зависимость добротности Q_c от частоты, которая определена как

$$Q_c = 94 \cdot f^{0.95} \quad (1)$$

Основываясь на этой формуле (1), были вычислены значения сейсмического момента и магнитуды Канамори для основного толчка 12 декабря 2020 г. в 21^h29^m и 5 афтершоков (табл. 5).

Таблица 5 / Table 5

Спектральные очаговые параметры для основного толчка и афтершоков землетрясения 12 декабря 2020 г. по данным [Зверева и др., 2024б] /
Spectral focal parameters for the main shock and aftershocks of the earthquake on December 12, 2020 according to [Zvereva et al., 2024b]

№	Дата и время/ Date and time	K_p	$M_0 \cdot 10^{15}$ (Н·м)	M_w	N_{sta}
0	12.12 21:29	12.9	15.85	4.7	19
1	12.12 23:50	10.8	1.26	4.0	24
2	13.12 11:34	12.3	6.31	4.5	17
3	14.12 00:12	9.8	0.20	3.5	18
4	22.12 13:21	9.5	0.16	3.4	9
5	23.12 16:01	9.7	0.13	3.3	8

Для сравнения приведем значения M_0 и M_w по данным 101 телесейсмической станции, полученные в GCMT и представленные в ISC (International Seismological Centre. (2024). On-line Bulletin. <https://doi.org/10.31905/D808B830>) для основного толчка: $M_0=2,253E+16$; $M_w=4,8$. Как видно, расхождения незначительные.

Макросейсмические данные. М.Я. Гайсумовым был осуществлен выезд в эпицентральную зону для сбора сведений о сотрясениях в населенных пунктах Чеченской Республики. Сотрудниками центра NOGSR был произведен сбор макросейсмических данных на территориях Осетии, Ингушетии и Кабардино-Балкарии. Сведения о макросейсмических проявлениях в 27 населенных пунктах собраны путем телефонного опроса с последующим составлением опросных листов. Оценка интенсивности проводилась по реакции людей и предметов быта на основе шкалы MSK-64 [Медведев и др., 1965].

С интенсивностью 5–6 баллов землетрясение проявилось в населенных пунктах Рошни-Чу, Танги-Чу, Мартан-Чу, Гехи, Урус-Мартан. Оно было замечено практически всеми жителями этих сел. Большинство населения испытывали сильный испуг, головокружение и в панике покидали помещения. В домах сильно раскачивались висевшие предметы, дребезжала посуда и стекла в окнах, скрипела и дрожала мебель, предметы двигались, беспокоились домашние животные. Находящиеся в автомашинах испытывали покачивания. Очевидцам трудно было стоять на ногах. Предположительно ощущалось от 1 до 3 толчков в течение 3–4 секунд. Зафиксированы отдельные случаи образования волосных трещин в штукатурке. В с. Рошни-Чу в частном одноэтажном кирпичном доме образовалась (по всей видимости, расширилась до 1–2 см) трещина в кирпичной кладке и фундаменте. В отдельных случаях треснули стекла в пластиковых окнах. При землетрясении был слышен грохотообразный гул, похожий на звук от далекого взрыва.

Интенсивность колебаний 5 баллов была зафиксирована в населенных пунктах Ассиновская, Шалажи, Валерик, Гой-Чу, Катар-Юрт, Ачхой-Мартан, Гойты, Алхан-Кала, Алхан-Юрт, Закан-Юрт, Чечен-Аул, Гикало, Грозный-юг (южная окраина). Здесь землетрясение ощутили многие люди, находящиеся в движении и почти все в покое (кровати шатались). В помещениях дрожала и скрипела мебель, открывались дверцы шкафов, колебались свободно подвешенные часы, люстры и другие предметы. Люди слышали раскатистый шум, как при грозе. Некоторые испытывали страх, но паники у людей не было. Колебания в виде двух-трех толчков продолжались 3–5 секунд. В отдельных случаях образовались волосные трещины во внутренней отделке жилых комнат, трещин в стенах не было. В населенных пунктах Валерик и Ачхой-Мартан в нескольких случаях треснули стекла в пластиковых витражах.

Интенсивность колебаний 4 балла была зафиксирована в населенных пунктах Серноводская, Самашки, Грозный-запад, Октябрьское, Грозный-центр, Грозный-север, Грозный-восток, Аргун-центр, Старые Атаги, Чири-Юрт, Шали-Центр, Цоци-Юрт, Автуры. Здесь землетрясение ощутили многие люди, находящиеся в покое, особенно находящиеся на верхних этажах домов, и отдельные люди, находящиеся в движении. Некоторые испытывали испуг, редко страх, находящиеся вне помещений слышали гул.

Интенсивность сотрясений в 3 балла зафиксирована в 19 населенных пунктах на расстояниях до 88 км от эпицентра. Люди, находившиеся в покое, испытывали плавное покачивание. В домах отмечались малозаметные колебания висевших предметов, дребезжание посуды.

Обобщенные результаты оценки интенсивности сотрясений приведены в таблице 6, а соответствующая карта пунктов-баллов представлена на рисунке 5. На ней же нанесено вероятное положение изосейст равной балльности.

Проведение 5- и 4-балльных изосейст довольно хорошо обеспечено пунктами-баллами, они вытянуты с востока на запад субширотно, 5–6-балльная изосейста, показанная на врезке к рисунку 5, несколько развернута на запад-северо-запад, но ее проведение не столь уверенно из-за малого числа пунктов наблюдений, что объясняется труднодоступной горной местностью в этом районе. Трехбалльная изо-

сейста расширяется и принимает более округлый вид, также с незначительной широтной вытянутостью. Положение изолиний балльности не противоречит простиранию нодальных плоскостей механизма очага землетрясения.

Таблица 6 / Table 6

**Макросейсмические данные о землетрясении 12 декабря 2020 г.
(основной толчок) /
Macroseismic data on the earthquake of December 12, 2020
(main shock)**

№	Пункт/ Settlement	Δ, км/ km	Координаты/ Coordinates		№	Пункт/ Settlement	Δ, км/ km	Координаты/ Coordinates	
			φ°, N	λ°, E				φ°, N	λ°, E
	5–6 баллов/ 5–6 points					3 балла/ 3 points			
1	Марган-Чу	4.4	43.06	45.56	32	Шатой	19.7	42.87	45.69
2	Танги-Чу	6.9	43.07	45.51	33	Борзой	20.8	42.84	45.63
3	Рошни-Чу	11.9	43.09	45.45	34	Махкеты	29	42.96	45.90
4	Урус-Марган	11.2	43.12	45.54	35	Итум-Кали	31.6	42.73	45.57
5	Гехи	17.2	43.16	45.47	36	Ведучи	37.1	42.68	45.57
	5 баллов/ 5 points				37	Ведено	44.1	42.97	46.09
6	Гой-Чу	5.9	43.06	45.61	38	Химой	47.1	42.65	45.85
7	Гойты	16.3	43.16	45.62	40	Бачи-Юрт	56.3	43.22	46.19
8	Шалажи	18.6	43.10	45.36	41	Червлёная	59.8	43.50	45.88
9	Валерик	21.1	43.17	45.40	42	Левобережное	61.5	43.57	45.63
10	Катар-Юрт	22.7	43.17	45.37	43	Калиновская	61.6	43.57	45.52
11	Алхан-Юрт	22.2	43.22	45.56	44	Брагуны	63.7	43.43	46.09
12	Гикало	26.7	43.22	45.73	45	Ботлих	66	42.66	46.21
13	Алхан-Кала	27	43.26	45.53	46	Горагорский	65.9	43.50	45.08
14	Чечен-аул	27.2	43.20	45.78	47	Ножай-Юрт	67.1	43.09	45.37
15	Грозный-юг	28.7	43.27	45.65	48	Надтеречное	69.4	43.62	45.33
16	Закан-Юрт	29.2	43.26	45.42	49	Владикавказ	71.6	43.02	44.68
17	Ачхой-Марган	29.3	43.18	45.28	50	Шелковская	83.1	43.50	46.33
18	Ассиновская	39.4	43.24	45.18	51	Дылым	87.9	43.07	46.64
	4 балла/ 4 points					2–3 балла/ 2–3 points			
19	Чири-Юрт	16.7	43.08	45.74	52	Унцукуль	106	42.71	46.79
20	Ст. Атаги	18.7	43.12	45.74		2 балла/ 2 points			
21	Шали	31.7	43.15	45.90	53	Дубки	104	43.02	46.84
22	Октябрьское	32.1	43.30	45.57	54	Кизилюрт	108	43.20	46.87
23	Грозный-центр	33.9	43.31	45.69	55	Каранай	112	42.83	46.90
24	Грозный-запад	34.8	43.33	45.50	56	Буйнакск	129	42.82	47.12
25	Самашки	36.7	43.29	45.30	57	Нальчик	167	43.49	43.61
26	Грозный-восток	37.4	43.33	45.74		не ощущалось/ not felt			
27	Грозный-север	38.4	43.35	45.70	58	Хунзах	107	42.54	46.71
28	Аргун	39.2	43.29	45.86	59	Тлярата	121	42.11	46.36
29	Автуры	39.4	43.16	46.00	60	Аракани	127	42.61	46.99
30	Цоци-Юрт	43.6	43.24	46.00	61	Кумух	159	42.17	47.12
31	Серноводская	45.6	43.30	45.16	62	Уркарах	195	42.16	47.63

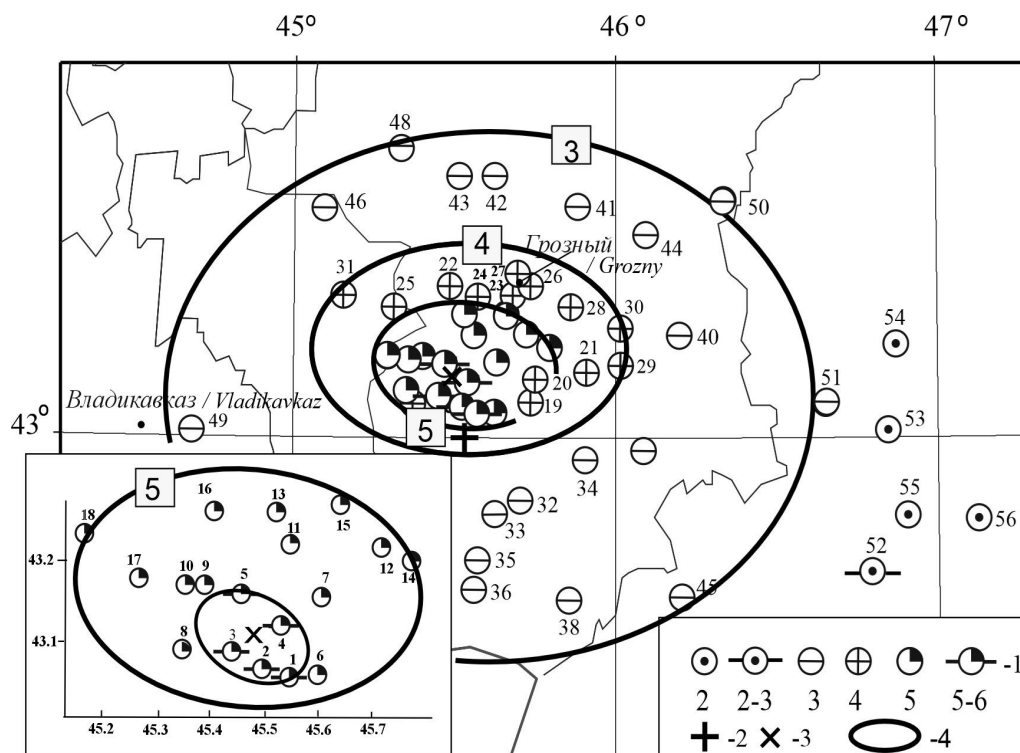


Рис. 5. Карта пунктов-баллов и изосейст равной балльности основного толчка землетрясения 12 декабря 2020 г. Внизу слева на врезке показана более детально область с 5-балльными и 5-6-балльными пунктами и изосейсты такой балльности

1 – интенсивность сотрясений в населенном пункте в баллах; 2 – положение инструментального эпицентра; 3 – положение макросейсмического эпицентра; 4 – изолинии балльности /

Fig. 5. A map of points and isoseists of equal magnitude of the main shock of the earthquake on December 12, 2020. The bottom left of the inset shows in more detail the area with 5-point and 5-6-point points and isoseists of such a score 1 – the intensity of concussions in a locality in points; 2 – the position of the instrumental epicenter; 3 – the position of the macroseismic epicenter; 4 – the isolines of the score

На основе собранных данных об интенсивности в населенных пунктах был построен график спада интенсивности в зависимости от гипоцентрального расстояния. На рисунке 6, кроме наблюдаемых данных, приведены кривые затухания согласно уравнениям макросейсмического поля с коэффициентами для Северного Кавказа ($b=1,6$, $v=3,1$, $c=2,2$) и Дагестана ($b=1,5$, $v=3,6$, $c=3,1$). Как видно, макросейсмический эффект землетрясения 12 декабря лучше всего описывается формулой с коэффициентами, предложенными для Дагестана [Кондорская, Шебалин, 1977].

Три сильнейших афтершока с $K_p \geq 10,8$ ощущались в основном в населенных пунктах Чеченской Республики: 12 декабря в 23^h50^m с $K_p=10,8$ – в Урус-Мартане, Чечен-Ауле, Грозном, Ачхой-Мартане – интенсивностью 3 балла; в Шали – 2 балла; 13 декабря в 11^h34^m с $K_p=12,3$ – в Урус-Мартане, Чечен-Ауле, Грозном, Ачхой-Мартане, Гой-Чу, Мартан-Чу, Танги-Чу, Рошни-Чу, Гехи – интенсивностью 5 баллов; в Шали, Аргуне, Цоци-Юрте, Серноводском, Самашках, Ассиновской, Автурах – 4 балла; в Махачкале – 2–3 балла; 13 декабря в 13^h05^m с $K_p=11,7$ – в Урус-Мартане, Чечен-Ауле, Грозном, Шали, Ачхой-Мартане – интенсивностью 3 балла.

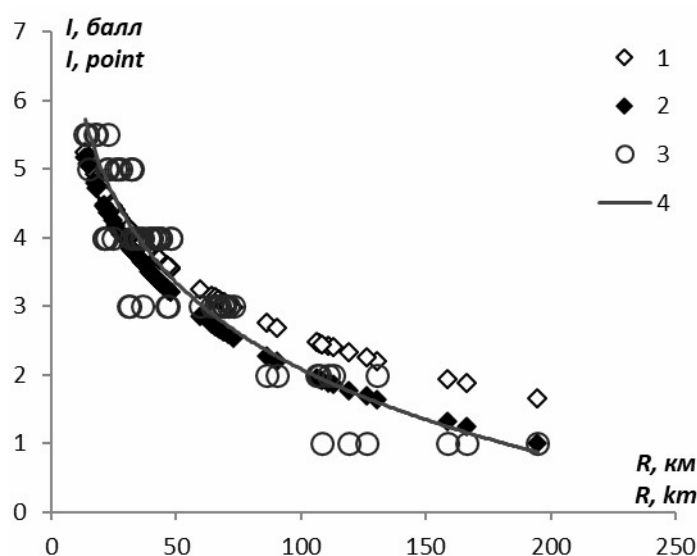


Рис. 6. График спада интенсивности сотрясений в баллах в зависимости от гипоцентрального расстояния R при землетрясении 12 декабря 2020 г.
 1 – затухание по формуле: $I = 1,6 \times M_s - 3,1 \times \lg R + 2,2$; 2 – затухание по формуле: $I = 1,5 \times M_s - 3,6 \times \lg R + 3,1$; 3 – наблюдаемые данные; 4 – кривая, аппроксимирующая наблюдаемые данные /

Fig. 6. Graph of the decrease in the intensity of concussions in points depending on the hypocentral distance R during the earthquake on December 12, 2020.

1 – attenuation according to the formula: $I = 1,6 \times M_s - 3,1 \times \lg R + 2,2$; 2 – attenuation according to the formula: $I = 1,5 \times M_s - 3,6 \times \lg R + 3,1$; 3 – observed data; 4 – a curve approximating the observed data

Выводы

Землетрясение 12 декабря 2020 г. и сопровождающие его афтершоки произошли в Черногорской зоне ВОЗ ($M_{\max}=6,5$) Терско-Сунженской сейсмогенерирующей области, что является подтверждением сейсмической активности этой зоны. В названном блоке длительное время с 1984 г. вплоть до 12 декабря 2020 г. наблюдалось затишье на уровне магнитуд $M_s \geq 5,0$. Было установлено, что для землетрясения характерен быстрый спад афтершоковой активности, что возможно связано с его относительно невысокой энергией, а также с раздробленностью среды в очаговых зонах предыдущих сильных землетрясений. Были исследованы спектральные характеристики основного толчка, такие как скалярный сейсмический момент M_0 и спектральная моментная магнитуда M_w . Был определен механизм очага и получен взбросовый тип подвижки, характерный для структур Большого Кавказа. Простирание обеих нодальных плоскостей механизма очага землетрясения близко к субширотной ориентации Черногорского разлома. Сравнение механизма очага землетрясения 12 декабря 2020 г. с механизмом очага 8–9-балльного Черногорского землетрясения 28.07.1976 г. показало подобие в типе движения – взброс. Максимальная интенсивность сотрясений в населенных пунктах составила 5–6 баллов по MSK-64. Полученная информация поможет глубже понять сейсмические процессы, влияющие на жизнь в сейсмически опасном районе на территории Чечнской Республики. Данные о произошедшем землетрясении и его многочисленных афтершоках необходимы для уточнения модели сейсмического воздействия и оценки уровня сейсмической опасности в регионе.

Литература

1. Асманов О.А., Гамидова А.М., Мусалаева З.А., Алисултанова Г.С. Каталог афтершоков Черногорского землетрясения 28 июля 1976 года в Чечено-Ингушетии. // Геодинамика и сейсмичность территории Дагестана. – 1979. – № 3(21). – С. 56–62.
2. Борисов Б.А., Рейснер Г.И. О геологической обстановке Чечено-Ингушского землетрясения 1976 г. // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. – 1977. – Т. 72. № 4. – С. 78–83.
3. Габсатарова И.П. Инструментальные параметры очага Курчалойского землетрясения 11 октября 2008 г. с $K_p=14.5$, $M_w=5.8$, $I_0=7-8$ (Чеченская Республика). // Землетрясения Северной Евразии в 2008 г. – 2014. – С. 433–447.
4. Зверева А.С., Габсатарова И.П., Лиходеев Д.В. Региональные особенности затухания сейсмических волн на территории Северного Кавказа. // Физика Земли. – 2024а. – № 6. – С. 64–79.
5. Зверева А.С., Скоркина А.А., Габсатарова И.П. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Северного Кавказа в 2020 году. // Землетрясения Северной Евразии. – 2024b. – Вып. 27 (2020). – С. 242–254. DOI: 10.35540/1818-6254.2024.27.22.
6. Кондорская Н.В., Шебалин Н.В. Новый каталог землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М.: Наука, 1977. – 536 с.
7. Краснопевцева Г.В. Глубинное строение Кавказского сейсмоактивного региона. – М.: Наука, 1984. – 109 с.
8. Левкович Р.А., Амиров С.Р. Сейсмичность сейсмофокальной области «Дагестанский клин» и ее ближайшего окружения за исторический и инструментальный периоды наблюдений до землетрясения 14 мая 1970 года. // Мониторинг. Наука и технологии. – 2010. – № 2. – С. 42–46.
9. Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В. Международная шкала сейсмической интенсивности MSK-64. М.: МГК АН СССР, 1965. – 11 с.
10. Михеева А.В., Дядьков П.Г., Марчук А.Г. Геоинформационная система GIS-EEDB и методы пространственно-временного анализа сейсмологических данных. // Геоинформатика. – 2013. – Т. 59. № 2. – С. 58–65.
11. Несмеянов С.А., Лутиков А.И., Шукин Ю.К., Донцова Г.Ю. Сейсмогенерирующие структуры. Комплексная оценка сейсмической опасности территории г. Грозный. М.: Минстрой России, 1996. – С. 38–47.
12. Прозоров А.Г. Динамический алгоритм выделения афтершоков для мирового каталога землетрясений. // Математические методы в сейсмологии и геодинамике (Вычислительная сейсмология, Вып. 19). М.: Наука, 1986. – С. 58–62.
13. Трифонов В.Г., Соболева О.В., Трифонов Р.В., Востриков Г.А. Современная геодинамика Альпийско-Гималайского коллизионного пояса. М.: ГЕОС, 2002. – 225 с.
14. Brune I.V. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. // Journal of Geophysical Research. – 1970. – V. 75. No. 26. – pp. 4997–5009.
15. Hanks T.S., Kanamori H. A moment magnitude scale. // Journal of Geophysical Research. – 1979. – Vol. 84. No. 135. – pp. 2348–2350.
16. Havskov J., Ottemoller L. Routine data processing in earthquake seismology: with sample data, exercises and software. Springer Science & Business Media, 2010. – 352 p.
17. Havskov J., Malone S., McCloud D., Crosson R. Coda Q for the state of Washington. // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1989. – Vol. 79. – pp. 1024–1038.
18. Lee W.H.K., Lahr J.C. HYP071 (Revised): A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes. // U.S. Geological Survey. Open File Report 75-311. – 1975. – 116 p.
19. Waldhauser F., Ellsworth W.L. A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the Northern Hayward fault, California. // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2000. – Vol. 90. No. 6. – pp. 1353–1368.
20. Waldhauser F. HypoDD – A program to compute double-difference hypocenter locations. // U.S. Geological Survey. Open File Report 01-113. – 2001. – 25 p.

References

1. Asmanov O.A., Gamidova A.M., Musalaeva Z.A., Alisultanova G.S. Catalog of aftershocks of the Chernogorskoe earthquake on 28 July 1976 in Checheno-Ingushetia. *Geodynamics and Seismicity of the Territory of Dagestan*. 1979. No. 3(21). pp. 56–62. (In Russ.)
2. Borisov B. A., Reisner G. I. On the geological setting of the Chechen-Ingush earthquake of 1976. *Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological series*. 1977. Vol. 72. No. 4. pp. 78–83. (In Russ.)
3. Gabsatarova I.P. Instrumental parameters of the Kurchaloi earthquake focus 11 October 2008, $K_p=14.5$, $M_w=5.8$, $I_0=7-8$ (Chechen Republic). *Earthquakes in Northern Eurasia*, 2008. 2014. pp. 433–447. (In Russ.)
4. Zvereva A.S., Gabsatarova I.P., Likhodeev D.V. Regional features of the attenuation of seismic waves in the North Caucasus. *Physics of the Earth*. 2024a. No. 6. pp. 64–79. (In Russ.)
5. Zvereva A.S., Skorkina A.A., Gabsatarova I.P. Spectral and source parameters of North Caucasus earthquakes in 2020. *Earthquakes in Northern Eurasia*, 27(2020). 2024b. pp. 242–254. DOI: 10.35540/1818-6254.2024.27.22. (In Russ.)
6. Kondorskaya N.V., Shebalin N.V. New catalog of strong earthquakes in the USSR from ancient times through 1975. Moscow. Nauka. 1977. 536 p. (In Russ.)
7. Krasnopevtseva G.V. The deep structure of the Caucasus seismically active region. Moscow. Nauka. 1984. 109 p. (In Russ.)
8. Levkovich R.A., Amirov S.R. Seismicity of the seismofocal region “Dagestan wedge” and its immediate surroundings for the historical and instrumental observation periods before the earthquake of 14 May 1970. *Monitoring. Science and Technology*. 2010. No. 2. pp. 42–46. (In Russ.)
9. Medvedev S.V. Shponhoyer V., Karnik V. MSK-64 International seismic intensity scale. Moscow. MGK Academy of Sciences USSR. 1965. 11 p. (In Russ.)
10. Mikheeva A.V., Dyadkov P.G., Marchuk A.G. Geoinformation system GIS-EEDB and methods of spatiotemporal analysis of seismological data. *Geoinformatics*. 2013. Vol. 59. No. 2. pp. 58–65. (In Russ.)
11. Nesmeyanov S.A., Lutikov A.I., Shchukin Yu.K., Dontsova G.Yu. Seismogenic structures. Comprehensive assessment of seismic hazard of the territory of Grozny. Moscow. Russian Ministry of Construction. 1996. pp. 38–47. (In Russ.)
12. Prozorov A.G. Dynamic algorithm for identifying aftershocks for the world catalog of earthquakes. *Mathematical methods in seismology and geodynamics (Computational seismology. Issue 19)*. Moscow. Nauka. 1986. pp. 58–62. (In Russ.)
13. Trifonov V.G., Soboleva O.V., Trifonov R.V., Vostrikov G.A. Modern geodynamics of the Alpine-Himalayan collision belt. Moscow. GEOS. 2002. 225 p. (In Russ.)
14. Brune I.V. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of Geophysical Research*. 1970. Vol. 75. No. 26. pp. 4997–5009.
15. Hanks T.S., Kanamori H. A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research*. 1979. Vol. 84. No. 135. pp. 2348–2350.
16. Havskov J., Ottemoller L. Routine data processing in earthquake seismology: with sample data, exercises and software. Springer Science & Business Media. 2010. 352 p.
17. Havskov J., Malone S., McCloud D., Crosson R. Coda Q for the state of Washington. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1989. Vol. 79. pp. 1024–1038.
18. Lee W.H.K., Lahr J.C. HYP071 (Revised): A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes. U.S. Geological Survey. Open File Report 75-311. 1975. 116 p.
19. Waldhauser F., Ellsworth W.L. A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the Northern Hayward fault, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2000. Vol. 90. No. 6. pp. 1353–1368.
20. Waldhauser F. HypoDD – A program to compute double-difference hypocenter locations. U.S. Geological Survey. Open File Report 01-113. 2001. 25 p.