

УДК 550.348.098.3

Шкала локальных магнитуд M_L для землетрясений в Терско-Каспийском прогибе

© 2023 г. Р.А. Дягилев, И.П. Габсатарова, Е.А. Селиванова

ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия

Поступила в редакцию 28.02.2023 г.

Аннотация. Разработана шкала (калибровочная функция) для определения локальной магнитуды M_L землетрясений с эпицентрами в центральной части Терско-Каспийского прогиба. В основе шкалы лежит формула, учитывающая затухание и геометрическое расхождение с расстоянием для максимальных амплитуд симулированных записей короткопериодного прибора Wood-Anderson. Для её расчёта была составлена выборка из 64 землетрясений, произошедших в 2020–2022 гг. в период активизации в районе Чёрных гор в Чеченской Республике. Землетрясения были записаны 58 станциями, расположенными вокруг эпицентров в различных геолого-тектонических условиях в диапазоне расстояний 25–526 км. Для расчёта применена программа MagScale, разработанная в ФИЦ ЕГС РАН на основе методических рекомендаций, изложенных в «Новом руководстве практики сейсмологических наблюдений» (NMSOP). Получены значения коэффициентов уравнения, характеризующие затухание в коре и верхней мантии. Рассчитаны станционные поправки, позволяющие уменьшить общую невязку шкалы с ± 0.26 до ± 0.15 . Площадное распределение поправок предположительно отражает геологические особенности района.

Ключевые слова: локальная магнитуда, калибровочная функция, землетрясения, Терско-Каспийский прогиб.

Для цитирования: Дягилев Р.А., Габсатарова И.П., Селиванова Е.А. Шкала локальных магнитуд M_L для землетрясений в Терско-Каспийском прогибе // Российский сейсмологический журнал. – 2023. – Т. 5, № 2. – С. 19–31. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.2.02>. – EDN: FEJGPK

Введение

Основной оценкой силы землетрясений в регионе Северного Кавказа вплоть до настоящего времени является энергетический класс, разработанный Т.Г. Раутиан [Раутиан, 1960; 1964]. Энергетический класс долгое время был широко распространён в региональных центрах, использующих методики обработки наблюдений на сейсмических станциях согласно «Инструкции о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях Единой системы сейсмических наблюдений» [Кондорская и др., 1981]. Эта оценка тесно связана с оценкой энергии, выделившейся в очаге в виде сейсмических волн, характеризую масштаб произошедших в нём деформаций.

В период внедрения программного обеспечения обработки цифровых записей землетрясений алгоритмы нахождения энергетического класса были включены в обрабатывающие программы, как, например, это было сделано в про-

грамме WSG [Акимов, Красилов, 2020], широко используемой при обработке цифровых записей сейсмических станций на Северном Кавказе. Многолетнее определение K_p по одной и той же методике позволило соблюдать преемственность каталогов за длительные периоды наблюдений.

Между тем, в мировой практике по-прежнему остаётся наиболее распространённой оценкой силы землетрясений с очагами, удалёнными на первые сотни километров, шкала магнитуд M_L , впервые предложенная Ч. Рихтером в 1935 г. [Richter, 1935] и несколько модифицированная в [Hutton, Boore, 1987]. Эта магнитуда вошла в перечень стандартных типов магнитуд, определённых Рабочей группой IASPEI, как представлено в «Новом руководстве практики сейсмологических наблюдений» (NMSOP), созданном большой группой мировых учёных под руководством П. Бормана [Bormann, 2012].

Широкое использование сейсмологическими центрами Европы и мира значений локальной магнитуды для слабых землетрясений

можно видеть в бюллетенях ISC [International ..., 2022]. В списке предпочтительных типов магнитуд для событий в бюллетене ISC – MS , mb , M_w и ML , ML стоит на четвертом месте, однако для слабых землетрясений с $ML \leq 3.5$ эта магнитуда часто становится единственной [Di Giacomo, Storchak, 2016].

В российских сейсмологических центрах локальная магнитуда ML оценивается по-разному. В частности, независимый расчёт магнитуд производится только на территории Восточно-Европейской платформы (ВЕП), Урала, Алтае-Саянского региона, Якутии, Камчатки и Арктики [Габсатарова, Ассиновская и др., 2021; Маловичко и др., 2021; Еманов и др., 2021; Шибеев и др., 2021; Чебров и др., 2021; Морозов и др., 2021], при этом везде, кроме Алтае-Саянского региона, также рассчитывается энергетический класс. На Северном Кавказе, в Прибайкалье, Забайкалье, Приамурье, Приморье, Курило-Охотском регионе, на Сахалине и Северо-Востоке России локальная магнитуда оценивается через корреляционные связи с энергетическим классом по Т.Г. Раутиан (K_p) и классом по С.Л. Соловьёву (K_s) [Раутиан, 1960; 1964; Соловьёв, Соловьёва, 1967; Габсатарова, Королецы и др., 2021; Мельникова и др., 2021; Фокина и др., 2021; Алёшина и др., 2021].

Определение ML важно для задач инженерной сейсмологии и оценок рисков, поскольку они тесно связаны с ущербом от землетрясения. Это объясняется тем, что многие строительные конструкции имеют собственные периоды, близкие к периоду сейсмометра Wood-Anderson (WA) (0.8 с) или находящиеся в пределах его полосы пропускания (около 0.1–1 с) [Bormann et al., 2013].

В ряде европейских регионов установлено, что значения локальной и моментной магнитуд находятся в довольно тесной связи, как, например, показано в работе [Herak, 2020; Di Giacomo et al., 2021]. В частности, для землетрясений Хорватии установлен факт, что в среднем существует линейная (почти 1:1) связь между ML и M_w , и это делает статистический анализ каталога, приведённого к одному типу магнитуд, а именно к M_w , более простым и надёжным. Полученные соотношения ML затем можно безопасно преобразовать в M_w (M_wL) в диапазоне величин, представляющих инженерный интерес, то есть выше $M_wL \approx 3.5$, и использовать в моделировании сильных движений, где требуется преобразование в M_wL . Такие зависимости использовались при составлении унифицированного Европейско-Средиземноморского каталога землетрясений (ЕМЕС) за последнее столетие и представ-

лены в работе [Grünthal, Wahlström, 2012]. Заметим, что зависимость, для Восточной Турции была построена с использованием данных каталога Кавказа [Годзиковская, 2023]. Эти данные собраны из разных источников, которые в качестве локальной магнитуды использовали значения MLH , пересчитанные из K_p , что, конечно, привело к большому разбросу при построении регрессии. Предположительно это соотношение используется в Унифицированном каталоге ЕМЕС и для других районов Кавказа. Безусловно, для Северного Кавказа такое соотношение магнитуд ещё необходимо исследовать на современном уровне.

Таким образом, работы по составлению региональных зависимостей, учитывающих затухание в отдельных районах Кавказа, актуальны и будут использоваться для получения инструментальных значений локальных магнитуд ML .

В настоящей работе поставлена задача уточнения калибровочной функции ML для района южной части Чеченской Республики в зоне сочленения Терско-Каспийского прогиба и Большого Кавказа, где в 2020–2022 г. произошли относительно сильные землетрясения. Этот район высокосейсмичен и известен сильным Черногорским землетрясением с $M=6.4$ в 1976 году. Работа является одной из первых в построении калибровочных функций ML для Северного Кавказа, за которой должны последовать исследования в других зонах этого региона.

Методические основы

В качестве методических основ приведём некоторые выдержки из главы 3 NMSOP «Сейсмические источники и параметры источников» [Bormann et al., 2013] и приложений к ней в виде DS 3.1 (Datasheet) [Bormann, 2012] и IS 3.3 (Information Sheet) [Bormann, Dewey, 2012], которые будут полезны для понимания и корректного выполнения работы построения калибровочной функции для выбранного нами района.

Шкала локальных магнитуд ML была разработана Ч. Рихтером в 1935 г. для землетрясений в Южной Калифорнии [Richter, 1935]. Шкала имеет вид:

$$ML = \lg(A_{WA}) + \sigma(\Delta), \quad (1)$$

где A_{WA} – максимальная амплитуда колебаний в мм на записи, полученной стандартным крутильным сейсмографом Wood-Anderson (WA); $\sigma(\Delta) = \lg(A_0)$ – калибровочная функция, значения которой соответствуют амплитуде колебаний

A_0 для условного эталонного землетрясения с магнитудой $ML=0$. Калибровочную функцию можно рассчитать с помощью выражения:

$$\sigma(\Delta)=a \cdot \lg(\Delta/100)+b \cdot (\Delta-100)+3+S, \quad (2)$$

где a – эмпирический коэффициент, описывающий геометрическое расхождение волн, b – эмпирический коэффициент, описывающий поглощение волн в среде, S – стационарная поправка, зависящая от грунтов в месте установки станции и компенсирующая возможные ошибки калибровки регистрирующей аппаратуры.

Табличные значения калибровочной функции $\sigma(\Delta)$ для Южной Калифорнии, рассчитанные Ч. Рихтером [Richter, 1958], представлены в DS 3.1 [Bormann, 2012]. Более поздняя версия шкалы, модифицированная Л. Хаттоном и Д. Буром [Hutton, Boore, 1987], на которой основана стандартная формула ML (IASPEI) (1), имеет вид:

$$ML=\lg(A)+a \cdot \lg(R)+b \cdot R+c, \quad (3)$$

где A – максимальное смещение земной поверхности в мм; R – гипоцентрально-расстояние в км, обычно менее 1000 км. Получены эмпирические коэффициенты: $a=1.11$, $b=0.00189$, $c=-2.09$. Существенным отличием уравнения (3) от первой версии шкалы ML является отступление от практики использования амплитуд WA и переход к расчётам через смещения грунта и уточнённый постоянный член $c=-2.09$, который учитывает экспериментально определённое статическое увеличение прибора WA (2080), а не его теоретическое значение (2800), указанное производителем сейсмографа.

Поскольку калибровочная функция Ч. Рихтера $\sigma(\Delta)$ и её модифицированная версия в выражении (2) характеризуют затухание волн на территории Южной Калифорнии, вполне вероятно, что для других регионов они могут быть непригодными. Исследования для районов континентального щита показали значительно более низкое затухание объёмных волн по сравнению с Южной Калифорнией. Несмотря на масштабирование $-\lg A_0(\Delta)$ для других регионов к значению, данному Ч. Рихтером для $\Delta=100$ км, отклонения от калибровочной функции Ч. Рихтера могут стать больше одной единицы магнитуды на расстояниях до 100 км. При определении калибровочных функций ML для других регионов сначала необходимо определить закон затухания амплитуды, а затем эту кривую необходимо привязать к опорной точке, данной в определении шкалы Ч. Рихтера ($ML=0$, $\Delta=100$ км, $A_{WA}=0.001$ мм).

Поскольку источники в других регионах могут быть значительно глубже, чем в Южной Калифорнии, следует либо определить $\sigma(\Delta, h)$, либо, по крайней мере, эпицентрально-расстояние Δ заменить в формулах магнитуды на гипоцентрально-расстояние $R=\sqrt{\Delta^2+h^2}$, последнее сейчас является обычной практикой [Bormann et al., 2013].

Согласно [Hutton, Boore, 1987], поправки на расстояние, разработанные Ч. Рихтером для локальных землетрясений ($\Delta < 30$ км), неверны. Это приводит к тому, что оценки магнитуды по ближайшим станциям значительно меньше, чем по более удалённым станциям. Значения ML по формуле (1) на гипоцентральных расстояниях между 50 и 200 км хорошо согласуются со значениями калибровки Ч. Рихтера, но завышены (до 0.6 магнитудных единиц) для близких станций ($R < 50$ км) и занижены (до 0.24 магнитудных единиц) для удалённых станций. Эффект отклонения на близких расстояниях связан с тем, что Ч. Рихтер предполагал геометрическое расхождение как $1/R^2$, тогда как наблюдаемый эффект составляет $\approx 1/R$. Чтобы устранить этот недостаток, для калибровки шкалы было предложено использовать альтернативную опорную точку ($ML=3$, $\Delta=17$ км, $A_{WA}=10$ мм), снижающую расхождения в определениях магнитуд на расстояниях менее 100 км, где региональные особенности затухания волн проявляются наиболее сильно [Hutton, Boore, 1987].

Для сейсмических станций, где регистрируются две горизонтальные компоненты, измерение амплитуд и расчёт магнитуды производятся независимо для каждой из них. Не нужно выполнять расчёт амплитуды горизонтальных колебаний из максимальных амплитуд разных компонент, так как они могут быть связаны с разными фазами, так же, как и не нужно вычислять максимальное векторное значение амплитуды горизонтальных колебаний. Главное, чтобы измерения происходили на записи в симуляции короткопериодного прибора WA , расчётная магнитуда не превышала порог $ML \approx 6.5$, после которого шкала ML испытывает насыщение [Kanamori, 1983].

Калибровка альтернативных региональных шкал магнитуд к стандартной формуле должна производиться таким образом, чтобы для любого региона в опорной точке на некотором фиксированном расстоянии ≤ 100 км одинаковые значения амплитуд, подставленные как в стандартную формулу, так и в альтернативную региональную формулу ML , давали одни и те же значения магнитуды (без учёта стационарных поправок).

Поправки на станциях в некоторых исследованиях варьировались от -0.6 до $+0.3$ единиц магнитуды и в значительной степени коррелировали с региональной геологией. Это указывает на настоятельную необходимость определения и функции калибровки и станционных поправок для ML на конкретной региональной основе. Станционные поправки S для ML , основанные на измерениях амплитуды короткого периода, довольно велики. Обычно они колеблются примерно в пределах ± 0.5 магнитудных единиц, и, как правило, больше для горизонтальных, чем для вертикальных компонент записи. Отрицательные поправки больше характерны для станций, установленных на осадочных отложениях или выветрелых породах, а близкие к нулю или положительные – для станций на жёстких скальных породах [Bormann, 2012].

Описанные выше принципы были учтены в алгоритме программы MagScale [Дягилев, 2022], которая используется в настоящей работе для построения калибровочной функции локальной магнитуды ML .

Используемые данные

В расчётах были задействованы данные по 64 землетрясениям, произошедшим в 2020–2021 гг. (рис. 1) в период активизации в райо-

не Чёрных гор в Чеченской Республике. Выборка представлена двумя основными толчками с $M=4.5-4.8$ и рядом наиболее сильных афтершоков этих землетрясений. Указанные землетрясения были записаны 58 станциями в диапазоне расстояний 25–525 км, расположенными в различных геолого-тектонических условиях. Представляло интерес увидеть, будут ли отражены в станционных невязках различия в строении участков земной коры.

В программном комплексе WSG «Система обработки сейсмических данных», разработанном в ФИЦ ЕГС РАН [Акимов, Красилов, 2020], предварительно были произведены замеры амплитуд и периодов на симулированных записях короткопериодного прибора WA в максимальной фазе записи на горизонтальных компонентах и сформирован бюллетень в формате ISF [IASPEI ..., 2022]. Этот бюллетень является источником данных для программы MagScale, в которой строилась калибровочная функция ML , учитывающая региональное затухание и характер геометрического расхождения. На рис. 1 показано пространственное положение лучей распространения волн, для которых в рассматриваемой выборке были измерены амплитуды. Взаимное расположение станций и очагов схематически отражает границы области, в пределах которой калибровочная кривая будет справедлива.

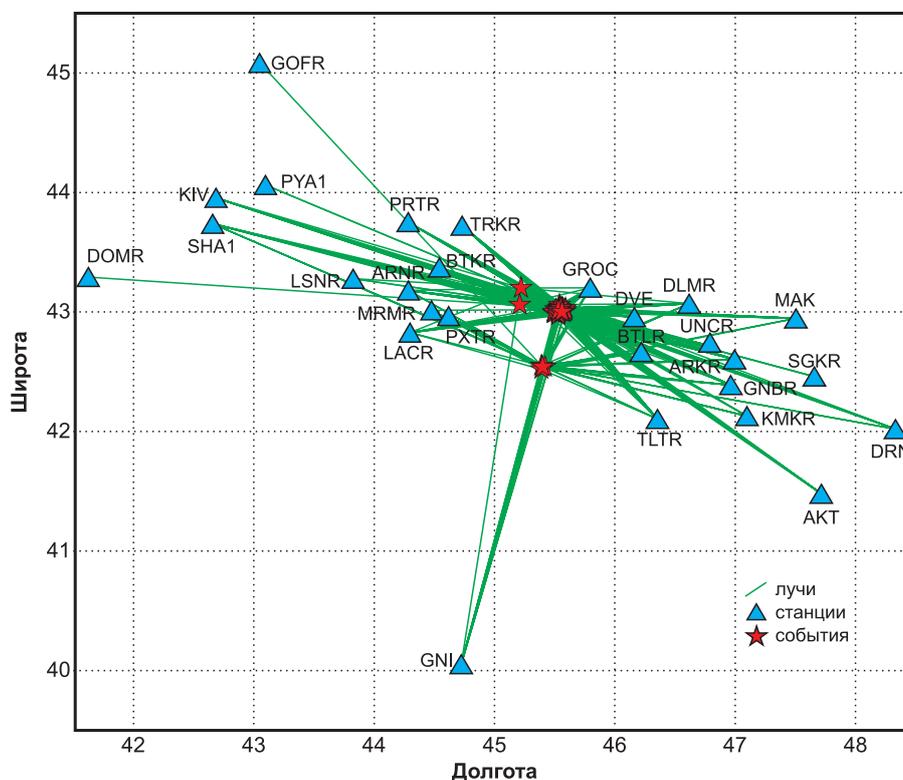


Рис. 1. Расположение эпицентров землетрясений и станций, участвовавших в исследовании

Значения максимальных амплитуд, измеренных на расстояниях от 25 до 526 км, находились в диапазоне 4.9–95000 нм, периоды T максимальных фаз попадали в интервал $T=0.08–2.0$ с, но более 90% – в интервал 0.2–0.6 с, из чего можно заключить, что максимум амплитуд на записи прибора WA приходился на объёмные поперечные S -волны. Ранее [Габсатарова, 2006] в программу WSG были заложены возможности расчёта локальной магнитуды через обобщённую калибровочную функцию для регионов РФ, и получены оценки локальной магнитуды в интервале $ML=1.8–5.1$, которые использовались при фильтрации исходных данных.

Полученные результаты

Для фильтрации установлены диапазоны допустимых значений различных параметров, попадание в которые гарантирует надёжное определение эмпирических коэффициентов и незначительное влияние ошибок измеряемых величин на результат. В частности, в расчёт принимались только землетрясения с магнитудами $-1.0 \leq ML \leq 6.0$ на гипоцентральных расстояниях $10 \leq R \leq 1000$ км, зарегистрированные минимум четырьмя станциями и имеющие измеренные амплитуды смещения грунта $1 \leq A \leq 10^6$ нм, при этом определение эмпирических коэффициентов a и b уравнения (2) считалось корректным, если они попадали в диапазоны $0.5 \leq a \leq 1.5$ и $0 \leq b \leq 0.01$. Так как имеющийся объём данных для малых расстояний не представительен, в качестве опорной точки был выбран инвариант, соответствующий классическому определению, данному Ч. Рихтером: амплитуда 1 мм на

записи прибора WA для землетрясения с магнитудой $ML=3$ должна достигаться на гипоцентральных расстоянии 100 км.

Использование опорной точки имеет важное значение, так как в общем наборе данных присутствуют измерения для землетрясений с разными магнитудами, и поэтому обобщающую аппроксимацию невозможно построить по набору данных, полученному путём простого объединения частей от разных событий. Все части должны быть предварительно приведены к одному условному уровню, который задаётся через опорную точку. В данной работе такое приведение осуществлялось посредством частных аппроксимаций вида (3) методом наименьших квадратов, по которым через координаты опорной точки можно было рассчитать величины необходимых частных смещений.

Расчёт частных параметров шкалы ML отдельно по данным каждого землетрясения показал, что для некоторых из них не удаётся получить правдоподобные коэффициенты затухания амплитуд с увеличением расстояния от гипоцентра. В основном это связано с наличием значительных ошибок в измерениях амплитуд колебаний. Одна из причин возникновения таких ошибок – это низкое отношение сигнал/шум в рабочей полосе частот на отдельных станциях. Такой же эффект возможен при наличии технических проблем в измерительных каналах. В выводе промежуточных результатов программы MagScale такие события помечаются знаком «–» в столбце «В диапазоне» (табл. 1). Из 54 событий существенные отклонения коэффициентов a и b выявлены всего для 12.

Таблица 1. Фрагмент результатов проверки соответствия исходных данных бюллетеня заданным ограничениям

Дата и время, дд.мм.гггг чч:мм:сс	ML	N	a	$b \times 1000$	c	В диапазоне	c_{100}	c_{17}
12.12.2020 21:29:49	5.1	12	1.164	1.004	–4.014	+	–2.111	–2.132
12.12.2020 21:34:08	3.2	21	1.375	0.622	–2.564	+	–2.493	–2.384
12.12.2020 21:35:28	3.3	10	1.112	1.243	–2.082	+	–2.031	–2.072
12.12.2020 21:38:07	2.0	5	1.124	4.779	–1.223	+	–2.409	–2.147
12.12.2020 21:47:18	2.0	7	0.799	0.000	–0.397	+	–1.280	–1.665
12.12.2020 21:51:15	2.3	11	0.440	3.969	–0.004	–	–0.958	–1.290
12.12.2020 23:48:11	3.0	18	1.016	2.349	–1.791	+	–1.948	–1.972
12.12.2020 23:50:20	4.2	25	0.844	1.521	–2.409	+	–1.521	–1.746

Примечание – « N » – количество станций, для которых измеряемые величины попали в диапазон допустимых значений; « a » – геометрическое расхождение; « $b \times 1000$ » – величина поглощения, увеличенная в 1000 раз; « c » – свободный член эмпирической зависимости вида (3); «В диапазоне» – флаг («+» или «–»), информирующий о попадании всех контролируемых величин в диапазон допустимых значений; « c_{100} » и « c_{17} » – скорректированные свободные члены эмпирической зависимости вида (3), рассчитанные с учётом опорных точек на расстояниях $R=100$ км и $R=17$ км соответственно.

Чтобы уменьшить влияние некачественных измерений, выбывающих из общего ряда, исходные данные, выявленные в результате предварительной проверки, были подвергнуты тщательному анализу, в результате которого принималось решение об исключении или принятии проблемных измерений в дальнейшие расчёты. В случае явного влияния помех на результат измерения амплитуд колебаний такие данные исключались из рассмотрения. Если же наблюдалось обычное отклонение надёжно измеренных амплитуд от ожидаемого уровня, расширялись диапазоны допустимых значений исходных данных в бюллетене.

После корректировки набора исходных данных в бюллетене выполнена обобщающая аппроксимация калибровочной функции. Аппроксимация реализована в двух вариантах (рис. 2). Первый учитывает только те данные бюллетеня, которые удовлетворяют всем обозначенным ограничениям, в том числе ограничениям на частные значения геометрического расхождения (a) и поглощения (b), рассчитанные для каждого землетрясения в выборке. Таким образом, по данному набору данных (всего 571 значение измеренных амплитуд и расстояний) получены следующие уравнения в форме (2) и (3) соответственно:

$$ML = \lg(A_{WA}) + 0.964 \cdot \lg(R/100) + 0.001847 \cdot (R-100) + 3 + S, \quad (4a)$$

$$ML = \lg(A) + 0.964 \cdot \lg(R) + 0.001847 \cdot R - 1.791 + S. \quad (4б)$$

Во втором варианте расчёта фильтрация по коэффициентам a и b не применялась, оставались действующими только ограничения на входные амплитуды и расстояния. Фактически во второй вариант расчёта попали все исходные данные (749 значений). Полученный результат аппроксимации незначительно отличается от первого варианта:

$$ML = \lg(A_{WA}) + 1.024 \cdot \lg(R/100) + 0.001648 \cdot (R-100) + 3 + S, \quad (5a)$$

$$ML = \lg(A) + 1.024 \cdot \lg(R) + 0.001648 \cdot R - 1.889 + S. \quad (5б)$$

Разница между оценками магнитуд, полученных с помощью выражений (4a,б) и (5a,б), не превышает 0.04 магнитудных единицы во всём диапазоне представленных расстояний ($25 < R < 526$ км), что говорит о слабой подверженности результата (5a,б) влиянию частных ошибок измерений. В обоих вариантах расчёта общая невязка шкалы (стандартное отклонение частных оценок магнитуд относительно средних величин без учёта станционных поправок) составляет 0.26.

Расчёт станционных поправок

Уравнение (4a,б) было использовано для вычисления новых значений ML и станционных поправок S . Поправка для каждой станции рассчитывалась как средняя величина отклонений частных определений магнитуд по станции ML_{Sta} относительно магнитуды ML_{Av} , рассчитанной по всем доступным станциям.

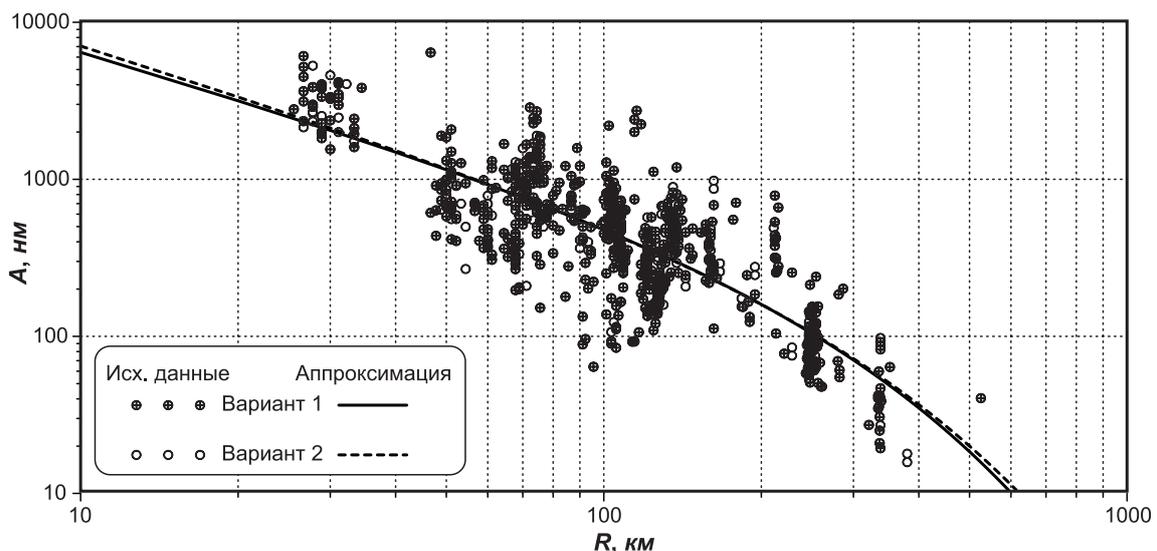


Рис. 2. Результаты аппроксимации калибровочной функции по двум вариантам исходных данных (пояснения в тексте)

В табл. 2 представлены значения S , полученные в настоящем исследовании при условии, что станция зарегистрировала не менее десяти землетрясений. Дополнительно в таблице приведены сведения о высоте станции над уровнем моря (Alt), а также диапазоны магнитуд и расстояний, в пределах которых имелись данные для расчёта поправок.

Детальная картина распределения невязок шкалы по всему диапазону расстояний представлена на рис. 3 слева. Общая гистограмма распределения невязок дана на рис. 3 справа. Из рисунка видно, что в результате ввода станционных поправок шкала магнитуд стала более сбалансированной, о чём свидетельствует снижение общей невязки магнитудных оценок с 0.26 до 0.15.

Таблица 2. Станционные поправки S к уравнению (4а,б) расчёта локальной амплитуды ML

Код станции	S	N	$Alt, м$	ML	$R, км$
AKT	0.08	21	1115	2.4–2.7	244–281
ARKR	0.23	55	760	1.8–4.7	123–159
ARNR	0.50	22	429	2.4–4.7	75–117
BTLR	0.29	51	970	1.8–4.7	64–101
BUJR	-0.26	14	460	2.5–4.7	129–143
DLMR	-0.36	26	660	2.4–4.7	83–118
DRN	-0.08	11	-21	3.2–4.9	250–287
DVE	0.19	55	-21	1.8–4.9	46–55
GNBR	-0.27	55	1210	1.8–4.9	128–162
GNI	0.14	22	1583	2.7–4.9	280–352
GROC	-0.20	64	198	1.8–4.7	25–82
HNZR	0.22	14	1675	2.5–4.7	106–141
KIV	0.13	20	1054	2.3–4.9	221–257
KMKR	-0.44	15	1898	2.1–4.7	145–165
KORR	0.00	14	618	2.5–4.9	94–126
LACR	-0.17	33	1276	1.8–4.7	85–107
LSNR	0.23	10	721	3.2–4.7	113–143
MAK	-0.27	21	42	2.5–4.9	156–188
MRMR	0.50	39	632	2.5–4.7	84–92
PRTR	0.01	13	136	2.4–3.3	131–135
PYA1	0.25	11	614	3.2–4.7	220–230
SGKR	-0.04	12	560	3.5–4.7	180–185
SHA1	0.14	25	2120	1.8–4.7	243–261
STDR	0.13	12	352	3.5–4.7	95–127
TLTR	0.17	58	1450	1.8–4.9	91–153
TRKR	-0.12	18	135	1.8–3.3	102–106
UNCR	-0.06	54	780	1.8–4.9	103–111
URKR	0.11	11	1330	3.5–4.7	189–229

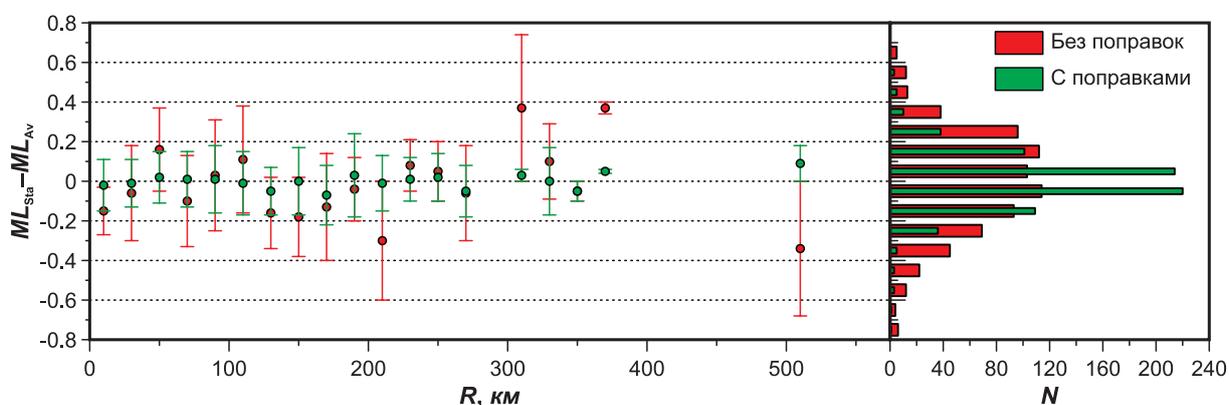


Рис. 3. Распределение невязок шкалы ML в зависимости от расстояния (слева) и общее (справа)

Исследование зависимости величины станционной поправки от высоты станции над уровнем моря не дало какой-либо чёткой связи двух параметров, однако пространственное распределение S позволяет говорить о его зональности. Особенности поля станционных поправок (рис. 4) дают основание разбить исследуемую территорию на две области: 1 – западная и северо-западная с положительными значениями; 2 – северная, северо-восточная и восточная с отрицательными значениями. Можно предположить, что это отражает разбиение территории исследования диагональными шовными зонами глубокого заложения Бенойско-Эльдаровской и Даттых-Ахловской [Несмеянов и др., 1996], видимо влияющих на характер поглощения энергии сейсмических волн.

С другой стороны, на значение поправки на ряде станций оказывают влияние грунты в приповерхностной толще. Так, например, находящиеся по соседству (удаление не более 30 км) станции «Грозный» (GROC) и «Ведено» (DVE) отличаются свойствами грунтов. Под станцией «Грозный» имеется мощный слой осадочных пород, а в «Ведено» приборы установлены на скальном грунте, из-за чего станции имеют разный знак поправки, подобно случаю, описанному в [Bormann, 2012].

Необходимо отметить, не все рассчитанные поправки однозначно несут в себе информацию о грунтах или иных локальных особенностях места расположения станций. Учитывая, что многие из них были получены в ограниченном диапазоне расстояний и азимутов на источники, представленные значения вполне могут потерять акту-

альность за рамками исходного набора данных. Особенность исходного материала требует внимательного подхода при практическом применении рассчитанных величин поправок S на станциях.

Заключение

В результате обобщения экспериментальных данных по 64 землетрясениям из афтершоковой последовательности 2020–2022 гг. в Чеченской Республике получена уточнённая шкала локальных магнитуд для землетрясений на территории Терско-Каспийского прогиба в восточной зоне Северного Кавказа. Новая шкала имеет широкие диапазоны применимости по магнитудам и гипоцентральному расстояниям и обеспечивает приемлемую ошибку невязки станционных оценок и средних величин ML . Установлены поправки магнитуд для 28 станций региона, позволяющие снизить стандартное отклонение при расчёте ML до 0.15. Шкала рекомендуется к дальнейшему применению для оценки локальной магнитуды землетрясений в названной зоне, а методика её построения, заложенная в программе MagScale, может быть легко реализована в других регионах для построения своей шкалы ML .

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» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

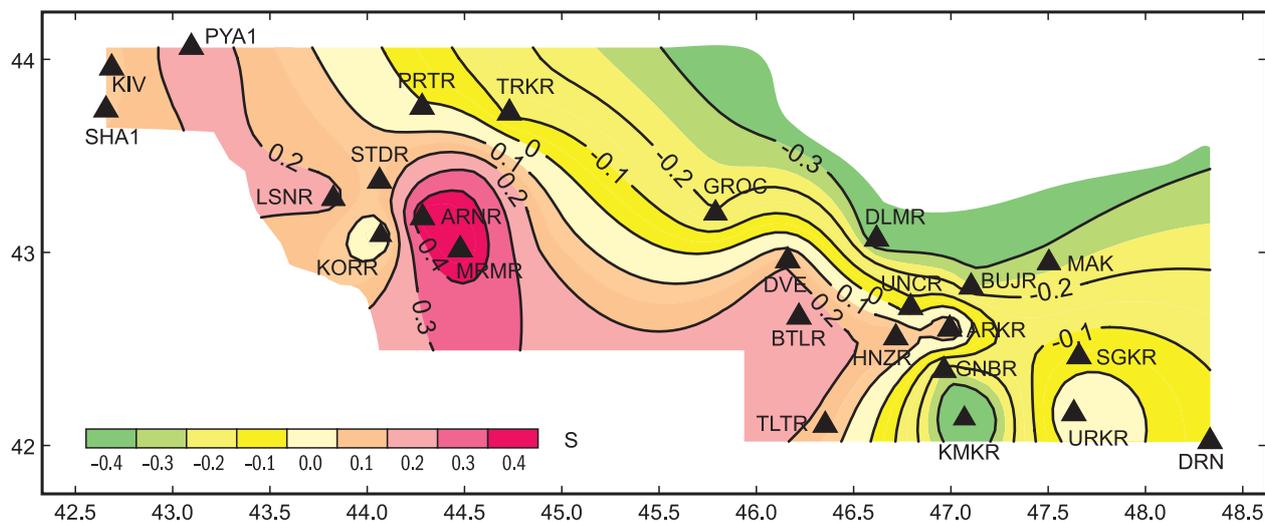


Рис. 4. Площадное распределение станционных поправок S

Литература

- 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. – EDN: IJOVUE
- Алёшина Е.И., Курткин С.В., Карпенко Л.И. Сейсмичность Северо-Востока России в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – С. 164–172. DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.15. – EDN: AORKRT
- Габсатарова И.П. Внедрение в рутинную практику подразделений Геофизической службы РАН процедуры вычисления локальной магнитуды // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Международной сейсмологической школы. – Обнинск: ГС РАН, 2006. – С. 49–53. – EDN: TRPJQZ
- Габсатарова И.П., Ассиновская Б.А., Баранов С.В., Карпинский В.В., Конечная Я.В., Мунирова Л.М., Надёжка Л.И., Никулин В.Г., Носкова Н.Н., Петров С.И., Пивоваров С.П., Санина И.А. Сейсмичность российской части Восточно-Европейской платформы и ближайшего окружения в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – С. 182–191. DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.17. – EDN: TDOJDR
- 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 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – С. 69–83. DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.06. – EDN: ORCRZJ
- Годзиковская А.А. База данных «Каталог землетрясений Кавказа с $M \geq 4.0$ ($K \geq 11.0$) с древнейших времён по 2000 г.». – URL: <http://zeus.wdcb.ru/wdcb/sep/caucasus/catrudat.html> (дата обращения 20.01.2023).
- Дягилев Р.А. Расчёт параметров локальной шкалы магнитуд, MagScale / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022666504 от 05.09.2022. – EDN: KDVZVH
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Шевкунова Е.В., Подкорытова В.Г. Сейсмичность Алтае-Саянского региона в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – С. 122–128. DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.11. – EDN: GGVHUYE
- Кондорская Н.В., Аранович З.И., Соловьёва О.Н., Шебалин Н.В. (отв. сост.). Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях Единой системы сейсмических наблюдений СССР. – М.: Наука, 1981. – 272 с.
- Маловичко А.А., Дягилев Р.А., Верхоланцев Ф.Г., Голубева И.В., Злобина Т.В. Сейсмичность Урала и Западной Сибири в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – С. 200–209. DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.19. – EDN: RHXXSG
- Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Филиппова А.И., Радзиминович Я.Б., Кобелева Е.А. Сейсмичность Прибайкалья и Забайкалья в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – С. 129–138. DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.12. – EDN: JCDDFK
- Морозов А.Н., Аветисов Г.П., Антоновская Г.Н., Асминг В.Э., Баранов С.В., Ваганова Н.В., Виноградов Ю.А., Жолондз А.С., Конечная Я.В., Фёдоров А.В., Фёдоров И.С. Сейсмичность Арктики в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – С. 210–216. DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.20. – EDN: XBVBXS
- Несмеянов С.А., Лутиков А.И., Шукин Ю.К., Донцова Г.Ю. Сейсмогенерирующие структуры // Комплексная оценка сейсмической опасности территории г. Грозного (Уточнение исходной сейсмичности. Сейсмическое микрорайонирование. Сейсмический риск) / Науч. ред. С.И. Полтавцев. – М.: Минстрой России, 1996. – С. 38–47.
- Раутиан Т.Г. Об определении энергии землетрясений на расстоянии до 3000 км // Экспериментальная сейсмика (Труды ИФЗ АН СССР; № 32 (199)). – М.: Наука, 1964. – С. 88–93.
- Раутиан Т.Г. Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности (Труды ИФЗ АН СССР; № 9 (176)). – М.: ИФЗ АН СССР, 1960. – С. 75–114.
- Соловьёв С.Л., Соловьёва О.Н. Соотношение между энергетическим классом и магнитудой Курильских землетрясений // Известия АН СССР, сер. «Физика Земли». – 1967. – № 2. – С. 13–22.
- Фокина Т.А., Сафонов Д.А., Костылев Д.В., Михайлов В.И. Сейсмичность Приамурья и Приморья, Сахалина и Курило-Охотского региона в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – С. 139–152. DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.13. – EDN: OHBBDR
- Чебров Д.В., Салтыков В.А., Матвеев Е.А., Дроздина С.Я., Ромашева Е.И., Митюшкина С.В., Абубакиров И.Р., Павлов В.М. Сейсмичность Камчатки и Командорских островов в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – С. 153–163. DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.14. – EDN: FZNZSB
- Шибасев С.В., Козьмин Б.М., Макаров А.А. Сейсмичность Якутии в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – С. 173–181. DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.16. – EDN: TMGQEE
- Bormann P. Magnitude calibration formulas and tables, comments on their use and complementary data. Data-sheet DS 3.1 // New Manual of Seismological Observatory

- Practice (NMSOP). V. 1, Ch. 3 / Ed. P. Bormann. – Potsdam: GeoForschungsZentrum, 2012. – P. 1–19. DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_DS_3.1
- Bormann P., Dewey J.W.* The new IASPEI standards for determining magnitudes from digital data and their relation to classical magnitudes. Information Sheet IS 3.3 // New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP). V. 1, Ch. 3 / Ed. P. Bormann. – Potsdam: GeoForschungsZentrum, 2012. – P. 16–49. DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_IS_3.3
- Bormann P., Wendt S., DiGiacomo D.* Seismic sources and source parameters // New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP2) / Ed. P. Bormann. – Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum, 2013. – P. 1–259. DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch3
- Di Giacomo D., Harris J., Storchak D.A.* Complementing regional moment magnitudes to GCMT: A perspective from the rebuilt International Seismological Centre Bulletin // Earth System Science Data. – 2021. – V. 13, N 5. – P. 1957–1985. DOI: 10.5194/essd-13-1957-2021
- Di Giacomo D., Storchak D.A.* A scheme to set preferred magnitudes in the ISC Bulletin // Journal of Seismology. – 2016. – V. 20, N 2. – P. 555–567. DOI: 10.1007/s10950-015-9543-7
- Grünthal G., Wahlström R.* The European-Mediterranean Earthquake Catalogue (EMEC) for the last millennium // Journal of Seismology. – 2012. – V. 16, Is. 3. – P. 535–570. DOI: 10.1007/s10950-012-9302-y
- Herak M.* Conversion between the local magnitude (ML) and the moment magnitude (Mw) for earthquakes in the Croatian Earthquake Catalogue // Geofizika. – 2020. – V. 37, N 2. – P. 197–211. DOI: 0.15233/gfz.2020.37.10
- Hutton L.K., Boore D.M.* The ML scale in Southern California // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1987. – V. 77, N 6. – P. 2074–2094. DOI: 10.1785/BSSA0770062074
- IASPEI Seismic Format (ISF) Version 2.0.* – URL: <http://www.isc.ac.uk/standards/isf/download/isf2.pdf> (дата обращения 12.09.2022).
- International Seismological Centre (ISC).* On-line Bulletin [Site]. – United Kingdom, Thatcham: Internat. Seismol. Centre, 2022. DOI: 10.31905/D808B830
- Kanamori H.* Magnitude scale and quantification of earthquakes // Tectonophysics. – 1983. – V. 93, N 3-4. – P. 185–199.
- Richter C.F.* An instrumental earthquake magnitude scale // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1935. – V. 25, N 1. – P. 1–32. DOI: 10.1785/BSSA0250010001
- Richter C.F.* Elementary seismology. – San Francisco and London: W.H. Freeman and Company, 1958. – 768 p.

Сведения об авторах

Дягилев Руслан Андреевич, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН), г. Обнинск, Россия. ORCID: 0000-0001-5974-5611. E-mail: dra@gsras.ru

Габсатарова Ирина Петровна, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия. ORCID: 0000-0001-8998-340X. E-mail: ira@gsras.ru

Селиванова Елена Аркадьевна, вед. инженер ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия. E-mail: seliv@gsras.ru

The scale of local magnitudes ML for earthquakes in the Terek–Caspian trough

© 2023 R.A. Dyagilev, I.P. Gabsatarova, E.A. Selivanova

GS RAS, Obninsk, Russia

Received February 28, 2023

Abstract A scale (calibration function) to determine the local magnitude ML of earthquakes with epicenters in the central part of the Terek–Caspian trough has been developed. The scale is based on a formula that takes into account wave attenuation and scattering with distance for the maximum amplitudes of the simulated recordings of the short-period Wood–Anderson instrument. To calculate it, a sample of 64 earthquakes that occurred in 2020–2022, during the period of activation in the Black Mountains in the Chechen Republic, was compiled. Earthquakes were recorded by 58 stations in the distance range of 25–526 km, located around the epicenters in various geological and tectonic area. The *Magscale* program developed at the GS RAS based on methodological recommendations set out in the New Manual for Observatory Practice (NMSOP) was used for the calculation. The values of the coefficients of the equation, which characterize the attenuation in the crust and upper mantle, are obtained. The station corrections are calculated. Their use made it possible to reduce the scale deviations from ± 0.26 to ± 0.15 . The areal distribution of station corrections probably reflects the geological features of the area.

Keywords Local magnitude, calibration function, earthquakes, Terek–Caspian trough.

For citation Dyagilev, R.A., Gabsatarova, I.P., & Selivanova, E.A. (2023). [The scale of local magnitudes ML for earthquakes in the Terek–Caspian trough]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 5(2), 19–31. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.2.02>. EDN: FEJGPK

References

- Akimov, A.P., & Krasilov, S.A. (2020). [WSG software package “Seismic data processing system”]. Certificate of state registration of a computer program No. 2020664678. (In Russ.). EDN: IJOVUE
- Alyeshina, E.I., Kurtkin, S.V., & Karpenko, L.I. (2021). [Seismicity of the North-East of Russia in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 164–172. (In Russ.). DOI: [10.35540/1818-6254.2021.24.15](https://doi.org/10.35540/1818-6254.2021.24.15). EDN: AORKRT
- Bormann, P. (2012). Magnitude calibration formulas and tables, comments on their use and complementary data. Datasheet DS 3.1. In Bormann, P. (Ed.), *New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP)*, V. 1, Ch. 3 (pp. 1–19). Potsdam, Germany: GeoForschungsZentrum Publ. DOI: [10.2312/GFZ.NMSOP-2_DS_3.1](https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_DS_3.1)
- Bormann, P., & Dewey, J.W. (2012). The new IASPEI standards for determining magnitudes from digital data and their relation to classical magnitudes. Information Sheet IS 3.3. In Bormann, P. (Ed.), *New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP)* (pp. 16–49). Potsdam, Germany: GeoForschungsZentrum. DOI: [10.2312/GFZ.NMSOP-2_IS_3.3](https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_IS_3.3)
- Bormann, P., Wendt, S., & Di Giacomo, D. (2013). Seismic sources and source parameters. In Bormann, P. (Ed.), *New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP2)* (pp. 1–259). Potsdam, Germany: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. DOI: [10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch3](https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch3)
- Chebrev, D.V., Saltykov, V.A., Matveenko, E.A., Droznina, S.Ya., Romasheva, E.I., Mityushkina, S.V., Abubakirov, I.R., & Pavlov, V.M. (2021). [Seismicity of Kamchatka and Commander Islands in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 153–163. (In Russ.). DOI: [10.35540/1818-6254.2021.24.14](https://doi.org/10.35540/1818-6254.2021.24.14). EDN: FZNZSB
- Di Giacomo, D., & Storchak, D.A. (2016). A scheme to set preferred magnitudes in the ISC Bulletin. *Journal of Seismology*, 20(2), 555–567. DOI: [10.1007/s10950-015-9543-7](https://doi.org/10.1007/s10950-015-9543-7)
- Di Giacomo, D., Harris, J., & Storchak, D.A. (2021). Complementing regional moment magnitudes to GCMT: A perspective from the rebuilt International Seismological Centre Bulletin. *Earth System Science Data*, 13(5), 1957–1985. DOI: [10.5194/essd-13-1957-2021](https://doi.org/10.5194/essd-13-1957-2021)
- Dyagilev, R.A. (2022). [Calculation of the parameters of the local magnitude scale, MagScale]. Certificate of state registration of the computer program No. 2022666504. (In Russ.). EDN: KDVZVH

- Emanov, A.F., Emanov, A.A., Fateev, A.V., Shevkunova, E.V., & Podkorytova, V.G. (2021). [Seismicity of the Altai and Sayan region in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 122-128. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.11. EDN: GGVHYE
- Fokina, T.A., Safonov, D.A., Kostylev, D.V., & Mikhailov, V.I. (2021). [Seismicity of the Amur and Primorye, Sakhalin and the Kuril-Okhotsk region in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 139-152. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.13. EDN: OHBBDR
- Gabsatarova, I.P. (2006). [Introduction into the routine practice of subdivisions of the GS RAS of the procedure for calculating the local magnitude]. In *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh. Materialy Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Materials from International seismological school] (pp. 50-54). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: TPPJQZ
- Gabsatarova, I.P., Assinovskaya, B.A., Baranov, S.V., Karpinsky, V.V., Konechnaya, Ya.V., Munirova, L.M., Nadezhka, L.I., Nikulin, V.G., Noskova, N.N., Petrov, S.I., Pivovarov, S.P., & Sanina, I.A. (2021). [Seismicity of the Russian part of East European platform and adjacent territories in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 182-191. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.17. EDN: TDOJDR
- Gabsatarova, I.P., Korolevskii, L.N., Ivanova, L.E., Sayapina, A.A., Bagaeva, S.S., Adilov, Z.M., & Asmanov, O.A. (2021). [Seismicity of the Northern Caucasus in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 69-83. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.06. EDN: ORCRZJ
- Godzikovskaia, A.A. (2023). *Baza dannykh "Katalog zemletriasenii Kavkaza s $M \geq 4.0$ ($K \geq 11.0$) s drevneishikh vremen po 2000 g."* [Database "Catalogue of earthquakes in the Caucasus with $M \geq 4.0$ ($K \geq 11.0$) from ancient times to 2000"]. Retrieved from <http://zeus.wdcb.ru/wdcb/sep/caucasus/catrudat.html> (In Russ.).
- Grünthal, G., & Wahlström, R. (2012). The European Mediterranean Earthquake Catalogue (EMEC) for the last millennium. *Journal of Seismology*, 16(3), 535-570. DOI: 10.1007/s10950-012-9302-y
- Herak, M. (2020). Conversion between the local magnitude (ML) and the moment magnitude (M_w) for earthquakes in the Croatian Earthquake Catalogue. *Geofizika*, 37(2), 197-211.
- Hutton, L.K., & Boore, D.M. (1987). The ML scale in Southern California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77(6), 2074-2094. DOI: 10.1785/BSSA0770062074
- IASPEI Seismic Format (ISF) Version 2.0. (2022). Available at: <http://www.isc.ac.uk/standards/isf/download/isf2.pdf>
- International Seismological Centre. (2023). On-line Bulletin. DOI: 10.31905/D808B830
- Kanamori, H. (1983). Magnitude scale and quantification of earthquakes. *Tectonophysics*, 93(3-4), 185-199.
- Kondorskaya, N.V., Aranovich, Z.I., Solov'yeva, O.N., & Shebalin, N.V. (Eds.). (1981). *Instruktsiia o poriadke proizvodstva i obrabotki nabliudenii na seismicheskikh stantsiiakh Edinoi sistemy seismicheskikh nabliudenii SSSR* [Instructions on the production and processing of observations procedure at seismic stations of a Unified system of seismic observations of the USSR]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 272 p. (In Russ.).
- Malovichko, A.A., Dyagilev, R.A., Verkholtantsev, F.G., Golubeva, I.V., & Zlobina, T.V. (2021). [Seismicity of the Urals and Western Siberia in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 200-209. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.19
- Melnikova, V.I., Gileva, N.A., Filippova, A.I., Radziminovich, Ya.B., & Kobeleva, E.A. (2021). [Seismicity of Baikal and Transbaikalia in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 129-138. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.12. EDN: JCDDFK
- Morozov, A.N., Avetisov, G.P., Antonovskaya, G.N., Asming, V.E., Baranov, S.V., Vaganova, N.V., Vinogradov, Yu.A., Jolondz, A.S., Konechnaya, Ya.V., Fedorov, A.V., & Fedorov, I.S. (2021). [Seismicity of the Arctic in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 210-216. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.20. EDN: XBTXBS
- Nesmeyanov, S.A., Lutikov, A.I., Shchukin, Yu.K., & Dontsova, G.Yu. (1996). [Seismogenic structures]. In *Kompleksnaia otsenka seismicheskoi opasnosti territorii g. Groznogo (Utochnenie iskhodnoi seismichnosti. Seismicheskoe mikroraiionirovanie. Seismicheskii risk)*. Nauch. red. S.I. Poltavtsev [Comprehensive assessment of the seismic hazard of the territory of Grozny (Updating the initial seismicity. Seismic microzoning. Seismic risk). Sci. ed. S.I. Poltavtsev] (pp. 38-47). Moscow, Russia: Ministry of Construction of Russia Publ. (In Russ.).
- Rautian, T.G. (1960). [Energy of the Earthquakes]. In *Metody detal'nogo izucheniya seismichnosti. Trudy IFZ AN SSSR*, 9(176). [Methods of Detailed Study of the Seismicity. Proceedings of the IPE AS USSR № 9(176)] (pp. 75-114). Moscow, Russia: IPE AS USSR Publ. (In Russ.).
- Rautian, T.G. (1964). [On the determination of the energy of earthquakes at a distance of 3000 km]. In *Ekspperimental'nai seismika. Trudy IFZ AN SSSR*

N 32(199) [Experimental seismic. Proceedings of the IPE AS USSR N 32(199)] (pp. 88-93). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).

Richter, C.F. (1935). An instrumental earthquake magnitude scale. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 25(1), 1-32. DOI: 10.1785/BSSA0250010001

Richter, C.F. (1958). Elementary seismology. San Francisco and London: W.H. Freeman and Company, 768 p.

Shibaev, S.V., Koz'min, B.M., & Makarov, A.A. (2021). [Seismicity of Yakutia in 2015]. *Zemletriaseniia*

Severnoi Evrazii [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 173-181. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.16. EDN: TMGQEE

Solov'ev, S.L., & Solov'eva, O.N. (1967). [The relationship between the energy class and the magnitude of the Kuril earthquakes]. *Izvestiia AN SSSR, ser. "Fizika Zemli"* [Izvestiya of the Academy of Sciences of the USSR. Physics of the Solid Earth], 2, 13-22. (In Russ.).

Information about authors

Dyagilev Ruslan Andreevich, PhD, Leading Researcher of the Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences (GS RAS), Obninsk, Russia. ORCID: 0000-0001-5974-5611. E-mail: dra@gsras.ru

Gabsatarova Irina Petrovna, PhD, Leading Researcher, Head Laboratory of the GS RAS, Obninsk, Russia. ORCID: 0000-0001-8998-340X. E-mail: ira@gsras.ru

Selivanova Elena Arkadievna, Leading Engineer of the GS RAS, Obninsk, Russia. E-mail: seliv@gsras.ru