

УДК 550.311

Шкала M_L для западной части Евразийской Арктики

© 2020 г. А.Н. Морозов^{1,2}, Н.В. Ваганова², В.Э. Асминг³, З.А. Евтюгина³

¹ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия; ²ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН, г. Архангельск, Россия;

³КоФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Апатиты, Россия

Аннотация. Проведено уточнение шкалы локальной магнитуды M_L для западной части Евразийской Арктики на основе данных сейсмических станций на архипелагах Шпицберген, Земля Франца-Иосифа и Северная Земля: $-\lg A_0(R) = 1.5 \cdot \lg(R/100) + 1.0 \cdot 10^{-4}(R-100) + 3.0$. Уточнение было проведено на основе выборки из 167 землетрясений и 612 значений амплитуд на пяти сейсмических станциях. Выборка охватывала землетрясения, произошедшие в основных сейсмоактивных зонах Евразийской Арктики за период с января 2016 г. по апрель 2019 года. Уточнённая шкала может быть применима в широких диапазонах эпицентральных расстояний и магнитуд. Шкала M_L с соответствующими станционными поправками будет введена в практику рутинной обработки сейсмологических данных для районов западной части Евразийской Арктики.

Ключевые слова: Шкала M_L , Евразийская Арктика, станционные поправки.

Для цитирования: Морозов А.Н., Ваганова Н.В., Асминг В.Э., Евтюгина З.А. Шкала M_L для западной части Евразийской Арктики // Российский сейсмологический журнал. – 2020. – Т. 2, № 4. – С. 63–68. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.4.06>

Введение

В течение всего инструментального периода обширные территории Евразийской Арктики были крайне неравномерно охвачены стационарными сейсмическими станциями по причине суровых климатических и неблагоприятных географических условий. Однако в 2010-х гг. произошло заметное увеличение количества сейсмических станций. В 2011 г. усилиями сотрудников ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН возобновились инструментальные наблюдения на побережье Карского моря и архипелаге Земля Франца-Иосифа, а в 2016 г. была установлена новая сейсмическая станция на архипелаге Северная Земля. Сотрудниками Кольского филиала (КоФ) ФИЦ ЕГС РАН в 2015 г. была восстановлена сейсмическая станция «Пирамида», а ранее в 2001 г. был установлен сейсмоакустический комплекс на архипелаге Шпицберген (BRBB). Также в 2009 и 2015 гг. были установлены новые станции КоФ ФИЦ ЕГС РАН на севере Кольского полуострова (PRYB, TER) и в 2017 г. – станции ЦО ФИЦ ЕГС РАН на полуострове Ямал в Западной Сибири (BVNN, SBTT, HRSV). Якутским филиалом ФИЦ ЕГС РАН, благодаря сотрудничеству с Геофизическим институтом Университета Аляски и Университетом шта-

та Мичиган (США), удалось модернизировать существующие и установить новые станции на севере Якутии. Параллельно в эти годы на западе Евразийской Арктики появлялись новые стационарные сейсмические станции у Норвежской национальной сейсмической сети и агентства NORSAR. Польской академией наук на архипелаге Шпицберген в 2010 г. была установлена сейсмическая станция HSPB.

Несмотря на то, что в настоящее время количество стационарных сейсмических станций в Евразийской Арктике является наибольшим за весь инструментальный период наблюдений, условия для достоверной локации эпицентров землетрясений, особенно низкомагнитудных, остаются всё ещё неблагоприятными по причине неравномерного распределения сейсмических станций и их удалённости друг от друга. Однако новые сейсмические станции на архипелагах Земля Франца-Иосифа и Северная Земля позволили уменьшить значения минимальной и представительной магнитуд для центральной части Евразийской Арктики и начать совместно с сейсмическими станциями на архипелаге Шпицберген регистрировать низкомагнитудные землетрясения и анализировать распределение их эпицентров в пространстве и во времени [Morozov *et al.*, 2016; Rogozhin *et al.*, 2016; Antonovskaya *et al.*,

2020]. При этом актуальным встал вопрос достоверности оценок значений магнитуды ML для землетрясений в Евразийской Арктике.

В ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН и Секторе сейсмического мониторинга севера Русской плиты ФИЦ ЕГС РАН при оценке магнитуды ML используется реализованный в программе WSG [Красилов и др., 2006] способ расчёта, основанный на осреднённой по Северной Евразии калибровочной функции [Габсатарова, 2006]. Некоторое неудобство расчёта магнитуды ML в программе WSG связано с ограничением эпицентрального расстояния 800 км, что в условиях Евразийской Арктики часто приводило к невозможности оценить для землетрясения магнитуду. После установки и нескольких лет функционирования стационарных сейсмических станций на архипелагах Земля Франца-Иосифа и Северная Земля и, используя данные сейсмических станций на архипелаге Шпицберген, появилась возможность выполнить калибровку шкалы локальной магнитуды ML для Евразийской Арктики, которая и описывается в этой статье.

Характеристика методики расчёта и исходных данных

Локальная магнитуда ML была первоначально определена Ч.Ф. Рихтером [Richter, 1935] как логарифм максимума амплитуды, измеренной на записи сейсмографа Вуда-Андерсона ($T_0=0.8$ с, увеличение $G=2800$, постоянная затухания $h=0.8$), расположенного на расстоянии 100 км от эпицентра. Рихтер построил калибровочную кривую для перехода от амплитуд, наблюдаемых на произвольном эпицентрального расстоянии, к амплитудам, ожидаемым на расстоянии 100 км. Магнитуда ML задаётся в виде [Richter, 1935; 1958]:

$$ML = \lg A - \lg A_0(R) + S, \quad (1)$$

где A – максимальная амплитуда показаний сейсмографа Вуда-Андерсона в миллиметрах для рассматриваемого события, $\lg A_0(R)$ – калибровочная кривая, A_0 – амплитуда для землетрясения с $ML=0$ на расстоянии R (в км) от гипоцентра рассматриваемого события до станции, S – станционная поправка.

Согласно [Bakun, Joyner, 1984; Hutton, Boore, 1987], $\lg A_0(R)$ можно представить в виде:

$$\lg A_0(R) = n \lg \frac{R}{R_{\text{ref}}} + k(R - R_{\text{ref}}) + M_{\text{ref}}, \quad (2)$$

где коэффициент n характеризует затухание при геометрическом расхождении (R^{-n}), а k характеризует неупругое поглощение (e^{-kR}).

Для шкалы [Richter, 1935; 1958] амплитуда смещения в поперечной волне 1 мм (сейсмограф Вуда-Андерсона) на гипоцентрального расстоянии $R_{\text{ref}}=100$ км соответствует $ML_{\text{ref}}=3$.

Таким образом, $-\lg A_0(R)$ можно представить в виде:

$$\lg A_0(R) = n \lg \frac{R}{100} + k(R - 100) + 3. \quad (3)$$

Коэффициенты n и k , характеризующие калибровочную функцию, оценивались из условий:

$$\sum_{ij} [ML^i - \lg A^{ij} + \lg A_0^{ij} - S^j] \rightarrow \min, \quad (4)$$

$$\sum_j S^j = 0, \quad (5)$$

где i – индексы событий, j – индексы станций, S^j – станционные поправки, A – амплитуды сейсмографа Вуда-Андерсона (в мм).

Для калибровки шкалы локальной магнитуды использовались результаты сейсмологических наблюдений на станциях, расположенных на архипелагах Земля Франца-Иосифа, Северная Земля и Шпицберген. В частности, это станции OMEGA и SVZ (сеть АН), станция KBS (сеть GE), HSPB, (сеть PL), SPA0 (сейсмическая группа SPITS, сеть NORSAR) (табл. 1).

Была подготовлена выборка из 167 землетрясений и 612 значений амплитуд на пяти сейсмических станциях. Выборка охватывала землетрясения, произошедшие в основных сейсмоактивных зонах Евразийской Арктики за период с января 2016 г. по апрель 2019 г. (рис. 1, табл. 2).

Для каждой станции имелась амплитудно-частотная характеристика прибора в комплексном виде (в полюсах и нулях – формат SAC). Это дало возможность записи сейсмических станций симулировать в запись сейсмографа Вуда-Андерсона. Для оценки значений максимальной амплитуды волны S на горизонтальном канале использовались записи с хорошим соотношением сигнал/шум (отношение не менее 3) и только тех землетрясений, которые были зарегистрированы не менее чем тремя станциями. Распределение количества замеров значений амплитуд в зависимости от эпицентрального расстояния и магнитуд землетрясений представлено на рис. 2 и 3 соответственно. Основное количество замеров амплитуд произведено для землетрясений с магнитудами ML от 3.0 до 5.0 в диапазоне эпицентральных расстояний от 50 до 1400 км.

Таблица 1. Сведения о сейсмических станциях

№	Сейсмическая станция		Дата открытия	Координаты и высота над уровнем моря			Тип оборудования
	название станции (код сети)	международный код		φ , °N	λ , °E	h , м	
1	Омега (АН)	OMEGA	25.08.2015	80.780	47.732	24	CMG-3T-Polar+ CMG-DM24
2	Северная Земля (АН)	SVZ	21.11.2016	79.276	101.657	21	CMG-6TD
3	Kingsbay (GE)	KBS	1967	78.926	11.942	74	STS-1
4	Hornsund (broadband) (PL)	HSPB	22.09.2007	77.002	15.533	10	STS-2
5	Spitsbergen Array (NO)	SPA0	06.11.1992	78.178	16.370	323	CMG-3T

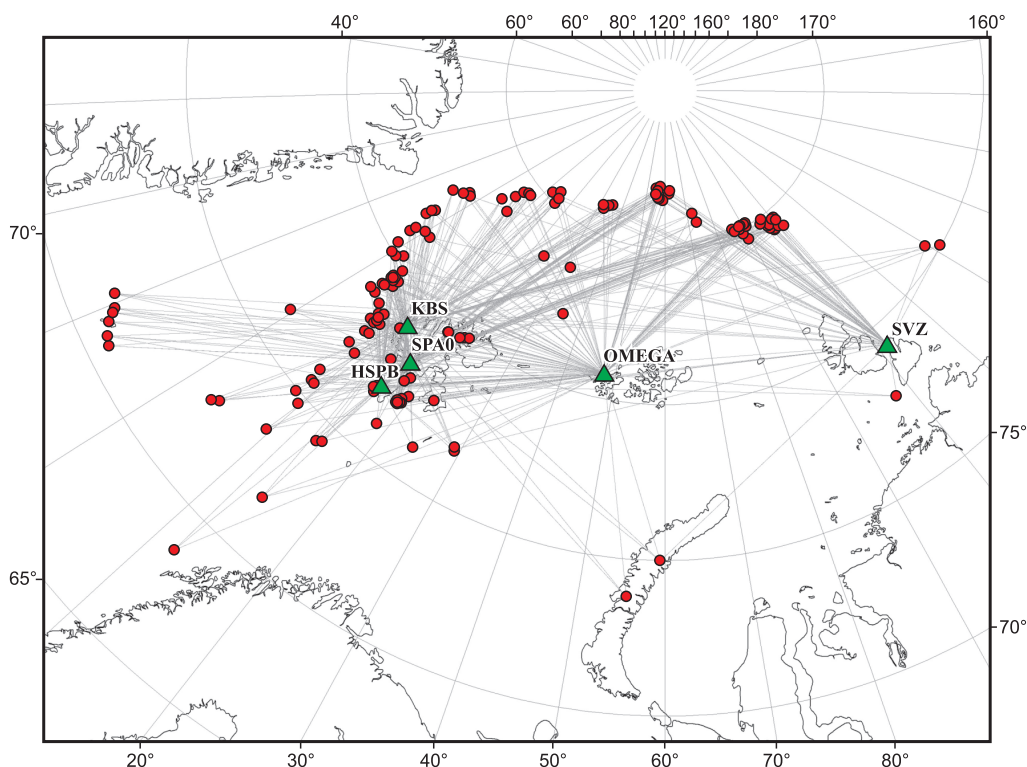


Рис. 1. Сейсмические станции, эпицентры землетрясений и лучи между очагами и станциями



Рис. 2. Распределение количества замеров значений амплитуд в зависимости от эпицентрального расстояния

Таблица 2. Параметры выборки для калибровки шкалы *ML*

Параметр	Значение
Количество землетрясений:	167
Период выборки:	с января 2016 г. по апрель 2019 г.
Количество станций:	5
Количество измерений амплитуд по станциям:	SPA0 163
	KBS 154
	HSPB 96
	OMEGA 136
	SVZ 63
Диапазон эпицентральных расстояний, км	SPA0 56–1918
	KBS 28–1852
	HSPB 11–1828
	OMEGA 394–1753
Диапазон значений магнитуд	SVZ 185–2115
	2.5–6.5

Обсуждение результатов и выводы

В результате аппроксимации выявлено, что наилучшая сходимость достигается при значениях $n=1.5$ и $k=1.0 \cdot 10^{-4}$. Вычисленные значения коэффициентов n и k и станционные поправки представлены в табл. 3.

Сравнение со шкалами *ML*, полученными для других регионов [Hutton, Boore, 1987; Alsaker et al., 1991; Дягилев, 2015], показывает, что все они расходятся в силу различий региональных особенностей распространения и затухания сейсмических волн (рис. 4). Сравнивая с калибровочной кривой, используемой нами ранее в WSG [Габсатарова, 2006], можно увидеть, что разница между кривыми становится заметней в диапазоне расстояний от 200 до 600 км (рис. 4).

Распределение невязок магнитуд по гипоцентральному расстояниям представлено на рис. 5.

Распределение построено с учётом поправок магнитуд, вычисленных индивидуально для каждой станции (табл. 3). В правой части рис. 5 представлена диаграмма распределения числа невязок. Из рис. 5 следует, что большинство значений невязок распределено в диапазоне от -0.4 до 0.4 .

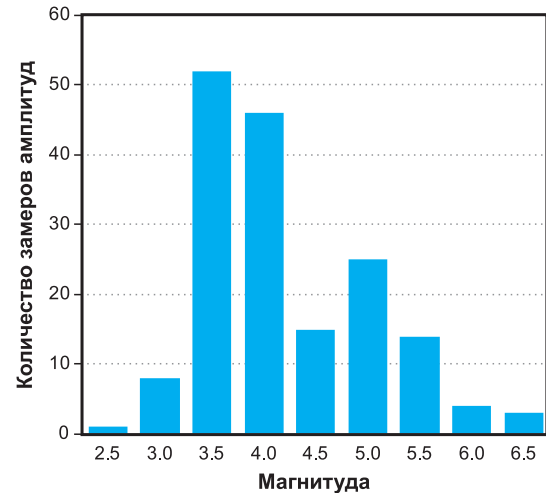
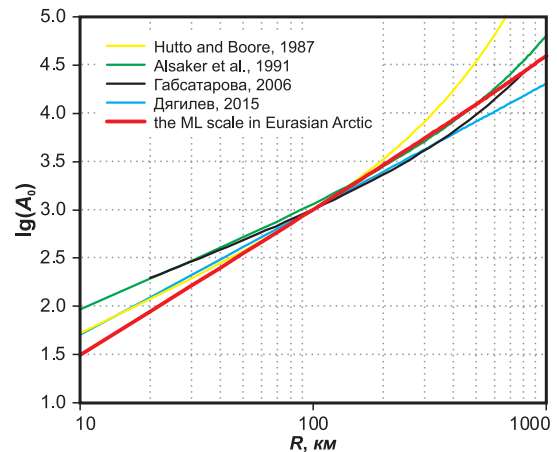
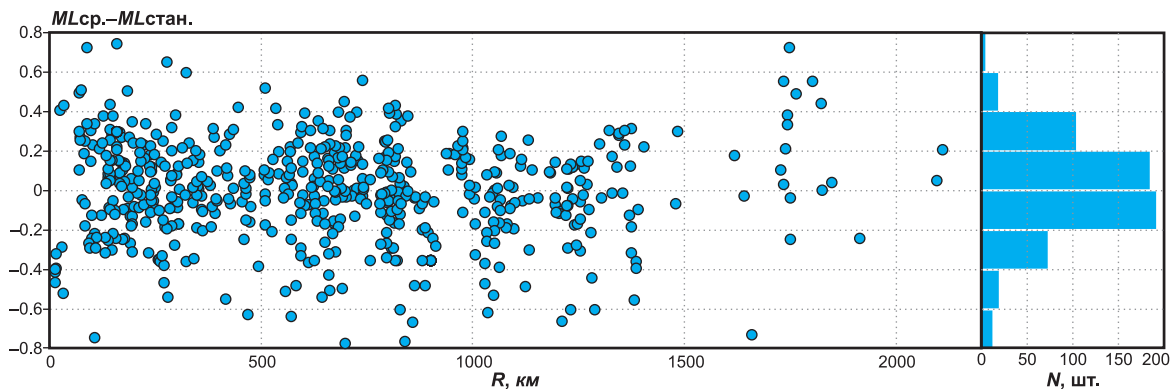
**Рис. 3.** Распределение количества замеров значений амплитуд в зависимости от магнитуды**Рис. 4.** Сравнение шкал *ML* для разных регионов мира**Рис. 5.** Распределение невязок магнитуд по гипоцентральному расстояниям

Таблица 3. Значения коэффициентов n , k и станционных поправок

n	k	σ	Станционные поправки				
			SPA0	KBS	HSPB	OMEGA	SVZ
1.5	$1.0 \cdot 10^{-4}$	0.30	-0.09	-0.09	0.15	-0.07	0.21

Таким образом, была получена уточнённая шкала локальной магнитуды ML для территории западной части Евразийской Арктики на основе данных сейсмических станций, функционирующих на архипелагах Шпицберген, Земля Франца-Иосифа и Северная Земля:

$$-\lg A_0(R) = 1.5 \cdot \lg \frac{R}{100} + 1.0 \cdot 10^{-4}(R - 100) + 3.0. \quad (6)$$

Уточнённая шкала может быть применима в широких диапазонах эпицентральных расстояний и магнитуд. Шкала ML с соответствующими станционными поправками будет введена в практику повседневной обработки сейсмологических данных для районов западной части Евразийской Арктики.

Литература

- 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.
- Дягилев Р.А. Шкала ML для Среднего Урала // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Десятой Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – С. 118–122.
- Красилов С.А., Коломиец М.В., Акимов А.П. Организация процесса обработки цифровых сейсмических данных с использованием программного комплекса WSG // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Международной сейсмологической школы. – Обнинск: ГС РАН, 2006. – С. 77–83.
- Alsaker A., Kvamme L.B., Hansen R.A., Dahle A., Bungum H. The ML scale in Norway // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1991. – V. 81, N 2. – P. 379–398.
- Antonovskaya G.N., Kapustian N.K., Konechnaya Y.V., Danilov A.V. Registration capabilities of Russian island-based seismic stations: Case study of the Gakkel Ridge monitoring // Seismic Instruments. – 2020. – V. 56, N 1. – P. 33–45.
- Bakun W.H., Joyner W.B. The ML scale in Central California // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1984. – V. 74, N 5. – P. 1827–1843.
- 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.
- Morozov A.N., Vaganova N.V., Ivanova E.V., Konechnaya Y.V., Fedorenko I.V., Mikhaylova Y.A. New data about small-magnitude earthquakes of the ultra-slow-spreading Gakkel Ridge, Arctic Ocean // Journal of Geodynamics. – 2016. – V. 93. – P. 31–41.
- Richter C.F. An instrumental earthquake scale // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1935. – V. 25. – P. 1–32.
- Richter C.F. Elementary Seismology. – San Francisco: WH Freeman and Company, 1958. – P. 136–139.
- Rogozhin E.A., Kapustian N.K., Antonovskaya G.N., Konechnaya Y.V. New seismicity map for the European sector of the Russian Arctic region // Geotectonics. – 2016. – V. 50, N 3. – P. 238–243.

Сведения об авторах

Морозов Алексей Николаевич, канд. техн. наук, вед. науч. сотр. ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия; вед. науч. сотр. ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН, г. Архангельск, Россия. E-mail: morozovalexey@yandex.ru

Ваганова Наталья Владиславовна, канд. геол.-мин. наук, ст. науч. сотр. ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН, г. Архангельск, Россия. E-mail: nvag@yandex.ru

Асминг Владимир Эрнестович, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. Кольского филиала (КоФ) ФИЦ ЕГС РАН, г. Апатиты, Россия. E-mail: asmingve@mail.ru

Евтюгина Зинаида Анатольевна, канд. хим. наук, науч. сотр. КоФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Апатиты, Россия. E-mail: zina_evt@mail.ru

The ML scale in western Eurasian Arctic

© 2020 A.N. Morozov^{1,2}, N.V. Vaganova², V.E. Asming³, Z.A. Evtugina³

¹GS RAS, Obninsk, Russia; ²FCIARctic, Arkhangelsk, Russia; ³KoB GS RAS, Apatity, Russia

Abstract The local magnitude scale ML was refined for the western part of the Eurasian Arctic on the basis of data from seismic stations operating on the archipelagos of Svalbard, Franz Josef Land, and Severnaya Zemlya: $-\lg A_0(R) = 1.5 \cdot \lg(R/100) + 1.0 \cdot 10^{-4}(R-100) + 3.0$. Refinement was carried out on the basis of a sample of 167 earthquakes and 612 amplitude values at 5 seismic stations. The sample covered earthquakes that occurred in the main seismically active zones of the Eurasian Arctic for the period from January 2016 to April 2019. The refined scale can be applied in wide ranges of epicentral distances and magnitudes. The ML scale with the corresponding station corrections will be introduced into the practice of daily processing of seismological data from the western part of the Eurasian Arctic.

Keywords Local magnitude scale, Eurasian Arctic, station correction.

For citation Morozov, A.N., Vaganova, N.V., Asming, V.E., & Evtugina, Z.A. (2020). [The ML scale in western Eurasian Arctic]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 2(4), 63-68. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.4.06>

References

- Alsaker, A., Kvamme, L.B., Hansen, R.A., Dahle, A., & Bungum, H. (1991). The ML scale in Norway. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 81(2), 379-398.
- Antonovskaya, G.N., Kapustian, N.K., Konechnaya, Y.V., & Danilov, A.V. (2020). Registration Capabilities of Russian Island-Based Seismic Stations: Case Study of the Gakkel Ridge Monitoring. *Seismic Instruments*, 56(1), 33-45.
- Bakun, W.H., & Joyner, W.B. (1984). The ML scale in Central California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74(5), 1827-1843.
- Dyagilev, R.A. (2015). [ML scale in Middle Urals]. In *Materialy X Mezhdunarodnoy seismologicheskoy shkoly "Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh"*, otv. red. A.A. Malovichko [Proceedings of the X International Seismological Workshop "Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data", A.A. Malovichko (ed.)] (pp. 118-122). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Gabsatarova, I.P. (2006). [Introduction into routine practice divisions of the Geophysical Survey of RAS calculation procedure of the local magnitude]. In *Materialy Mezhdunarodnoy seismologicheskoy shkoly "Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh"* [Proceedings of the International Seismological Workshop "Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data"] (pp. 49-53). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Hutton, L.K., & Boore, D.M. (1987). The ML scale in southern California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77(6), 2074-2094.
- Krasilov, S.A., Kolomiets, M.V., & Akimov, A.P. (2006). [Organization of the processing of digital seismic data with the use of WSG program complex]. In *Materialy mezhdunarodnoy seismologicheskoy shkoly "Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh"* [Proceedings of the International Seismological Workshop "Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data"] (pp. 77-83). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Morozov, A.N., Vaganova, N.V., Ivanova, E.V., Konechnaya, Y.V., Fedorenko, I.V., & Mikhaylova, Y.A. (2016). New data about small-magnitude earthquakes of the ultra-slow-spreading Gakkel Ridge, Arctic Ocean. *Journal of Geodynamics*, 93, 31-41.
- Richter, C.F. (1935). An instrumental earthquake scale. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 25, 1-32.
- Richter, C.F. (1958). *Elementary Seismology*. San Francisco, USA: WH Freeman and Company. 768 p.
- Rogozhin, E.A., Kapustian, N.K., Antonovskaya, G.N., & Konechnaya, Y.V. (2016). New seismicity map for the European sector of the Russian Arctic region. *Geotectonics*, 50(3), 238-243.

Information about authors

Morozov Alexey Nikolaevich, PhD, Leading Researcher of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (GS RAS), Obninsk, Russia; Leading Researcher of the N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research (FCIARctic), Arkhangelsk, Russia ORCID: 0000-0001-9958-5974. E-mail: morozovalexey@yandex.ru

Vaganova Natalya Vladislavovna, PhD, Senior Researcher of the N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research (FCIARctic), Arkhangelsk, Russia. E-mail: nvag@yandex.ru

Asming Vladimir Ernestovich, PhD, Leader Scientist of the Kola Branch of Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences (KoB GS RAS), Apatity, Russia. E-mail: asmingve@mail.ru

Evtugina Zinaida Anatol'evna, PhD, Researcher of the KoB GS RAS, Apatity, Russia. E-mail: zina_evt@mail.ru