

УДК 550.34

Предварительная оценка сейсмической опасности района Арктического хребта Гаккеля и окрестностей

© 2019 г. Б.А. Ассиновская¹, Н.М. Панас¹, М.К. Овсов¹, Г.Н. Антоновская²

¹ФИЦ ЕГС РАН, г. Санкт-Петербург, Россия; ²ФГБУН ФИЦКИА РАН, г. Архангельск, Россия

Аннотация. Описаны исходные данные, методика расчётов и результаты предварительной оценки сейсмической опасности в регионе хребта Гаккеля – самой северной сейсмогенной зоны Земли. Согласно геологическим данным регион считается потенциально нефтегазоносным, но его промышленное освоение ещё не началось. На первом этапе исследования составлен унифицированный по магнитуде M_w каталог землетрясений с 1912 по 2014 год. При этом использованы сведения о сейсмических событиях из исторических источников и каталога ISC, а также результаты наблюдений Архангельской сейсмической сети в Арктике за 2014–2018 гг. В каталоге землетрясений выделена его представительная часть и проведено исследование сейсмического режима. По характеру сейсмичности регион делится на высокоактивную рифтовую зону хребта Гаккеля и континентальные уступы шельфовых морей Баренцева, Карского и Лаптевых с более слабой активностью, разделённые и обрамлённые асейсмичными районами – котловинами Нансена, Амундсена и хребта Ломоносова. С помощью структурного анализа геолого-геофизических данных осуществлена сейсмическая регионализация региона исследований. Построение карт вероятностной сейсмической опасности в терминах максимальных ускорений движений грунта PGA для периода повторяемости 500 и 100 лет (10 % вероятности превышения в ближайшие 50 и 10 лет) проведено с использованием программы CRISIS. Как и ожидалось, наиболее опасной оказалась Гаккелевская зона шириной около 200 км.

Ключевые слова: Арктика, сейсмичность, повторяемость землетрясений, структурный анализ геолого-геофизических данных, сейсмическая регионализация, сейсмическая опасность, программа CRISIS, затухание, пиковое ускорение движения грунта.

Для цитирования: Ассиновская Б.А., Панас Н.М., Овсов М.К., Антоновская Г.Н. Предварительная оценка сейсмической опасности района Арктического хребта Гаккеля и окрестностей // Российский сейсмологический журнал. – 2019. – Т. 1, № 1. – С. 35–45. doi: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2019.1.03>

Введение

Регион исследования включает в себя активный срединный Арктический хребет Гаккеля и его обрамление: котловину Нансена, а также континентальные уступы в районе Баренцева и Карского морей.

Уровень геоэкологических угроз и, соответственно, целесообразность промышленного освоения предопределяются различного рода природными рисками, один из которых сейсмический. Регион считается высокоперспективным в части добычи углеводородов [Богоявленский В.И. и др., 2015], ему предстоит интенсивное промышленное освоение. При этом достаточно высокий уровень сейсмической активности потребует проведения сейсмического районирования всей зоны российской Арктики.

Сейсмическая опасность обычно рассчитывается с использованием вероятностного метода PSHA (Probabilistic Analysis Hazard Seismic) [Cornell, 1968], при этом сейсмическое воздействие на конкретном месте в большинстве случаев обусловлено суммарным влиянием нескольких сейсмических источников – зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ). Метод PSHA широко используется в России и за рубежом.

Ранее область никогда не рассматривалась в работах по оценке сейсмической опасности по причине расположения в высоких арктических широтах и тяжёлых климатических условий. При этом для сопредельных районов суши в России существуют карты сейсмической опасности последней модификации ОСП-2015, а также составленные на их основе новые строительные нормы и правила

[<http://docs.cntd.ru/document/1200111003>]. Для Европы известен проект SHARE [<http://www.share-eu.org/>]. В 1990-е годы осуществлялась оценка опасности для морей Баренцева и Лаптевых ОСР-97 [Уломов, Шумилина, 1998].

На данном уровне изученности возможна оценка лишь примерного уровня опасности в регионе. Сложности с более точной оценкой опасности предопределялись объективно-мелким масштабом исходного геологического материала, необходимого для сейсмической регионализации вследствие слабой изученности региона, и трудностями использования программы CRISIS для полярных широт.

Характеристика методов исследования

На первом этапе строилась схема сейсмостектонического районирования [Овсов, Ассиновская, 2018; Assinovskaya et al., 2018] на специально подготовленной цифровой геолого-геофизической основе и проведён структурный анализ этой информации по методике [Assinovskaya, Ovsov, 2014]. Исходные данные включали в себя карты по гравиметрии в редукции Фая, абсолютных отметок рельефа от поверхности геоида в цифровом виде из архива М.К. Овсова, амплитуд и скоростей современных тектонических движений масштаба 1:6000000 в аналоговой форме, предоставленных Г.П. Аветисовым.

Далее был осуществлён анализ сейсмологической информации и проведено картирование территории по уровню ожидаемых ускорений движения грунта для периодов повторяемости 500 и 100 лет с применением программного обеспечения CRISIS [Ordaz et al., 2017].

Программа CRISIS может считать воздействия и строить карты опасности в форме как амплитуд максимальных, так и частотно зависимых ускорений сейсмических колебаний. В данном случае использована форма максимальных колебаний. Модели затухания для различных сейсмостектонических обстановок и типов поверхностных грунтов встроены в программу.

Сейсмические источники (объёмы коры) задаются в виде 3D-полигонов, определённых координатами (долгота, широта и глубина) вершины, определяющей их площади. Для каждого сейсмического источника с помощью статистического анализа каталога землетрясений оценивается количество землетрясений в единицу времени $\lambda(M)$, превышающих заданную минимальную магнитуду. CRISIS предполагает, что сейсмичность в источнике равномерно распределяется на единицу площади (площадные источники).

Далее программа осуществляет процесс интеграции всех возможных локаций очагов в пространстве. Обычно предполагается, что внутри сейсмического источника все точки с одинаковой вероятностью могут быть очагами землетрясения.

Скорость сейсмического процесса в данном случае учитывается в виде модифицированной модели Гутенберга-Рихтера (пуассоновский процесс). Максимальной магнитуде M_{\max} присваивается вероятностное распределение Гаусса [Ordaz et al., 2017], в котором участвуют нижний предел максимальной магнитуды M_1 , чаще — максимально наблюдаемая магнитуда, верхний предел максимальной магнитуды M_2 , а также ожидаемое значение M_{\max} , которое было бы, если бы распределение распространялось от $-\infty$ до ∞ . Значение M выбирается из тектонических соображений. В формулу входит также σ — стандартная девиация M_{\max} .

Ускорение A также считается случайной величиной с логарифмически нормальным распределением и средним значением $A_m(M, R)$, заданным таблицей затухания для соответствующей комбинации магнитуды и расстояния, и стандартным отклонением натурального логарифма σ .

Использование программы CRISIS предопределило ход исследований в данной работе. На первом этапе проведены унификация магнитуд землетрясений, на втором — определялась представительность событий разной магнитуды, и рассчитывались параметры сейсмического режима. На третьем этапе с помощью карты сейсмостектонического районирования выделялись зоны разной сейсмической активности, и для каждой из них оценивалась максимально возможная магнитуда. Далее рассчитывались собственно сейсмические воздействия в форме максимальных ускорений движений PGA с использованием встроённых в CRISIS зависимостей сейсмического затухания этого параметра от расстояния в условиях средних грунтов.

Некоторые сведения о геологии и глубинном строении

Район исследования охватывает акваторию океана от Шпицбергенской зоны дислокаций на западе до континентального уступа моря Лаптевых на востоке, включает рифтовую зону хребта Гаккеля в центре, хребет Ломоносова на севере и континентальные уступы Брусилова и Лаптево-морский на юге, географические границы региона $\varphi=79^\circ$, $\lambda=28^\circ$; $\varphi=84^\circ$, $\lambda=-11^\circ$; $\varphi=80^\circ$, $\lambda=160^\circ$; $\varphi=77^\circ$, $\lambda=118^\circ$. Следует заметить, что сейсмически

активная область района Шпицбергена в данном случае не включена в район исследования.

Согласно карте основных тектонических и геоморфологических элементов Арктики, составленной по разным материалам, хребет Гаккеля протягивается от долготы $\lambda = -7^\circ$ до $\lambda = 125^\circ$ [Cochran et al., 2003]. В его пределах по геоморфологическим, петрологическим и геофизическим особенностям в рифтовой зоне хребта различаются Западная, Центральная, Восточная зоны. Скорость так называемого медленного спрединга в них меняется с запада на восток от 13.5–15 до 6 мм/год, протяжённость зон растёт с 300 до 600 км, глубина рифтовых долин достигает 3.8–5.5 км. Мощность коры составляет 1.3–4.9 км, её вещественный состав меняется от базальтового до габбро-перидотитового, самая тонкая кора находится во второй зоне. В восточной части хребта Гаккеля с $\lambda = 94$ – 125° океанические глубины достигают 3–5 км, выделяются отдельные впадины и долины, земная кора также океанического типа. Согласно геологической карте 1:5000000 [Harrisson et al., 2011], общая ширина отрогов и долин хребта Гаккеля достигает 200 км, он пересекается большим количеством трансформных разломов. В районе расположения этих нарушений, возможно, мощность земной коры увеличивается до 20 км, так же, как и в пределах Лаптевоморского участка хребта Гаккеля. Это подтверждается присутствием здесь более глубоких очагов землетрясений.

На континентальном уступе, в районе Земли Франца-Иосифа и вокруг земная кора переходного типа мощностью до 20 км [Pease et al., 2014; Дымов и др., 2011], в котловине Нансена она становится океанической (характеризуется мощностью до 10–12 км, базальтовым составом и скоростью распространения продольных волн 7.5 км/с). На базальтовом фундаменте обнаруживается слой осадочных пород ($V_p = 2.0$ – 3.8 м/с) мощностью до 8 км. В этом районе имеются области резкой смены мощности коры в желобах Франц-Виктория и Святой Анны [Klitzke et al., 2015]. По данным [Pease et al., 2014], котловина Амундсена имеет также кору вулканического типа, соответственно, базитового состава, мощностью до 5 км. Хребет Ломоносова, напротив, характеризуется двухслойной континентальной корой, соответственно, присутствием гранитного слоя корой толщиной до 15 км и наличием разломных зон.

Каталог землетрясений. Сейсмичность

Каталог землетрясений первоначально содержал 639 событий с $M_w = 3.5$ – 6.7 , имевших место

в регионе в 1912–2014 гг. Первые 38 событий произошли в раннеинструментальный период (1912–1959 гг.) и зарегистрированы малым числом станций, данные о них взяты из публикаций [Hodgson et al., 1965; Sykes, 1965] и банка данных Г.П. Аветисова [Аветисов и др., 2001]. Остальная информация, полученная по данным глобальной сейсмической сети, извлечена из каталога ISC [International..., 2016]. Кроме того, составленная сводка была сверена с новейшей работой [Morozov et al., 2018], в которой старые инструментальные данные переобработаны с применением современных методик, и часть событий переместилась, в основном, в пределы хребта Гаккеля. Сомнение вызывает событие 14 октября 1908 г. с $M = 6.3$, эпицентр которого в старых источниках находился на Шпицбергенском склоне ($\varphi = 81.5^\circ$, $\lambda = 16^\circ$), далее он переместился восточнее (до $\varphi = 82^\circ$, $\lambda = 30^\circ$) [International..., 2016]. В [Morozov et al., 2018] этот эпицентр оказался внутри архипелага Земля Франца-Иосифа, что в сеймотектоническом плане, имея в виду асейсмичный вулканический покров структуры, не кажется правдоподобным.

После очистки каталога от артефактов, а также ручной декластеризации (исключён рой землетрясений 1999 г.) в нём осталось 544 события. Далее в каталог были добавлены предоставленные ФГБУН ФИЦКИА РАН данные о 33 землетрясениях с $ML = 1.8$ – 4.9 , зарегистрированных в Арктическом регионе тремя станциями Архангельской локальной сети в 2014–2018 гг. Всего в Архангельском каталоге содержится 167 событий из этого района, но большая часть записана одной станцией.

Особую задачу представляла унификация магнитуд, так как в исходной сводке имели место их разные типы, такие как m_b , M_n , M_d , ML , а сейсмическая опасность, как известно, рассчитывается на основе магнитуды M_w . Последний параметр был получен в два этапа. Сначала все значения были пересчитаны в магнитуду m_b по специально составленным уравнениям регрессии:

$$m_b = (0.45 \pm 0.11) \cdot ML + (2.19 \pm 0.50), \quad (1)$$

$$m_b = (0.72 \pm 0.10) \cdot M_d + (0.23 \pm 0.10), \quad (2)$$

$$m_b = (0.42 \pm 0.15) \cdot M_n + (2.15 \pm 0.50). \quad (3)$$

Магнитуды m_b затем приводились к магнитуде M_w в соответствии с [Gruntal, Wahlstrom, 2003]. В результате был составлен однородный по магнитуде каталог событий. В качестве примера приводим список наиболее сильных землетрясений с $M_w > 6$ (табл. 1). Есть некоторые сомнения в надёжности определения величин магнитуд.

Таблица 1. Список землетрясений с $M_w > 6$

Источник	Дата	φ , °N	λ , °E	H , км	M_w	Район
Н	18.02.1948	83.0	40.4		6.7	Континентальный уступ
ISC	25.08.1964	78.15	126.65	33?	6.4	Хребет Гаккеля
ISC	21.03.1988	77.59	125.52	34?	6.2	Хребет Гаккеля
ISC	06.03.2005	84.92	2.9	6.1	Хребет Гаккеля	

Примечание: Н – [Hodgson et al., 1965], ISC – [International..., 2016].

В табл. 1 внесены четыре события: событие 1948 г. имело место на континентальном уступе, землетрясение 1964 г. произошло в центральной части рифтовой зоны, два последних возникли на Лаптевоморском сегменте хребта. Следует заметить, что большая часть землетрясений с $M_w \geq 5$ концентрируется в центре хребта (рис. 1).

На следующем этапе проведена оценка репрезентативности землетрясений разных уровней энергии в разные периоды времени в разных сеймотектонических областях, а именно, в рифтовой зоне хребта Гаккеля и в пределах континентального уступа.

Очаги землетрясений разных энергий практически равномерно распределены вдоль рифтовой зоны, они располагаются на глубинах от первых километров до 20 км. Механизмы очагов имеют сбросовый характер, что свидетельствует о преобладании деформаций растяжения. Напротив, на континентальном уступе в западной части имеется область концентрации очагов, в т.ч. сильного, в районе желоба Франц-Виктория и спорадическое их распределение по территории восточной части уступа – имеем только редкие очаги в районах желоба Святой Анны и архипелага Северная Земля. Некоторые очаги находятся за пределами района, но учтены в расчётах.

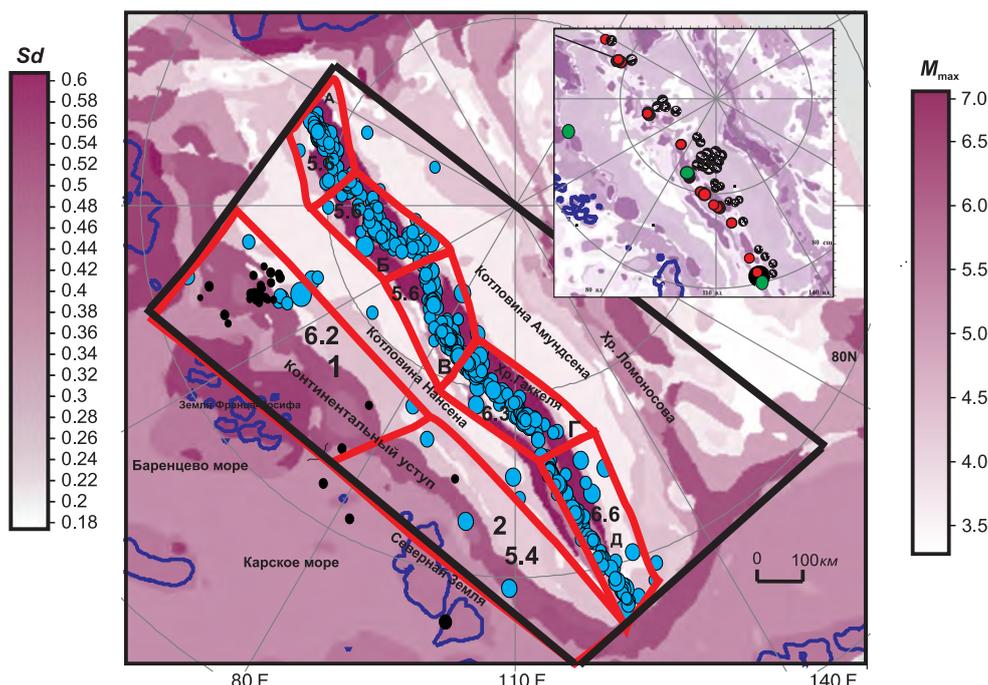


Рис. 1. Карта зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ).

Шкала слева – результаты структурного анализа – усреднённые стандартные отклонения от средних значений геофизических данных, шкала справа – привязанные к ним предположительные значения максимально возможной магнитуды. Красными рамками обведены зоны ВОЗ, участвующие в дальнейших расчётах. Синими кружками показаны эпицентры землетрясений с $M_w = 3.5-6.7$ из основного каталога, размер знака пропорционален $M_w/30$, чёрными – данные Архангельской сети с $M_w = 1.8-4.0$, размер знака пропорционален $M_w/20$. Чёрной линией обведён район исследования. На врезке: детальный структурный анализ рифтовой зоны по двум информативным признакам (батиметрия, гравиметрия), эпицентры землетрясений с $M \geq 5$ (красные кружки) и $M \geq 6$ (зелёные кружки), а также известные по ISC механизмы очагов землетрясений

Сейсмический режим

Представительность событий разного энергетического уровня в разные периоды времени в данном регионе определена из каталога землетрясений для зон хребта Гаккеля и континентального уступа отдельно (рис. 2).

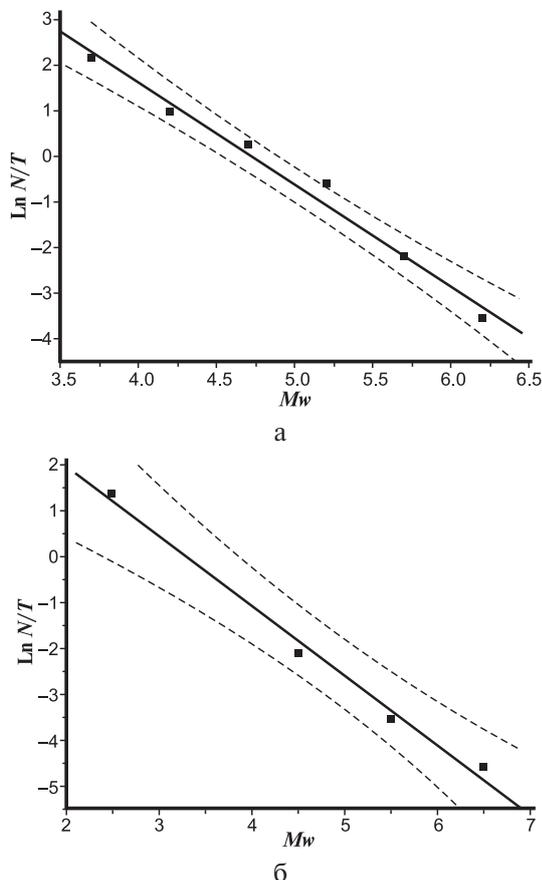


Рис. 2. Графики повторяемости землетрясений в ln-нормальной форме для хребта Гаккеля (а) и для континентального уступа (б)

Анализ показал, что для рифтовой зоны каталог представлен (то есть события зарегистрированы без пропуска) с $M_w > 6$ примерно последние 100 лет, с $M_w = 5$ — около 50 лет, с $M_w = 4$ — с 1970 г., с $M_w < 4$ — последние 16 лет. Оказалось, что выборка представительных землетрясений на хребте Гаккеля содержит только 384 землетрясения. Некоторый разброс на графике в районе $M_w = 5$ объясняется проблемой пересчёта из одного типа магнитуд в другой.

Для расчёта вероятностной интенсивности сотрясений получено линейное уравнение повторяемости землетрясений в ln-нормальной форме (эту форму требует CRISIS) (рис. 2а):

$$\ln N/T = (-2.23 \pm 0.14) \cdot M_w + (10.54 \pm 0.74), \quad (4)$$

то есть наклон графика (параметр β) оказался равным 2.23.

Характер сейсмичности в пределах южного континентального уступа Северного Ледовитого океана и рассмотренного выше района хребта Гаккеля коренным образом различаются — количество слабых землетрясений на уступе существенно меньше, тем не менее, известны события с магнитудой больше 6 (табл. 1). Это говорит об особенностях сейсмического процесса, связанных с разными прочностными свойствами земной коры, в данном случае океанической и континентальной. Несмотря на малое число событий (40), получено линейное уравнение повторяемости землетрясений также в ln-нормальной форме (рис. 2б):

$$\ln N/T = (-1.52 \pm 0.11) \cdot M_w + (5.0 \pm 0.57). \quad (5)$$

Ошибка аппроксимации показана в обоих случаях в виде 95 %-го доверительного интервала (рис. 2а, б).

На графике (рис. 2б) пропущена точка в интервале магнитуд 3–4 — на месте стыка двух выборок сильных (старых) и слабых землетрясений, записанных Архангельской сетью станций. Исходя из графиков повторяемости, события с $M_w = 6.0$ происходят на хребте примерно каждые 20 лет, а на склоне — каждые 60 лет.

Зоны возможных очагов землетрясений

Зоны выделялись на основе карты сейсмо-тектонического районирования (сейсмической регионализации), проведённого с помощью структурного анализа геолого-геофизических данных [Сейсмическое..., 1980; Assinovskaya, Ovsov, 2014; Овсов, Ассиновская, 2018].

Величина максимально возможной магнитуды землетрясений обусловлена степенью неоднородного строения коры (рис. 1). Однако в этом случае, если использовать карту, имеем слишком высокий уровень детализации, который не может быть обеспечен сейсмическими данными. Поэтому карта была формализована по-другому — путём деления на площадные домены линейного и изометрического типов (рис. 1). На карту также были нанесены очаги землетрясений из унифицированного каталога и выделены, предположительно, прогнозные зоны возможных очагов землетрясений (ВОЗ) в укрупнённом виде. Всего таких зон выделено семь, они разной формы. Территория между зонами считалась неактивной. В пределах рифта в соответствии с картой и структурой сейсмичности зонами считались прямолинейные протяжённые участки земной коры прямоугольной формы (табл. 2). На континентальном уступе выделено два площадных домена,

Таблица 2. $M_{w_{\max}}$ по протяжённости зоны ВОЗ по формуле (6) на хребте Гаккеля

Зоны	L , км	M_{\max} по (1)	Среднее значение	Наблюденное	Принято
А	253	4.3–6.8	5.6	5.5	5.6
Б	292	4.4–6.9	5.6	5.5	5.6
В	292	4.4–6.9	5.6	5.4	5.6
Г	390	4.6–7.1	5.8	6.1	6.3
Д	555	4.9–7.4	6.2	6.4	6.6

это деление сугубо условное в связи с недостатком, главным образом, сейсмологической информации.

Максимально возможная магнитуда

При оценке величины M_{\max} обычно используются сейсмологические (максимальная наблюдаемая магнитуда) и сеймотектонические методы (размеры зон, ответственных за возникновение землетрясений). По наблюдаемым графикам повторяемости M_{\max} можно определять в случае наличия однородного каталога за достаточно большой период времени, в нашем случае этого нет, поэтому использовался второй способ.

Ранее получен ряд эмпирических соотношений между геометрическими размерами сейсмогенных зон, мощностью сейсмоактивного слоя и максимальной магнитудой землетрясения, которое здесь может произойти. Для районов высокой тектонической активности используются формулы Н.В. Шебалина [Сейсмическое..., 1980], связывающие максимально возможную энергию с геометрией зоны накопления и освобождения упругой деформации:

$$1.8 \cdot \lg L \leq M_{\max} \leq 2 \cdot \lg L + 2, \quad (6)$$

$$M_{\max} \leq 4 \cdot \lg H + 1.8. \quad (7)$$

Здесь и далее L – линейные размеры сейсмогенной зоны, H – мощность сейсмоактивного слоя, равная максимальной глубине очагов землетрясений.

Непосредственно по карте были определены линейные размеры отрезков рифтовой зоны хребта Гаккеля с разной ориентацией, а также площади двух доменов на уступе изометрической формы. Результаты вычислений приведены в табл. 2 и в тексте. Наибольшая M_{\max} предполагается на отрезках «Г» и «Д», здесь возникали в прошлом события более 6. Соотношение (7), если мощность сейсмоактивного слоя $H \sim 20$ км, даёт значение $M_{\max} = 7.0$, что также вполне вероятно для рифтовой зоны.

Для площадных доменов изометрической формы можно использовать формулы:

$$M_{\max} = 0.875 \cdot \lg S + 2.1 \text{ [Ассиновская, 1994]}, \quad (8)$$

$$M_{\max} = \lg S + 0.3 \text{ [Уломов, 1988]}, \quad (9)$$

где S – площадь домена в км^2 , или экспертную оценку. Формула (8) получена на основе анализа межэпицентральных расстояний землетрясений разных магнитуд для Свальбардского поднятия в Баренцевом море.

По характеру сейсмичности регион континентального уступа условно разделён на два площадных домена – западный, явно более опасный, чем восточный, но линейные сейсмогенные зоны здесь выделяются пока что неуверенно.

Западный домен имеет площадь 254.1 тыс. км^2 , расчётное $M_{\max} = 6.8$, что, вероятно, много, если распределять эту опасность для всей площади. По формуле (9) $M_{\max} = 5.7$, это меньше наблюдаемой 6.7. Принято экспертное среднее значение $M_{\max} = 6.2$. На следующих этапах работы можно будет исследовать локальные сейсмогенные зоны на уступе и оценить M_{\max} более точно.

Восточный домен имеет площадь 221.25 тыс. км^2 , при этом M_{\max} получается равной 6.7 или 5.6, что для этого блока явно много, поэтому в данном случае M_{\max} принята немного большей наблюдаемого значения 5.4.

Таким образом, окончательные сведения о сейсмичности для зон хребта взяты следующими: минимальная магнитуда $M_{w_{\min}} = 3.7$, сейсмическая активность $\lambda_0 = 2.29$, наклон \ln -нормального графика повторяемости $\beta = 2.23$, коэффициент вариации $\sigma(\beta) = 0.1$. Для доменов уступа данные параметры приняты $M_{w_{\min}} = 3.7$, $\lambda_0 = 0.5$, $\beta = 1.48$. Для данного района имеются представительные более слабые, чем 3.7, землетрясения, но для удобства расчётов в CRISIS в качестве минимальной представительной магнитуды выбрано это же значение.

Результаты расчётов M_{\max} в виде M_1 , M_2 , M_3 (минимального, среднего и максимального значений возможной максимальной магнитуды, как того требует программа CRISIS) сведены в табл. 3. В дальнейшем эта таблица с добавлением сведений о $M_{w_{\min}}$, λ_0 , β и $\sigma(\beta)$ использована в качестве входного файла программы CRISIS.

Таблица 3. Параметры M_{\max}

№ зоны	Mw_1	Mw_2	Mw_3
Хребет			
А	6.4	6.6	6.8
Б	5.4	5.6	5.8
В	5.4	5.6	5.8
Г	6.1	6.3	6.5
Д	6.4	6.6	6.8
Уступ 1	5.9	6.1	6.3
Уступ 2	5.2	5.4	5.6

Карта (рис. 1) показывает потенциальную опасность и на хребте Ломоносова. Но сейсмических данных для этого района нет.

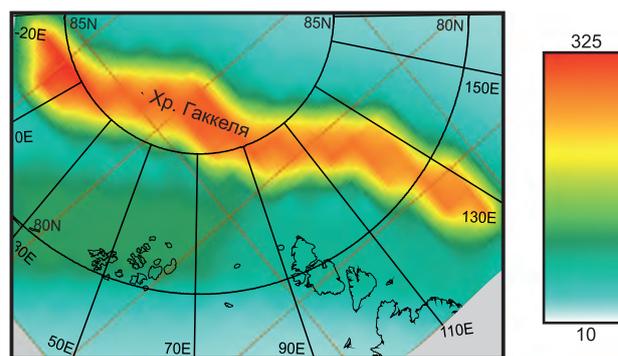
Затухание максимальных ускорений

Закон затухания максимальных ускорений движения грунта при землетрясении – важнейший параметр для количественной оценки сейсмической опасности. Модель затухания обычно регионально обусловлена и сильно зависит от преобладающих типов механизмов очагов землетрясений. В программе CRISIS имеются встроенные модели, описывающие амплитуды колебания грунта в разных частотных диапазонах в некоторых тектонических обстановках с высокой сейсмичностью, например, [Youngs et al., 2005; Atkinson, Boore, 2003] для Средиземно-морской области, зон растяжений и сбросового характера деформаций [Spudich, 1999]. Для расчёта выбрана последняя встроенная модель.

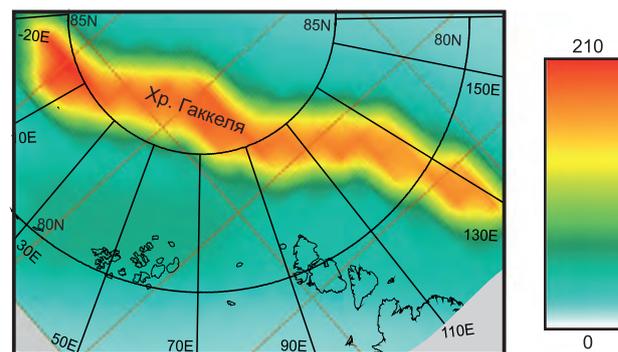
Результаты

Результаты вероятностного анализа сейсмической опасности получены в виде ряда распределений в регионе амплитуд максимальных ожидаемых ускорений ($см/с^2$) движения средних грунтов дна океана с различными периодами повторяемости или разной вероятностью превышения конкретных значений в соответствующие интервалы времени. На рис. 3 представлены карты параметров. Расчёты проводились по сетке $0.5 \times 0.5^\circ$ в рамках координат области исследования.

Согласно рис. 3а, для повторяемости 500 лет в Арктике ожидаемые максимальные ускорения достаточно велики и составят около $300 см/с^2$ (8.5 баллов по шкале EMS-98 [Grunthal et al., 1998]) на севере и юге хребта Гаккеля, усиление интенсивности на северо-западе более объясняется краевым эффектом. На западе континентального склона этот параметр равен $100 см/с^2$ (7 баллов EMS-98), на юго-востоке – около $70 см/с^2$.



а



б

Рис. 3. Карта максимальных ожидаемых ускорений ($см/с^2$) для средних грунтов и периода повторяемости 500 лет или для 10% вероятности превышения этих значений в ближайшие 50 лет (а), то же для периода повторяемости 100 лет или 10% вероятности превышения этих значений в ближайшие 10 лет (б). Масштаб в 1 см – 100 км

Подобные карты используются обычно в гражданском строительстве, где являются нормативным документом.

Учитывая возможно меньший срок службы сооружений в нефтегазовой промышленности, построена ещё одна карта (рис. 3б) для периода повторяемости 100 лет или 10% вероятности превышения в течение ближайших 10 лет, где максимальное значение ожидаемых ускорений чуть превышает $200 см/с^2$ (7 баллов) на хребте и $30–40 см/с^2$ (более 5 баллов) на склоне.

Обсуждение результатов

Достоверность полученных оценок можно было бы оценить путём их сравнения с последними результатами аналогичных нормативных исследований, однако их нет.

Имеются старые данные для Баренцева моря и моря Лаптевых ОСР-97 в баллах, но данный район они не охватывают. На европейских картах SHARE [<http://www.share-eu.org/>] и в

последних российских работах ОСР-2015 А, В, С [<http://docs.cntd.ru/document/1200111003>] также отсутствуют данные по опасности для района Арктики. Авторами проделаны аналогичные исследования также с использованием программы CRISIS для Балтийского моря [Ассиновская, Овсов, 2013; Ассиновская, Овсов, 2015], однако этот регион – слабосейсмичный и поэтому трудно сравнимый с Арктикой. Результаты при этом были получены вполне адекватные.

Построенные карты не являются нормативными документами, однако могут помочь оценить опасность региона при строительстве сооружений для добычи нефти и газа, если важна ожидаемая интенсивность сотрясений на дне моря.

Данную оценку сейсмической опасности акватории следует рассматривать как первое приближение ещё и потому, что оценки затухания получены исключительно по наблюдениям на берегу. Чтобы получить искомые уравнения для дна моря необходимо иметь записи сильных движений донными сейсмографами.

Выводы

1. В результате исследований впервые проведена оценка сейсмической опасности в регионе рифтовой зоны хребта Гаккеля и континентального уступа – северной окраины Баренцева, Карского морей, а также запада моря Лаптевых. Составлен унифицированный каталог представительных землетрясений, проведена оценка параметров сейсмического режима. Использована современная методика расчётов в виде программы CRISIS. Построены карты максимальных ожидаемых ускорений ($см/с^2$) колебаний средних грунтов для периодов повторяемости 500 и 100 лет, 10 %, вероятности превышения этих значений в ближайшие 50 и 10 лет.

2. В регионе выделена одна обширная область повышенной сейсмической опасности в районе хребта Гаккеля. На остальной территории уровень опасности оказался невысоким.

3. Усовершенствование данного вида исследований, прежде всего, видится в развитии сейсмических наблюдений в Российской Арктике, уточнении основных параметров землетрясений, особенно магнитуд и глубин очагов, снижении энергетического уровня регистрации и качественной каталогизации событий, а также получении регионального уравнения затухания ожидаемых колебаний грунта в спектральной форме.

Авторы выражают благодарность редакторам и рецензентам статьи за сделанные замечания и исправления.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-00453-19-02.

Литература

Аветисов Г.П., Винник А.А., Копылова А.В. Модернизированный банк арктических сейсмологических данных // Российский геофизический журнал. – 2001. – Вып. 23–24. – С. 42–48.

Ассиновская Б.А. Сейсмичность Баренцева моря. – М.: Изд. НГК РАН, 1994. – 128 с.

Ассиновская Б.А., Овсов М.К. Оценка сейсмической опасности Восточно-Балтийского региона // Геориск. – 2015. – № 3. – С. 21–27. – URL: http://www.geomark.ru/journals_list/zhurnal-georisk-32015

Ассиновская Б.А., Овсов М.К. Сеймотектоническое зонирование Восточной Балтики с применением компьютерных методов анализа // Геориск. – 2013. – № 3. – С. 48–56. – URL: http://www.geomark.ru/journals_list/zhurnal-georisk-32013

Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Никитин Р.А., Шустер В.Л. Перспективы нефтегазодобычи Канадской глубоководной котловины и сопредельных акваторий Северного Ледовитого океана // Арктика: экология и экономика. – 2015. – № 4 (20). – С. 61–69.

Дымов В.А., Качурина Н.В., Макарьев А.А., Макарьева Е.М. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист U-41–44 – Земля Франца-Иосифа (восточные острова). Объяснительная записка. – СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2011. – 220 с. + 6 вкл.

Овсов М.К., Ассиновская Б.А. Подготовка данных для оценки сейсмической опасности срединного Арктического хребта Гаккеля и окружающих районов // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XIII Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – С. 189–193.

Сейсмическое районирование территории СССР. Методические основы и региональное описание карты 1978 года / Под общ. ред. В.И. Бунэ, Г.П. Горшкова. – М.: Наука, 1980. – 307 с.

СП 14.13330.2014 *Строительство в сейсмических районах СНиП II-7-81** (актуализированного СНиП II-7-81* «Строительство в сейсмических районах» (СП 14.13330.2011)) (с Изменением N 1) [site]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200111003>

Уломов В.И. Очаговая сейсмичность и долгосрочный прогноз землетрясений // Проблемные вопросы сейсмологии Средней Азии. – Ташкент: Фан, 1988. – С. 32–67.

- Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект новых карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации // Сейсмостойкое строительство. – 1998. – № 4. – С. 30–34.
- Assinovskaya B., Ovsov M., Panas N., Frolova N. On seismic hazard in Arctic // European Seismological Commission 36th General Assembly, 2–7 September 2018 Valletta - Malta. – ESC2018. – S39. – P. 431.
- Assinovskaya B.A., Ovsov M.K. Seismotectonic zoning of the Finnish-Bothnia region based on the structural analysis method // Russ. J. Earth. Sci. – 2014. – V. 14, ES2005. – doi: <https://doi.org/10.2205/2014ES000542>
- Atkinson G.M., Boore D.M. Empirical ground-motion relations for subduction-zone earthquakes and their application to Cascadia and other regions // Bull. Seismol. Soc. Am. – 2003. – V. 93, N 4. – P. 1703–1729.
- Cochran J.R., Kurras G.J., Edwards M.H., Coakley B.J. The Gakkel Ridge: Bathymetry, gravity anomalies, and crustal accretion at extremely slow spreading rates // J. Geophys. Res. – 2003. – V. 108, Is. B2. – doi: <https://doi.org/10.1029/2002JB001830003>
- Cornell C.A. Engineering seismic risk analysis // Bull. Seismol. Soc. Am. – 1968. – N 58. – P. 1583–1606.
- Gruntal G. (ed.). European Macroseismic Scale 1998. EMS-98. – Luxembourg, 1998. – 100 p.
- Gruntal G., Wahlstrom R. An M_w based earthquake catalogue for central, northern and Northwestern Europe using a hierarchy of magnitude conversions // J. Seismol. – 2003. – N 7. – P. 507–531.
- Harrison J.C., St-Onge V.R., Petrov O.V., Strelnikov S.I., Lopatin B.G., Wilson F.H., Tella S., Paul D., Lynds T., Shokalsky S.P., Hults C.K., Bergman S., Jepsen A., Solil A. Geological map of the Arctic, 2011. Geological Survey of Canada. Map 2159A, Scale 1:5000000.
- Hodgson J.H., Bath M., Jensen H., Kvale A., Linden N.A., Murphy L.M., Shebalin N.V., Tryggvason E., Vesanen E. Seismicity of the Arctic. Annals of the International Geophysical Year, 1957–58 // Seismology. – V. 30. – New York: Pergamon Press, 1965. – P. 33–66.
- International Seismological Centre (ISC). On-line Bulletin [Site]. – URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/> – Thatcham, United Kingdom: ISC, 2016.
- Klitzke P., Faleide J.I., Scheck-Wenderoth M., Sippe J. A lithosphere-scale structural model of the Barents Sea and Kara Sea region // Solid Earth. – 2015. – N 6. – P. 153–172. – doi: <https://doi.org/10.5194/se-6-153-2015>
- Morozov A.N., Vaganova N.V., Asming V.E., Konechnaya Y.V., Evtyugina Z.A. The instrumental seismicity of the Barents and Kara sea region: relocated event catalog from early twentieth century to 1989 // J. Seismol. – 2018. – V. 22, N 5. – P. 1171–1209. – doi: <https://doi.org/10.1007/s10950-018-9760-y>
- Ordaz M., Faccioli E., Martinelli F., Aguilar A., Arboleda J., Meletti C., D'Amico V. R-CRISIS. Program for computing seismic hazard. – 2017. – URL: <http://www.r-crisis.com/>
- Pease V., Drachev S., Stephenson R., Zhang X. Arctic lithosphere – a review // Tectonophysics. – 2014. – V. 628. – P. 1–25. – doi: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.05.033>
- SHARE [site]. – URL: <http://www.share-eu.org/>
- Spudich W.B., Joyner A.G., Lindh D.M., Boore B.M., Margaris Fletcher J.B. SEA99 A Revised Ground Motion Prediction Relation for use in extensional tectonic regimes // Bull. Seismol. Soc. Am. – 1999. – V. 5, N 89. – P. 1156–1170.
- Sykes L.R. The seismicity of the Arctic // Bull. Seismol. Soc. Am. – 1965. – V. 55, N 2. – P. 501–518.
- Youngs R.R., Chiou S.-J., Garcia D., Singh S.K., Herraiz M., Ordaz M., Pacheco J.F. Inslab earthquakes of Central Mexico: Peak ground-motion parameters and response spectra // Bull. Seismol. Soc. Am. – 2005. – V. 95, N 6. – P. 2272–2282. – doi: <https://doi.org/10.1785/0120050072>

Сведения об авторах

Ассиновская Бэла Александровна, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. Федерального государственного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН), г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: assin.bela@gmail.com

Панас Наталья Михайловна, инженер 1 кат. ФИЦ ЕГС РАН, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: natagold-86@inbox.ru

Антоновская Галина Николаевна, д-р техн. наук, зам. директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаврова Российской академии наук (ФГБУН ФИЦКИА РАН), г. Архангельск, Россия. E-mail: galina.antonovskaya@gmail.com

Preliminary seismic hazard assessment of the Arctic Gakkel ridge and surrounding

© 2019 B.A. Assinovskaya¹, N.M. Panas¹, M.K. Ovsov¹, G.N. Antonovskaya²

¹GS RAS, St. Petersburg, Russia; ²FCIARctic, Arkhangelsk, Russia

Abstract This study describes primary data, methods of estimation and final results of the preliminary seismic hazard assessment in the region of the Gakkel Ridge that is a northernmost seismogenic zone of the Earth. According to geological data, the region is considered potentially oil and gas, but its industrial development has not yet begun. These authors for the Baltic Sea did the similar work earlier. At the first stage of this study, the earthquake catalog unified in magnitude Mw was compiled for the period from 1912 to 2014. Information on seismic events from historical sources and the ISC catalog was used, as well as the results of observations of the Arkhangelsk seismic network in the Arctic for 2014–2018. The representative part of earthquake data was revealed and the seismic regime has been studied. By seismicity origin, the region is divided into the highly active rift zone of the Gakkel Ridge and the continental slopes of the Barents, Kara and eastern Laptev seas with weaker activity, separated and framed by aseismic areas like the Nansen, Amundsen basins and the Lomonosov Ridge. The seismic zoning of the study region was carried out based on structural analysis of geological and geophysical data. The mapping of probabilistic seismic hazard in terms of maximum accelerations of PGA soil movements for a return period of 500 and 100 years (10% probability of exceedance in the next 50 and 10 years) was conducted using the CRISIS program. As expected, the most dangerous was the Gakkel zone about 200 km wide.

Keywords Arctic, seismicity, earthquake, recurrence, structural analysis of geological and geophysical data, seismic zoning, seismic hazard, CRISIS program, attenuation.

For citation Assinovskaya, B.A., Panas, N.M., Ovsov, M.K., & Antonovskaya, G.N. (2019). [Preliminary seismic hazard assessment of the Arctic Gakkel Ridge region and surrounding]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Seismological Journal], 1(1), 35-45, (In Russ.). doi: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2019.1.03>

References

- Assinovskaya, B.A. (1994). *Seismichnost' Barentseva moria* [Seismicity of the Barents Sea]. Moscow, Russia: NGK RAS Publ., 128 p. (In Russ.).
- Assinovskaya, B.A., & Ovsov, M.K. (2015). [Seismic hazard assessment of the Eastern Baltic region]. *Georisk* [Georisk], 3, 19-25. (In Russ.). Retrieved from http://www.geomark.ru/journals_list/zhurnal-georisk-32015
- Assinovskaya, B.A., & Ovsov, M.K. (2013). [Seismotectonic zoning of the Eastern Baltic based on computer analysis method]. *Georisk* [Georisk], 3, 48-56. (In Russ.). Retrieved from http://www.geomark.ru/journals_list/zhurnal-georisk-32013
- Assinovskaya, B.A., & Ovsov, M.K. (2014). Seismotectonic zoning of the Finnish-Bothnia region based on the structural analysis method, *Russian Journal of Earth Sciences*, 14(ES2005). doi: <https://doi.org/10.2205/2014ES000542>
- Assinovskaya, B., Ovsov, M., Panas, N., & Frolova, N. (2018). On seismic hazard in Arctic. In *European Seismological Commission 36th General Assembly*, S39 (p. 431). Valletta - Malta ESC2018.
- Atkinson, G.M., & Boore, D.M. (2003). Empirical Ground-Motion Relations for Subduction-Zone Earthquakes and Their Application to Cascadia and Other Regions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(4), 1703-1729.
- Avetisov, G.P., Vinnik, A.A., & Kopilova, A.V. (2001). [Upgraded Seismological Data Bank of the Arctic]. *Rossiiskii geofizicheskii zhurnal* [Russian Geophysical Journal], 23-24, 42-48 (In Russ.).
- Bogojavlensky, V.I., & Bogojavlensky, I.V. (2015). [Oil and gas potential of the Canadian deep-water basin and adjacent waters of the Arctic Ocean]. *Arctica: ecologia i economica* [Arctic: ecology and economy], 4(20), 61-69. (In Russ.).
- Bune, V.I., & Gorshkov, G.P. (1980). *Seismicheskoye raionirovanie territorii SSSR. Metodicheskie osnovy i regionalnoe opisaniye karti 1978 goda* [Seismic regionalization of the territory of the USSR. Methodical foundations and regional description of 1978 map]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 307 p. (In Russ.).
- Cochran, J.R., Kurras, G.J., Edwards, M.H., & Coakley, B.J. (2003). The Gakkel Ridge: Bathymetry, gravity anomalies, and crustal accretion at extremely slow spreading rates. *Journal of Geophysical Research*, 108 (B2). doi: <https://doi.org/10.1029/2002JB001830>
- Cornell, C.A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58, 1583-1606.

- Dimov, V.A., Kachurina, N.V., Makarjev, A.A., & Makarjeva, E.M. (2011). *Gosudarstvennaia geologicheskaia karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1:1000000 (tret'e pokolenie). Seriya Severo-Karsko-Barentsevomorskaia. List U-41-44 - Zemlia Frantsa-Iosifa (vostochnye ostrova). Ob'iasnitel'naia zapiska* [State geological map of Russian Federation. Scale 1:1 000 000 (third generation). North Kara - Barents Series. List U-41-44 - Franz-Josef Land (eastern islands), Explanatory note]. St. Petersburg, Russia: Kartfabrika VSEGEI Publ., 220 p. (In Russ.).
- Gruntal, G. (ed.). (1998). *European Macroseismic Scale 1998. EMS-98*. Luxembourg, 100 p.
- Gruntal, G., & Wahlstrom, R. (2003). An Mw based earthquake catalogue for central, Northern and North-western Europe using a hierarchy of magnitude conversions. *Journal of Seismology*, 7, 507-531.
- Harrison, J.C., St-Onge V.R., Petrov, O.V., Strel'nikov, S.I., Lopatin, B.G., Wilson, F.H., Tella, S., Paul, D., Lynds, T., Shokalsky, S.P., Hults, C.K., Bergman, S., Jepsen, A., & Solil, A. (2011). Geological map of the Arctic. *Geological Survey of Canada*, Map 2159A, Scale 1:5000000.
- Hodgson, J.H., Bath, M., Jensen, H., Kvale, A., Landen, N.A., Murphy, L.M., Shebalin, N.V., Tryggvason, E., & Vesanen, E. (1965). Seismicity of the Arctic. *Annals of the International Geophysical Year, 1957-58. Seismology*, 30, 33-66. New York: Pergamon Press.
- International Seismological Centre (2019). On-line Bulletin. Thatcham, United Kingdom: Internatl. Seis. Cent. Retrieved from <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>
- Klitzke, P., Faleide, J. I., Scheck-Wenderoth, M., & Sippel, J.A. (2015). Lithosphere-scale structural model of the Barents Sea and Kara Sea region. *Solid Earth*, 6, 153-172. doi: <https://doi.org/10.5194/se-6-153-2015>
- Morozov, A.N., Vaganova, N.V., Asming, V.E., Konechnaya, Y.V., & Evtugina, Z.A. (2018). The instrumental seismicity of the Barents and Kara Sea region: relocated event catalogue from early twentieth century to 1989. *Journal of Seismology*, 22(5), 1171-1209. doi: <https://doi.org/10.1007/s10950-018-9760-y>
- Ordaz, M., Faccioli, E., Martinelli, F., Aguilar, A., Arboleda, J., Meletti, C., & D'Amico, V. (2018). R-CRISIS 2018. Program for computing seismic hazard. *UNAM-2018*. Retrieved from <https://ecapra.org/topics/R-crisis-2018>
- Ovsov, M.K., & Assinovskaya, B.A. (2018). [Data preparation for the seismic hazard assessment of the Mid-Arctic Gakkel Ridge and surrounding areas]. In *Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seysmologicheskikh dannykh. Materialy XIII Mezhdunarodnoy seysmologicheskoy shkoly (Otv. red. A.A. Malovichko)* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Proceedings of the XIII International Seismological Workshop (Ed. A.A. Malovichko)] (pp. 189-194). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Pease, V., Drachev, S., Stephenson, R., & Zhang, X. (2014). Arctic lithosphere - a review. *Tectonophysics*, 628, 1-25. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.05.033>
- SHARE. (2019). Retrieved from <http://www.share-eu.org/SP14.13330.2014> *Stroitelstvo v seismicheskikh raionach SNIp II-7-81* (aktualizirovannogo SNIpA-7-81*Stroitelstvo v seismicheskikh raionach (SP14.13330.2011))* [Building in seismic regions SNIp II-7-81* (updated SNIp II-7-81* "Building in seismic regions" ((SP 14.13330.2011)))] (2019). Retrieved from <http://docs.cntd.ru/document/1200111003>
- Spudich, P., Joyner W. B., Lindh A.G., Boore, D.M., Margaris, B.M., & Fletcher J.B. (1999). SEA99S SA revised ground motion prediction relation for use: in extensional tectonic regimes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 5(89), 1156-1170.
- Sykes, L.R. (1965). The seismicity of the Arctic. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 55(2), 501-518.
- Ulomov, V.I., & Shumilina, L.S. (1998). [Set of new maps of general seismic zoning of the territory of the Russian Federation]. *Seismostoikoye stroitelstvo* [Earthquake resistant construction], 4, 30-34. (In Russ.).
- Youngs, R.R., Chiou, S.-J., Garcia, D., Singh, S.K., Herraiz, M., Ordaz M., & Pacheco J.F. (2005). Inslab earthquakes of Central Mexico: peak ground-motion parameters and response spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(6), 2272-2282. doi: <https://doi.org/10.1785/0120050072>

Information about authors

Assinovskaya Bela Aleksandrovna, PhD, Senior Researcher of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (GS RAS), St. Petersburg, Russia. E-mail: assin.bela@gmail.com

Panas Natal'ia Mikhailovna, Cat. I Engineer of the GS RAS, St. Petersburg, Russia. E-mail: natagold-86@inbox.ru

Antonovskaya Galina Nikolaevna, Dr., Deputy Director of the N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research (FCIARctic), Arkhangelsk, Russia. E-mail: galina.antonovskaya@gmail.com