

# СОВРЕМЕННАЯ ГРУППИРУЮЩАЯСЯ НИЗКОМАГНИТУДНАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ СРЕДИННО-ОКЕАНИЧЕСКОГО ХРЕБТА ГАККЕЛЯ

А. Н. Морозов<sup>\*,1,2</sup> , Н. В. Ваганова<sup>2</sup> , И. В. Старков<sup>2,3</sup>  и Я. А. Михайлова<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаврова Уральского отделения Российской академии наук, г. Архангельск, Россия

<sup>3</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

\* **Контакт:** Алексей Николаевич Морозов, morozovalexey@yandex.ru

Землетрясения на срединно-океанических хребтах (СОХ) отражают активные магматические и тектонические процессы, формирующие новую океаническую кору. При этом, активные процессы спрединга ультрамедленных хребтов, со скоростями спрединга менее 20 мм/год, к которым относятся хребет Гаккеля в Северном Ледовитом океане и юго-западный Индийский в Индийском океане, ещё слабо изучены по сравнению с СОХ в Атлантическом и Тихом океанах, со скоростями спрединга более 25 мм/год. Благодаря установке в XXI веке стационарных сейсмических станций на арктических архипелагах Земля Франца-Иосифа и Северная Земля, появилась возможность регистрировать и изучать в пределах хребта Гаккеля низкомagnitude-ные группирующиеся землетрясения, в том числе роевые последовательности землетрясений. В данной статье представлены первые результаты регистрации, локации и изучения роевых последовательностей низкомagnitude-ных землетрясений в пределах хребта Гаккеля за период с 2012 по 2022 гг. Показано, что роевые последовательности в большей степени регистрируются в западном вулканическом и восточном вулканическом сегментах хребта, а в пределах центрального амагматического сегмента таковых не обнаружено. В структурообразовании этой части хребта преобладают тектонические, а не магматические и метаморфические процессы. Подробно рассмотрены два крупных роя низкомagnitude-ных землетрясений в восточном вулканическом сегменте хребта.

**Ключевые слова:** Арктика, хребет Гаккеля, низкомagnitude-ные землетрясения, рой землетрясений

**Цитирование:** Морозов, А. Н., Н. В. Ваганова, И. В. Старков и Я. А. Михайлова (2023), Современная группирующаяся низкомagnitude-ная сейсмичность срединно-океанического хребта Гаккеля, *Russ. J. Earth. Sci.*, 23, ES3007, <https://doi.org/10.2205/2023es000843>

## Введение

Срединно-океанический хребет (СОХ) Гаккеля является арктической границей между двумя литосферными плитами: Североамериканской и Евразийской, и выступает как прямое продолжение Атлантического срединно-океанического хребта в Арктический бассейн и Якутию (рис. 1). Хребет простирается субширотно примерно на 1800 км от 7° з. д. до 125° в. д. и обладает наименьшей скоростью спрединга среди всей системы СОХ, она колеблется от 15 мм/год до 6–7 мм/год. Спрединг на протяжении большей части хребта ортогонален. Амплитуда крупнейших нетрансформных смещений не превышает 15 км [Гуревич и др., 2004; Дубинин и др., 2013].

Благодаря крупным экспедициям «SCICEX» [Edwards и др., 2001], «AMORE2001» [Thiede и Oerter, 2002], «AGAVE» [Reves-Sohn и др., 2007], а также экспедициям ВНИ-ИОкеангеологии им. академика И. С. Грамберга, на хребте Гаккеля можно выделить

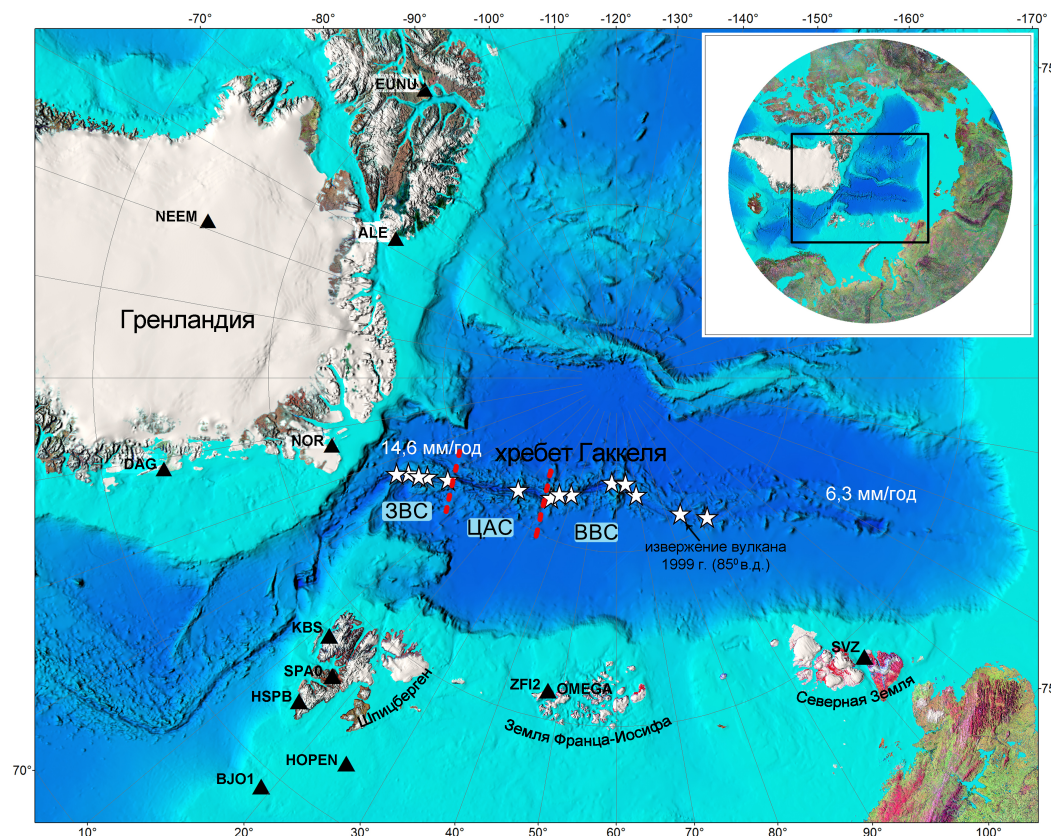
Получено: 31 Января 2023 г.

Принято: 5 Апреля 2023 г.

Опубликовано: 21 Августа 2023 г.



© 2023. Коллектив авторов.



**Рис. 1.** Позиция срединно-океанического хребта Гаккеля и деление его на суперсегменты. Белыми звездочками показано расположение вулканических центров согласно [Дубинин и др., 2013; Cochran, 2008; Wanless и др., 2014]. Черными треугольниками показаны сейсмические станции.

три суперсегмента: западный вулканический сегмент (ЗВС, простирается от 7° з. д. до 3° в. д.), центральный амагматический сегмент (ЦАС, простирается от 3° в. д. до 30° в. д.) и восточный вулканический сегмент (BBC, от 30° в. д. до 94° в. д.) [Cochran, 2008; Michael и др., 2003] (рис. 1).

В течение всего инструментального периода землетрясения в пределах хребта Гаккеля регистрировались только удалёнными стационарными сейсмическими станциями. Представительный уровень регистрации землетрясений сильно варьировался в зависимости от времени и географического района хребта. Для второй половины XX века для всего хребта представительными являются землетрясения с магнитудами от 4,5. Для начала XXI века – с магнитудами от 3,5. [Аветисов, 1996; Engen и др., 2003]. В статье [Schlindwein и др., 2015] были проанализированы все доступные данные о сейсмичности в пределах хребта и был сделан вывод, что для дальнейшего углубления нашего понимания процессов, протекающих в пределах хребта, необходимо получить сейсмические данные о событиях с магнитудами от 2,0 до 4,0, которые ликвидируют разрыв в охвате магнитуд между очень локальными и краткосрочными исследованиями сейсмичности на льдинах и телесейсмическими записями.

Очевидно, что землетрясения на СОХ отражают активные магматические и тектонические процессы, формирующие новую океаническую кору. В некоторых современных моделях вложен принцип дискретно-непрерывного спрединга, предполагающего формирование корового слоя в результате повторяющихся дайковых интрузий и излияний на оси хребта. Четкая связь между мигрирующей сейсмичностью и распространением вершины дайки показана в [Fox и др., 1995; Schmid и др., 2017; Tarasewicz и др., 2012]. Таким образом, роявая низкомagnitudeная сейсмичность в пределах СОХ является следствием тектонических и магматических процессов и может являться четким индикатором

магматического вторжения [Bohnenstiehl u Dziak, 2008]. При этом, активные процессы спрединга ультрамедленных хребтов Гаккеля и юго-западного Индийского ещё слабо изучены из-за своей удалённости. В работе [Schlindwein, 2012] по телесейсмическим данным было показано, что роевые землетрясения характерны для участков с четкими признаками вулканических структур, они затрагивают участки протяжённостью до 50 км и происходят неоднократно для конкретных участков в течение нескольких лет.

Благодаря установке в XXI веке стационарных сейсмических станций на арктических архипелагах Земля Франца-Иосифа и Северная Земля, появилась возможность регистрировать и изучать низкомagnitudeные рои землетрясений в пределах хребта Гаккеля уже не на телесейсмических расстояниях, а на более близких. Под роем будем понимать последовательность (группу) сейсмических событий, происходящих на локальной площади за относительно короткий период времени (от 1 до 15 суток, иногда до месяца), частота возникновения и magnitude которых слабо меняются со временем. В данной статье представлены первые результаты регистрации, локации и изучения роевых последовательностей низкомagnitudeных землетрясений в пределах хребта Гаккеля.

### Исходные данные и методы исследования

Сейсмический мониторинг хребта Гаккеля проводился на основе данных сейсмических станций сети АН (Архангельская сейсмическая сеть) [N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, 2002], функционирующих на архипелагах Земля Франца-Иосифа и Северная Земля в период с 2012 по 2022 гг. [Antonovskaya u др., 2020]. Дополнительно привлекались данные зарубежных станций, функционирующих преимущественно на архипелаге Шпицберген (рис. 1), через официальные сайты GEOFON [GEOFON, 2014] и ORFEUS [ORFEUS, 2022]. В данной работе анализируется каталог Архангельской сейсмической сети по хребту Гаккеля [Morozov u Vaganova, 2023], дополненный данными из каталога ISC.

При локации землетрясений хребта Гаккеля мы использовали годограф, рассчитанный в программе TauP [Crotwell u др., 1999] по скоростной модели NOES\_hybrid (табл. 1), представляющей собой улучшенную модификацию скоростной модели NOES зоны перехода «континент–океан» в Евразийской Арктике [Morozov u Vaganova, 2017].

Для оценки magnitude использовалась уточнённая шкала локальной magnitude ML для территории западной части Евразийской Арктики [Morozov u др., 2020].

**Таблица 1.** Параметры скоростной модели NOES\_hybrid

| Глубина, км | $V_P$ , км/с | $V_S$ , км/с | Примечание            |
|-------------|--------------|--------------|-----------------------|
| 0           | 4,30         | 2,36         |                       |
| 4           | 6,10         | 3,50         |                       |
| 15          | 6,90         | 3,85         |                       |
| 20          | 8,00         | 4,60         |                       |
| 71,5        | 8,10         | 4,65         |                       |
| 210         | 8,37         | 4,67         |                       |
| 260         | 8,60         | 4,80         |                       |
| >310        | 8,665        | 4,696        | ak135 [Kennett, 2005] |

В пределах хребта Гаккеля низкомagnitudeные землетрясения регистрируются малым количеством сейсмических станций из-за их удалённости – чаще одной-тремя станциями, редко более трех. Из-за этого большая часть землетрясений не попадает в сейсмические каталоги, т. к. достоверно выполнить локацию не представляется возможным. В нашем исследовании для землетрясений, которые регистрировались тремя и более станциями, параметры гипоцентров вычисляются в программе NAS (New Association System) [Asming u Prokudina, 2016; Fedorov u др., 2019], в усовершенствованном виде реализующей метод Generalized beamforming [Ringdal u Kverna, 1989]. Для

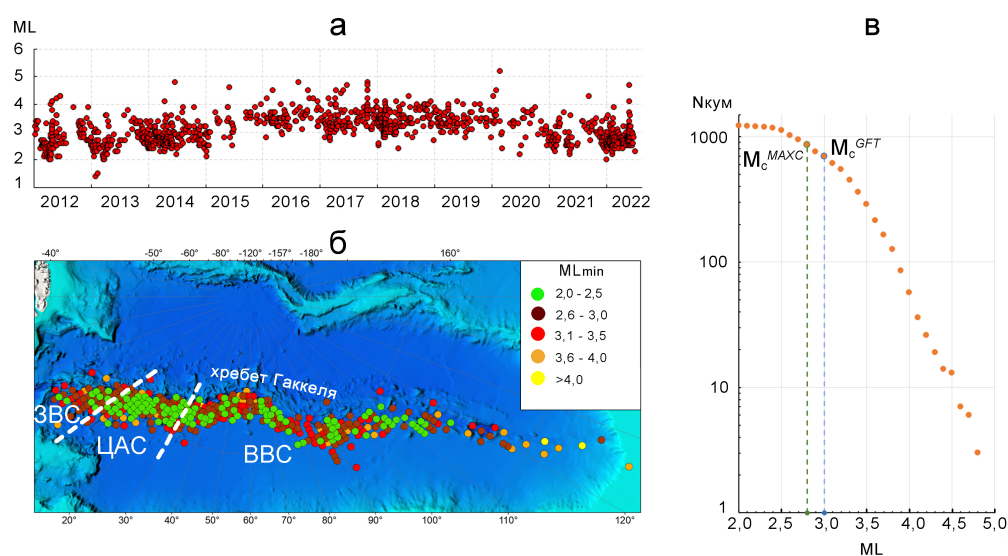
локации землетрясений, зарегистрированных только двумя станциями, используется программа WSG (Windows Seismic Grafer), разработанная ФИЦ ЕГС РАН [Акимов и Красилов, 2020]. Применяется метод «circle and chord» [Havskov и др., 2009], при котором эпицентр определяется по пересечению эпицентральных окружностей, рассчитанных по времени  $S-P$ .

При регистрации ограниченным числом станций роевых низкомагнитудных землетрясений применялся также метод локации относительно сильного землетрясения (arrival-time difference (ATD) technique) [Spence, 1980]. В процедуре ATD используется набор разностей времён прихода  $P$ - и  $S$ -волн. Эти разности получены по нескольким станциям, зарегистрировавшим опорное (мастер) событие с известными параметрами очага и соседнее событие с неизвестными параметрами. Если оба события расположены близко друг к другу (менее 10% от среднего гипоцентрального расстояния), их траектории луча почти одинаковы. В этом случае аномалии в скоростной модели пренебрежимо малы, а различия во времени прихода, как правило, связаны со смещением в пространстве соседнего события относительно опорного.

### Результаты исследования

Для разных фрагментов хребта Гаккеля техническая возможность регистрировать низкомагнитудные землетрясения появилась в разное время. С 2012 по 2015 гг. сейсмическими станциями, установленными на арх. Земля Франца-Иосифа, регистрировались землетрясения, прежде всего, из западной части хребта до  $80^\circ$  в. д. После введения в строй в 2016 г. стационарной сейсмической станции SVZ на арх. Северная Земля появилась техническая возможность регистрировать низкомагнитудные события в пределах хребта восточнее  $80^\circ$  в. д.

За период с 2012 по 2022 гг. в пределах хребта Гаккеля Архангельской сетью было зарегистрировано 1225 землетрясений с магнитудами  $ML$  от 2,0 до 5,2. На рис. 2а представлено распределение магнитуд зарегистрированных землетрясений по времени. Видно, что в период с 2015 по 2019 гг. значение минимальной регистрируемой магнитуды увеличивалось до значений  $ML_{\min} = 2,5$ , при том, что в предыдущие и последующие годы этот уровень был 2,0. Изменение значений минимальной магнитуды в разные периоды мы связываем со следующими факторами: постепенное введение в строй новых станций на арктических архипелагах, замена сейсмических датчиков на



**Рис. 2.** Распределение магнитуд землетрясений хребта Гаккеля: а – распределение магнитуд землетрясений по времени; б – распределение  $ML_{\min}$ ; в – кумулятивный график повторяемости для всего хребта и определения представительного уровня магнитуд.



станциях и корректировка амплитудно-частотной характеристики датчика на станции ZFI2, увеличение уровня техногенных шумов на ZFI2 и OMEGA в период с 2015 г. из-за возросшей хозяйственной деятельности на о. Земля Александры арх. Земля Франца-Иосифа. Из-за экстремальных условий эксплуатации возникшие технические неисправности на сейсмической аппаратуре невозможно решать оперативно и проводить плановые профилактические работы.

Пространственное распределение минимальной магнитуды рассчитывалось в ячейках размером  $1,5^\circ$  по широте и  $2,0^\circ$  по долготе. Преимущественно, землетрясения с самыми низкими значениями  $M_{L\min}$  от 2,0 до 2,5 регистрировались в пределах ЦАС и фрагментарно в BBC (рис. 26).

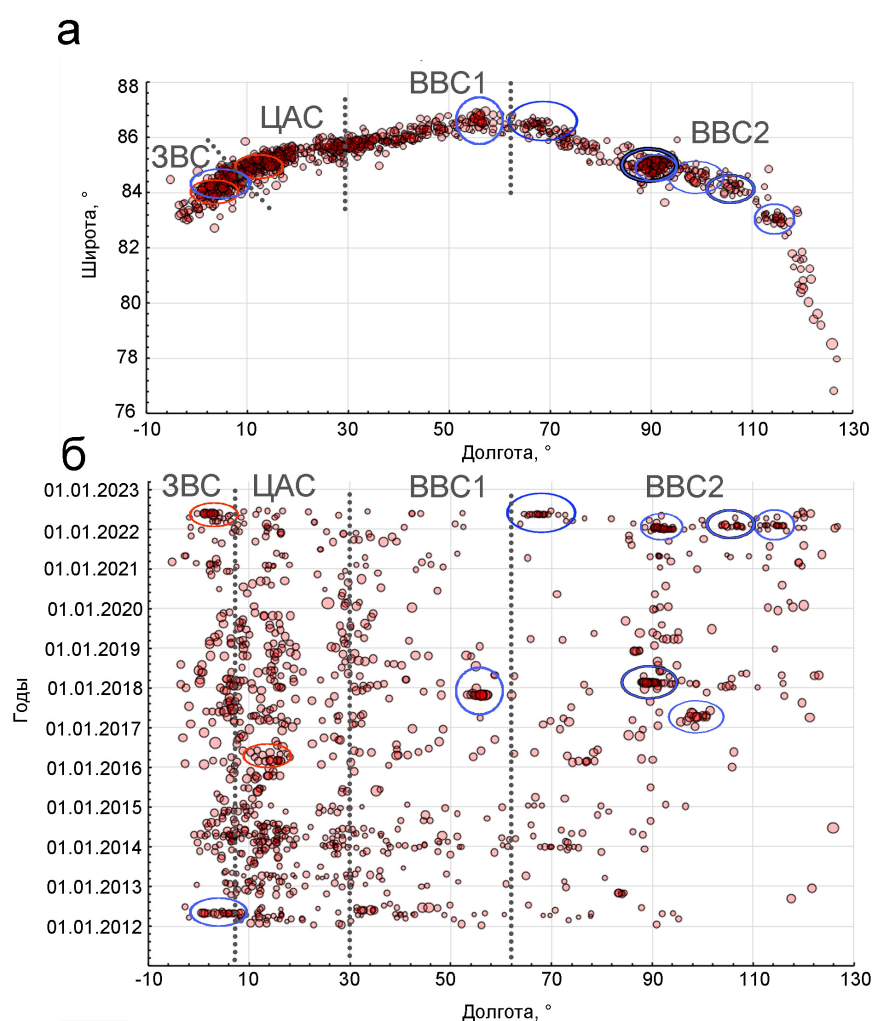
Значения представительной магнитуды  $M_c$  для всего хребта в целом (рис. 2в) рассчитывались двумя способами: методом MAXC (Maximum Curvature) и методом GFT (Goodness-of-Fit test) [Wiemer u Wyss, 2000]. А также значения  $M_c$  вычислялись отдельно для каждого сегмента – ЗВС, ЦАС и BBC. Для BBC значения  $M_c$  вычислялись отдельно для разных временных периодов: с 2012 по 2016 гг. и с 2017 по 2022 гг., и для разных участков сегмента: от  $30^\circ$  в. д. до  $62^\circ$  в. д. (BBC1) и от  $62^\circ$  в. д. до  $130^\circ$  в. д. (BBC2) (табл. 2). Результаты расчетов показали, что землетрясения регистрировались с представительными магнитудами от 2,5 до 3,3 в зависимости от участков и периода времени.

**Таблица 2.** Значения представительной магнитуды  $M_c$

| Сектор                               | Период времени     | Значение $M_c$ |           |
|--------------------------------------|--------------------|----------------|-----------|
|                                      |                    | Метод MAXC     | Метод GFT |
| ЗВС                                  | с 2012 по 2022 гг. | 3,0            | 3,0       |
| ЦАС                                  | с 2012 по 2022 гг. | 2,5            | 3,1       |
| BBC1                                 | с 2012 по 2016 гг. | 2,8            | 2,6       |
| $30^\circ$ в. д. – $62^\circ$ в. д.  | с 2017 по 2022 гг. | 3,3            | 3,2       |
| BBC2                                 | с 2012 по 2016 гг. | 2,5            | 3,0       |
| $62^\circ$ в. д. – $130^\circ$ в. д. | с 2017 по 2022 гг. | 2,5            | 2,9       |

Распределение эпицентров землетрясений, зарегистрированных в пределах хребта Гаккеля в период с 2012 по 2022 гг., показано на рис. 3а,б. Ранее в работе авторов [Morozov u др., 2021] были изучены особенности пространственно-временного распределения современной сейсмичности в пределах хребта. Как иллюстрирует рис. 3а,б, в общем потоке сейсмических событий визуально можно наблюдать периоды активизации сейсмичности и периоды затиший по времени, а также скопления и группы событий, локализующиеся в определенном ареале пространства.

Существует множество способов и приемов идентификации групповых (кластерных) землетрясений и разделения их на различные группы, относящиеся к афтершокам, форшокам, роям, и даже связанные с трассированием линейной трещиноватой структуры земной коры [Мурзоев, 1992; Молчан и Дмитриева, 1991; Смирнов, 2009; Шебалин, 2005; Frohlich u Davis, 1990]. Ограничением для применения стандартных методов в данном случае может служить тот фактор, что по исследуемой нами территории существующие каталоги могут быть немногочисленными, неполными, и энергетический уровень некоторых роев землетрясений может быть ниже уровня представительной магнитуды. Авторы считают, что к проблеме выделения роев землетрясений в общем каталоге арктического хребта Гаккеля нельзя подходить формально, и намерены решать эту задачу в ближайших исследованиях. В настоящем же исследовании мы попробовали применить алгоритм одиночных связей по [Frohlich u Davis, 1990], при котором из  $N$  землетрясений отдельные землетрясения сначала связываются со своими ближайшими соседями (в пространстве и времени), чтобы сформировать подгруппы событий. Затем процесс повторяется, и каждая подгруппа рекурсивно связывается со



**Рис. 3.** Распределение землетрясений хребта Гаккеля в пространстве и во времени: а – распределение землетрясений в пространстве; б – распределение землетрясений во времени. Овалами синего цвета выделены рои землетрясений, овалами красного цвета – афтершоковые последовательности.

своим ближайшим соседом, пока не будут найдены все звенья (группы), соединяющие все землетрясения.

Из общего каталога землетрясений, зарегистрированных в пределах хребта Гаккеля, нами были выделены 10 групп землетрясений, содержащих 8 и более событий. Далее, каждая из 10-ти групп исследовалась на наличие или отсутствие в ней главного сильного толчка. В случае, если группа событий имеет ярко выраженный сильный толчок с последующим убыванием числа событий в соответствии с законом Омори [Omori, 1894], то мы имеем дело с афтершоковой последовательностью. Если же частота и магнитуда событий слабо меняются со временем, то такое скопление будет являться роём землетрясений. Именно роевая сейсмичность хребта Гаккеля представляет для нас наибольший научный интерес. Две из 10-ти групп нами были квалифицированы как афтершоковые последовательности, остальные 8 групп – как рои (табл. 3).

Примечательно, что в Центральном амагматическом сегменте регистрируются преимущественно одиночные землетрясения. В этом сегменте хребта зафиксирована только одна группа землетрясений в марте 2016 г. в районе 84–85° с. ш., 12–16° в. д., состоящая из 8-ми событий, первое из которых имеет  $M_L = 4,5$ , а последующие события из группы имеют магнитуду на единицу меньше и убывающий характер по числу событий. Данную группу мы не можем квалифицировать как рой и определяем

**Таблица 3.** Параметры кластеров землетрясений хребта Гаккеля, выделенных из каталога за период 2012–2022 гг.

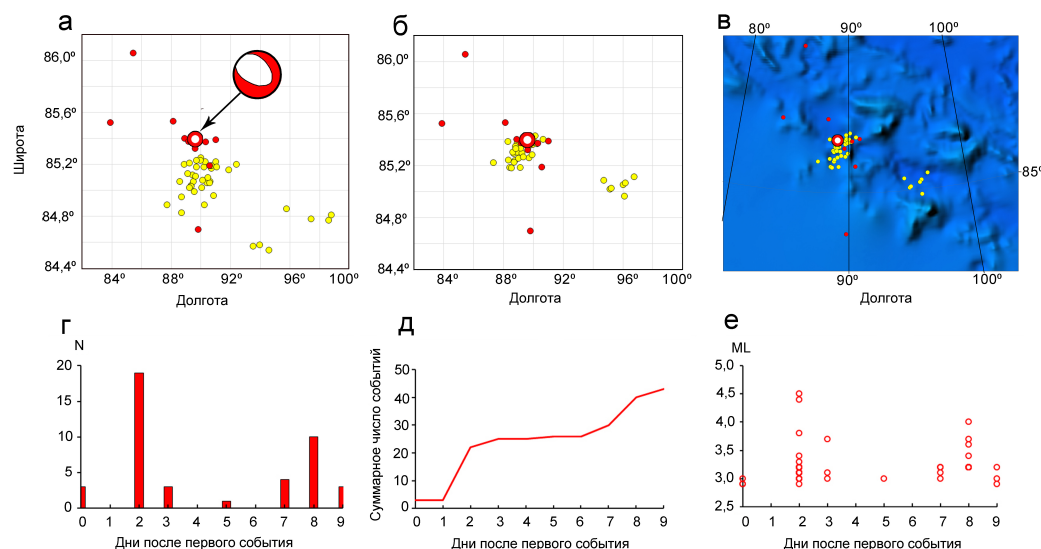
| № сегмента | Дата/продолжительность | Место                                | Число событий | Магнитуда $ML_{min}-ML_{max}$ | Тип рой/афтершоки                                  |
|------------|------------------------|--------------------------------------|---------------|-------------------------------|----------------------------------------------------|
| 1          | 19.04.2012–01.05.2012  | Lat 83,84–84,19<br>Lon –1,20–8,08    | 17            | 2,8–4,4                       | рой                                                |
| 2          | 01.03.2016–04.03.2016  | Lat 84,96–85,21<br>Lon 11,79–16,27   | 8             | 3,3–4,5                       | Афтершоки. Главный толчок 01.03.2016 г. $ML = 4,5$ |
| 3          | 07.04.2017–13.05.2017  | Lat 84,68–84,95<br>Lon 98,11–100,73  | 10            | 3,4–4,6                       | рой                                                |
| 4          | 28.10.2017–16.11.2017  | Lat 86,56–86,96<br>Lon 51,84–57,77   | 14            | 3,6–5,1                       | рой                                                |
| 5          | 20.01.2018–23.02.2018  | Lat 84,84–85,26<br>Lon 86,66–91,86   | 52            | 2,8–4,3                       | рой                                                |
| 6          | 29.12.2021–21.01.2022  | Lat 84,83–85,22<br>Lon 90,30–94,11   | 33            | 2,3–3,5                       | рой                                                |
| 7          | 09.01.2022–08.02.2022  | Lat 83,95–84,38<br>Lon 104,45–107,94 | 10            | 2,4–3,5                       | рой                                                |
| 8          | 31.01.2022–14.02.2022  | Lat 83,00–83,31<br>Lon 113,92–116,14 | 10            | 2,5–3,0                       | рой                                                |
| 9          | 04.05.2022–18.05.2022  | Lat 86,31–86,62<br>Lon 64,61–71,26   | 17            | 2,5–2,9                       | рой                                                |
| 10         | 21.05.2022–31.05.2022  | Lat 84,07–84,31<br>Lon 1,02–3,47     | 14            | 2,5–4,7                       | Афтершоки. Главный толчок 21.05.2022 г. $ML = 4,7$ |

её как афтершоковую последовательность (сегмент 2 из табл. 3). Отсутствие роевых землетрясений в пределах ЦАС может быть объяснено тем, что спрединг этого сегмента амагматичен. В структурообразовании этой части хребта преобладают тектонические, а не магматические и метаморфические процессы [Дубинин и др., 2013]. Ниже будут рассмотрены две крупные роевые последовательности низкомagnitudeных землетрясений, произошедшие в ВВС2 в феврале 2018 г. (Сегмент 5 из табл. 3) и в мае 2022 г. (Сегмент 9 из табл. 3).

#### Рой землетрясений в феврале 2018 г.

Рой был зарегистрирован на незначительном удалении от вулканического центра 85° в. д. Под вулканическим центром понимаются геологические образования на поверхности, указывающие на существование в данном пункте вулканического аппарата. В районе 85° в. д. в 1999 г. произошло уникальное и интересное явление, которое нашло своё отражение в большом количестве научных статей [Korger, 2013; Müller u Jokat, 2000; Riedel u Schlindwein, 2010; Tolstoy u др., 2001]. С января по сентябрь 1999 г. станциями мировой сети был зарегистрирован рой из 237 землетрясений с магнитудами  $m_b$  от 3,2 до 5,8, представляющий собой самый сильный из когда-либо зарегистрированных роёв в СОХ. Это произошло в месте, где скорость спрединга только около 10 мм в год. Благодаря анализу геофизических данных экспедиций «SCICEX», «AMORE2001» и «AGAVE», а также анализу волновых форм станций мировой сети [Müller u Jokat, 2000; Riedel u Schlindwein, 2010], показано явное свидетельство мощного взрывного вулканизма на глубине около 4000 м.

Рой в феврале 2018 г. состоял первоначально из 52 землетрясений, среди которых только 11 были зарегистрированы станциями мировой сети. Остальные события являются низкомagnitudeными и были зарегистрированы арктическими станциями на архипелагах Шпицберген, Земля Франца-Иосифа и Северная Земля, причем 18 землетрясений – только двумя станциями.



**Рис. 4.** Графики, отображающие следующие характеристики роя землетрясений в феврале 2018 г.: а – распределение эпицентров до применения метода ATD; б – распределение эпицентров после применения метода ATD; в – распределение эпицентров после применения метода ATD на батиметрической карте. Красные кружки – эпицентры землетрясений по данным ISC, желтые кружки – эпицентры низкомagnitudeных землетрясений, для которых применялся метод ATD; г – количество землетрясений в рое по дням; д – распределение кумулятивного числа событий; е – распределение магнитуды событий во времени.

Для 11 землетрясений из роя, которые были зарегистрированы станциями мировой сети, параметры очагов брались из базы данных ISC [*International Seismological Centre (ISC), 1964*]. Остальные 41 землетрясение были переложены относительно сильного толчка 16 февраля 2018 г. 10:02 (UTC) с магнитудой  $M_w(\text{GCMT}) = 5,0$ . Это землетрясение было выбрано также по причине того, что параметры очага, вычисленные в разных сейсмологических Центрах, существенно не отличаются друг от друга. Эпицентры по разным данным находятся в пределах эллипсов ошибок. За основу были взяты параметры International Data Center (CTBTO) [*The Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (CTBTO), 1996*].

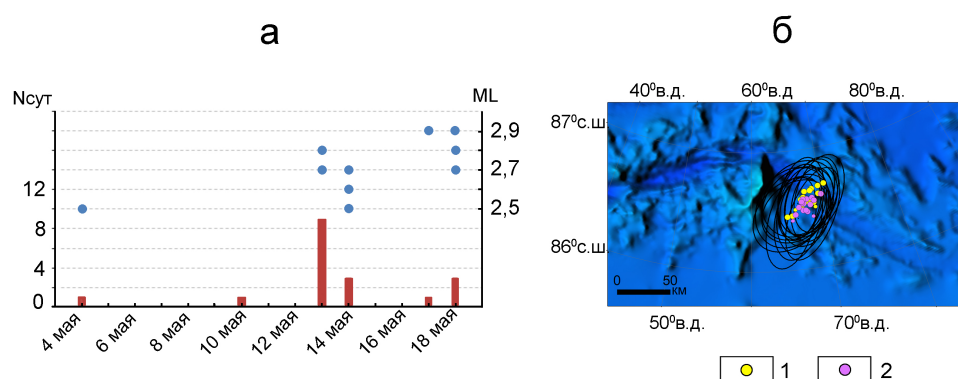
На рис. 4а–в показано исходное расположение эпицентров землетрясений, которые в сейсмическом каталоге сети АН были отнесены к одному рою. После релокации относительно сильного землетрясения, эпицентры четко сформировали два роя. Первый рой состоит из 7 землетрясений с  $ML$  от 3,0 до 3,3, которые произошли в течение двух дней 7 и 8 февраля. Второй рой состоит из 47 землетрясений с  $ML$  от 2,8 до 4,5, которые произошли в течение 10 дней с 14 по 23 февраля. Два землетрясения, которые были зарегистрированы станциями мировой сети, были исключены из второго роя, т. к. их эпицентры значительно удалены, и их эллипсы ошибок не пересекают область роя. При этом во втором рое землетрясения происходили неравномерно по времени (рис. 4г–е), большинство землетрясений произошло в течение 16 и 22 февраля.

Для сильного землетрясения 16 февраля 2018 года 10:02 (UTC), входящего в рой, в каталоге Global CMT [*Dziewonski u Anderson, 1981; Global CMT Catalog, 2013*] есть решение по фокальному механизму. Это землетрясение ясно демонстрирует механизм очага растяжения, характерный для сбросовых разломов, что вполне можно ожидать в срединно-океанических рифтовых системах.

#### Рой землетрясений в мае 2022 г.

В мае 2022 г. на удалении примерно 230 км в северо-западном направлении от роя 2018 г. зарегистрирован еще один крупный рой, состоящий из 17 землетрясений с магнитудами  $ML \geq 2,5$ . Большинство событий произошло 13 мая (рис. 5а), рой не





**Рис. 5.** Рой землетрясений в мае 2022 г. а – распределение землетрясений по дням и их магнитуда  $ML$ ; б – локация эпицентров в программе NAS по алгоритму Generalized beamforming (1) и методом относительной локации ADT (2).

имеет четко выраженного главного сильного толчка. Метод релокации применялся относительно землетрясения 17 мая 2022 г. 22:15 (UTC) с  $ML = 2,9$ . Это землетрясение было зарегистрировано 10-ю сейсмическими станциями.

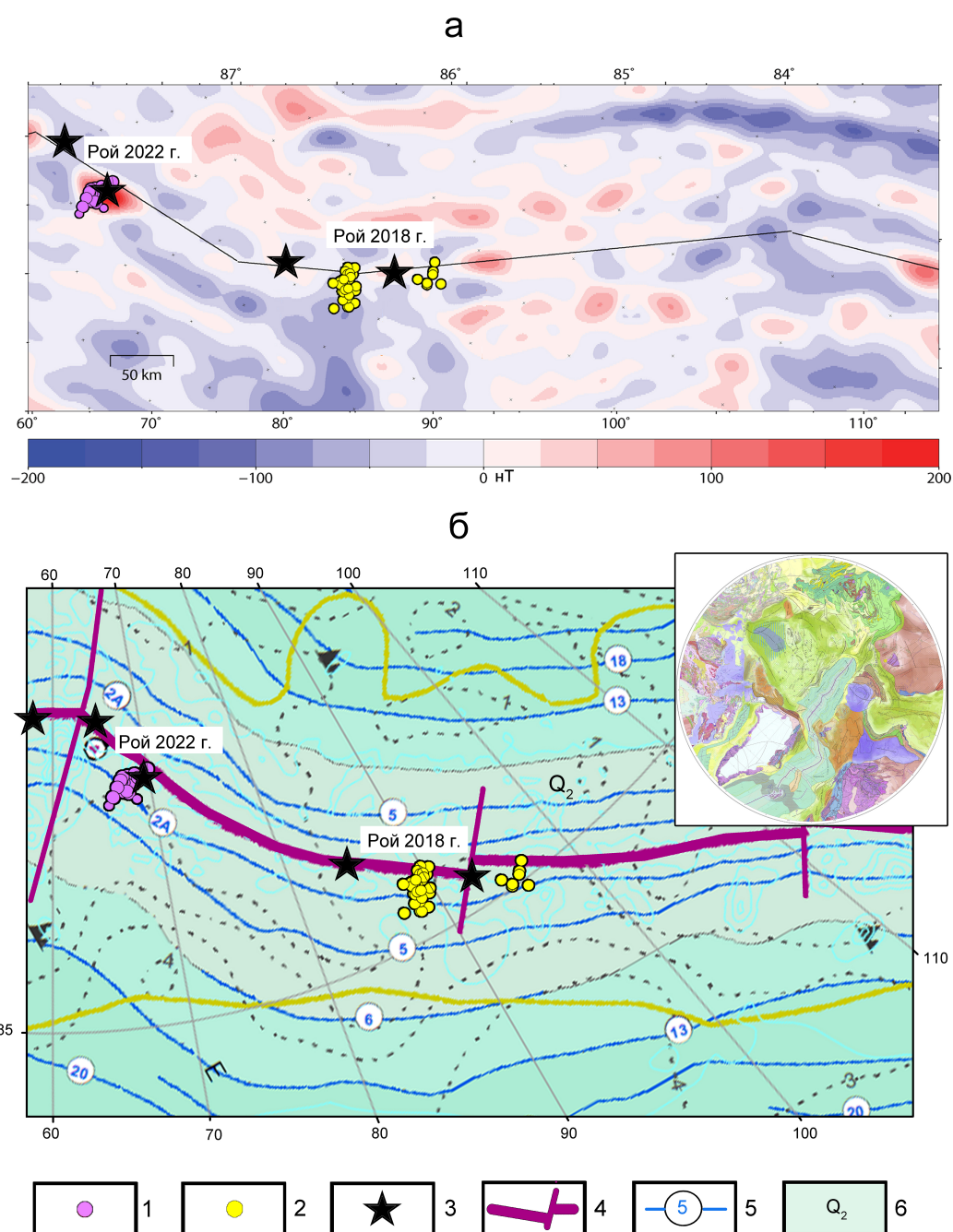
Метод относительной локации упорядочил компоновку эпицентров. Рой представляет из себя скопление эпицентров в форме продолговатого облака, расположенного восточнее поперечного поднятия, и вытянутое субпараллельно ему (рис. 5б). Размеры малой полуоси эллипсов ошибок лежат в диапазоне от 19 до 35 км, большой полуоси – от 33 до 45 км.

Согласно карте магнитных аномалий EMAG2, составленной на основе спутниковых, воздушных и морских магнитных измерений [Maus и др., 2009], рой 2022 г. лежит в области положительной магнитной аномалии интенсивностью до 200 нТ (рис. 6а), обусловленной процессами магматической интрузии, в то время как рой 2018 г. лоцируется в области слабой отрицательной магнитной аномалии. В осевой зоне распределение положительных и отрицательных аномалий совпадает с ритмом инверсий главного геомагнитного поля. Гипотеза разрастания океанического дна (sea-floor spreading) [Hess, 1962] связывает возникновение аномалий разного знака с процессом намагничивания глубинного вещества базальтового состава, поступающего к поверхности на оси срединных поднятий, при различных полярностях геомагнитного поля и с последующим горизонтальным отодвижением источников с различным знаком намагниченности от оси срединного поднятия. Всё это свидетельствует о растянутой во времени пульсационной истории формирования рифтовой зоны хребта Гаккеля и не может быть объяснено простой моделью спрединга северо-атлантического типа [Рекант и Гусев, 2016]. Согласно тектонической карте [Petrov и др., 2016], оба роя расположены в зоне активных разломов и вблизи вулканических центров (рис. 6б).

### Обсуждение результатов и выводы

Анализ результатов сейсмического мониторинга срединно-арктического хребта Гаккеля на основе данных сейсмических станций, функционирующих на архипелагах Земля Франца-Иосифа и Северная Земля (код сети АН), в период с 2012 по 2022 гг. показал, что землетрясения в пределах хребта регистрировались с минимальной магнитудой  $ML$  от 2,0 и с представительными магнитудами от 2,5 до 3,3 в зависимости от участков и периода времени. Это позволяет изучать группирующиеся землетрясения и низкомagnitudeные роевые последовательности землетрясений в пределах ультрамедленного хребта Гаккеля. Активные процессы спрединга ультрамедленных хребтов Гаккеля и юго-западного Индийского ещё слабо изучены из-за своей удалённости.

За период наблюдений выделены группирующиеся землетрясения, среди которых наблюдаются как афтершоковые, так и роевые последовательности низкомagnitudeных землетрясений. При этом в Центральном амагматическом сегменте роев землетря-



**Рис. 6.** Фрагменты карты магнитной аномалии EMAG2 по [Maus и др., 2009] (а) и тектонической карты по [Petrov и др., 2016] (б): 1 – локация роя 2022 г. методом ADT; 2 – локация роя 2018 г. методом ADT; 3 – вулканические центры; 4 – ось хребта Гаккеля и активные разломы; 5 – магнитные аномалии и их номера; 6 – области с геологическим промежутком времени Q<sub>2</sub> ранний миоцен – ранний плиоцен.

сений не зафиксировано, в этом сегменте хребта регистрируются преимущественно одиночные землетрясения, а также выделены афтершоки после главного сильного толчка 1 марта 2016 г. Отсутствие роевых землетрясений в пределах ЦАС может быть объяснено тем, что спрединг этого сегмента амагматичен. В центральной части хребта рифтовая долина трансформируется в амагматичный трог с пологими склонами и редкими морфологическими проявлениями вулканизма [Koxan, 2013]. В структурообразовании этой части хребта преобладают тектонические, а не магматические

и метаморфические процессы [Дубинин и др., 2013]. Рои землетрясений регистрируются преимущественно в Восточном вулканическом сегменте на фоне восстановления вулканической активности.

На первом этапе рассмотрены две роевые последовательности, зарегистрированные в феврале 2018 г. и в мае 2022 г. Оба роя не имеют главного сильного толчка и произошли на локальной площади. Рой в феврале 2018 г. состоит из 53 землетрясений с магнитудами от 2,9 до 4,5, эпицентры которых сосредоточены в районе 85° в. д. в непосредственной близости от вулканического центра. Рой в мае 2022 г. состоит из 17 землетрясений с магнитудами от 2,5 до 2,9, и эпицентры расположены в районе 64–71° в. д., чуть восточнее поперечного субмеридионального поднятия, протягивающегося в обе стороны от рифтовой долины.

Рой мая 2022 г. лежит в области интенсивной положительной аномалии, обусловленной процессами магматической интрузии. Основной чертой рельефа данной части хребта является наличие крупных поднятий, перпендикулярных рифтовой оси. В пределах днища рифтовой долины этим поднятиям соответствуют вулканические хребты высотой до 1,5–2 км и длиной 20–35 км. Рой землетрясений мая 2022 г. можно приурочить к участкам с четкими признаками вулканических структур.

Напротив, роевое облако февраля 2018 г. совпадает с участком магнитной аномалии отрицательного знака. Фокальный механизм очага одного из землетрясений 16 февраля 2018 г. 10:03 (UTC) показывает механизм растяжения, характерный для сбросовых разломов. При этом рой произошёл вблизи активного разлома, с высокой концентрацией упругих напряжений, с ортогональным по отношению к оси рифтовой долины направлением. Заметные отличия в условиях, при которых произошли данные рои, свидетельствуют о более сложных причинно-следственных связях между сейсмичностью, магматизмом и крупными разломами. Возможно, крупные разломы играют роль проводящих путей при распространении магмы вдоль оси, порождая движение флюидов в магматических очагах и вулканическую сейсмичность.

Зарегистрированные рои являются свидетельством проявления эндогенных процессов (тектонических, магматических и метаморфических) и отражают особенности аккреции коры и структурообразования. Авторы придерживаются мнения, что роевая сейсмичность ультрамедленного спредингового хребта Гаккеля не может быть описана простой моделью вулканизма и магматического вторжения в симметричный рифт, а скорее является результатом сложного взаимодействия даек и разрывных нарушений с переносом магмы по разломам, потенциально играющим важную роль.

**Благодарности.** Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-27-00190 «Рои низкомagnitudeных землетрясений на ультрамедленном спрединговом хребте Гаккеля в Арктике – индикатор современного магматизма и внедрения даек?»

## Список литературы

- Аветисов Г. П. Сейсмоактивные зоны Арктики. — СПб : ВНИИОкеангеология, 1996. — С. 185.
- Акимов А. П., Красилов С. А. Программный комплекс WSG «Система обработки сейсмических данных». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664678 от 16.11.2020 г. — 2020.
- Гуревич В. Ю., Астафурова Н. И., Глебовский Е. Г. и др. Некоторые особенности аккреции коры у оси западной части ультранизкоскоростного хребта Гаккеля, Северный Ледовитый океан // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. — 2004. — Т. 5. — С. 87–97.
- Дубинин Е. П., Кохан А. В., Суцевская Н. М. Тектоника и магматизм ультрамедленных спрединговых хребтов // Геотектоника. — 2013. — Вып. 3, № 3. — С. 3–30. — DOI: [10.7868/s0016853x13030028](https://doi.org/10.7868/s0016853x13030028).
- Кохан А. В. Морфология рифтовых зон ультрамедленного спрединга (хребты Рейкьянес, Книповича и Гаккеля) // Вестник Московского университета. Серия 5: География. — 2013. — Т. 2. — С. 61–69.
- Мирзоев К. М. Рекомендации по выделению групповых землетрясений // Вопросы инженерной сейсмологии (Инженерно-сейсмологические исследования для районирования сейсмической опасности). — 1992. — Т. 33. — С. 53–57.

- Молчан Г. М., Дмитриева О. Е. Идентификация афтершоков: обзор и новые подходы // Современные методы интерпретации сейсмологических данных. Вычислительная сейсмология. Т. 24. — Москва : Наука, 1991. — С. 19–50.
- Морозов А. Н., Ваганова Н. В. Годографы региональных волн Р и S для районов спрединговых хребтов Евро-Арктического региона // Вулканология и сейсмология. — 2017. — № 2. — С. 59–67. — DOI: [10.7868/s0203030617020055](https://doi.org/10.7868/s0203030617020055).
- Морозов А. Н., Ваганова Н. В., Асминг В. Э. и др. Шкала ML для западной части Евразийской Арктики // Российский сейсмологический журнал. — 2020. — Т. 2, № 4. — С. 63–68. — DOI: [10.35540/2686-7907.2020.4.06](https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.4.06).
- Рекант П. В., Гусев Е. А. Структура и история формирования осадочного чехла рифтовой зоны хребта Гаккеля (Северный Ледовитый океан) // Геология и геофизика. — 2016. — Т. 57, № 9. — С. 1634–1640. — DOI: [10.15372/gig20160903](https://doi.org/10.15372/gig20160903).
- Смирнов В. Б. Прогностические аномалии сейсмического режима. I. Методические основы подготовки исходных данных // Геофизические исследования. — 2009. — Т. 10, № 2. — С. 7–22.
- Шебалин П. Н. Цепочки эпицентров как индикатор возрастания радиуса корреляции сейсмичности перед сильными землетрясениями // Вулканология и сейсмология. — 2005. — № 1. — С. 3–15.
- Antonovskaya G., Morozov A., Vaganova N., et al. Seismic monitoring of the European Arctic and Adjoining Regions // The Arctic. Current Issues and Challenges. — 2020. — P. 303–368.
- Asming V., Prokudina A. System for automatic detection and location of seismic events for arbitrary seismic station configuration NSDL // European Seismological Commission. — 2016. — P. 2016–373.
- Bohnenstiehl D. R., Dziak R. P. Mid-ocean ridge seismicity // Encyclopedia of Ocean Sciences / ed. by J. Steele, S. Thorpe, K. Turekian. — London : Academic Press, 2008.
- Cochran J. R. Seamount volcanism along the Gakkel Ridge, Arctic Ocean // Geophysical Journal International. — 2008. — Vol. 174, no. 3. — P. 1153–1173. — DOI: [10.1111/j.1365-246x.2008.03860.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2008.03860.x).
- Crotwell H. P., Owens T. J., Ritsema J. The TauP Toolkit: Flexible Seismic Travel-Time and Raypath Utilities // Seismological Research Letters. — 1999. — Vol. 70, no. 2. — P. 154–160. — DOI: [10.1785/gssrl.70.2.154](https://doi.org/10.1785/gssrl.70.2.154).
- Dziewonski A. M., Anderson D. L. Preliminary reference Earth model // Physics of the Earth and Planetary Interiors. — 1981. — Vol. 25, no. 4. — P. 297–356. — DOI: [10.1016/0031-9201\(81\)90046-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(81)90046-7).
- Edwards M. H., Kurras G. J., Tolstoy M., et al. Evidence of recent volcanic activity on the ultraslow-spreading Gakkel ridge // Nature. — 2001. — Vol. 409, no. 6822. — P. 808–812. — DOI: [10.1038/35057258](https://doi.org/10.1038/35057258).
- Engen Ø., Eldholm O., Bungum H. The Arctic plate boundary // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. — 2003. — Vol. 108, B2. — P. 1–17. — DOI: [10.1029/2002jb001809](https://doi.org/10.1029/2002jb001809).
- Fedorov A. V., Asming V. E., Jevtjugina Z. A., et al. Automated Seismic Monitoring System for the European Arctic // Seismic Instruments. — 2019. — Vol. 55, no. 1. — P. 17–23. — DOI: [10.3103/s0747923919010067](https://doi.org/10.3103/s0747923919010067).
- Fox C. G., Radford W. E., Dziak R. P., et al. Acoustic detection of a seafloor spreading episode on the Juan de Fuca Ridge using military hydrophone arrays // Geophysical Research Letters. — 1995. — Vol. 22, no. 2. — P. 131–134. — DOI: [10.1029/94gl02059](https://doi.org/10.1029/94gl02059).
- Frohlich C., Davis S. D. Single-link cluster analysis as a method to evaluate spatial and temporal properties of earthquake catalogues // Geophysical Journal International. — 1990. — Vol. 100, no. 1. — P. 19–32. — DOI: [10.1111/j.1365-246x.1990.tb04564.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1990.tb04564.x).
- GEOFON. — 2014. — URL: <https://geofon.gfz-potsdam.de/> (visited on 03/31/2023).
- Global CMT Catalog. — 2013. — URL: <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html> (visited on 03/31/2023).
- Havskov J., Bormann P., Schweitzer J. Earthquake location // New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP). — Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 2009. — P. 1–28.
- Hess H. H. Petrologie Studies. A Volume in Honour of Buddington. — New York : The Geological Society of American, 1962. — P. 660.
- International Seismological Centre (ISC). — 1964. — URL: <http://www.isc.ac.uk/> (visited on 03/31/2023).
- Kennett B. L. N. Seismological tables: ak135. — Australia, Canberra : Research School of Earth Sciences. Australian National University, 2005. — P. 289.
- Korger E. I. Seismicity and structure of a magmatic accretionary centre at an ultraslow spreading ridge: The volcanic centre at 85E/85N, Gakkel Ridge. — University of Bremen, 2013. — P. 159.
- Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H., et al. EMAG2: A 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. — 2009. — Vol. 10, no. 8. — P. 08005. — DOI: [10.1029/2009gc002471](https://doi.org/10.1029/2009gc002471).



- Michael P. J., Langmuir C. H., Dick H. J. B., *et al.* Magmatic and amagmatic seafloor generation at the ultraslow-spreading Gakkel ridge, Arctic Ocean // *Nature*. — 2003. — Vol. 423, no. 6943. — P. 956–961. — DOI: [10.1038/nature01704](https://doi.org/10.1038/nature01704).
- Morozov A., Vaganova N. Earthquake catalog of the Gakkel mid-ocean ridge (Arctic Ocean) according to the data of the Arkhangelsk seismic network (AH code) for the period from 2013 to 2022. — 2023. — DOI: [10.31905/smupnwep](https://doi.org/10.31905/smupnwep).
- Morozov A. N., Vaganova N. V., Antonovskaya G. N., *et al.* Low-Magnitude Earthquakes at the Eastern Ultraslow-Spreading Gakkel Ridge, Arctic Ocean // *Seismological Research Letters*. — 2021. — Vol. 92, no. 4. — P. 2221–2233. — DOI: [10.1785/0220200308](https://doi.org/10.1785/0220200308).
- Müller C., Jokat W. Seismic evidence for volcanic activity discovered in central Arctic // *Eos, Transactions American Geophysical Union*. — 2000. — Vol. 81, no. 24. — P. 265. — DOI: [10.1029/00eo00186](https://doi.org/10.1029/00eo00186).
- N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research. Arkhangelsk Seismic Network. — 2002. — DOI: [10.7914/SN/AH](https://doi.org/10.7914/SN/AH).
- Omori F. On aftershocks of earthquakes // *Journal of the College of Science*. — 1894. — Vol. 7. — P. 111–200.
- ORFEUS. — 2022. — URL: <https://orfeus-eu.org/> (visited on 05/12/2022).
- Petrov O., Morozov A., Shokalsky S., *et al.* Crustal structure and tectonic model of the Arctic region // *Earth-Science Reviews*. — 2016. — Vol. 154. — P. 29–71. — DOI: [10.1016/j.earscirev.2015.11.013](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.11.013).
- Reves-Sohn R., Edmonds H., Humphris S., *et al.* Scientific scope and summary of the Arctic Gakkel vents (AGAVE) expedition // *EOS Transactions American Geophysical Union*. Vol. 1. — American Geophysical Union, 2007. — P. 7.
- Riedel C., Schlindwein V. Did the 1999 earthquake swarm on Gakkel Ridge open a volcanic conduit? A detailed teleseismic data analysis // *Journal of Seismology*. — 2010. — Vol. 14, no. 3. — P. 505–522. — DOI: [10.1007/s10950-009-9179-6](https://doi.org/10.1007/s10950-009-9179-6).
- Ringdal F., Kväerna T. A multi-channel processing approach to real time network detection, phase association, and threshold monitoring // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 1989. — Vol. 79, no. 6. — P. 1927–1940. — DOI: [10.1785/BSSA0790061927](https://doi.org/10.1785/BSSA0790061927).
- Schlindwein V. Teleseismic earthquake swarms at ultraslow spreading ridges: indicator for dyke intrusions? // *Geophysical Journal International*. — 2012. — Vol. 190, no. 1. — P. 442–456. — DOI: [10.1111/j.1365-246x.2012.05502.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2012.05502.x).
- Schlindwein V., Demuth A., Korger E., *et al.* Seismicity of the Arctic mid-ocean Ridge system // *Polar Science*. — 2015. — Vol. 9, no. 1. — P. 146–157. — DOI: [10.1016/j.polar.2014.10.001](https://doi.org/10.1016/j.polar.2014.10.001).
- Schmid F., Schlindwein V., Koulakov I., *et al.* Magma plumbing system and seismicity of an active mid-ocean ridge volcano // *Scientific Reports*. — 2017. — Vol. 7, no. 1. — DOI: [10.1038/srep42949](https://doi.org/10.1038/srep42949).
- Spence W. Relative epicenter determination using P-wave arrival-time differences // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 1980. — Vol. 70, no. 1. — P. 171–183. — DOI: [10.1785/BSSA0700010171](https://doi.org/10.1785/BSSA0700010171).
- Tarasewicz J., Brandsdóttir B., White R. S., *et al.* Using microearthquakes to track repeated magma intrusions beneath the Eyjafjallajökull stratovolcano, Iceland // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. — 2012. — Vol. 117, B9. — P. 1–13. — DOI: [10.1029/2011jb008751](https://doi.org/10.1029/2011jb008751).
- The Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (CTBTO). — 1996. — URL: <https://www.ctbto.org/> (visited on 03/31/2023).
- Thiede J., Oerter H. The Expedition ANTARKTIS XVII/2 of the Research Vessel POLARSTERN in 2000. Vol. 404. — Bremerhaven : Alfred Wegener Institute for Polar, Marine Research, 2002. — P. 245.
- Tolstoy M., Bohnenstiehl D. R., Edwards M. H., *et al.* Seismic character of volcanic activity at the ultraslow-spreading Gakkel Ridge // *Geology*. — 2001. — Vol. 29, no. 12. — P. 1139. — DOI: [10.1130/0091-7613\(2001\)029<1139:scovaa>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<1139:scovaa>2.0.co;2).
- Wanless V. D., Behn M. D., Shaw A. M., *et al.* Variations in melting dynamics and mantle compositions along the Eastern Volcanic Zone of the Gakkel Ridge: insights from olivine-hosted melt inclusions // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. — 2014. — Vol. 167, no. 5. — P. 1–22. — DOI: [10.1007/s00410-014-1005-7](https://doi.org/10.1007/s00410-014-1005-7).
- Wiemer S., Wyss M. Minimum Magnitude of Completeness in Earthquake Catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 2000. — Vol. 90, no. 4. — P. 859–869. — DOI: [10.1785/0119990114](https://doi.org/10.1785/0119990114).

# MODERN LOW-MAGNITUDE EARTHQUAKE SWARMS OF THE GAKKEL MID-OCEANIC RIDGE, ARCTIC OCEAN

A. N. Morozov<sup>\*\*1,2</sup> , N. V. Vaganova<sup>2</sup> , I. V. Starkov<sup>2,3</sup> , Y. A. Mikhaylova<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup>N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, Russia

<sup>3</sup>Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

**\*\*Correspondence to:** Alexei N. Morozov, morozovalexey@yandex.ru

Earthquakes at mid-ocean ridges (MOR) reflect the active magmatic and tectonic processes that form new oceanic crust. Active spreading processes of ultraslow ridges, with spreading rates of less than 20 mm/yr, are still poorly understood compared to the MOR in the Atlantic and Pacific oceans, with spreading rates of more than 25 mm/yr. Thanks to the installation of stationary seismic stations in the 21st century on the Arctic archipelagos of Franz Josef Land and Severnaya Zemlya, it became possible to record and study low-magnitude grouping earthquakes within the Gakkel Ridge, including swarm sequences of earthquakes. This article presents the first results of registration, location and study of swarm sequences of low-magnitude earthquakes within the Gakkel Ridge for the period from 2012 to 2022. It is shown that swarm sequences are recorded to a greater extent in the western volcanic and eastern volcanic segments of the ridge, while no such sequences were found within the central amagmatic segment. The structure formation of this part of the ridge is dominated by tectonic rather than magmatic and metamorphic processes. Two large swarm of low-magnitude earthquakes that occurred in the eastern volcanic segment of the ridge are considered in detail.

**Keywords:** Gakkel Ridge, low-magnitude earthquakes, Arctic, earthquake swarm, Arctic Ocean

**Citation:** Morozov, A. N., N. V. Vaganova, I. V. Starkov, Y. A. Mikhaylova (2023), Modern Low-Magnitude Earthquake Swarms of the Gakkel Mid-Oceanic Ridge, Arctic Ocean, *Russ. J. Earth. Sci.*, 23, ES3007, <https://doi.org/10.2205/2023ES000843>

## References

- Akimov A. P., Krasilov S. A. Software complex WSG "Seismic Data Processing System". Certificate of state registration of the computer program No 2020664678 dated November 16, 2020. — 2020. — (in Russian).
- Antonovskaya G., Morozov A., Vaganova N., *et al.* Seismic monitoring of the European Arctic and Adjoining Regions // The Arctic. Current Issues and Challenges. — 2020. — P. 303–368.
- Asming V., Prokudina A. System for automatic detection and location of seismic events for arbitrary seismic station configuration NSDL // European Seismological Commission. — 2016. — P. 2016–373.
- Avetisov G. P. Seismically active zones of the Arctic. — SPb : VNIIOkeangeologiya, 1996. — P. 185. — (in Russian).
- Bohnenstiehl D. R., Dziak R. P. Mid-ocean ridge seismicity // Encyclopedia of Ocean Sciences / ed. by J. Steele, S. Thorpe, K. Turekian. — London : Academic Press, 2008.
- Cochran J. R. Seamount volcanism along the Gakkel Ridge, Arctic Ocean // Geophysical Journal International. — 2008. — Vol. 174, no. 3. — P. 1153–1173. — DOI: [10.1111/j.1365-246x.2008.03860.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2008.03860.x).
- Crotwell H. P., Owens T. J., Ritsema J. The TauP Toolkit: Flexible Seismic Travel-Time and Raypath Utilities // Seismological Research Letters. — 1999. — Vol. 70, no. 2. — P. 154–160. — DOI: [10.1785/gssrl.70.2.154](https://doi.org/10.1785/gssrl.70.2.154).
- Dubinin E. P., Kokhan A. V., Sushchevskaya N. M. Tectonics and Magmatism of Ultra Slow Spreading Ridges // Geotectonics. — 2013. — Issue 3, no. 3. — P. 3–30. — DOI: [10.7868/s0016853x13030028](https://doi.org/10.7868/s0016853x13030028). — (in Russian).
- Dziewonski A. M., Anderson D. L. Preliminary reference Earth model // Physics of the Earth and Planetary Interiors. — 1981. — Vol. 25, no. 4. — P. 297–356. — DOI: [10.1016/0031-9201\(81\)90046-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(81)90046-7).

- Edwards M. H., Kurras G. J., Tolstoy M., *et al.* Evidence of recent volcanic activity on the ultraslow-spreading Gakkel ridge // *Nature*. — 2001. — Vol. 409, no. 6822. — P. 808–812. — DOI: [10.1038/35057258](https://doi.org/10.1038/35057258).
- Engen Ø., Eldholm O., Bungum H. The Arctic plate boundary // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. — 2003. — Vol. 108, B2. — P. 1–17. — DOI: [10.1029/2002jb001809](https://doi.org/10.1029/2002jb001809).
- Fedorov A. V., Asming V. E., Jevtjugina Z. A., *et al.* Automated Seismic Monitoring System for the European Arctic // *Seismic Instruments*. — 2019. — Vol. 55, no. 1. — P. 17–23. — DOI: [10.3103/s0747923919010067](https://doi.org/10.3103/s0747923919010067).
- Fox C. G., Radford W. E., Dziak R. P., *et al.* Acoustic detection of a seafloor spreading episode on the Juan de Fuca Ridge using military hydrophone arrays // *Geophysical Research Letters*. — 1995. — Vol. 22, no. 2. — P. 131–134. — DOI: [10.1029/94gl02059](https://doi.org/10.1029/94gl02059).
- Frohlich C., Davis S. D. Single-link cluster analysis as a method to evaluate spatial and temporal properties of earthquake catalogues // *Geophysical Journal International*. — 1990. — Vol. 100, no. 1. — P. 19–32. — DOI: [10.1111/j.1365-246x.1990.tb04564.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1990.tb04564.x).
- GEOFON. — 2014. — (date of access: 31.03.2023). <https://geofon.gfz-potsdam.de/>.
- Global CMT Catalog. — 2013. — (date of access: 31.03.2023). <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>.
- Gurevich V. Y., Astafurova N. I., Glebovsky E. G., *et al.* Some peculiarities of crustal accretion near the axis of the western part of the ultra-low velocity Gakkel Ridge, Arctic Ocean // *Geological and geophysical characteristics of the lithosphere of the Arctic region*. — 2004. — Vol. 5. — P. 87–97. — (in Russian).
- Havskov J., Bormann P., Schweitzer J. Earthquake location // *New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP)*. — Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 2009. — P. 1–28.
- Hess H. H. — New York : The Geological Society of American, 1962. — P. 660.
- International Seismological Centre (ISC). — 1964. — (date of access: 31.03.2023). <http://www.isc.ac.uk/>.
- Kennett B. L. N. Seismological tables: ak135. — Australia, Canberra : Research School of Earth Sciences. Australian National University, 2005. — P. 289.
- Kokhan A. V. Morphology of ultra-slow spreading rift zones (Reykjanes, Knipovich and Gakkel ridges) // *Bulletin of the Moscow University. Series 5: Geography*. — 2013. — Vol. 2. — P. 61–69. — (in Russian).
- Korger E. I. Seismicity and structure of a magmatic accretionary centre at an ultraslow spreading ridge: The volcanic centre at 85°E/85°N, Gakkel Ridge. — University of Bremen, 2013. — P. 159.
- Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H., *et al.* EMAG2: A 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. — 2009. — Vol. 10, no. 8. — P. 08005. — DOI: [10.1029/2009gc002471](https://doi.org/10.1029/2009gc002471).
- Michael P. J., Langmuir C. H., Dick H. J. B., *et al.* Magmatic and amagmatic seafloor generation at the ultraslow-spreading Gakkel ridge, Arctic Ocean // *Nature*. — 2003. — Vol. 423, no. 6943. — P. 956–961. — DOI: [10.1038/nature01704](https://doi.org/10.1038/nature01704).
- Mirzoev K. M. Recommendations for identifying group earthquakes // *Issues of engineering seismology (Engineering and seismological research for seismic hazard zoning)*. — 1992. — Vol. 33. — P. 53–57. — (in Russian).
- Molchan G. M., Dmitrieva O. E. Aftershock Identification: Overview and New Approaches // *Modern methods of interpretation of seismological data. Computational seismology*. Vol. 24. — Moscow : Nauka, 1991. — P. 19–50. — (in Russian).
- Morozov A., Vaganova N. Earthquake catalog of the Gakkel mid-ocean ridge (Arctic Ocean) according to the data of the Arkhangelsk seismic network (AH code) for the period from 2013 to 2022. — 2023. — DOI: [10.31905/smupnwep](https://doi.org/10.31905/smupnwep).
- Morozov A., Vaganova N., Asming V., *et al.* The ML scale in western Eurasian Arctic // *Russian Journal of Seismology*. — 2020. — Vol. 2, no. 4. — P. 63–68. — DOI: [10.35540/2686-7907.2020.4.06](https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.4.06). — (in Russian).
- Morozov A. N., Vaganova N. V. Hodographs of regional waves P and S for areas of spreading ridges in the Euro-Arctic region // *Volcanology and seismology*. — 2017. — No. 2. — P. 59–67. — DOI: [10.7868/s0203030617020055](https://doi.org/10.7868/s0203030617020055). — (in Russian).
- Morozov A. N., Vaganova N. V., Antonovskaya G. N., *et al.* Low-Magnitude Earthquakes at the Eastern Ultraslow-Spreading Gakkel Ridge, Arctic Ocean // *Seismological Research Letters*. — 2021. — Vol. 92, no. 4. — P. 2221–2233. — DOI: [10.1785/0220200308](https://doi.org/10.1785/0220200308).
- Müller C., Jokat W. Seismic evidence for volcanic activity discovered in central Arctic // *Eos, Transactions American Geophysical Union*. — 2000. — Vol. 81, no. 24. — P. 265. — DOI: [10.1029/00eo00186](https://doi.org/10.1029/00eo00186).
- Omori F. On aftershocks of earthquakes // *Journal of the College of Science*. — 1894. — Vol. 7. — P. 111–200.
- ORFEUS. — (date of access: 12.05.2022). <https://orfeus-eu.org/>.
- Petrov O., Morozov A., Shokalsky S., *et al.* Crustal structure and tectonic model of the Arctic region // *Earth-Science Reviews*. — 2016. — Vol. 154. — P. 29–71. — DOI: [10.1016/j.earscirev.2015.11.013](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.11.013).

- Rekant P. V., Gusev E. A. Structure and formation history of the sedimentary cover of the rift zone of the Gakkel Ridge (Arctic Ocean) // Russian geology and geophysics. — 2016. — Vol. 57, no. 9. — P. 1634–1640. — DOI: [10.15372/gig20160903](https://doi.org/10.15372/gig20160903). — (in Russian).
- Reves-Sohn R., Edmonds H., Humphris S., *et al.* Scientific scope and summary of the Arctic Gakkel vents (AGAVE) expedition // EOS Transactions American Geophysical Union. Vol. 1. — American Geophysical Union, 2007. — P. 7.
- Riedel C., Schlindwein V. Did the 1999 earthquake swarm on Gakkel Ridge open a volcanic conduit? A detailed teleseismic data analysis // Journal of Seismology. — 2010. — Vol. 14, no. 3. — P. 505–522. — DOI: [10.1007/s10950-009-9179-6](https://doi.org/10.1007/s10950-009-9179-6).
- Ringdal F., Kväerna T. A multi-channel processing approach to real time network detection, phase association, and threshold monitoring // Bulletin of the Seismological Society of America. — 1989. — Vol. 79, no. 6. — P. 1927–1940. — DOI: [10.1785/BSSA0790061927](https://doi.org/10.1785/BSSA0790061927).
- Schlindwein V. Teleseismic earthquake swarms at ultraslow spreading ridges: indicator for dyke intrusions? // Geophysical Journal International. — 2012. — Vol. 190, no. 1. — P. 442–456. — DOI: [10.1111/j.1365-246x.2012.05502.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2012.05502.x).
- Schlindwein V., Demuth A., Korger E., *et al.* Seismicity of the Arctic mid-ocean Ridge system // Polar Science. — 2015. — Vol. 9, no. 1. — P. 146–157. — DOI: [10.1016/j.polar.2014.10.001](https://doi.org/10.1016/j.polar.2014.10.001).
- Schmid F., Schlindwein V., Koulakov I., *et al.* Magma plumbing system and seismicity of an active mid-ocean ridge volcano // Scientific Reports. — 2017. — Vol. 7, no. 1. — DOI: [10.1038/srep42949](https://doi.org/10.1038/srep42949).
- Shebalin P. N. Epicenter chains as an indicator of increasing seismicity correlation radius before strong earthquakes // Volcanology and seismology. — 2005. — No. 1. — P. 3–15. — (in Russian).
- Smirnov V. B. Prognostic anomalies of the seismic regime. I. Methodological basis for the preparation of initial data // Geophysical research. — 2009. — Vol. 10, no. 2. — P. 7–22. — (in Russian).
- Spence W. Relative epicenter determination using P-wave arrival-time differences // Bulletin of the Seismological Society of America. — 1980. — Vol. 70, no. 1. — P. 171–183. — DOI: [10.1785/BSSA0700010171](https://doi.org/10.1785/BSSA0700010171).
- Tarasewicz J., Brandsdóttir B., White R. S., *et al.* Using microearthquakes to track repeated magma intrusions beneath the Eyjafjallajökull stratovolcano, Iceland // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. — 2012. — Vol. 117, B9. — P. 1–13. — DOI: [10.1029/2011jb008751](https://doi.org/10.1029/2011jb008751).
- The Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (CTBTO). — 1996. — (date of access: 31.03.2023). <https://www.ctbto.org/>.
- Thiede J., Oerter H. The Expedition ANTARKTIS XVII/2 of the Research Vessel POLARSTERN in 2000. Vol. 404. — Bremerhaven : Alfred Wegener Institute for Polar, Marine Research, 2002. — P. 245.
- Tolstoy M., Bohnenstiehl D. R., Edwards M. H., *et al.* Seismic character of volcanic activity at the ultraslow-spreading Gakkel Ridge // Geology. — 2001. — Vol. 29, no. 12. — P. 1139. — DOI: [10.1130/0091-7613\(2001\)029<1139:scovaa>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<1139:scovaa>2.0.co;2).
- Wanless V. D., Behn M. D., Shaw A. M., *et al.* Variations in melting dynamics and mantle compositions along the Eastern Volcanic Zone of the Gakkel Ridge: insights from olivine-hosted melt inclusions // Contributions to Mineralogy and Petrology. — 2014. — Vol. 167, no. 5. — P. 1–22. — DOI: [10.1007/s00410-014-1005-7](https://doi.org/10.1007/s00410-014-1005-7).
- Wiemer S., Wyss M. Minimum Magnitude of Completeness in Earthquake Catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan // Bulletin of the Seismological Society of America. — 2000. — Vol. 90, no. 4. — P. 859–869. — DOI: [10.1785/0119990114](https://doi.org/10.1785/0119990114).