

УДК 550.34

КРИОСЕЙСМОЛОГИЯ АРХИПЕЛАГА СЕВЕРНАЯ ЗЕМЛЯ – ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СТАЦИОНАРНОГО МОНИТОРИНГА

© 2024 г. Г. Н. Антоновская^{а, *}, Я. В. Конечная^{а, b}, Н. К. Капустян^а, Е. Р. Морозова^а

^аФедеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. акад. Н.П. Лаверова УрО РАН,
Никольский просп., 20, Архангельск, 163020 Россия

^bФедеральный исследовательский центр “Единая геофизическая служба РАН”,
просп. Ленина, 139, Обнинск, Калужская обл., 249034 Россия

*e-mail: essm.ras@gmail.com

Поступила в редакцию 19.02.2024 г.

После доработки 11.04.2024 г.

Принята к публикации 22.04.2024 г.

Представлены первые результаты мониторинга локальной сейсмичности архипелага Северная Земля с конца 2016 по 2023 гг., зарегистрированной одиночной стационарной сейсмической станцией, установленной на о. Большевик. Выделено 73 локальных сейсмических события, имеющих Р- и S-фазы. Рассмотрена возможность их сортировки (землетрясение или льдотрясение) путем сопоставления волновых форм и СВАН-диаграмм с региональными землетрясениями, произошедшими в районе архипелага. Пространственно-временная последовательность и скорость миграции событий показывают, что события ледникового типа могут быть результатом разрядки напряжений в ледниках при воздействии неглубоких коровых землетрясений в радиусе ~30 км. Показано, как при трудности развертывания сейсмической сети, даже одна стационарная сейсмическая станция позволяет получить полезную информацию о ледниковых событиях и коровых землетрясениях.

Ключевые слова: архипелаг Северная Земля, криосейсмология, каталог, льдотрясение, СВАН-диаграмма, мониторинг

DOI: 10.31857/S0203030624040061, **EDN:** IXQPCS

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня криосейсмология является активно развиваемым направлением науки по изучению динамики ледников (см. обзоры [Podolskiy, Walter, 2016; Aster, Winberry, 2017]), но так было не всегда. Ситуация резко изменилась после сообщения о так называемых “ледниковых землетрясениях” [Ekström et al., 2003, 2006].

Обнаружение нового типа сейсмических событий вызвало многочисленные теоретические и экспериментальные исследования планетарных криогенных сейсмических явлений, хотя свойства льда и мерзлых грунтов систематически изучались ранее [Цытович, 2019]. Процессы деструкции ледниковых покровов принято называть льдотрясениями [Hudson et al., 2020]. Регистрация нового типа сейсмических событий потребовала

изменения параметров наблюдательных сетей по сравнению с классической сейсмологией: расширения частотного и динамического диапазонов регистрации, подключения инфразвуковых наблюдений и пр. [Федоров и др., 2016; Виноградов и др., 2021]. По криосейсмологии созданы специальные международные программы и проводятся международные конференции [Podolskiy, Walter, 2016], это стимулирует постановку новых геофизических исследований и разработку методов анализа данных. Ледниковые процессы на сейсмических записях, полученных в криолитозоне, представлены разнообразными волновыми формами – это импульсные и шумоподобные колебаниями, по которым проводится оценка активности ледников. Существенно, что в недоступных районах, в отличие от аэрокосмических наблюдений,

сейсмические работы не зависят от условий видимости и дают информацию о состоянии льдов и ледников. С другой стороны, сейсмические наблюдения, по сравнению с точечными гляциологическими измерениями в скважинах, охватывают большие территории. Следует отметить, что многие методы, используемые сейчас в криосейсмологии, особенно обнаружения и обработки сигналов, уже апробированы в сейсмологии вулканов [Konstantinou, Schlindwein, 2003]. Таким образом, набор методов анализа сейсмических записей дает достоверную информацию о процессах в толще льда, является ключом к пониманию и, возможно, прогнозированию эволюции таяния ледников. Однако, как отмечается в работе [Sánchez-Gómez et al., 2020], исследования только начинаются, и имеющихся знаний все еще недостаточно.

Сейсмические события, вызванные процессами во льдах, обычно разделяют на ледовые, происходящие в морских или оне рассматривалась и анализ этих процессов является основным в данной работе.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК И СЕЙСМИЧНОСТЬ АРХИПЕЛАГА СЕВЕРНАЯ ЗЕМЛЯ

Северная Земля – крупный островной архипелаг к северу от п-ова Таймыр на границе Карского моря и моря Лаптевых, от которого он отделен проливом Вилькицкого (рис. 1). Осадочный чехол Северо-Карского бассейна обнажен на островах архипелага. Фундамент

в основном сложен в разной степени деформированными и метаморфизованными сланцами и песчаниками неопротерозоя–кембрия [Малышев и др., 2012]. На глубине 10–15 см от поверхности находится вечная мерзлота. Глубина сезонного протаивания не превышает 60 см по наблюдениям 2016–2017 гг. [Богородский и др., 2021].

За последние полвека температура воздуха в районе арктических морей значительно выросла. К примеру, по данным Росгидромета, за 30 лет рост температуры атмосферы в районе Карского моря составляет 4.74°C. Подобное явление способствует таянию арктических льдов, увеличению продолжительности безледного периода, что, в свою очередь, приводит к изменению метеоусловий – появлению мезоциклонов, осложняющих навигацию [Репина и др., 2019]. В связи с этим расширение мониторинга ледовой обстановки и включение в него информации о криосейсмологии, особенно вдоль трассы Северного морского пути, является актуальной задачей.

Почти 48% площади арх. Северная Земля покрыто ледниками, выделяется 17 ледниковых систем [Котляков, 2019]. Основные крупные ледники архипелага показаны на рис. 1а, а в табл. 1 приведены некоторые их характеристики в соответствии с Каталогом ледников СССР [1980].

Остров Октябрьской Революции является крупнейшим островом архипелага. На нем находится 7 крупных ледников, которые занимают больше половины всей площади острова (см.

Таблица 1. Водные ресурсы ледников архипелага Северная Земля

Характеристика	Ледники							
	Академии наук	Альбанова	Русанова	Карпинского	Университетский	Вавилова	Пионер	Ленинградский (вместе с ледником Семенова-Тян-Шанского)
Площадь, км ²	5865	408	956	2560	1803	1817	254	2508
Средняя толщина, м	495	158	250	280	300	265	192	140
Максимальная высота поверхности, м	781	524	704	965	800	728	—	935
Объем, км ³	2910	64	240	716	540	480	49	352
Водозапас, 10 ⁹ т	2500	55	206	615	464	413	42	303

Примечание. Информация о средней толщине ледника основана на радиолокационных измерениях.

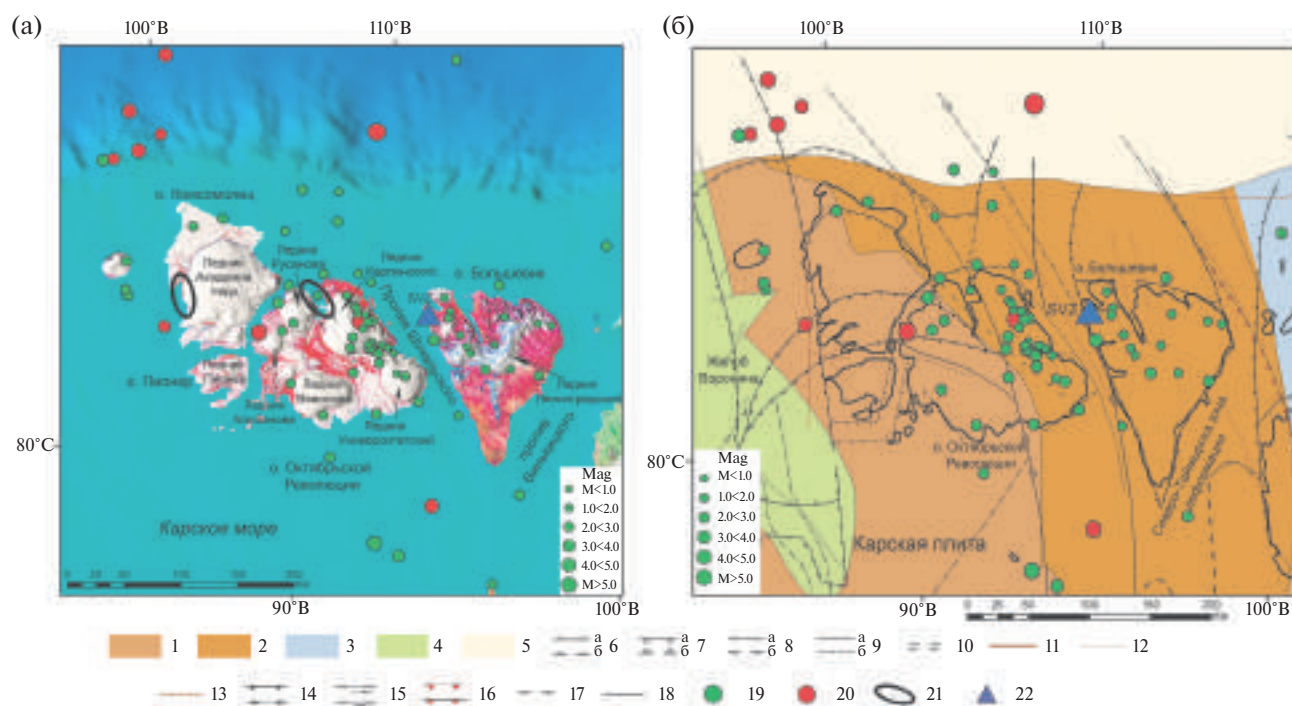


Рис. 1. Пространственное распределение сейсмических событий в районе архипелага Северная Земля на фрагменте физической карты (а) и карты основных неотектонических и геоморфологических элементов Арктики (б) по [Верниковский и др., 2013].

1–5 – литосферные плиты: 1 – с позднедокембрийским фундаментом, 2 – с позднедокембрийским фундаментом, подвергшиеся герцинским тектоническим деформациям, 3 – аккреционно-коллизийные комплексы, 4 – трог и склоны с корой переходного типа, 5 – современный континентальный склон; 6–9 – современные разломы [Атлас ..., 2004] (а – достоверные, б – предполагаемые): 6 – нормальные разломы, штрихи на опущенном крыле, 7 – взбросы, треугольники на приподнятом крыле, 8 – разломы неустановленного типа, штрихи на опущенном крыле, 9 – разломы без установленного смещения; 10 – стрелками показано направление смещения при сдвигах; 9–13 – разломы [Pubellier et al., 2018]; 11–13 – разломы [Arctic Petroleum Geology..., 2011]: 11 – активный спрединговый центр, 12 – нормальные разломы, 13 – неклассифицированные разломы; 14 – надвиг и взброс; 15 – сдвиговый сброс (стрелка – направление сброса); 16 – фронт деформаций для орогенов; 17 – нормальные листрические разломы; 18 – неклассифицированные разломы; 19, 20 – сейсмические события: 19 – зарегистрированные только станцией SVZ, 20 – включенные в сейсмический каталог; 1 – Таймырский аккреционный пояс; 21 – области образования айсбергов и ледников [Шапошников и др., 2017]; 22 – сейсмическая станция “Северная Земля” (SVZ).

рис. 1а). Места, где ледники выходят к морю, часто служат источником образования айсбергов [Атлас, 2020]. Стоит отметить, что, согласно рис. 1а, в выделенных районах образования айсбергов сейсмических событий практически нет.

Геотектонические структуры архипелага, являющегося частью Таймыро-Североземельской складчатой области, представляют собой продолжение складчатости п-ова Таймыр (см. рис. 1б). Тектонические процессы, определившие современную конфигурацию североземельских островов и разделяющих их проливов, продолжают и в настоящее время оказывать влияние на формирование рельефа

архипелага [Engen et al., 2003; Верниковский и др., 2013].

На рис. 1 показано распределение эпицентров событий, зарегистрированных за весь период инструментальных наблюдений (с начала XX века) в районе арх. Северная Земля. Анализ пространственного распределения эпицентров показывает, что кроме самого архипелага землетрясения наблюдается на склоне континентального шельфа и в Карском море, южнее арх. Северная Земля. Сейсмичность архипелага характеризуется, в основном, как слабая. Однако, на склоне шельфа и Карском море выявлены землетрясения с магнитудой более 3.5.

Несмотря на рассмотренные ниже трудности при обработке событий по записям единичной станции, результаты показывают, что их эпицентры приурочены к границе Карской плиты, попадают в зону Северо-Таймырской деформации – разлом сбросового характера (см. рис. 1б) по [Верниковский и др., 2013]. Согласно работам [Engen et al., 2003; Верниковский и др., 2013], проявление сейсмичности предположительно связано с процессами рифтогенеза, развивающегося в центральной сейсмоактивной зоне моря Лаптевых.

В соответствии с плотностной моделью земной коры вдоль профиля Северная Земля–Поднятие Менделеева [Каминский, 2009] в районе арх. Северная Земля осадочные породы залегают до 3 км, далее, до глубин 18 км, выделяют гранодиоритовую верхнюю кору, а ниже, до 31 км, – базитовый нижний слой земной коры.

Мы разделили сейсмические события на тектонические землетрясения и события, связанные с деятельностью ледников. Сложность задачи определяется тем, что оба типа событий имеют природный характер и в данном случае известные критерии идентификации, как в паре “землетрясение–взрыв”, не применимы. Одной из возможностей является поиск решения в сопоставлении пространственного положения очага события и глубинного строения коры. Другие возможности мы будем искать при анализе волновых форм, разделения событий на группы и выявления особенностей пространственно-временного хода эпицентров. Кроме того, типизация ледниковых событий и их отсев из общей массы сейсмических событий, происходящих на арх. Северная Земля, позволит в дальнейшем избежать попадания событий ледниковой природы в сейсмический каталог.

СХЕМА НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Для изучения природы землетрясений и льдотрясений схемы наблюдения могут различаться, что определяется, прежде всего, трудностями работ в Арктике. Как и на заре сейсмологии, имеются работы по анализу данных как одиночной сейсмической станции для выделения различных типов льдотрясений [Köhler et al., 2019], так и наблюдения локальных сетей различного уровня [O’Neel et al., 2007;

Walter et al., 2013; Köhler et al., 2015; Winter et al., 2021]. В российских условиях для арктических территорий создание полноценной сейсмической сети мониторинга ледовой и/или ледниковой обстановки до сих пор остаются нереализуемым в полном объеме. Но проведение исследований по накоплению банка данных о процессах, протекающих в ледниках российских архипелагов, весьма актуальны и востребованы. Работы зарубежных коллективов и коллег Кольского филиала ФИЦ ЕГС РАН являются важной составляющей для сопоставления получаемых результатов и выявления общих закономерностей.

В ноябре 2016 г. совместными усилиями ФИЦКИА УрО РАН и ААНИИ (Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт) на о. Большевик арх. Северная Земля на территории научно-исследовательского стационара “Ледовая база “Мыс Баранова” была открыта сейсмическая станция “Северная Земля” с кодом SVZ (см. рис. 1) [Антоновская и др., 2018]. Станция вошла в состав сейсмической сети ФИЦКИА УрО РАН.

Развернуть сейсмическую сеть для локализации местных землетрясений и льдотрясений, как это обычно делается на освоенных территориях (например, [Deichmann et al., 2000; O’Neel, Pfeffer, 2007]), пока организационно не представляется возможным. В нашем случае мониторинг сейсмической обстановки осуществляется единичной станцией, с чем связана основная проблема в локализации сейсмических событий – в сейсмологии принято проводить обработку минимум по трем сейсмическим станциям либо группе. Однако, исходя из реальной ситуации, мы попытаемся всесторонне проанализировать записи одной сейсмической станцией, применяя все доступные нам методы. Конечно, обработка по одной станции – это менее достоверный способ локализации, чем по нескольким станциям, однако по его результатам можно определить основные закономерности пространственного распределения эпицентров. Кроме того, даже единичная станция дает важную информацию о спектральном составе событий, типичных волновых формах и магнитудах.

В случае регистрации события несколькими станциями применялся метод засечек

в программном комплексе WSG [Акимов, Красилов, 2020] разработки ФИЦ ЕГС РАН. При локации события по данным одиночной станции эпицентр был определен по пересечению эпицентрального расстояния и направлению обратного азимута в программе EL [ELRESS, 2021]. В обоих случаях использовался годограф Varents [Kremenetskaya et al., 2001]. Для определения значений локальной магнитуды ML используется уточненная шкала для западной части Евразийской Арктики [Морозов и др., 2020].

Для локации сейсмических событий отбирались те, которые имеют уверенные вступления объемных Р- и S-волн, т.е. с достаточно высоким соотношением сигнал/шум. Первоначально все расчеты проводились при фиксированной глубине, затем, как показано ниже, мы варьировали глубину очага. Точность Р-фазы составляет ± 0.3 с, а S-фазы ± 0.5 с. Оценка погрешности в определении эпицентра при локации по нескольким станциям проводилась путем получения эллипса ошибок в программе NAS [Fedorov et al., 2019]. В случае одиночной станции оценка погрешности не является классическим эллипсом ошибок, а дает только оценочное определение его полуосей. Погрешность первой полуоси связана с погрешностью по глубине (от 0 до 30 км), второй полуоси — с неточностью определения азимута ($\pm 10^\circ$).

Построение спектрально-временных диаграмм (СВАН-диаграмм) проводилось в программе Geopsy (рис. 2). Для каждого случая параметры ΔT и Δf подбирались индивидуально, например, для построения СВАН-диаграммы, показанной на рис. 3а, $\Delta T = 2.1$ с, $\Delta f = 0.04$ Гц, а для рис. 3б — $\Delta T = 0.7$ с, $\Delta f = 0.07$ Гц соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Кроме ранее зарегистрированных землетрясений, табл. 2 содержит информацию о 73 локальных сейсмических событиях, выделенных за период функционирования станции SVZ (конец 2016 по 2023 гг. включительно) и имеющих вступления фаз объемных волн. По техническим причинам станция временно не работала в 2019 и 2021 гг. В качестве источника информации для составления каталога (см. табл. 2) использовались собственные данные Архангельской сейсмической сети. В данном

исследовании мы не рассматриваем очевидные ледовые события, характеризующиеся как импульсные высокочастотные микроколебания.

С момента установки станции SVZ с ноября 2016 г. по декабрь 2023 г. большинство слабых сейсмических событий приурочено о. Октябрьской Революции (35 шт.), особенно сейсмичности этого района рассмотрены ниже. Для проведения сравнительного анализа волновых форм были построены СВАН-диаграммы пяти тектонических землетрясений, произошедших в районе арх. Северная Земля (см. табл. 2). Такие землетрясения имеют магнитуду выше 2.5, они были зарегистрированы не только станцией SVZ, но и другими сейсмическими станциями, установленными в Европейской Арктике и находящимися на удалении от эпицентра на сотни километров. Полученные СВАН-диаграммы схожи между собой, пример землетрясения 31.03.2022 г. в районе о. Комсомолец показан на рис. 2.

Эпицентры событий на о. Октябрьской Революции ($N = 35$ шт.) и оценка их погрешностей в виде эллипсов показаны на рис. 3а. Значения локальных магнитуд для этих событий находится в диапазоне от 0.2–2.3. Распределение магнитуд всех зарегистрированных станцией SVZ событий ($N = 73$ шт.) показано на рис. 3б. Оно отображает недостаточность данных с магнитудами ниже 1.2, но дает представление о том, что в совокупности событий возможно два вида толчков, дающих максимум на $ML \sim 1.5$ и значения $ML > 3$.

Анализ волновых форм и построение СВАН-диаграмм показали, что все события, зарегистрированные на о. Октябрьской Революции, условно можно разделить на две группы А и В. В каталоге табл. 2 эти группы помечены разным цветом строк. Расчет описательной статистики для ML показывает, что эти группы различаются по медианным значениям $\langle ML \rangle$: для группы А $\langle ML \rangle = 1.1$, для В $\langle ML \rangle = 0.8$.

На рис. 4 представлены примеры записей (вертикальный и горизонтальные каналы) сейсмических событий и СВАН-диаграммы для вертикального канала. Первая группа А (см. рис. 4а) имеет достаточно четкие вступления Р- и S-волн, а также поверхностные волны. S-волна всегда интенсивнее Р. Хорошо известно, что неглубокие землетрясения генерируют поверхностные волны [Lay, Wallace 1995]. При расчете положения эпицентров изначально мы

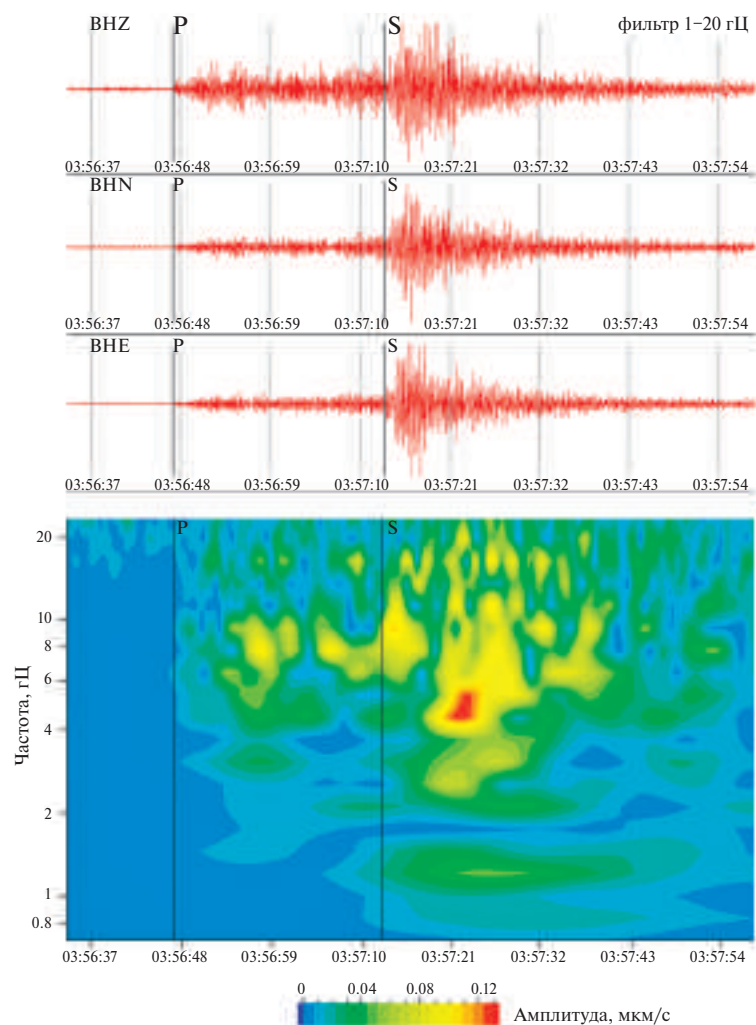


Рис. 2. Волновые формы для Z-, N- и E-каналов и СВАН-диаграмма для Z-канала тектонического землетрясения, зарегистрированного станцией SVZ 31.03.2022 г. в районе о. Комсомолец.

приняли глубину для всех событий $h = 0$ км. В пользу гипотезы о коровых землетрясениях группы **A** свидетельствуют несколько фактов:

- в работе [Köhler et al, 2015] иллюстрируются похожие волновые формы для событий арх. Шпицберген, и они определяются как землетрясения,

- события группы **A** имеют СВАН-диаграммы, аналогичные тектоническим землетрясениям в рассматриваемом районе на записях станции SVZ (см. рис. 2),

- время прихода Rg-волны на сейсмических записях группы **A** сильно отличается от расчетного значения времени вступления Rg с нулевой глубиной в сторону ее увеличения (очевидно, более 5 км).

Согласно одномерной скоростной модели IASPEI91 на локальных расстояниях, при глубинах более 10 км фаза поверхностной волны Rg не наблюдается. Поэтому мы можем лишь отметить, что теоретически гипоцентры событий группы **A** располагаются на глубинах от 5 до 10 км. Все эти рассуждения показывают, что события группы **A** – это коровые землетрясения. У группы событий **B** Р-волна выражена более слабо, отсутствуют поверхностные волны и наблюдается высокочастотный шум (~ 20 Hz) между вступлениями волн. Для событий группы **B** отметим следующие особенности:

- отсутствие поверхностных волн на расстояниях от 50 до 200 км от сейсмической станции,

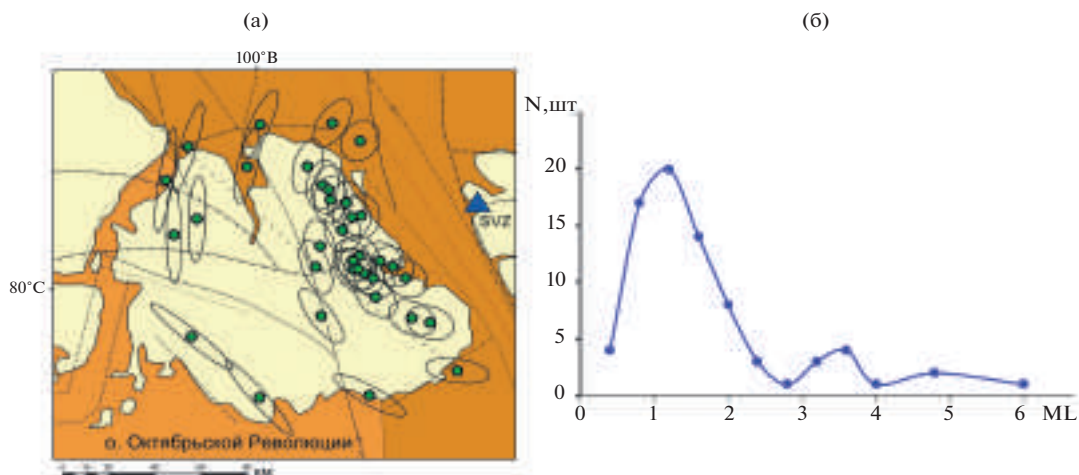


Рис. 3. Расположение сейсмических событий в районе о. Октябрьской Революции арх. Северная Земля на фрагменте карты основных неотектонических и геоморфологических элементов Арктики (а) по [Верниковский и др., 2013] и гистограмма локальной магнитуды сейсмических событий (б). Легенду см. рис. 1.

- меньшие значения магнитуд (т.е. это более слабые сигналы),
- наличие высокочастотной составляющей в волновых формах,
- пространственная приуроченность событий к окраинам ледников.

Все эти особенности позволяют нам предположить, что рассматриваемые события отличаются от коровых землетрясений и имеют другую природу, скорее всего — ледниковую. Такие события могут происходить в ледовых куполах или на поверхности, разделяющую кору и ледовый купол. При этом возможные поверхностные волны от событий группы **В** присутствуют в коде записи на локальных расстояниях.

Заметим, что близкое расположение групп относительно друг друга, возможно, указывает на их геодинамическую связь, тем более что линейный характер их проявления совпадает с выделенной разломной зоной по геологическим данным [Атлас, 2004; Rubellier et al., 2018]. Если это так, то можно предположить определенную очередность событий в выделенных группах. Для выявления этого на карте (рис. 5) была проведена ось $I-I'$ с началом в условно выбранной точке I . Затем эпицентры событий проецировались на эту ось и рассчитывались расстояния от точки I до каждого спроецированного события. На рис. 6а представлен временной ход миграции проекций эпицентров для групп **А** и **В**. Мы оставили

только тот временной промежуток, в котором сейсмическая регистрация велась непрерывно, т.е. это 2017–2018 гг. Несмотря на краткость интервала (два года), при анализе данных есть определенная закономерность в проявлении событий. Отмечается линейный тренд в миграции со скоростью 0.021 км/ч (см. рис. 6а). Видно, что события группы **А** мигрируют знакопеременно вдоль оси тренда. Максимальное отклонение от оси составляет около 150 км. Значения скоростей миграции согласуются с параметрами, характерными для сейсмического процесса в консолидированной породе: на натурных моделях для скорости срыва неустойчивого блока [Кочарян, 2016] или скорости распространения разрыва, но для сильных землетрясений (Япония, Аляска) [Kawasaki et al., 2001; Ohta et al., 2006]. По-видимому, здесь мы видим проявление геодинамики, в частности движения по близлежащему разлому (см. рис. 1, 3). Можно отметить тенденцию к знакопеременной миграции не только для событий группы **А**, но и группы **В**, причем временной ход для последних как бы запаздывает на примерно месяц относительно кривой для группы **А**. Пока данных мало, но попробуем интерпретировать отмеченную тенденцию.

Из рис. 5 можно заметить, что события группы **В** преимущественно происходят в краевых областях ледовых куполов. Согласно рис. 6а это интервал расстояний 250–280 км, т.е. не на всей длине оси $I-I'$, а только на этом отрезке

Таблица 2. Каталог сейсмических событий район архипелага Северная Земля

Дата	Параметры эпицентра				Эллипс ошибок			Магнитуда	Примечание
	Время в очаге	φ, °N	λ, °E	h, км	AzMajor	Rminor, км	Rmajor, км		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
19.10.1924	15:34:47.2	80.67	105.94	10f	75	73.2	124.3	MS=6.0	Morozov et al., 2021
07.08.1978	12:48:21.6	79.59	99.08	10f	58	8.7	10.9	mb(ISC)=4.6	Morozov et al., 2021
04.07.1995	03:26:17.1	80.02	95.02	10f	123	8.1	11.2	mb(ISC)=4.6	Morozov et al., 2021
22.06.1999	21:21:21.2	82.15	96.43	10f	157	20.6	118.8	mb(ISC)=3.5	Morozov et al., 2021
22.02.2016	08:20:44.5	81.84	95.46	35f	26	7.0	11.2	mb(IDC)=3.4	Morozov et al., 2021
10.12.2016	03:00:23.6	81.06	95.46	0f	—	1.9	40.3	ML(AH)=1.5	Обработка только по станции SVZ
24.12.2016	08:25:02.6	82.34	100.33	10f	67	15.4	88.4	mb(IDC)=3.6	Morozov et al., 2021
10.01.2017	01:26:36.5	77.83	94.38	0f	—	2.0	39.8	ML(AH)=2.1	Обработка только по станции SVZ
11.01.2017	07:43:05.5	78.01	96.61	10f	117	7.6	10.0	mb(ISC)=3.4	Morozov et al., 2021
07.03.2017	17:10:17.5	79.22	98.57	0f	—	7.4	11.2	ML(AH)=1.9	Обработка только по станции SVZ
13.03.2017	08:56:28.7	80.92	90.63	0f	—	1.6	48.4	ML(AH)=1.7	Обработка только по станции SVZ
19.03.2017	19:48:48.7	79.33	98.73	0f	—	7.9	10.6	ML(AH)=1.2	Обработка только по станции SVZ
08.05.2017	06:33:42.1	80.87	90.56	0f	—	1.6	48.1	ML(AH)=1.8	Обработка только по станции SVZ
09.07.2017	17:43:32.9	78.77	98.85	0f	—	5.7	14.3	ML(AH)=1.6	Обработка только по станции SVZ
19.07.2017	5:20:06	78.83	94.41	0f	—	2.8	28.1	ML(AH)=1.6	Обработка только по станции SVZ
22.08.2017	01:51:15.9	77.19	96.65	0f	—	1.8	44.6	ML(AH)=1.7	Обработка только по станции SVZ
23.08.2017	10:30:09.4	80.58	111.38	0f	—	42.2	1.8	ML(AH)=2.0	Обработка только по станции SVZ
28.08.2017	02:57:44.1	79.00	99.09	0f	—	7.7	10.8	ML(AH)=1.3	Обработка только по станции SVZ
01.09.2017	17:50:51.1	81.84	97.07	5f	40	11.7	88.6	ML(AH)=2.9	Обработка по двум станциям ACC*
04.09.2017	10:59:37.9	80.97	96.96	0f	—	2.2	36.3	ML(AH)=1.6	Обработка только по станции SVZ
25.09.2017	23:52:16.1	81.94	93.41	0f	—	1.4	58.0	ML(AH)=2.9	Обработка только по станции SVZ

Таблица 2. Продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
02.10.2017	09:19:09.3	79.29	98.81	0f	—	8.2	10.3	ML(AH)=1.1	Обработка только по станции SVZ
07.10.2017	09:08:51.0	80.09	99.19	0f	—	4.5	17.9	ML(AH)=1.3	Обработка только по станции SVZ
22.10.2017	19:07:07.2	80.35	101.38	0f	—	3.8	21.0	ML(AH)=1.1	Обработка только по станции SVZ
21.11.2017	13:11:22.7	79.47	98.00	0f	—	6.0	13.6	ML(AH)=1.1	Обработка только по станции SVZ
28.11.2017	07:37:59.6	79.05	104.78	0f	—	6.8	12.2	ML(AH)=1.3	Обработка только по станции SVZ
11.12.2017	7:00:06.0	79.29	102.67	0f	—	3.7	6.3	ML(AH)=1.0	Обработка только по станции SVZ
11.12.2017	13:53:37.0	78.97	102.06	0f	—	3.3	6.2	ML(AH)=1.0	Обработка только по станции SVZ
17.12.2017	12:27:56.9	79.37	98.59	0f	—	7.4	11.2	ML(AH)=1.0	Обработка только по станции SVZ
18.12.2017	05:24:25.2	79.53	98.38	0f	—	6.5	12.7	ML(AH)=1.1	Обработка только по станции SVZ
03.01.2018	23:12:35.0	79.33	99.17	0f	—	9.0	9.6	ML(AH)=0.6	Обработка только по станции SVZ
16.03.2018	22:57:51.6	78.90	97.10	0f	—	4.4	18.2	ML(AH)=1.1	Обработка только по станции SVZ
14.04.2018	16:36:19.3	79.06	98.87	0f	—	7.6	11	ML(AH)=0.6	Обработка только по станции SVZ
28.04.2018	03:39:49.6	79.36	98.68	0f	—	7.7	10.8	ML(AH)=0.7	Обработка только по станции SVZ
02.05.2018	15:26:28.2	81.12	91.44	0f	—	1.6	49.1	ML(AH)=1.9	Обработка только по станции SVZ
20.05.2018	14:19:50.9	79.28	99.30	0f	—	8.5	10.3	ML(AH)=0.8	Обработка только по станции SVZ
02.06.2018	14:11:42.7	79.29	97.39	0f	—	5.2	15.4	ML(AH)=1.8	Обработка только по станции SVZ
03.06.2018	23:05:02.6	77.64	99.57	0f	—	2.4	32.8	ML(AH)=1.3	Обработка только по станции SVZ
29.06.2018	11:53:23.9	79.21	99.34	0f	—	8.4	10.4	ML(AH)=0.6	Обработка только по станции SVZ
24.07.2018	16:51:23.0	79.53	99.53	0f	—	8.3	10.6	ML(AH)=1.5	Обработка только по станции SVZ

Таблица 2. Продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
06.01.2020	20:00:54.6	79.92	96.91	0f	—	3.8	20.8	ML(AH)=1.2	Обработка только по станции SVZ
10.03.2020	05:13:03.0	79.40	98.90	0f	—	8.3	10.2	ML(AH)=0.8	Обработка только по станции SVZ
21.03.2020	09:09:08.5	79.83	99.37	0f	—	6.1	13.4	ML(AH)=0.8	Обработка только по станции SVZ
22.03.2020	20:03:50.2	78.51	105.12	0f	—	1.0	19.6	ML(AH)=1.0	Обработка только по станции SVZ
03.05.2020	04:23:30.5	79.92	95.95	0f	—	3.4	23.5	ML(AH)=1.3	Обработка только по станции SVZ
05.05.2020	09:14:28.5	79.66	99.25	0f	—	7.3	11.3	ML(AH)=0.8	Обработка только по станции SVZ
31.05.2020	21:21:50.7	79.61	99.47	0f	—	8.3	10.1	ML(AH)=0.6	Обработка только по станции SVZ
03.06.2020	11:57:56.0	78.28	103.30	0f	—	0.9	20.4	ML(AH)=1.6	Обработка только по станции SVZ
07.07.2020	03:39:30.2	79.55	99.35	0f	—	8.6	9.8	ML(AH)=1.1	Обработка только по станции SVZ
18.08.2020	04:32:25.9	78.62	101.86	0f	—	1.6	12.7	ML(AH)=1.4	Обработка только по станции SVZ
23.08.2020	16:50:02.4	79.53	98.99	0f	—	7.8	10.7	ML(AH)=0.9	Обработка только по станции SVZ
14.01.2022	12:43:46.1	79.17	102.42	0f	—	7.8	10.7	ML(AH)=0.5	Обработка только по станции SVZ
04.03.2022	22:45:00.0	79.73	99.34	0f	—	6.9	12	ML(AH)=0.2	Обработка только по станции SVZ
06.03.2022	03:33:35.5	79.40	98.72	0f	—	7.7	10.8	ML(AH)=0.5	Обработка только по станции SVZ
06.03.2022	14:53:16.9	78.83	103.99	0f	—	1.6	12.1	ML(AH)=0.6	Обработка только по станции SVZ
11.03.2022	14:56:39.0	78.72	102.86	0f	—	1.7	11.8	ML(AH)=0.7	Обработка только по станции SVZ
13.03.2022	11:55:30.1	79.70	99.37	0f	—	7.2	11.5	ML(AH)=0.2	Обработка только по станции SVZ
31.03.2022	03:56:12.0	80.49	91.33	5f	80	20.1	52.4	ML(AH)=2.4	Обработка по 4 станциям ACC*
15.04.2022	18:11:05.1	79.08	101.07	0f	—	4.4	4.4	ML(AH)=2.1	Обработка только по станции SVZ
09.05.2022	23:56:45.2	80.13	96.91	0f	—	3.1	25.5	ML(AH)=2.9	Обработка только по станции SVZ

Таблица 2. Окончание

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
17.05.2022	20:45:41.3	78.03	93.91	0f	–	2.2	35.8	ML(AH)=3.5	Обработка только по станциям SVZ
13.11.2022	16:41:28.8	79.78	100.67	0f	–	8.1	10.4	ML(AH)=0.9	Обработка только по станциям SVZ
13.11.2022	15:54:05.2	80.74	101.12	0f	–	2.8	27.8	ML(AH)=2.0	Обработка только по станциям SVZ
19.11.2022	07:56:19.1	78.86	101.92	0f	–	2.5	8.1	ML(AH)=0.5	Обработка только по станциям SVZ
26.12.2022	15:05:09.5	79.91	100.48	0f	–	6.3	12.9	ML(AH)=0.8	Обработка только по станциям SVZ
31.01.2023	22:05:27.4	78.6	104.79	0f	–	1.1	17.5	ML(AH)=0.9	Обработка только по станциям SVZ
04.02.2023	14:51:51.3	80.53	102.43	0f	–	3.2	24.4	ML(AH)=1	Обработка только по станциям SVZ
07.02.2023	14:24:33.6	79.98	98.30	0f	–	4.4	18.1	ML(AH)=1	Обработка только по станциям SVZ
15.02.2023	23:58:18.0	79.52	94.85	0f	–	3.3	24.1	ML(AH)=1.3	Обработка только по станциям SVZ
19.02.2023	05:02:25.0	79.14	102.19	0f	–	3.1	8.1	ML(AH)=0.4	Обработка только по станциям SVZ
21.02.2023	17:57:44.6	78.80	101.85	0f	–	1.7	11.8	ML(AH)=0.1	Обработка только по станциям SVZ
25.02.2023	14:01:07.4	80.19	97.54	0f	–	3.5	22.4	ML(AH)=1.1	Обработка только по станциям SVZ
08.03.2022	02:05:19.6	78.47	99.75	0f	–	4.7	17.2	ML(AH)=0.8	Обработка только по станциям SVZ
25.03.2023	12:40:54.6	78.48	102.64	0f	–	1.3	15.2	ML(AH)=0.5	Обработка только по станциям SVZ
04.03.2023	07:52:49.0	81.90	93.97	5f	50	12.1	33.1	ML(AH)=2.5	Обработка по 5 станциям АСС*
30.03.2023	17:06:54.2	80.57	99.07	0f	–	3.0	26.3	ML(AH)=0.9	Обработка только по станциям SVZ
03.04.2023	23:10:05.1	78.63	109.13	0f	–	2.6	29.8	ML(AH)=1.3	Обработка только по станциям SVZ
07.04.2023	12:05:50.7	79.15	95.21	0f	–	3.4	23.0	ML(AH)=1.2	Обработка только по станциям SVZ

Примечание. *АСС – Архангельская сейсмическая сеть.
Цветом показаны события о. Октябрьской Революции: серым – события группы А, синим – события группы В.

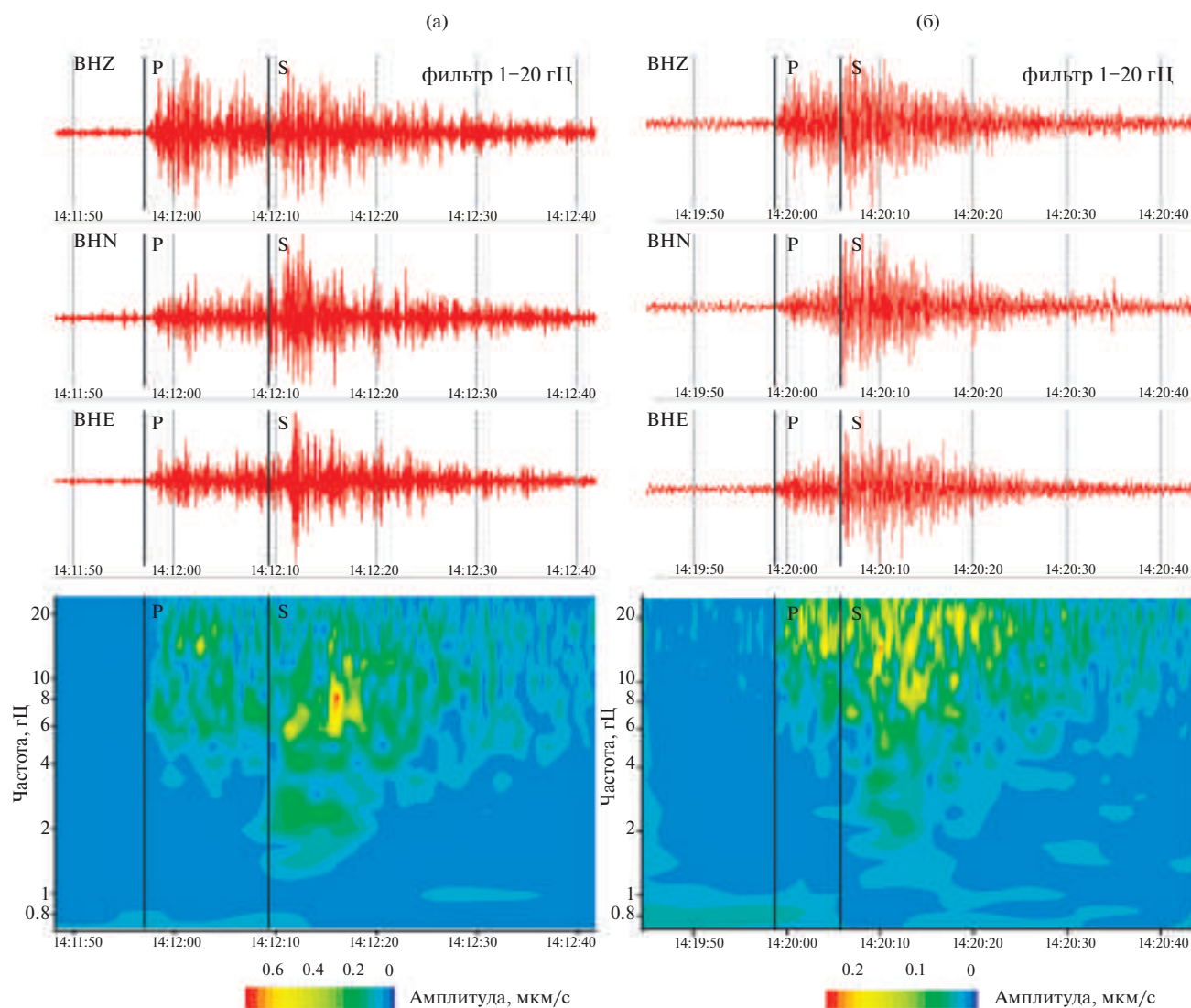


Рис. 4. Волновые формы для Z-, N- и E-каналов и СВАН-диаграммы локальных сейсмических событий, зарегистрированных SVZ (а – группа А, б – группа В).

оси ~30 км. Здесь ледовый купол наиболее тонкий (~100 м).

Если предположить, что коровые события инициируют, например, механизм, запускающий деформирование в толще льда по вертикали (так называемый механизм “push”), то скорость передачи напряжения по диффузным законам (как в модели Эльзасера), приводящей к событиям группы В, исходя из мощности льда и времени отставания (примерно месяц), составляет км/ч. Мы рассматриваем процесс передачи деформирования от подошвы льда до примерно середины его толщи. Это согласуется с оценками скоростей движения в ледосборных бассейнах [Sánchez-Gómez et al., 2020]. Процессы медленного деформирования льда недостаточно

изучены, особенно в крупных ледовых массивах. По существу, мы впервые показываем возможность таких процессов, аналогичных тектоническим волнам [Быков, 2018].

Для выявления скорости миграции проекций эпицентров событий попарно для всего набора событий (n) на о. Октябрьской Революции рассчитывались кажущиеся скорости вдоль оси I-I' путем перебора всех пар событий:

$$V_{ij} = \frac{S_i - S_j}{t_i - t_j} \cdot \begin{pmatrix} i = 1...n \\ j = 1...n \end{pmatrix}.$$

Анализ гистограммы значений (см. рис. 6б) выявляет четкий максимум на значении км/ч, причем знак “+” в положении максимума в распределении указывает на северо-западное

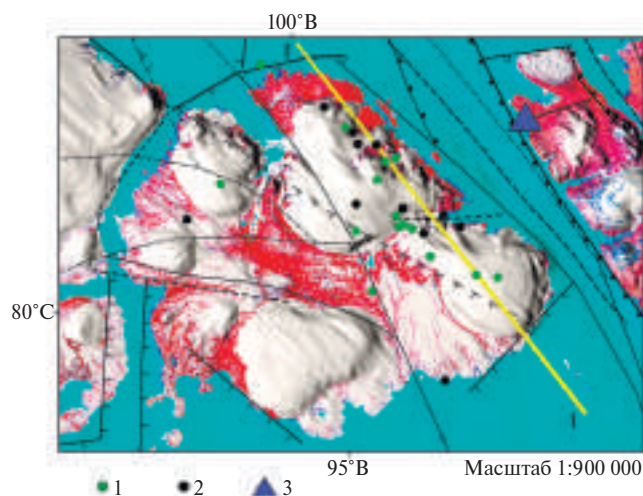


Рис. 5. Распределение событий о. Октябрьской Революции.

1 – группа А, 2 – группа В, 3 – сейсмическая станция SVZ; I–I' – линия, на которую производились проекции эпицентров событий.

Условные обозначения см. рис. 1.

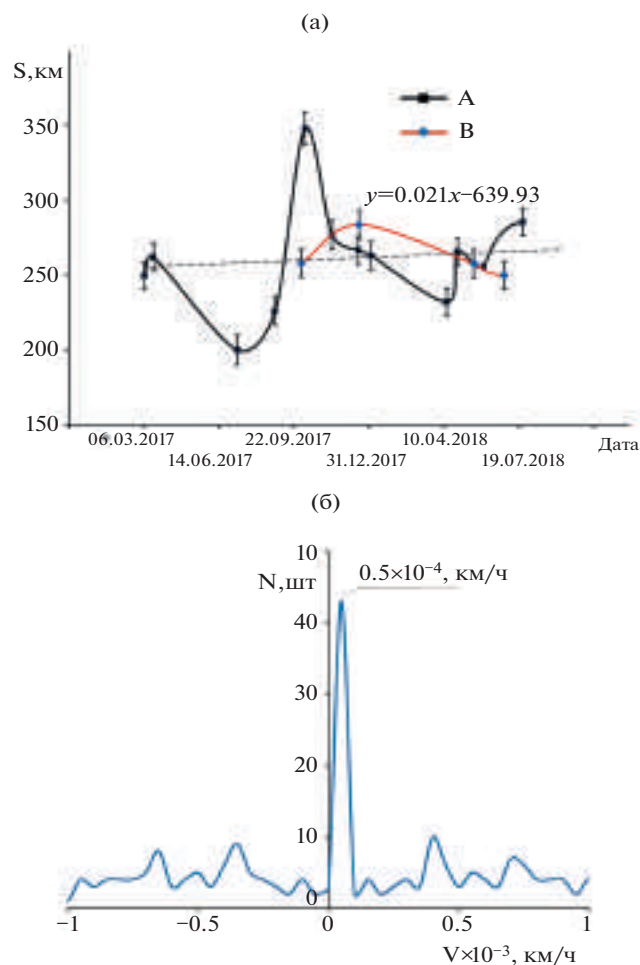


Рис. 6. Временные вариации миграции эпицентров событий групп А и В за 2017–2018 гг. вдоль линии I–I' (а) и частотная гистограмма кажущихся скоростей (б). Линия I–I' показана на рис. 4.

направление миграции. Значение совпадает с оценкой миграции событий группы В по вертикали, т.е. динамика ледниковых событий согласуется с коровой геодинамикой.

Можно предположить, что события группы В представляют собой реализацию механизма разрядки напряжений в ледовой толще, вызванной коровыми землетрясениями с эпицентрами в их окрестности не более ~30 км. По существу, это соответствует механизму индуцирования ледовой сейсмичности. В дальнейшем, при проведении сейсмического мониторинга, стоит учитывать, что события группы В (в рутинной обработке будут определяться по волновой форме и спектрально-временному анализу) относятся к ледниковой активности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установка сейсмической станции SVZ на архипелаге Северная Земля позволила значительно продвинуться в исследовании этой арктической территории, в частности включить в анализ ледовую сейсмическую активность и события в земной коре. Значение локальной магнитуды по данным станции SVZ находится в диапазоне от 0.1 до 4.9. Эпицентры слабых событий были определены по данным одной станции. Тем не менее, с учетом эллипса ошибок, удалось привязать группы событий к разломной тектонике и к ледовым куполам. На основании полученных данных представлен сейсмический каталог за 2016–2023 гг.

Анализ волновых форм (тип волн, их спектральный состав) дает возможность разделить ряд событий по их природе, т.е. отделить явления в ледовой толще от коровых землетрясений. Исходя из непротиворечивых результатов пространственно-временного анализа показано, что ледовые события на седловинах куполов могут инициироваться произошедшими вблизи коровыми землетрясениями. Скорости развития процессов во льду, приводящим к льдотрясениям, составляют км/ч. Этот вид ледовой сейсмичности, индуцированной событиями в земной коре, представляется важным для гляциологии и требует тщательного сбора данных для аналогичных ситуаций.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-27-00095 от 29.12.2023 г. “Исследования сейсмической активности ледников архипелага Северная Земля”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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.
- Антоновская Г.Н., Ковалев С.М., Конечная Я.В., Смирнов В.Н., Данилов А.В. Новые сведения о сейсмичности российской Арктики по данным пункта сейсмических наблюдений “Северная Земля” // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Т. 64. № 2(116). С. 170–181.
DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-2-170-181
- Атлас “Геология и полезные ископаемые шельфов России” / Гл. ред. М.Н. Алексеев. М.: Научный мир, 2004. 279 с.
- Богородский П.В., Макштас А.П., Кустов В.Ю. Первые результаты мерзлотных наблюдений на НИС “Ледовая база “Мыс Баранова” // Исследование природной среды высокоширотной Арктики на НИС “Ледовая база “Мыс Баранова” / Под общей редакцией А.П. Макштаса и В.Т. Соколова. СПб.: ААНИИ, 2021. С. 184–193.
- Бужин И.В., Глазовский А.Ф., Май Р.И., Миронов Е.У., Нестеров А.В., Наумов А.К., Гудошников Ю.П. Исследование динамики и морфометрии ледников и айсбергов и прикладное использование полученных результатов при освоении углеводородных месторождений на континентальном шельфе Российской Арктики // Вестник Российского фонда фундаментальных исследований. 2020. Т. 3-4(107-108). С. 21–37.
- Быков В.Г. Предсказание и наблюдение деформационных волн Земли // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 3. С. 721–754. DOI: 10.5800/GT-2018-9-3-0369
- Верниковский В.А., Добрецов Н.Л., Метелкин Д.В., Матушкин Н.Ю., Кулаков И.Ю. Проблемы тектоники и тектонической эволюции Арктики // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 8. С. 1083–1107.
- Виноградов Ю.А., Федоров А.В., Баранов С.В., Асминг В.Э., Федоров И.С. О выделении айсбергообразующих льдотрясений по сейсмоинфразвуковым данным // Лед и снег. 2021. Т. 61. № 2. <https://doi.org/10.31857/S2076673421020087>.
- Голубев В.Н. Современные колебания ледникового купола Вавилова на Северной Земле // Материалы гляциологических исследований. 1998. Вып. 85. С. 196–204.
- Каминский В.Д. Глубинное строение Центрального Арктического бассейна / Автореф. дисс. ... доктора геол.-мин. наук. СПб., 2009. 47 с.
- Каталог ледников СССР / Отв. ред. О.Н. Виноградов. 1980. Т. 16. Вып. 1. 81 с.
- Котляков В.М. Ледники // Большая российская энциклопедия 2004–2017. <https://bigenc.ru/geology/text/5556912?> (Дата обращения 05.02.2024).
- Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов / Отв. ред. акад. РАН В.В. Адушкин. М.: ГЕОС, 2016. 424 с.
- Малышев Н.А., Никишин В.А., Никишин А.М., Обметко В.В., Мартиросян В.Н., Клещина Л.Н., Рейдик Ю.В. Новая модель геологического строения и истории формирования Северо-Карского осадочного бассейна // Доклады Академии наук. 2012. Т. 445. № 1. С. 50–54.
<http://www.evgenyusev.narod.ru/tecto/malyshev-2012.pdf>
- Морозов А.Н., Ваганова Н.В., Асминг В.Э., Евтюгина З.А. 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.
- Репина И.А., Артамонов А.Ю., Варенцов М.И., Хавина Е.М. Взаимодействие атмосферы и океана в Северном Ледовитом океане по данным измерений в летне–осенний период // Российская Арктика. 2019. № 7. С. 49–61.
DOI: 10.24411/2658-4255-2019-10075.
- Ружич В.В., Псахье С.Г., Черных Е.Н., Борняков С.А., Гранин Н.Г. Деформации и сейсмические явления в ледяном покрове озера Байкал // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 3. С. 289–299.
- Сочнев О.Я., Корнишин К.А., Тарасов П.А., Сальман А.Л., Глазовский А.Ф., Лаврентьев И.И., Ефимов Я.О., Мамедов Т.Э. Исследование ледников российской Арктики для обеспечения айсберговой безопасности работ на шельфе // Нефтяное хозяйство. 2018. № 10. С. 92–97.
DOI: 10.24887/0028-2448-2018-10-92-97
- Федоров А.В., Асминг В.Э., Баранов С.В., Виноградов А.Н., Евтюгина З.А., Горюнов В.А. Сейсмологические наблюдения за активностью ледников архипелага Шпицберген // Вестник МГТУ. 2016. Т. 19. № 1/1. С. 151–159.

- Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов: Общая и прикладная // Изд. стереотип. 2019. 446 с.
- Шапошников В.М., Александров А.В., Матанцев Р.А., Ивановская О.Д. Анализ айсберговой опасности на Северном морском пути на примере газозовов // Арктика: экология и экономика. 2017. № 2(26). С. 76–81.
- Antonovskaya G.N., Basakina I.M., Vaganova N.V., Kapustian N.K., Konechnaya Y.V., Morozov A.N. Spatiotemporal Relationship between Arctic Mid-Ocean Ridge System and Intraplate Seismicity of the European Arctic // Seismolog. Res. Lett. 2021. V. 92. № 5. P. 2876–2890.
https://doi.org/10.1785/0220210024.
- Arctic Petroleum Geology. Geological Society Memoir 35 / Eds A.M. Spencer, A.F. Embry, D.L. Gautier, A.V. Stupakova, K. Sørensen. London: Geological Society, 2011. 661 p.
DOI: 10.1144/M35.21
- Aster R., Winberry J. Glacial seismology // Rep. Prog. Phys. 2017. V. 80(126801). 39 p.
DOI: 10.1088/1361-6633/aa8473.
- Berg B., Bassis J. Crevasse advection increases glacier calving // Journal of Glaciology. 2022. P. 1–10.
DOI: 10.1017/jog.2022.10
- Blankenship D.D., Anandakrishnan S., Kempf J.L., Bentley C.R. Microearthquakes Under and Alongside Ice Stream B, Antarctica. Detected By A New Passive Seismic Array // Annals of Glaciology. 1987. V. 9. P. 30–34.
DOI: https://doi.org/10.3189/S0260305500200712
- Deichmann N., Ansorge J., Scherbaum F., Aschwanden A., Bernardi F., Gudmundsson G.H. Evidence for deep icequakes in an Alpine glacier // Annals of Glaciology. 2000. V. 31(1). P. 85–90.
DOI: 10.3189/172756400781820462
- Dowdeswell J.A., Gorman M.R., Bassford R.P., Williams M. et al. Form and flow of the Academy of Sciences Ice Cap, Severnaya Zemlya, Russian High Arctic // J. of Geophys. Res. 2002. V. 107(B4). P. 1–16.
DOI: 10.1029/2000jb000129
- Dowdeswell J.A., Williams M. Surge-type glaciers in the Russian High Arctic identified from digital satellite imagery // Journal of Glaciology. 1997. V. 43(145). P. 489–494.
DOI: 10.3189/S0022143000035097
- Ekström G., Nettles M., Abers G.A. Glacial earthquakes // Science. 2003. V. 302(5645). P. 622–624.
DOI: 10.1126/science.1088057
- Ekström G., Nettles M., Tsai V.C. Seasonality and increasing frequency of Greenland glacial earthquakes // Science. 2006. V. 311(5768). P. 1756–1758.
DOI: 10.1126/science.1122112
- ELRESS, Event Locator Seismological Software, 2021. Available from: <http://www.krsc.ru/?q=en/EL> (Last Accessed February 6, 2024)
- Engen Ø., Eldholm O., Bungum H. The Arctic plate boundary // J. of Geophys. Res. 2003. V. 108. № B2. 2075.
DOI: 10.1029/2002JB001809
- Fedorov A.V., Asming V.E., Jevtjugina Z.A., Prokudina A.V. Automated Seismic Monitoring System for the European Arctic // Seismic. Instruments. 2019. V. 55. P. 17–23.
https://doi.org/10.3103/S0747923919010067
- Hudson T.S., Brisbourne A.M., Walter F., Graff D., White R.S., Smith A.M. Icequake source mechanisms for studying glacial sliding // J. of Geophys. Res.: Earth Surface. 2020. V. 125. e2020JF005627.
https://doi.org/10.1029/2020JF005627
- Kawasaki I., Asai Y., Tamura Y. Space-time distribution of interpolate moment release including slow earthquakes and the seismo-geodetic coupling in the Sanriku-oki region along the Japan trench // Tectonophysics. 2001. V. 330. P. 267–283.
DOI: 10.1016/S0040-1951(00)00245-6
- Köhler A., Maupin M., Nuth C., Van Pelt W. Characterization of seasonal glacial seismicity from a single-station on-ice record at Holtedahlfonna, Svalbard // Annals of Glaciology. 2019. V. 60(79).
DOI: 10.1017/aog.2019.15
- Köhler A., Nuth C., Schweitzer J., Weidle C., Gibbons S.J. Regional passive seismic monitoring reveals dynamic glacier activity on Spitsbergen, Svalbard // Polar Research. 2015. V. 34:1. 26178.
DOI: 10.3402/polar.v34.26178
- Konstantinou K.I., Schlindwein V. Nature, wavefield properties and source mechanism of volcanic tremor: A review // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2003. V. 119(1–4). P. 161–187.
DOI: 10.1016/S0377-0273(02)00311-6
- Kremenetskaya E., Asming V., Ringdal F. Seismic Location Calibration of the European Arctic // Pure and Applied Geophysics. 2001. V. 158. P. 117–128.
https://doi.org/10.1007/PL00001151
- Lay T., Wallace T.C. Modern global seismology. San Diego, CA: Academic Press, 1995.
- Mikesell T.D., van Wijk K., Haney M.M., Bradford J.H., Marshall H.P., Harper J.T. Monitoring glacier surface seismicity in time and space using Rayleigh waves // J. of Geophys. Res. 2012. V. 117. F02020.
DOI: 10.1029/2011JF002259
- Moholdt G., Wouters B., Gardner A.S. Recent mass changes of glaciers in the Russian High Arctic // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39. P. 1–5.
DOI: 10.1029/2012gl051466
- Morozov A.N., Vaganova N.V., Asming V.E., Mikhailova Ya.A. Seismicity of the North of the Russian Plate:

- Relocation of Recent Earthquakes // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2018. V. 54. № 2. P. 292–309.
DOI: 10.1134/S1069351318020143
- Morozov A.N., Vaganova N.V., Konechnaya Ya.V., Asming V.E., Dulentsova L.G., Evtyugina Z.A. Seismicity in the far Arctic areas: Severnaya Zemlya and the Taimyr Peninsula // *Journal of Seismology*. 2021. V. 25. Iss. 5. P. 1171–1188.
DOI: 10.1007/s10950-021-10032-1
- Ohta Y., Freymueller J.T., Hreinsdóttir S., Suito H.A. A large slow slip event and the depth of the seismogenic zone in the south central Alaska subduction zone // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2006. V. 247(1–2). P. 108–116.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2006.05.013>
- O’Neel S., Marshall H.P., McNamara D.E., Pfeffer W.T. Seismic detection and analysis of icequakes at Columbia Glacier, Alaska // *J. of Geophys. Res.* 2007. V. 112. F03S23.
DOI: 10.1029/2006JF000595
- O’Neel S., Pfeffer W.T. Source mechanics for monochromatic icequakes produced during icebergs calving at Columbia Glacier, AK // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. L22502.
DOI: 10.1029/2007GL031370
- Podolskiy E.A., Walter F. Cryoseismology // *Rev. Geophys.* 2016. V. 54. P. 708–758.
DOI: 10.1002/2016RG000526
- Pubellier M., Rossi P., Petrov O., Shokalsky S., St-Onge M., Khanchuk A., Pospelov I. Tectonic map of the Arctic / 1st ed., scale 1:10 000 000. St. Petersburg, Russia: VSEGEI Printing House, 2018.
DOI: 10.14683/2018TEMAR10M
- Sánchez-Gómez P., Navarro F.J., Dowdeswell J.A., De Andrés E. Surface velocities and calving flux of the Academy of Sciences Ice Cap, Severnaya Zemlya // *Ice and Snow*. 2020. V. 60(1). P. 19–28.
DOI: 10.31857/S2076673420010020
- Walter F., Canassy P.D., Husen S., Clinton J.F. Deep icequakes: what happens at the base of Alpine glaciers? // *J. of Geophys. Res.: Earth Surface*. 2013. V. 118. P. 1720–1728.
DOI: 10.1002/jgrf.20124
- West M.E., Larsen C.F., Truffer M., O’Neel S., Le Blanc L. Glacier microseismicity // *Geology*. 2010. V. 38(4). P. 319–322.
DOI: 10.1130/G30606.1
- Winter K., Lombardi D., Diaz-Moreno A., Bainbridge R. Monitoring Icequakes in East Antarctica with the Raspberry Shake // *Seismolog. Res. Lett.* 2021. V. 92(5). P. 2736–2747.
DOI: 10.1785/0220200483

CRYOSEISMOLOGY OF THE SEVERNAYA ZEMLYA ARCHIPELAGO — THE FIRST RESULTS OF PERMANENT MONITORING

G. N. Antonovskaya^{1,*}, Ya. V. Konechnaya^{1,2}, N. K. Kapustian¹, and E. R. Morozova¹

¹Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Nikolsky ave., 20, Arkhangelsk, 163020 Russia

²Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Lenin ave., 139, Obninsk, Kaluga region, 294030 Russia
*e-mail: essm.ras@gmail.com

We present the first results of local seismicity monitoring of the Severnaya Zemlya archipelago for the end of 2016 to 2023, recorded by a single permanent seismic station installed on Bolshevik Island. 73 local seismic events with P- and S-phases have been identified. The possibility of their sorting (earthquake or icequake) by comparing their waveforms and time-frequency analysis with regional earthquakes that occurred in the archipelago area is considered. The spatial and temporal sequence and migration rate of the events show that glacial-type events can be the result of stress discharge in glaciers under the impact of shallow crustal earthquakes within a radius of ~30 km. It is shown how, given the difficulty of deploying a seismic network, even a single permanent seismic station can provide useful information on glacial and crustal earthquakes.

Keywords: Severnaya Zemlya archipelago, Cryoseismology, seismic catalogue, icequake, time-frequency signal analysis, monitoring