



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра прикладной океанографии
и комплексного управления прибрежными зонами

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(магистерская диссертация)

На тему Зарождение айсбергов от ледников по данным сейсмометров на припае
и на берегу

Исполнитель Кравцова Карина Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

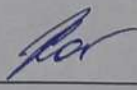
Чанцев Валерий Юрьевич
(фамилия, имя, отчество)

Научный консультант кандидат физико-математических наук
(ученая степень, ученое звание)

Колабутин Николай Валерьевич
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой


(подпись)

кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«10» 06 2025 г.

Санкт-Петербург

2025

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Состояние изученности динамики айсбергообразования в Арктическом бассейне.....	6
1.1 Определение и механизмы образования айсбергов	6
1.2 Анализ состояния исследований зарождения айсбергов в Арктике	12
Глава 2. Методы исследования и обработки данных.	23
2.1 Методы исследования	23
2.2 Измерительные приборы	29
2.3 Исходные данные	38
Глава 3. Анализ и обработка полученных данных сейсмометров.	43
Заключение	88
Список использованной литературы.....	90
Приложения	94

Введение

В современных условиях стремительно изменяющегося глобального климата на планете, на что, кстати говоря, Арктические регионы более остро и быстро реагируют в отличие от других районов. Авторами статьи [1] сообщается, что наблюдается тенденция на отступление и абляцию ледников, а также увеличение их айсбергопродуктивности, приводя к большему количеству айсбергов на акватории морей и путях Северного морского пути (СМП), что делает изучение процессов их зарождения и движения особенно актуальным и значимым в настоящее время. Понимание этих процессов играет важную роль при оценке воздействия изменения климата на морские экосистемы и уровень моря.

Кроме того, айсберги представляют собой серьезную угрозу для морского судоходства и инфраструктуры данного бассейна. Исследование их зарождения может помочь в разработке более эффективных систем прогнозирования, предупреждения и навигации, что, в свою очередь, снизит риск столкновений судов, стационарных нефте- и газодобывающих платформ с айсбергами. Немаловажно заметить, что использование сейсмометров для мониторинга процессов, связанных с образованием айсбергов, является достаточно новым и мало применимым способом изучения данных явлений. Оно открывает новые горизонты в геофизических исследованиях, что может привести к более глубокому пониманию механики льда и его взаимодействия с окружающей средой.

Применение современных технологий, таких как сейсмометрия, для изучения природных явлений демонстрирует важность междисциплинарного подхода в науке и может способствовать развитию новых методов мониторинга и анализа данных. Таким образом, данная тема является актуальной как с научной, так и с практической точки зрения, что делает её важной для

дальнейших исследований в области геофизики, экологии и безопасности мореплавания.

В данной диссертационной работе **объектами** исследования являются айсберги и процессы, связанные с их зарождением.

В роли **предмета** исследования выступают данные, полученные с помощью сейсмометров, которые фиксируют не только колебания ледяного покрова и земли, но и приходящие ко льду различного рода волны, а также явления и события, способствующие и сопутствующие появлению трещин, разломов и образованию айсбергов. К ним можно отнести температуру воздуха, градиенты атмосферного давления, а именно связанные с ними явления такие как скорость и направление ветра, подъёмы и спады уровня моря, а также образование циклонов и антициклонов, разного рода динамические факторы, включающие в себя приливо-отливные явления, океанические волны различной природы, возникающие в результате штормовых нагонов, циклонов, волны Цунами, сейсмические процессы, в добавок ко всему необходимо учитывать собственную динамика ледника. Стоит отметить значимость дальнейшего анализа и интерпретации полученных результатов для понимания механизмов образования айсбергов, которые тоже будут относиться к предмету исследования.

Целью моего исследования является анализ процессов зарождения айсбергов на основе данных сейсмометров, полученных с НИС «Ледовая база Мыс Баранова» и сейсмостанций, установленных на Шпицбергене на леднике Норденшельда, для выявления факторов, влияющих на их образование, а также понимание механики взаимодействия ледяного покрова с окружающей средой и динамических явлений, воздействующих на ледяной покров и способствующих формированию айсбергов.

Для достижения намеченной цели необходимо решить ряд поставленных **задач:**

- Систематизация и высокочастотная фильтрация (10 Гц) полученных натурных данных сейсмометров и попутных метеорологических параметров с НИС «Ледовая база Мыс Баранова» и установленных сейсмостанций на леднике Норденшельда на арх. Шпицберген;
- Расчёт частотных спектров и вейвлетов, а также их анализ;
- Выявление событий, относящихся и сопутствующих образованию трещин, разломов и айсбергов (ледотрясения);
- Нахождение признаков схода ледников и образования новых айсбергов.

Научно-практическая значимость заключается в том, что результаты исследования будут способствовать углублению понимания процессов образования айсбергов и динамического состояния ледников. Полученные данные могут быть использованы для разработки более точных моделей прогнозирования откалывания айсбергов, что, в свою очередь, поможет при оценке рисков и обеспечения безопасности морского судоходства и добычи полезных ископаемых на арктическом шельфе, в изучении изменений глобального климата и при планировании прибрежной инфраструктуры. Также важно обратить внимание на то, что исследование формирования айсбергов с помощью сейсмометров может также способствовать нашему пониманию взаимодействия ледового покрова и океана. Отслеживая и анализируя данные сейсмометров с шельфовых ледников и берега, мы получаем информацию об их структурной целостности, потенциальных рисках отрыва айсбергов и динамике движения льда. Эта информация может иметь решающее значение для оценки стабильности ледниковых щитов и прогнозирования будущего повышения уровня моря, а также для улучшения имитационных моделей состояния и поведения ледников.

Глава 1. Состояние изученности динамики айсбергообразования в Арктическом бассейне

1.1 Определение и механизмы образования айсбергов

Айсберг — это огромный массив льда, имеющий различные конфигурации формы, отколовшийся от ледника и плавающий в открытом море. В Арктике они имеют гораздо меньшие размеры по сравнению с Антарктическими. Так, например, в Северной Атлантике очень большим считается айсберг высотой более 75 м и длиной более 200 м, а в Антарктиде максимальная длина составляет больше 3200 м.

Когда приповерхностная температура воздуха в летний период возрастает, то процессы образования айсбергов на шельфовых и выводных ледниках, краевая часть которых выходит в море, значительно усиливаются. Так в работе [1] сказано, что в 2020 год был одним из самых аномально тёплых за последние двадцать лет и что суммарно от всех ледников Российского сектора Арктических морей, по спутниковым данным, было зафиксировано более 15 тысяч айсбергов, что примерно на 33% больше предыдущих исследованных годов. Большая часть сформировалась от ледников архипелага Северная Земля, где согласно полученным с помощью спутников данным в 2020 году в этом районе продуцирования появилось около восьми тысяч айсбергов.

В своё время А.П. Капица для процесса отделения айсберга от ледника предложил термин «облом айсбергов» [2]. Под «обломом айсбергов» обычно понимают откалывание крупных столообразных айсбергов от шельфовых ледников. Но в общем случае, они образуются при отрыве пограничных зон различных ледников (шельфовых, покровных и т.д.), затем начинается путь дрейфа на открытой воде. Этот процесс именуют калвингом (Calving), он до сих пор плохо изучен, но существует несколько факторов, играющих основную роль

в зарождении айсбергов. Таковыми являются динамика самого ледника и ряд динамических воздействий, таких как океанические приливы и волны различных видов, возникающие в результате штормовых нагонов, циклонов, подъёма и спада уровня моря или волн Цунами, также стоит отметить не последнюю роль сейсмических процессов. Движение айсберга осуществляется за счёт ветрового форсинга, воздействия морского течения, силы Кориолиса, приливо-отливных явлений и многих других.

Давно известно, что примерно $7/8$ массы айсберга находится не над водной поверхностью, а под ней, то есть практически вся часть массы и объёма покоится под водой. В этом и заключается его главная опасность для морского судоходства и гидротехнических сооружений, так как его надводная часть может быть едва заметной или казаться не опасной. Но никогда не ясно, каков его масштаб и форма в толще воды. Айсберги представляют значительную опасность для любой деятельности человека в морях российского арктического шельфа и могут оказывать воздействие на такую важную экономическую сферу, как добыча полезных ископаемых и углеводородов в этом регионе [3]. Например, подвергаются опасности со стороны айсбергов морские стационарные газовые и нефтяные платформы, подводные трубопроводы и кабели также находятся в зоне риска из-за ледовой экзарации, другими словами пропахивание дна дрейфующими айсбергами и торосами.

За последние десять лет вероятность столкновения с айсбергами в арктических морях возросла из-за изменений климата на планете. Это привело к увеличению числа образующихся айсбергов каждый год и роста их размеров, что, в свою очередь, повышает риск столкновений судов и гидротехнических сооружений с ними. Поэтому крайне важно обеспечить постоянный мониторинг айсбергопродуктивных районов. Наиболее эффективным способом реализации этой задачи является использование спутниковой информации, которая предоставляет возможность отслеживать появление и перемещение этих опасных ледовых образований в реальном времени. Это позволит своевременно

предупреждать о потенциальной опасности и принимать необходимые меры для обеспечения безопасности добычи углеводородов и газа, судоходства и рыбной ловли в арктическом секторе РФ [4]. Но дистанционные методы не всегда позволяют обнаружить айсберг в момент его образования, с чем я и столкнулась в процессе своего исследования. Это связано с несколькими факторами: пространственное разрешение прибора может быть недостаточным, и качество снимка не позволит чётко определить айсберг это или нет; для видимого диапазона значительную роль играет облачность, которая делает невозможным просмотр того или иного региона, также можно отметить один затрудняющий фактор северных регионов – Полярная ночь, в период которой некоторые спутники не ведут съёмку.

Большая часть ледников архипелагов Арктической зоны России (архипелаги Земля Франца-Иосифа, Шпицберген, Новая Земля и Северная Земля) достигают моря и формируют айсберги, наибольшая концентрация которых наблюдается в районах их зарождения. Интенсивность и объём их образования и размеры зависят от сочетания групп факторов, которые связаны между собой [1]:

1. Скорость движения ледников и их стабильность, изменения этих скоростей за разные периоды;
2. Расположение фронта ледника в море и его изменение, а также формы поверхности ледниковых языков;
3. Форма залива, фьорда, подледниковой долины, конфигурация рельефа дна и прилегающей акватории.

Что мы в сущности знаем о механизме образования айсбергов? В действительности наши знания о нём довольно ограничены, так как этот процесс плохо изучен, что затрудняет его прогнозирование. Когда концы ледников достигают моря в виде вертикальной стены или пологого ската, то по мере погружения, из-за того, что плотность льда меньше плотности воды, на них будет действовать постоянно возрастающее давление воды снизу. Это давление не

является постоянным вследствие периодических и непериодических колебаний уровня моря, что приводит к откалыванию от края ледника кусков различного масштаба. Процесс отрыва айсберга от продуцирующего ледника происходит в случае, когда его скользящий край достигает гидростатического равновесия [5].

Разрушение выступающих частей ледника может происходить тремя из перечисленных ниже механизмов [5, 6]:

- После образования сквозной трещины поперёк конца ледника откалывается монолитный кусок и вследствие колебаний приходит в состояние равновесия, тогда он и будет считаться айсбергом. Так, к примеру, образуются наиболее крупные айсберги.
- Если летняя абляция ледника была интенсивнее разрушения его подводной части, то язык ледника принимает форму «подводного тарана», распространяющийся на большие расстояния в море. Со временем он начинает обламываться, а осколки всплывают на поверхность. Но этот вариант маловероятен. Айсберги, образовавшиеся по такому механизму, как правило, небольшого размера и имеют нечёткую форму. В северном полушарии такой путь айсбергообразования присущ относительно южным широтам преимущественно летом.
- При разрушении выступающей части ледника от его отвесной стены со временем начинают отрываться и обрушаться в воду куски льда различного масштаба. Этот способ обычен для медленно движущихся ледников высоких широт и островов, имеющих форму оледенения в виде ледяного купола.

Немаловажную роль в механизме формирования айсбергов играет угол уклона ледника к уровню моря. Так при сползании ледников в море по резкому скату, довольно быстро происходит их разлом и всплытие айсбергов. В то время как уже растресканный ледник медленно движется вдоль покатого склона, и тогда процесс его разрушения длится постепенно [7].

Воздействие ветровых волн может привести к отколу айсбергов, когда эти колебания совпадают с резонансными колебаниями самого покровного ледника [7]. Основной вклад в формирование и дальнейшую жизнь этих ледников вносят изменения уровня моря, которые служат ключевым фактором для их разрушения, способствуя началу процесса калвинга. На периферии шельфовых ледников, которые глубоко вдаются в море, также влияют нерегулярные колебания уровня воды, вызванные разнообразными длинными волнами, зыбью из отдалённых районов, сейсмические волны, Цунами и барические длинные волны. Все эти факторы приводят к колебаниям участков шельфовых ледников (их амплитуда, как правило, не более 2 м), находящихся в воде, параллельно отвесной линии, то есть в вертикальном направлении, что может привести к формированию трещин, по которым и происходит отделение массивов льда. Тем не менее, штормовые волны и зыбь не могут служить единственной причиной для отрыва айсбергов от шельфовых ледников [5].

Приливо-отливные явления также способствуют процессам деструкции шельфовых ледников. В тех областях, где в летний период море свободно от льда, морские волны начинают формировать волноприбойные ниши в стенке ледника над уровнем воды. Фирн, находящийся над этими нишами, начинает постепенно откалываться, в результате образуя подводные выступы [8]. При достижении значительных такой подводный таран создаёт подъёмную силу, способствуя откалыванию айсбергов (это довольно редко встречающееся явление).

Экстремальные подвижки ледников к океану, другими словами сёрджи, во многом способствуют зарождению айсбергов в течение их разрушения («отёла»). Это объясняется тем, что увеличение скорости движения ледников повышает их способность к продуцированию айсбергов [9]. По Гляциологическому словарю [10], «Сёрдж» (подвижка ледника, резкое ускорение движения ледника) — это регулярно встречающееся, представляющее собой одну из стадий пульсаций ледников или единичное ускорение, возникающее в результате резких

изменений внешних условий (накопление воды, обвалы, землетрясения). Существование таких подвижек ледников вне автоколебаний (пульсаций) достоверно не установлено».

Размеры айсбергов и интервалы между их образованием зависят от толщины кромки ледников, скорости их перемещения, топографии дна и характера протекания различных динамических явлений в шельфовой зоне [3]. Отколы массивных кусков льда от ледниковых щитов является одним из механизмов расхода. Процессы калвинга происходят с определённой периодичностью, составляющая от нескольких лет до нескольких десятилетий, которая может варьироваться около некоторого среднего положения, устанавливаемого только с помощью статистических данных за длительный период времени. Подвижки льда в одном и том же леднике происходят с регулярными интервалами времени, как правило, в диапазоне от 10 до 100 лет [11]. Отрыв айсбергов, как правило, наблюдается один раз за год в весенней время года, то есть после вскрытия припая. Важно отметить, что процесс калвинга шельфовых ледников встречается намного реже, особенно в Арктических районах, примерно один раз за период от 3 до 5 лет. Весна отличается более интенсивным протеканием процессов разломов льда и отёла айсбергов вследствие появления термического напряжения в поверхностном слое, например, перепады температур [5].

На архипелаге Северная Земля формируются айсберги преимущественно столообразного типа в результате деструкции вытянутых узких частей выводных ледников. Каждый год они попадают в моря Карское и Лаптевых после вскрытия припайного льда. Бывали случаи, когда разрушения припая вдоль восточного побережья архипелага не происходило в течение двух-трёх лет, в некоторой степени это можно объяснить присутствием айсбергов, которые сели на мель, тем самым образуя место, откуда проще намерзать льду [5].

Таким образом, процесс зарождения айсбергов является сложным и многофакторным, так как обуславливается множеством причин. К ним можно

отнести динамику ледников, от которых они образуются, климатические условия регионов и особенности морской среды. До сих пор механизмы их формирования слабо изучены в силу труднодоступности районов генерации и суровости условий работы. В последние десятилетия из-за изменений глобального климата возросло количество айсбергов, что создает значительные риски для судоходства и инфраструктурных объектов в Арктике, подчёркивая важность дальнейших исследований и разработок методов раннего обнаружения и предотвращения возможных опасных явлений.

1.2 Анализ состояния исследований зарождения айсбергов в Арктике

В Российском секторе Арктического региона источниками зарождения айсбергов являются шельфовые и выводные ледники, а также ледниковые языки, находящиеся на архипелагах Шпицберген, Земля Франца-Иосифа, Новая Земля и Северная Земля, расположение которых продемонстрировано на рисунке 1.

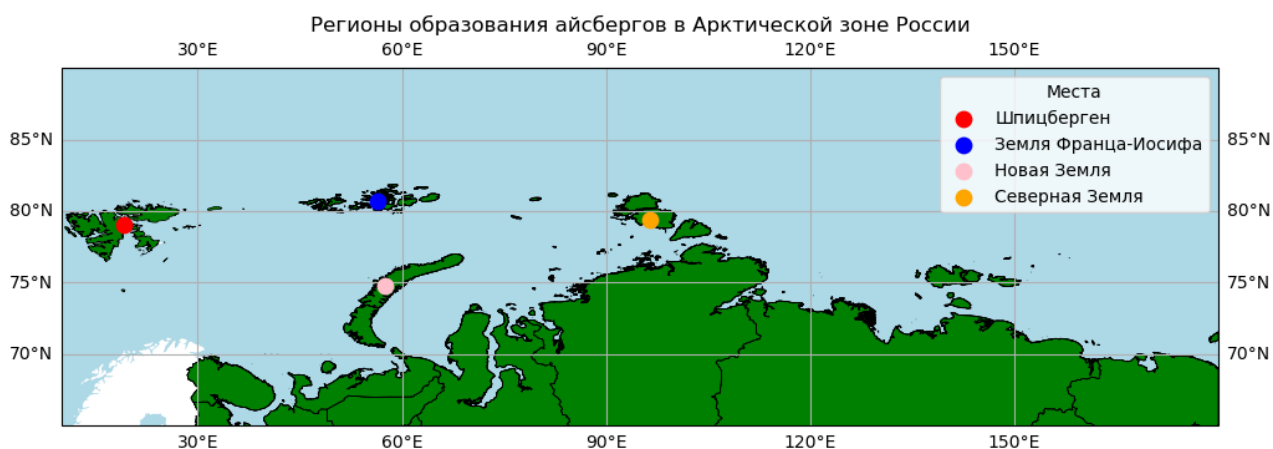


Рисунок 1. Районы образования айсбергов в Арктическом секторе Российской Федерации.

Поток потери льда от каждого из них различен в силу их географического положения, вытекающих из этого климатических особенностей, в связи с системой циркуляции океана, динамикой продуцирующих ледников и площадей покровного оледенения. Так, например, наибольшие значения айсбергового стока отмечаются на архипелагах Шпицберген и Земля Франца-Иосифа, а именно в среднем $4 \text{ км}^3/\text{год}$ [12], на Северную Землю приходится 1.52–

1.9 км³/год [13]. В частности для моря Лаптевых очагом образования айсбергов являются ледники арх.Северная Земля, по большей части вдоль восточных берегов островов Комсомолец и Октябрьской Революции, ещё можно отметить в качестве источника акватории проливов Шокальского и Красной Армии, где возможно формирование айсбергов после взлома припайного льда [12].



Рисунок 2. Ледники архипелага Северная Земля, являющиеся очагами зарождения айсбергов [13]. Нумерация дана по Всемирному каталогу ледников, ледоразделы (красные линии) ледниковых куполов нанесены в соответствии с базой данных GLIMS [14].

До настоящего времени деформационные структурно-текстурные изменения во льду из-за форсинга волн всё также является актуальным объектом исследования. Так в совместной работе Епифанова В.П. и Сазонова К.Е. [15] они утверждают, что вопросы, связанные с влиянием резонансных явлений на пространственную изменчивость прочностных свойств ледяного покрова, и все возможные варианты воздействия импульсов напряжений или волн на процесс разрушения льда в достаточной мере не исследованы. Авторы считают, что эмиссия упругих волн происходит вследствие локальных деформаций в структуре льда, которые, в свою очередь, связаны с напряжениями,

возникающими в процессе кристаллизации воды. В другой своей работе [16] К.Е. Сазонов и В.П. Епифанов предложили определение для так называемых вторичных текстур льда. Они описали их как «замёрзшие волны», возникающие в результате интерференции резонансных волн.

Вследствие неизбежных случайных толчков в ледяном поле присутствуют собственные микроколебания, которые вызывают параметрический резонанс, проявляющийся в локальном увеличении пластичности льда. Показателями таких волновых процессов будут вторичные текстуры льда. В статье [15] говорится, что стационарные периодические волновые структуры в ледяном поле образуются в результате интерференции изгибно-гравитационных и продольных волн.

Калвингом (glacier calving) принято считать процессы деструкции ледниковых покровов, к группе которых относят растрескивание (crevassing) тела ледника, аномально быстрые подвижки (surging), краевое обрушение выводных ледников, выходящих на поверхность моря. Все эти явления генерируют сейсмические сигналы, называемые ледотрясениями [17].

Исследование сейсмичности ледников началось с американского учёного сейсмолога Герона Экстрёма из Колумбийского университета [18,19,20]. В своих статьях он описывал низкочастотные сигналы от крупных выводных ледников побережья Гренландии, которые были зарегистрированы глобальной сейсмологической сетью. Также Экстрём обнаружил сезонную изменчивость количества ледотрясений, выдвинул модель очага сейсмических импульсов, отражающую связь с подвижками ледника по его ложу.

Так авторами статьи [17] говорится, что наибольшей популярностью из всех разновидностей ледотрясений среди исследователей пользуются обрушения краевой части ледника (калвинг). Обычно перед таким обвалом наблюдается его растрескивание, или же оно происходит одновременно с ним. Появление и дальнейшее состояние крупных трещин регистрируется сейсмометрами, установленными на льду, в виде импульсных сейсмических событий, которые

также относятся к ледотрясениям. В работе [21] выявлена значимая корреляционная связь между длительностью обрушения края ледника и длительностью сейсмической записи ледотрясения. И в случае использования систем удалённого мониторинга появится возможность осуществлять постоянные наблюдения за состоянием припая, дрейфующего льда и покровного оледенения в Арктике на различных временных масштабах, а также позволит нам вести статистику интенсивности обрушений ледников, которая может дать новые сведения о реакции ледников на изменения глобального климата, наиболее ярко проявляющиеся именно в этом районе.

Нельзя не заметить, как Виноградов Ю.А. со своими соавторами в [17] отмечает довольно значимые преимущества совместного применения сейсмических и инфразвуковых станций, к которым можно отнести относительно небольшие затраты, непрерывный (в течение всего года) и работающий при любых погодных условиях инструмент для реализации таких исследований. Одновременное использование сейсмических и инфразвуковых методов геофизического мониторинга позволяет надёжно отличать ледотрясения от слабых землетрясений, а также более точно определять координаты эпицентров ледниковых событий по сравнению с применением каждого из них по отдельности, так как эти данные только дополняют друг друга, делая анализ более полным и информативным. В силу того, что при разрушении льда порождается спектр сейсмических и акустических (в инфразвуковом диапазоне тоже) колебаний, то применение подобных датчиков, установленных на ледяном покрове, для выявления ледотрясений будет самым точным и целесообразным.

В статье [17] Виноградов со своими коллегами говорит о трудностях, появляющихся при применении сейсмоинфразвукового метода наблюдений за обрушениями кромок ледников. Так главная проблема состоит в том, чтобы точным образом отличить события откола льда от других видов ледотрясений, например, растрескивания. Очевидно, что нужно использовать информацию о

местоположении эпицентра, который обычно находится вблизи краевой зоны ледника. Но данное предложение имеет некоторые ограничения:

- Нечёткость вступлений объёмных сейсмических волн от ледотрясений, вдобавок к этому у них слабовыраженная поляризационная картина, что приводит к неточной локализации источника.
- Сложность в определении вступлений различных фаз волн усугубляется тем, что айсбергообразующие процессы часто происходят не в одном месте, а на достаточно протяжённом участке ледниковой кромки, что усложняет волновую картину и интерпретацию сейсмических данных.

Для упрощения и удобства анализа полученных данных предлагается привлечь записи инфразвуковых датчиков, с помощью которых время прихода акустических сигналов можно принимать в качестве маркера начала вторичных волн. Это улучшает точность определения координат эпицентра, но всё равно не даёт однозначного ответа о природе события, так как реальный источник может находиться на расстоянии несколько сотен метров от края ледника.

Авторы работы [17] поясняют необходимость учёта дополнительных критериев, которые должны быть основаны на отличительных характеристиках сейсмических и инфразвуковых записей, чтобы явно отличать айсбергопродуцирующие процессы от других. Источники таких сигналов состоят в прямой связи с различными этапами зарождения самого айсберга. К ним относятся:

- отрыв льда от края ледника;
- падение отколотых кусков вдоль фронта ледника;
- столкновение с водой и дном.

При успешном обнаружении и фиксации этих фаз на сейсмических и инфразвуковых записях можно будет точно установить природу ледотрясения.

Как показано в [17], что ледотрясения, способствующие появлению дрейфующих айсбергов, генерируют особые сейсмические и акустические сигналы с непохожим на остальные спектральным составом, также им

свойственны ярко выраженные полосы в спектрограмме появляющиеся после падения огромной глыбы льда в воду. Эти характерные признаки появляются благодаря отражению волн от дна и поверхности водоёма при падении льда в воду.

В совместной статье [22] Антоновской Г.Н., Ковалёва С.М., Смирнова В.Н. и ряда их соавторов представлены результаты анализа данных сейсмической станции с кодовым именем SVZ, касающиеся регистрации сейсмических событий и анализ полученных данных в Центральной части Северного Ледовитого океана, в ней рассматривается обработка региональных и локальных землетрясений, а также событий ледникового происхождения.

Повышение уровня микросейсмического фона при низком уровне техногенных помех происходит с июля–августа по сентябрь, которое авторы связывают с интенсификацией хозяйственной деятельности на НИС «Ледовая база Мыс Баранова» в летний арктический период, освобождением акватории от льда и таянием снежного покрова, снижающим влияние экзогенных факторов. Большая часть зарегистрированных землетрясений на станции SVZ была отнесена к телесейсмическим, так как сейсмические волны от них пришли из различных регионов мира. В руководстве [23] по обработке региональных и локальных землетрясений было дано такое определение сейсмическим волнам «это механические упругие колебания, вызванные взрывом или землетрясением и распространяющиеся через геологические среды в виде деформаций на значительные расстояния от своего эпицентра».

В статье [22] её авторы предполагают связь между импульсными микроколебаниями (ИМК) и активностью припая или ледниковых куполов. Такой же природы колебания наблюдались и на других станциях Архангельской сети. Характеристики зарегистрированных ИМК:

- Длительность записи одного импульса — от 1,5 до 5 секунд.
- Наличие плавно затухающей хвостовой части.
- Невозможность выделения вступлений продольных и поперечных волн.

- Максимальная частота колебаний находится в диапазоне 2–8 Гц.

Остановимся немного на том, какими по характеру распространения бывают сейсмические волны. Продольные волны отличаются объёмным способом передачи возмущения толщи, то есть частицы среды движутся вдоль направления распространения волны. В отличие от них, поперечные характеризуются сдвиговым типом передачи возмущения, заставляя частицы двигаться в направлении, перпендикулярном к направлению движения волны. Их характерной особенностью является то, что продольные волны имеют большую скорость по сравнению с поперечными [23].

В своей статье [24] Фёдоров А.В., Асминг В.Э., Баранов С.В., Виноградов А.Н., Евтюгина З.А. и Горюнов В.А. демонстрируют свои результаты исследований сейсмической активности ледников архипелага Шпицберген, связанной с процессами их разрушения. Они подметили, что сейсмические события неравномерно распределены в течение суток, то есть большинство явлений было зарегистрировано с 10 до 12 часов по UTC, на эти же часы приходились максимальные температуры воздуха. Таким образом была обнаружена прямая взаимосвязь с повышением атмосферной температуры. Другими словами, активность сейсмических событий совпадает с высокими значениями температуры, что указывает на возможное воздействие её изменений на динамику ледников, а, следовательно, на регистрируемые сейсмостанциями явления. По итогу, всё это может указывать на то, что сейсмическая активность ледового покрова может быть вызвана процессами таяния и деструкции льда.

Для более детального изучения Антоновская с коллегами решили из общего числа всех зафиксированных событий выделить наиболее сильные и вследствие ручной локации выяснили, что большинство их эпицентров располагались в краевой части ледника, где обычно и происходит зарождение айсбергов, но некоторые эпицентры находились вдали от краёв, в зонах активного образования трещин и разломов ледяного покрова. Результаты спектрального анализа, проведённого авторами, показали, что во всех записях

сейсмометров доминируют низкие частоты величиной менее 6 Гц, так как был применен специальный детектор ледниковых событий, основанный на низкочастотном спектральном составе.

В ходе исследований авторами статьи [24] было выделено три основных региона с высокой сейсмоактивностью ледников:

- возле поселка Кингсбэй на северо-западе острова Западный Шпицберген;
- на юге острова возле залива Хорнсунн;
- в восточной части острова.

Таким образом, можно заключить, что проведённые исследования авторов работы [24] подтвердили тесную связь сейсмической активности ледникового покрова Шпицбергена с процессами деструкции ледников.

Как уже говорилось ранее, что на зарождение айсбергов могут влиять динамические процессы, пришедшие с океана, а именно приливные волны и волны зыби, воздействие штормов, отдалённых и непосредственно около побережья. Так и в статье [25] её авторы, Смирнов В.Н., Знаменский М.С. и Шейкин И.Б., исследуют волновые процессы в дрейфующем льду Северного Ледовитого океана по экспедиционным данным, которые могут возникать по различным причинам.

Так на протяжении множества исследований Смирнов В.Н. со своими коллегами в работе [25] заключает, что при образовании трещин в ледяном покрове и его разрушении формируется широкий спектр объёмных и изгибных волн, то есть сам лёд их порождает. Тогда на записях сейсмометров будут преобладать вертикальные колебания, не симметричные относительно срединной плоскости ледяной пластины. Если энергии в источнике достаточно, чтобы возбудить гравитационные колебания льда, то есть совместные колебания с водой, то как результат образуются изгибно-гравитационные волны.

При возникновении сдвиговых напряжений во льду генерируются упругие волны низких частот. Длительность и сила подвижки с трением по разрыву определяют структуру этих излучаемых волн. Во время каждого сдвига в

сплочённом дрейфующем льду происходит своего рода сдвиговой удар вдоль всей длины разлома. Спектральный состав возникающих при этом горизонтально-поляризованных колебаний определяется особенностями взаимодействия системы лёд-лёд [25].

В экспедиции MOSAiC, результаты которой и исследовались в совместной работе авторов [25], в различные периоды отмечались уникальные явления разрушения льда гравитационными волнами, когда в условиях слабого ветра отмечались вертикальные колебания с элементами механики разрушения. Из данных, полученных в ходе исследований, авторы [25] заключили, что ветер, имеющий скорость до 20 м/с, порождает эмиссию изгибно-гравитационных волн с периодами от 5 до 12 с. При таких условиях может образоваться резонансный эффект, то есть ситуация совпадения скорости ветра и минимума фазовой скорости изгибно-гравитационных волн для данной толщины льда.

Анализ связи колебаний с метеорологическими параметрами помогает выявлять особенности характера распространения гравитационных волн с периодами до 30 с и выше. В то время как изменчивость их может являться, в некотором смысле, прогностическим признаком формирования волн зыби от надвигающегося циклона, зачастую приносящего шторма.

В данной большой совместной работе [26] Михайловой Н.Н., Мукамбаева А.С., Казакова Е.Н., Морозова В.Г. и Игибаева У.А. рассматривается влияние изменения глобального климата на различные ледники планеты, особое внимание уделяется сейсмической активности в Арктике, так как этот район наиболее чувствителен к изменениям климата. Сделан большой обзор на статьи, направленные на исследование этого вопроса.

В [26] говорится, что в течение суток температура воздуха меняется и тем самым влияет сейсмичность ледника, так как поверхность ледового покрова подвергается тепловому сжатию при охлаждении ледника, в то время как изолированные участки не находятся под термической нагрузкой. И как результат каждую ночь незащищенный лёд трескается, что ведёт к постепенному

разрушению и эрозии льда. Эти процессы начинают действовать более явно при относительно тёплой температуре и вне пределов поверхности земли. Расселины и трещины играют одну из главных ролей в массовом балансе ледников, являясь путями (каналами) для талой воды, которая поступает в ледниковую дренажную систему и приносит значительное количество латентного тепла внутрь ледника.

В конце хотелось бы сказать, что исследование деформационных изменений льда под воздействием волн и по сей день остаётся актуальной задачей, требующей комплексного подхода для реализации её решения. Прочность ледового покрова и способность волн к его разрушению всё также находятся под пристальным вниманием учёных. Сейсмические сигналы, генерируемые при разрушении ледников и образовании айсбергов, могут быть использованы для мониторинга состояния покровного оледенения Арктики.

Для повышения точности определения координат источников ледотрясений нужно использовать сейсмические и инфразвуковые методы комбинированно, что также позволит отличать их от других сейсмических событий. А уровень развития технологий, на котором мы сейчас находимся, даёт возможность проводить мониторинг ледового покрова на разных временных масштабах, что поможет нам лучше понимать его поведение, состояние и динамику, так как Арктический район быстрее всех остальных реагирует на изменения климатических условий.

Важно отметить, что полученные результаты всех этих исследований имеют важное значение для прогнозирования и предотвращения опасных ледовых явлений, которые в настоящее время только учащаются. Таким образом, необходимо продолжать научные изыскания в этой области и наращивать объёмы научных полевых и экспедиционных исследований для разработки эффективных стратегий адаптации к изменению климата.

Подводя итог проведённому обзору исследований других учёных в данном направлении, хочется сказать, что существует немалое количество методов изучения ледового покрова, его свойств, характеристик, состояния и его

динамики, в некоторых случаях основанных на совершенно разных подходах. Так можно использовать дистанционные методы изучения (изменения площади и массы арктических ледников, а также температурного режима), позволяющие охватывать колоссальные по размеру территории интереса, и натурные полевые исследования (сейсмические, инфразвуковые, их синтез), проводимые локально, более точно и направленные на изучение состояния ледникового покрова, его свойств и динамики. Даже применение одного и того же подхода исследования не гарантирует одинаковости используемых методов. Так, например, при анализе записей сейсмометров авторы статьи [24] использовали фильтрацию низкочастотным фильтром в полосе 2-5 Гц, я же в своей работе применяю высокочастотную фильтрацию на 10 Гц, которая позволяет оставить на сейсмических записях только динамические явления, относящиеся к активности льда, а именно подвижки, трещины, разломы, торошение, ветровое воздействие на его поверхность, в редких случаях можно зафиксировать землетрясения как локального происхождения, так и пришедшие из других регионов (телесеismicкие).

Глава 2. Методы исследования и обработки данных.

2.1 Методы исследования

Динамическими факторами, обуславливающими в припайном льду деформации, напряжения и разлом, являются ветер и волны зыби, приливо-отливные явления, подъёмы и спады уровня моря, термическое сжатие и торошение, свободные волны при обрушении ледников в море и образовании айсбергов, а также сейсмические волны. Также рассматриваются различной природы волны, такие как гравитационные, поляризованные и изгибно-гравитационные. Перечисленные выше факторы работают вместе, создавая сложные и разнообразные процессы в припайном льду, влияющие на его динамическое состояние. Их взаимодействие определяет поведение ледового покрова, что делает его изучение критически важным для оценки состояния морских льдов и понимания их реакции на изменения климата.

Смирнов В.Н. в своей работе [27] рассуждает о механизмах разрушения льда как твёрдого тела с точки зрения двух концепций: механической и кинетической, рассмотрим вторую.

Согласно кинетической концепции разрушение твёрдых тел является результатом протекающего во времени процесса, который развивается в среде в напряжённом состоянии под действием термических флуктуаций и механических напряжений. Таким образом, разрыв материала есть конечная стадия заключительного этапа постепенного развития и накопления субмикроскопических разрушений. Понятие «долговечность под нагрузкой» определяет время, необходимое для завершения процесса деструкции от момента нагружения до разрыва. Длительность разрушения обуславливается величиной «активационного барьера» и температурой. Существует некоторая зависимость от растяжения, а именно, чем больше растянуто тело, тем меньше

становится этот «барьер», и требуется более короткий интервал времени для его разрыва. «Внутренние естественные напряжения – это система напряжений, существующих в состоянии равновесия внутри льда при отсутствии внешних воздействий». Таким образом, лёд можно считать средой, обладающей собственными напряжениями, его разрушение обусловлено не только внешними нагрузками, но и внутренними силами, исходящими изнутри. Разрушение ледового покрова прекрасно вписывается в описанную концепцию [27].

Также Смирнов В.Н. в [27] рассматривает процессы разрушения крупномасштабных объектов природной среды, такие как морской ледяной покров. Прочность в геофизических масштабах зависит от уровня абсолютных напряжений в среде, а концентрационный критерий укрупнения трещин связывает микро- и макроразрушения, позволяя переносить представления о механизмах разрушения с одного масштаба на другой. Из-за микронеоднородностей происходит локализация в узких областях неустойчивого образования трещин, в итоге формируется магистральный разрыв или полосы текучести. Нестабильность макроскопических деформаций выражается в образовании таких разрывов. Геофизические масштабы процессов, связанных с возникновением протяжённых трещин, разломов и гряд торосов, позволяют переносить принципы сейсмологии на ледяной покров и процессы его разрушения.

В своей работе [27] Смирнов В.Н. излагает основные принципы механики разрушения, лежащие в основе теории формирования разломов, на которые и я в том числе и опиралась в своей научной работе:

- деструкция происходит вследствие формирования, разрастания и объединения трещин в неоднородной среде;
- возникновение макроразрыва влечёт за собой перераспределение напряжений и деформаций в определённом объёме среды;
- разрушение материала является процессом, происходящем в пространстве и во времени, а не критическим явлением;

- формирование магистрального разрыва выражается в неустойчивости макродеформации;

Среди деформации и разрушения ледяного покрова можно выделить два типа: термические и динамические. Термические трещины образуются в результате флуктуации температуры внешней, не защищённой, поверхности ледяного покрова. Если происходит сжатие верхних слоёв, то трещины формируются на верхней поверхности, а если нижележащих – соответственно на нижней. Вследствие того, что снег и лёд имеют разную толщину, то термическое расширение и сжатие протекают неравномерно. По итогу локальными термическими напряжениями создаётся система трещин [27].

При исследовании физико-механических процессов, происходящих в ледяных полях, и изучении генерации упругих волн в их источниках обычно регистрируются следующие характеристики:

- уровень и сбросы напряжений;
- спектр упругих и гравитационных волн;
- скорости распространения волн;
- поляризация и направление распространения волн.

Как сказано в [27], диапазон измеряемых характеристик лежит в большом интервале, возможны амплитуды колебаний от долей микрометра до метра, именно поэтому необходимо выполнять измерения различными по принципу действия приборами. Упругие колебания, регистрируемые в диапазоне низких частот до 0,1 Гц, относятся к стандартным сейсмометрическим методам изучения среды, а фиксируемые под ледяным покровом волны с периодами от 5 до 50 секунд легко обнаруживаются с помощью высокочувствительных мареографов.

В полевых условиях исследования, как правило, применяются наклонометры маятникового типа (сеймонаклонометры), штанговые деформометры, датчики напряжений (измерители давления) во льду,

сейсмометры (обычно молекулярно-электронные), акселерометры и мареографы. Измерение деформаций льда, напряжений в его толще и наклонов поверхностей ледяного покрова основывается на регистрации перемещений.

Напряжения ледового покрова, которые удаётся зафиксировать, являются показателем интенсивности внутренних сил, воздействующих на него, в то время как деформации характеризуют относительные смещения и подвижки частей тела под их влиянием.

При резком уменьшении или повышении внутренних напряжений в ледяной толще генерируются упругие волны с широким спектром частот, различной структуры и интенсивности. В диапазоне частот от 0,1 до 1000 Гц наблюдаются почти все типы волн: продольные, поперечные, изгибные и изгибно-гравитационные. Излучение волн при разгрузке напряжений и их последующее развитие зависят от свойств льда и сил сжатия. Основным фактором, который будет влиять на возникновение упругой или пластической деформации в ледяном покрове, — продолжительность нагружения в конкретной точке.

В совместном отчёте по НИР [28] сотрудников ААНИИ отмечен тот факт, что целесообразным будет разделение колебательных и волновых процессов на две группы: волны, возникающие в океане и атмосфере, влияющие на состояние льда, и волны, генерируемые льдом в процессе деформации и разрушения. Совместный анализ данных, полученных в ходе контактного мониторинга, вместе с метеорологической и океанографической информацией позволяет получить важные и необходимые сведения о состоянии, свойствах ледового покрова, его динамике, деформациях, трещинах и разломах, а также возможность спрогнозировать его разрушение.

Физико-механические изменения в структуре льда и его реакция на внешние воздействия позволяют оценить действующие на него силы, тогда появляется возможность прогнозирования опасных ледовых явлений. Можно выделить из всего ряда динамических процессов, происходящих в толще ледяного покрова, один наиболее характерный и значимый, который

представляется в виде вертикальных и горизонтальных подвижек льда. Непрерывно происходящие подвижки и разрушение льда определяют его строение и прочность, которую необходимо учитывать при расчёте нагрузок на гидротехнические сооружения и конструкции [28].

После падения температуры атмосферного воздуха следует охлаждение верхней поверхности ледяного покрова. Вследствие присутствия рассолов в морском льду при понижении температуры его верхних слоёв происходит увеличение объёма, так как лёд будет расширяться при замерзании. Такое явление ведёт к прогибу ледяного покрова, который может оставаться несколько дней. На больших площадях этот прогиб, вызванный охлаждением поверхности, с течением некоторого времени будет приводить к образованию термических трещин [28].

Также в данном отчёте [28] исполнители НИР отметили, что если на горизонтальных осях прибора (сейсмометра) N и E выделяются чёткие интенсивные горизонтальные сигналы с периодичностью появления примерно 12 часов, то скорее всего эти импульсы можно связать с приливными колебаниями в океане, порождающими взаимодействие льда с явлениями сжатия и разрушения ледяного покрова. Цуги горизонтальных колебаний свидетельствуют о процессах, происходящих именно в этой плоскости, что наводит на мысль об удалённом источнике волн. Такого рода колебания во льду выделяют как индикаторы приливов на акватории Северного Ледовитого океана.

Расстановка сейсмометров и наклономеров по схеме треугольника со сторонами несколько сотен метров (500-600 м), описанная в отчёте [28], позволяет говорить нам о масштабах площади деформирования льда и образования трещин, которые могут также достигать сотни метров и более. Это вытекает из того, что на записях приборов синхронно возникает наклон ледяного покрова на расстоянии равному удалению регистратора по схеме расстановки, а изгибы льда сопровождаются упругими импульсами и подвижками по трещинам и разломам. Источником этих упругих колебаний является трещина, которая

распространяется в ледяном массиве и может представляться в виде удара и сильных вибраций.

Необходимо также упомянуть о том, что из себя представляют быстрое преобразование Фурье и вейвлет-анализ. Быстрое преобразование Фурье (БПФ) является высокоэффективным алгоритмом для вычисления дискретного преобразования Фурье (ДПФ) последовательности из N чисел для определения N коэффициентов при разложении на компоненты с разными частотами, которое используется для получения спектрального или частотного состава сигнала, а также для упрощения расчёта дискретной свёртки и корреляции. БПФ с высокой скоростью позволяет преобразовывать матрицу ДПФ в произведение разреженных (как правило, нулевых) множителей. Таким образом, быстрым преобразованием Фурье можно назвать алгоритм прореживания по частоте–времени [29].

Около тридцати лет назад А. Гроссманом и Ж. Морле было выведено такое определение в качестве нового способа исследования временных и пространственных рядов: «Вейвлеты – это семейство функций, которые локальны во времени и по частоте, и в которых все функции получаются из одной посредством её сдвигов и растяжений по оси времени», которое также присутствует в пособии Малинина В.Н. [30]. Главным преимуществом вейвлет-преобразования в отличие от разложения Фурье является то, что с его помощью могут одновременно выявляться низкие и высокие частоты в различных временных масштабах, являясь при этом одним из самых перспективных методов анализа данных, который уже нашёл множество применений. Также оно позволяет делать двумерное представление одномерного сигнала в частотной плоскости «частота–положение». В данном случае в роли периода или частоты гармонического колебания выступает масштаб аргумента базисной функции, а временное положение определяется сдвигом, что обеспечивает локализацию высоко- и низкочастотных особенностей сигналов, при этом они связаны с

временем. Набор циклических колебаний, полученный таким образом, обладает изменчивыми во времени параметрами [30].

2.2 Измерительные приборы

Регистратор сейсмических сигналов Байкал–7 HR.

«Байкал-7HR» представляет собой мобильный регистратор для фиксации сейсмических сигналов высокого разрешения. «Байкал-7HR» является самодостаточной сейсмической станцией, предназначенной для регистрации данных от различных сейсмических источников в обширном спектре частот (от 0 до 370 Гц) с высокой точностью и точной синхронизацией с глобальным временем. Он может применяться как при оперативных, так и при продолжительных полевых исследованиях сейсмологических и геофизических исследований, осуществляемых в различных климатических и температурных (-30°C до $+60^{\circ}\text{C}$) условиях. Этот прибор имеет небольшую потребляемую мощность (<1.2 Вт в режиме записи) от внешнего источника питания, значительную ёмкость автономной памяти, интегрированный генератор с высокой стабильностью и GPS-модуль, а также высококачественный аналоговый-цифровой преобразователь. Всё это обеспечивает высококачественные эксплуатационные характеристики при реализации большого разнообразия научных задач [31].

Регистратор сейсмических сигналов Байкал–8.

«Байкал-8» представляет собой универсальный автономный регистратор сейсмических сигналов с 6 каналами записи данных, имеющий специализированный АЦП высокого разрешения. Он является сейсмической станцией, предназначенной для регистрации данных от различных сейсмических источников в большом интервале частот с высокой точностью и отличной согласованностью с мировым временем (UTC). Этот прибор подходит, как для использования в стационарных исследовательских комплексах, так и при

полевых сейсмологических и геофизических научных работах, проводящихся в различных по суровости климатических условиях и широком диапазоне температур (-30°C до $+60^{\circ}\text{C}$), предлагая такую же малую потребляемую мощность (<2.0 Вт в режиме записи) и ёмкость памяти, как и «Байкал-7 HR» [32].

Главными отличиями регистратора «Байкал-8» от «Байкала-7HR» является то, что он имеет 6 каналов записи, а не 3, что позволяет подключить одновременно 2 прибора, расширен частота дискретизации, увеличен верхний предел полосы частот до 1680 Гц., также можно отметить, что этот сейсмометр легче по весу, что более удобно при его использовании в полевых условиях. Передняя панель прибора и его общий вид представлены на рисунке 3 а) и б) в Приложении 1.

Трёхкомпонентный широкополосный молекулярно-электронный цифровой сейсмометр СМЕ-4311.

Сейсмометр представляет собой три высокочувствительных молекулярно-электронных датчика-преобразователя (один вертикальный и два горизонтальных), оси чувствительности которых ориентированы по трём взаимно перпендикулярным осям, электронную плату усиления сигнала и плату автономного беспроводного регистратора, закреплённые на общем основании и помещённые в защитный внешний корпус [33].

Под воздействием внешних механических сил, например, от колебаний поверхности Земли, рабочая жидкость в преобразователях — концентрированный раствор электролита — перемещается между электродами сейсмометра, обеспечивая их электролитическое соединение или разъединение, посредством подведения или удаления ионов растворённого вещества. Этот направленный конвективный поток заряженных ионов возбуждает электрический отклик на электродах. Эта электрическая реакция на электродах интенсифицируется и преобразуется платой усиления в напряжение на выходе, соответствующее скорости внешнего воздействия (движения земной коры). Полученное таким образом напряжение преобразуется в поток 32-разрядных

отсчётов, далее сохраняющиеся на карте памяти устройства или же передающиеся по каналам связи [33].

Особенности и преимущества этого прибора заключаются в его высокой чувствительности и низком уровне шумов, что позволяет получать точные измерения. Компактный размер (180×140 мм) и небольшой вес (4.6 кг) делают его оптимальным для проведения полевых исследований, а малое потребление энергии (27 мА в стандартном исполнении) и простая установка добавляют удобства в использовании. Прибор не требует арретирования и центрирования массы, так как не имеет выхода сенсора положения массы и входного сигнала центрирования массы, тем самым обеспечивая простоту его перемещения без потери точности. Он устойчив к частым сменам места наблюдения и имеет полосу частот от 0,0167 (60 сек) до 50 Гц, с чувствительностью 2000 В/(м/с). Широкий температурный диапазон работы прибора (от -40°C до +55°C), делает возможным работу в суровых арктических условиях, а дифференциальный выход с размахом ± 15 В обеспечивает гибкость в подключении. Сейсмометр не требует настройки уровня в силу того, что допустимый угол наклона от вертикали при установке составляет до 15°, что добавляет дополнительную универсальность его применения [33].

Измеритель угла наклона двухкоординатный ИН-Д3а-360 (наклономер).

Измеритель угла наклона двухкоординатный ИН-Д3 предназначен для измерений углов наклона и наклонных перемещений объекта по двум координатам [34].

В основном ИН-Д3 применяется в областях, связанных с мониторингом и контролем строительных конструкций. Кроме того, наклонмер помогает при исследовании изгибных деформаций элементов строительных конструкций, что важно для проектирования и оценки прочности. В системах ориентации и стабилизации положения платформ и приборов ИН-Д3 может быть использован для точного определения углового положения и ориентации различных объектов, что актуально в геодезии и робототехнике. Также он позволяет

отслеживать изменения углового положения различных объектов, что полезно в механике, авиации и других областях, где важна точность позиционирования [34].

Первичный преобразователь измерителя содержит центральный подвижный электрод в виде маятника и четыре боковых электрода и представляет собой осесимметричную, заполненную электролитом металлическую ампулу с пятью токовыводами [34].

Прибор имеет три взаимно перпендикулярные измерительные оси: центральная измерительная (вертикальная) ось Z , совпадающая с осью симметрии измерителя и две взаимно перпендикулярные радиальные (горизонтальные) измерительные оси X и Y [34].

Выходные сигналы представляют собой составляющие угла наклона φ_x и φ_y , связанные с радиальными измерительными осями, где положительные сигналы указывают на наклон в сторону горизонтальных осей, а отрицательные — в противоположную сторону [34].

Схема синхронных наблюдений изгибно-гравитационных волн на припае и микросейсмических волн на берегу на НИС «Ледовая база Мыс Баранова».

На НИС «Ледовая база Мыс Баранова» ведётся постоянный мониторинг сейсмического состояния припая и динамического состояния выводных ледников, являющимися потенциальными источниками образования айсбергов, процессов отколов от них обломков, зарождения айсбергов, а также экзарационные процессы от килей торосов и айсбергов. И для решения всего спектра этих задач как раз и используются трёхкомпонентные сейсмометры СМЕ-4311, Байкал-7 HR, Байкал-8 и наклономеры ИН-Д3а-360.

Сейсмометры устанавливаются на суше (берег) и на припайном льду. С целью наблюдения за сейсмичностью региона, обусловленной землетрясениями и локальными микросейсмами, динамикой выводных ледников и отрывом от них айсбергов с помощью технологии сейсмометрического мониторинга на суше в районе НИС «Ледовая база Мыс Баранова» были развернуты 3 полевых станции,

осуществляющие непрерывную аналого-цифровую обработку данных с необходимой частотой, и 1 базовая станция сбора и обработки данных. Синхронизация записи осуществляется посредством спутниковой навигационной системы, а геопозиционные модули фиксируют координаты и передают их по радиосвязи. Электрическое питание всех устройств обеспечивается от аккумуляторов [35]

Описанный измерительный комплекс предназначен для регистрации текущих динамических характеристик физико-механического состояния льда. В реальном времени осуществляется регистрация и передача на базовую станцию таких физических показателей, как скорость перемещения и наклон поверхности льда, частотный спектр колебаний внутри ледяного покрова, непосредственно колебания в прибрежных скальных породах и ледниках, интенсивность упругих волн при разрушении массивов льда, обрушении обломков в море и формировании айсбергов [35].

Обмен данными между мобильными полевыми станциями и базовой станцией выполняется по радиоканалу. Этот канал стабильно функционирует на расстояниях до 1500 метров прямой видимости между антеннами базовой и мобильной сеймостанций. В условиях помех на пути распространения радиосигнала и нестабильной связи используется ретранслятор, увеличивающий дальность действия канала до более чем 5000 метров прямой радиовидимости [35].

Полевая станция состоит из набора объединенных в одну систему компонентов, соединяемых при помощи электрических шнуров и соответствующих разъемов:

- модуль регистрации и передачи данных;
- массив основных датчиков;
- сейсмометр 3-х компонентный СМЕ-4311;
- наклономер 2-х компонентный ИН-ДЗА-360;
- модуль питания с набором свинцово-кислотных аккумуляторов;

- набор антенн для подключения по радиоканалу, а также приема сигнала GPS;
- управляющий защищенный ноутбук.

Полевая станция предназначена для непосредственного измерения динамических параметров измеряемой системы при помощи массива датчиков. Датчики подключены к модулю регистрации и передачи данных. Модуль регистрации позволяет осуществлять временное хранение данных, а также передачу их на базовую станцию в режиме реального времени. Полевая станция работает от автономного источника питания, представленного в виде свинцово-кислотной аккумуляторной батареи [35].

Базовая станция сбора и обработки данных состоит из набора модулей, соединённых между собой электрическими проводами и внутренним радиоканалом (рисунок 6). В состав станции входят сервер для сбора и хранения данных, модуль радиопередачи для базовой станции, антенна основного радиоканала на частоте 900 МГц, модуль дополнительного передающего радиоканала с антенной и антенна дополнительного радиоканала на частоте 2,4 ГГц [35].

Базовая станция предназначена для сбора, хранения и обработки данных, получаемых от полевых станций по радиоканалу в режиме реального времени, а также с её помощью обеспечивается мониторинг динамических параметров ледовой обстановки [35].

В качестве вычислительного оборудования на базовой станции могут использоваться разные конфигурации в зависимости от поставленных задач:

- аналитическая рабочая станция в сочетании с сервером;
- аналитическая рабочая станция без сервера;
- защищенный ноутбук PANASONIC-CF-31 в качестве сервера и поста мониторинга.

Ретранслятор радиоканала представляет собой модуль приёма и передачи радиосигнала, используемый с целью увеличения дальности передачи радиосигналов. Это устройство даёт возможность принимать радиосигнал с нескольких полевых станций, имеющих антенны малой мощности, затем отправлять полученный сигнал на базовую станцию через увеличенное расстояние посредством применения мощной антенны [35].

Размещение комплекса в полевых условиях

Методика измерения параметров упругих продольных и поперечных волн во льду с различной поляризацией, изгибно-гравитационных волн в ледяных полях при сжатии и трещинообразовании во льду, возникновение автоколебательных процессов предусматривает пространственную установку датчиков на ледяных полях, торосах и айсбергах. Для сбора данных о состоянии ледяных образований в рамках данного комплекса предусмотрено использование трёх мобильных полевых сейсмостанций, каждая из которых оснащена собственным комплектом датчиков. Условная схема размещения приборов на ледяном покрове представляется в виде прямоугольного треугольника со сторонами длиной до 1500 м и более, которая показана на рисунке 4 (см. Приложение 1). Датчики ориентируются по линии направления Север-Юг. Для повышения точности расстановки приборов используются переносные GPS навигаторы [35].

Программное обеспечение «Power Graph»

Данное программное обеспечение является современным инструментом регистрации, визуализации, обработки и анализа данных. «Power Graph» предоставляет возможность сбора данных с различных измерительных устройств и приборов, с его помощью можно осуществлять регистрацию, визуализацию и обработку сигналов в режиме реального времени, также доступен режим редактирования, математической обработки и анализа полученных данных. В нём можно хранить как исходные данные, так и уже

обработанные (функция хранения), важно отметить функцию импорта и экспорта данных [36].

Power Graph поддерживает различные устройства сбора данных благодаря расширяемой библиотеке драйверов, которая включает платы и модули АЦП, измерительные приборы, виртуальные генераторы сигналов, а также компьютерные устройства ввода и звукозаписи. Программа предоставляет возможность подключения новых устройств и источников сигналов, а также поддерживает управляющие компоненты устройств, такие как цифровые входы/выходы и ЦАПы [36].

Регистрация данных включает в себя предварительный мониторинг входных сигналов и индивидуальную настройку и калибровку каналов, что позволяет использовать любые единицы измерения сигналов. Пользователь может выбрать произвольный набор каналов для регистрации и установить произвольную скорость записи, то есть частоту оцифровки. Также предусмотрена аппаратная и программная синхронизация сбора данных с использованием счетчиков, таймеров и по уровню сигнала с записью пред- и пост-истории. Система позволяет сохранять и отображать параметры сбора данных, такие как тип устройства, дата, время, скорость и длительность регистрации, а также записывать серию независимых измерений (блоков данных) в один файл. Кроме того, можно устанавливать текстовые метки (комментарии) на ленте записи и вводить и хранить текстовую информацию, такую как заметки, примечания и протокол измерений, для каждого блока данных и для всего файла [36].

Визуализация данных может производиться в режимах самописца и осциллографа, обеспечивая эффективную систему графического представления больших объемов информации. Пользователь имеет возможность выбирать формат значений шкалы времени, такие как часы, минуты или секунды, а также произвольный набор каналов для отображения. Кроме того, предусмотрено

независимое позиционирование и масштабирование графиков, а также изменение цвета и стиля графиков и сетки [36].

В режиме редактирования данных предоставляется возможность выделения необходимого участка для редактирования и анализ, к текущим записям можно добавлять данные из других файлов, например метеорологические параметры. Пользователь по своему усмотрению может изменять последовательность блоков с данными, осуществлять прореживание и осреднение по времени, проводить корректировку данных на основе статистических показателей, а также выполнять графическое редактирование отдельных значений сигнала [36].

В блок обработки данных входит постоянно расширяемая библиотека математических и статистических функций цифровой обработки сигналов, таких как калибровка и корректировка, усреднение и сглаживание, выделение огибающей, частотная и амплитудная фильтрация, дифференцирование и интегрирование, расчёт параметров циклических сигналов, вычисление полинома, а также выполнение арифметических и логических операций, тригонометрических, логарифмических и множество других функций. Так как возможна регистрация в режиме реального времени, то и цифровая обработка сигналов тоже, также система позволяет создавать новые каналы с расчётными данными, вдобавок к этому выполнять неограниченное количество промежуточных вычислений [36].

Анализ данных включает в себя определение параметров сигналов по графикам с помощью скользящих маркеров и дополнительные графические построения, такие как проекции, касательные, статистические уровни и расчётные прямые. Многофункциональный спектроанализатор позволяет строить различные типы спектральных графиков, рассчитывать статистические значения в заданных частотных полосах и осуществлять непрерывную регистрацию данных с построением спектров в режиме реального времени. Также доступен двухкоординатный осциллограф для построения графиков

межканальных зависимостей, включая режим реального времени, и гистограмма распределения сигналов по амплитуде. Для анализа данных доступна библиотека статистических и информационных функций [36].

2.3 Исходные данные

Исходными данными для обработки и дальнейшего анализа служат записи сейсмометров СМЕ-4311, наклономера, Байкал-7HR и Байкал-8, предоставленные мне моим научным консультантов, являющимся сотрудником лаборатории физики льда, отдела Ледового режима и прогнозов в научно-исследовательском институте Арктики и Антарктики. Они состоят из трёх каналов сейсмометра, обозначенных как Z – вертикальный канал, N и E – горизонтальные каналы. Горизонтальный канал N ориентирован по направлению магнитного севера. Частота дискретизации записей станции составляет 100 Гц. А так же спектры рассматриваемых сигналов канала Z, N, E, полученные посредством алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ, FFT), и вейвлеты Морле. Наклонометры и горизонтальные составляющие сейсмометра (N и E) регистрируют горизонтальные колебательные ускорения, так как они практически идентичны друг другу по внешнему виду. Вертикальная компонента, как правило, на один–два порядка меньше по амплитуде в сравнении с горизонтальными. Важно отметить, что также к исследованию привлекаются данные метеорологической обстановки, а именно атмосферное давление, температура воздуха и скорость ветра, которые регистрируются в обязательном порядке на соответствующих станциях.

В рамках текущей работы было проведено тщательное и внимательное изучение данных за март – начало мая 2017 года, а также с конца февраля 2023 по май 2023 года с привлечением ноябрьских записей того же года, полученных с сейсмометров, которые были отправлены с научно-исследовательской станции «Ледовая база Мыс Баранова».

Для осуществления обработки указанных выше записей использовалось специализированное программное обеспечение под названием Power Graph, которое позволило выполнить обработку полученной информации. В процессе анализа была применена фильтрация высокочастотным фильтром с частотой 10 Гц, встроенным в программу, что позволило очистить данные от зашумляющих (неинформативных для исследования) и низкочастотных сигналов, мешающих визуальной обработке, и выделить интересующие меня сигналы. При фильтрации на частоте 6 Гц сигнал становится более чётким и гладким, то есть убираются незначительные шумы и возмущения, но в целом он не меняется, что делает трудным поиск и выделение из общей картины интересующих событий, но в особых случаях высокочастотные сигналы были видны даже на не профильтрованных записях, что говорит об их силе.

Эта детальная проверка была направлена на выявление и идентификацию различных динамических событий, которые могли произойти в ледяном покрове. В числе таких событий за указанный период 2023 года были выявлены микроподвижки льда, которые могут свидетельствовать о начале процессов изменения его структуры; подвижки, которые возможно указывают на более масштабные изменения во льду; торошение, проявляющееся в форме трения льдин друг об друга и взаимном давлении, требующее внимания; а также сейсмические колебания, ветровые колебания, микротрещины, трещины и, наконец, крупные разломы, которые могут представлять собой серьёзную угрозу для инфраструктуры и безопасности.

Данные за весну 2017 года стационара «Ледовая база Мыс Баранова» были дополнительно обработаны, так как в первых числах мая была обнаружена экзарация дна предположительно в результате движения айсберга в течение нескольких дней (с 03.05.17 по 05.05.17), который упал в акваторию залива, и, чтобы отследить момент его зарождения, я путём обратного просмотра записей сейсмометра, изучая данные с начала мая к апрелю, пытаюсь идентифицировать необходимый мне сигнал. В результате тщательного изучения записей

сейсмометров не были обнаружены ни схода ледника, ни образования айсберга. Как было отмечено выше, в первые несколько дней мая отмечалась экзарация дна, различной интенсивности подвижки, торошение льдов и локальное землетрясение 2.05.17 г. Апрель 2017 года был богат на обилие торошений, подвижек и воздействия на лёд сильного ветра и волнения. В марте того же года была зафиксирована крупная трещина и последующее после трение её стенок, а также на протяжении всего месяца подвижки и микроподвижки, то есть в основном наблюдалось в динамическом отношении спокойное состояние ледяного покрова. Важно отметить, что удалось обработать последние два дня февраля, так как остальных записей нет из-за поломки прибора. Было зарегистрировано 2 трещины 28 февраля и 2 термические трещины 27.02.17.

В работе также используются записи со сейсмических станций на архипелаге Шпицберген, на леднике Норденшельда, выходящем в бухту Адольф. Всего использовалось в комплексе 3 станции. Две из них были установлены непосредственно на леднике SVA2 (78.64° с.ш. и 17.02° в.д., установлена 10.08.2017) и SVA3 (78.638° с.ш. и 17.00° в.д., установлена 08.08.2017). Ещё одна станция Gamma была установлена на берегу (78.64° с.ш. и 16.94° в.д., поставлена 08.08.2017). Схема расположения станций представлена на рисунке 5 а) и б). Расстояние между станциями SVA2 и SVA3 составило 423 м, а между SVA3 и Gamma – 1322 м.

Станции работали до 14.09.2017 включительно, только станция SVA3 была выведена из работы 06.09.2017, они передавали данные на центральный компьютер на базе в посёлке Пирамида. Чтобы удостовериться в выявленных событиях на записях сейсмометров была установлена видеокамера, но она проработала недолго из-за преждевременной разрядки аккумулятора, а заменить его возможности не было из-за отсутствия запасного. Видеоматериалы мне были недоступны. Особое внимание в данной работе уделяется периоду времени с 20.08.17 по 25.08.17, так как 21.08.2017 и 25.08.2017 было зарегистрировано 2 крупных динамических события, предположительно откол от ледника

Норденшельда массива льда, что должно было привести к зарождению айсберга. Оба этих явления были зафиксированы всеми станциями (берег и ледник) и идентифицированы Знаменским Максимом Сергеевичем, сотрудником лаборатории Физики льда, занимавшимся тогда установкой станций и получением этих данных, как сейсмические события, так как они вызвали возмущение вертикального и горизонтальных каналов приборов. Это событие могло наиболее вероятно повлечь за собой обрушение части ледника в акваторию залива. Я же произвела более тщательную обработку, так как в этот период было обнаружено множество ледовых событий, показывающих активность динамического состояния исследуемого ледника.

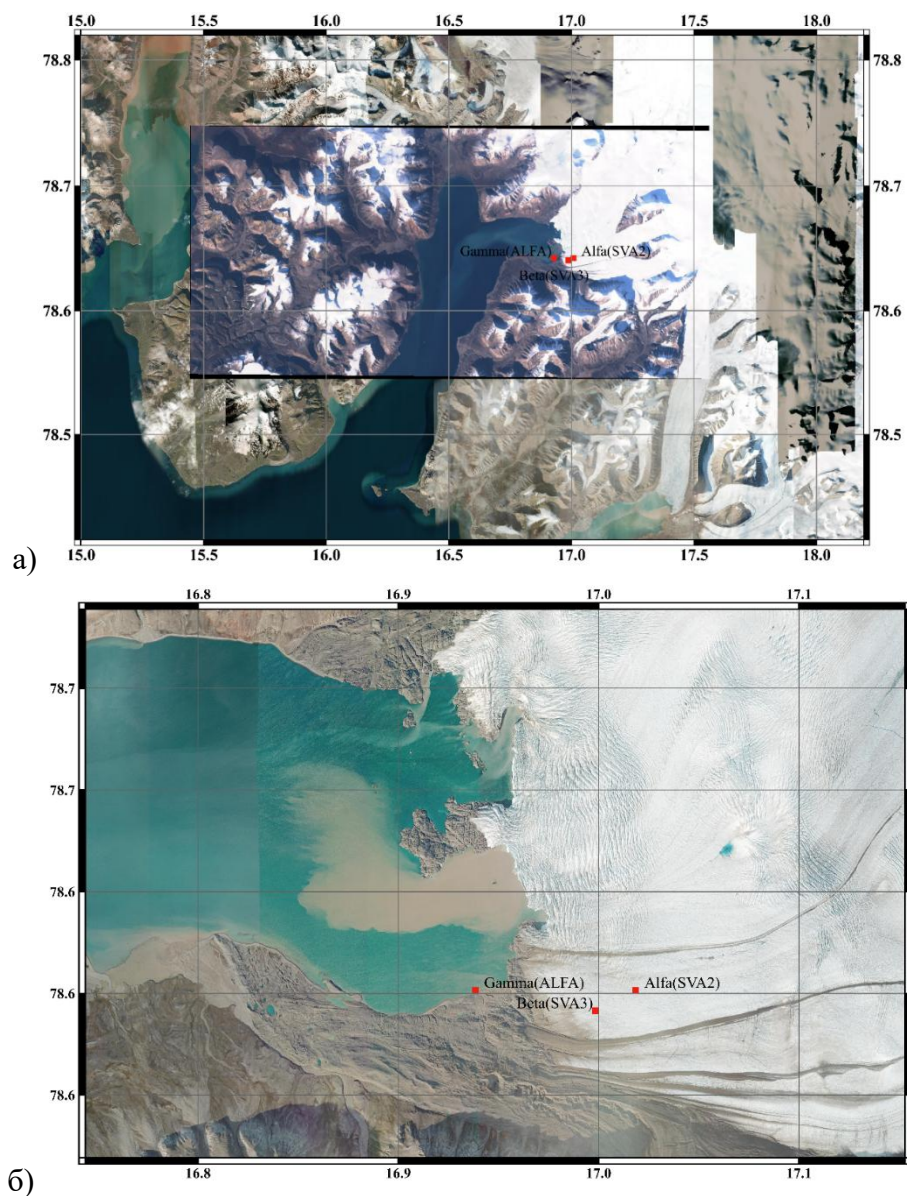


Рисунок 5. Карта с расположением сейсмических станций в районе ледника Норденшельда с наложенным спутниковым снимком Sentinel-2 за 31.08.2017 года.

Таким образом, в результате детального изучения записей сейсмометров были сформированы таблицы с зафиксированными динамическими событиями различного происхождения, которые помещены в приложениях 2–8, проведённая работа позволила получить ценную информацию о состоянии ледяного покрова за исследуемые указанные периоды, что является важным для понимания динамики ледников и образования айсбергов. В качестве примера на рисунке 6 а)–б) (см. Приложение 9) приведены ледовые события, произошедшие в марте и мае на стационаре «Ледовая база Мыс Баранова». Также я решила заострить внимание на крайне важных и показательных явлениях за исследуемый период с 20.08.17 по 25.08.17 на леднике Норденшельда на Шпицбергене, зарегистрированные станциями (SVA2, SVA3 и Gamma) измерительного комплекса, некоторые из них показаны на рис.6 в)–ж) в Приложении 9.

Глава 3. Анализ и обработка полученных данных сейсмометров.

Перед тем как приступить к обработке записей сейсмометра они предварительно проходят процедуру высокочастотной фильтрации на 10 Гц для удаления низкочастотных сигналов, чтобы они не мешали визуальной оценке полученных данных, и стало возможным исследовать только интересные события из высокочастотной области. Это необходимо для того, чтобы убрать колебания, имеющие частоту меньше 5–6 Гц в спектре записей сейсмометров, являющиеся фоновыми (постоянными) динамическими проявлениями ледников и сейсмическими сигналами от грунта, и оставить колебания в высокочастотной области, которые связаны с ледотрясениями.

Были исследованы данные с НИС «Ледовая база Мыс Баранова», а также с ледника Норденшельда на арх.Шпицберген, что позволило сравнить динамику льда на леднике и припайного. В рамках данного исследования внимание уделялось изучению данных со стационара на архипелаге Северная Земля с целью понять, насколько далеко распространяется сигнал при зарождении айсбергов, а также можно ли его зафиксировать при помощи сейсмометров, установленных на припайном льду и на грунте, но не вблизи самого ледника.

После выявления всех возможных ледовых событий (подвижки, трещины, разломы, торошения, проявление ветрового воздействия) для данных с НИС «Ледовая база Мыс Баранова» за период с февраля по май и ноябрь 2023 года были построены частотные спектры, представленные на рисунках 7–11 и произведено непрерывное вейвлет-преобразование Морле, обеспечивающее хорошее разрешение во временной и частотной областях, по составляющим N, E и Z с помощью кода, написанного на языке MATLAB, программный код вынесен в Приложение 10. Графики для построенных вейвлетов можно увидеть в приложении 11 на рисунке 12 а)-д).

Спектры, изображённые на рисунках 7–11, являются графиками спектрального разложения, рассчитанные с помощью БПФ. На самом графике нанесены три компоненты сигналов сейсмометра Z, N и E.

На рисунке 7 по оси X отложена частота, которая изменяется от 0 до 1.0 Гц, в то время как по оси Y — амплитуда, которая изменяется от 0 до 0.4 Вольт. Анализируя горизонтальную компоненту N, можно заметить, что ее амплитуда достигает наибольших значений в диапазонах частот 0.3–0.4 Гц и 0.6–0.65 Гц. В то же время, другая составляющая сигнала E демонстрирует максимальные значения амплитуды при частотах 0.5 Гц и 0.95 Гц. По вертикальному каналу компоненты Z главный пик наблюдается на частоте 0.5 Гц. То есть энергонесущими являются низкие частоты сигнала.

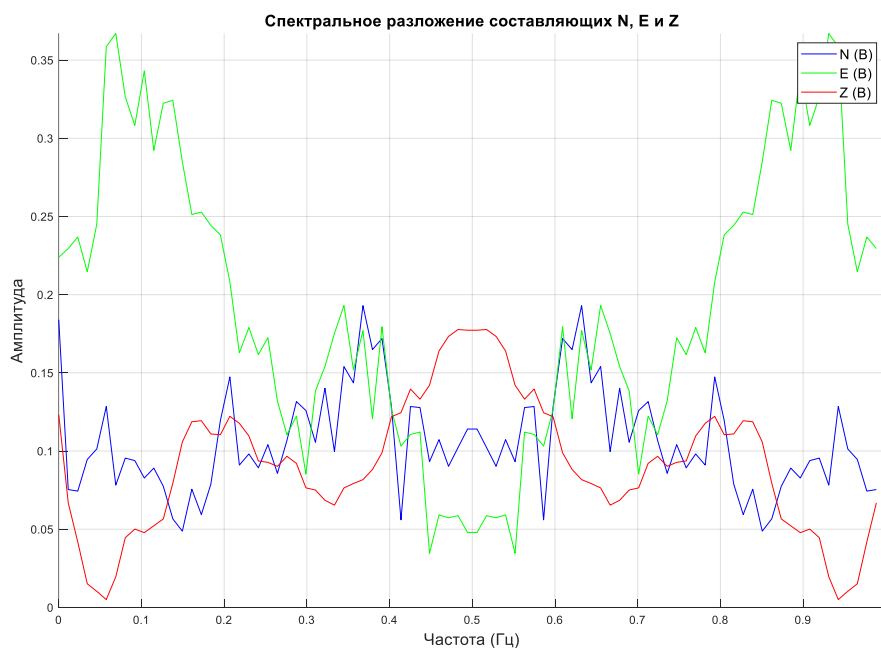


Рисунок 7. Частотные спектры выявленных динамических событий в феврале.

По графику, показанному на рисунке 8, амплитуда изменяется от 0 до 0.45 Вольт. Важно отметить, что колебания сигналов по всем компонентам присутствуют на всех частотах спектра в пределах от 0 до 1.0, что говорит о разнообразии и сложности, возникающих и происходящих ледовых событий. Выделить экстремумы для каждой отдельной составляющей представляется затруднительным.

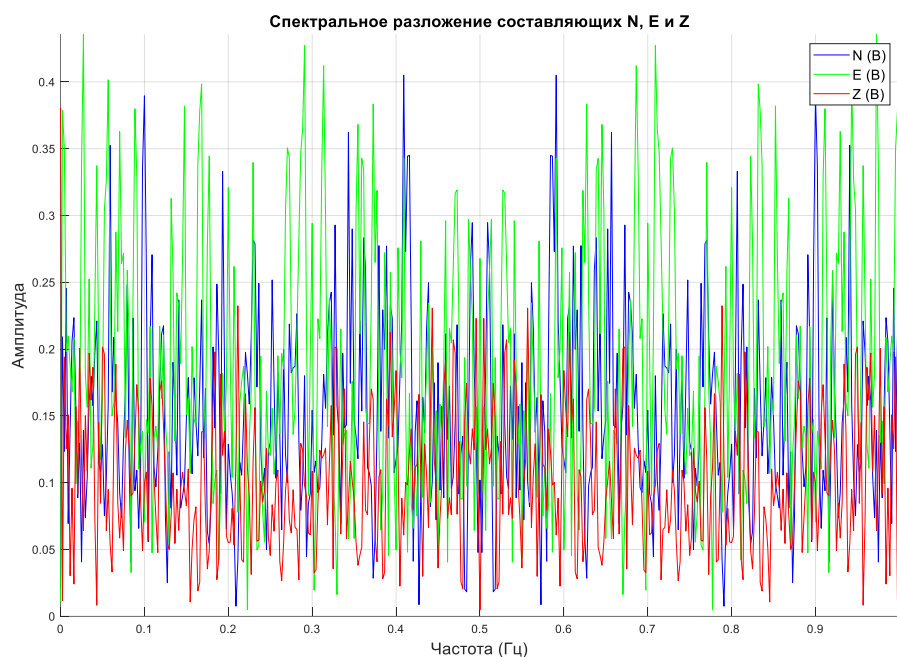


Рисунок 8. Частотные спектры выявленных динамических событий в марте.

На рисунке 9 величина амплитуды сигнала колеблется в интервале от 0 до 0.5 Вольт. Составляющие также изменяются по всему участку спектра в интервале от 0 до 1.0 Гц, но максимальные величины амплитуды сигналов в основном приходятся на участок 0.3–0.7 Гц, свидетельствуя о том, что всё же имеются области спектра, где ледовые события наиболее выражены.

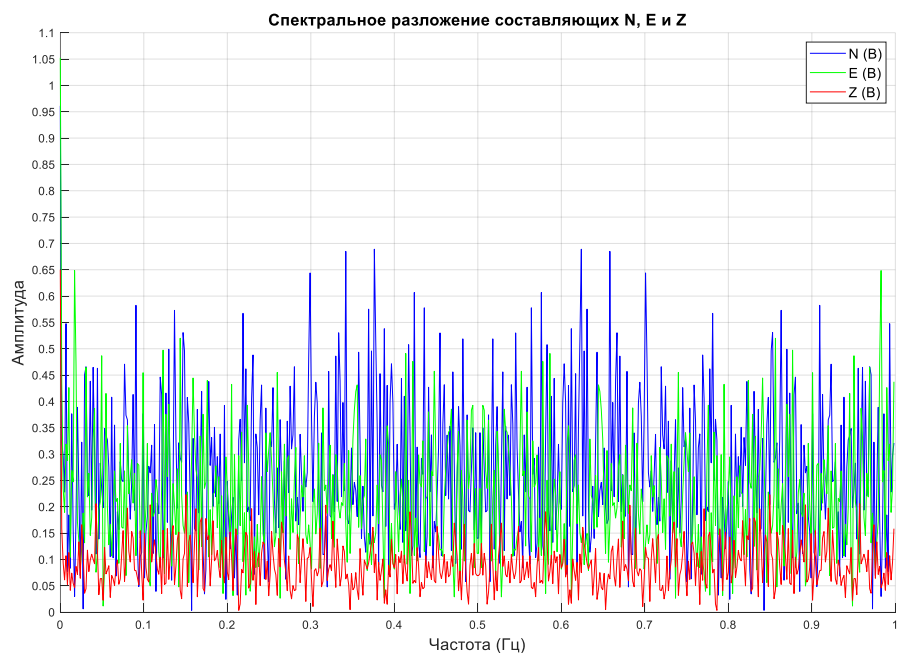


Рисунок 9. Частотные спектры выявленных динамических событий в апреле.

По рисунок 10, отражающему спектральное разложение динамических событий, наблюдаемых в мае, можно отметить, что амплитуды компонентов сигнала варьируются от 0 до 1.0 Вольт. При этом колебания сигналов фиксируются на протяжении всего частотного спектра.

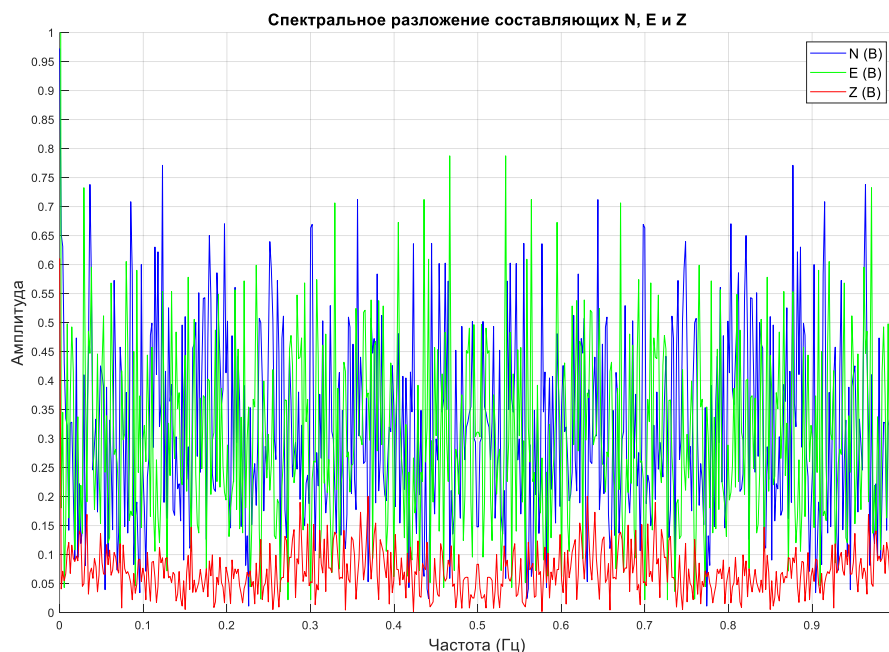


Рисунок 10. Частотные спектры выявленных динамических событий в мае.

На графике рисунка 11 отчётливо видно, что частота изменяется от 0 до 1.0 Гц, а значения амплитуд горизонтальных N, E и вертикальной Z составляющих варьируют до 2.3 Вольт. В ноябре 2023 года наиболее выражены были компонента N и Z, имея наибольшие значения амплитуды в близких друг другу областях спектра, а именно в интервалах 0.35–0.4 Гц и 0.6–0.65 Гц. касается горизонтальной компоненты E, то на всём участке спектра она колеблется от 0.2 до 1.5 В.

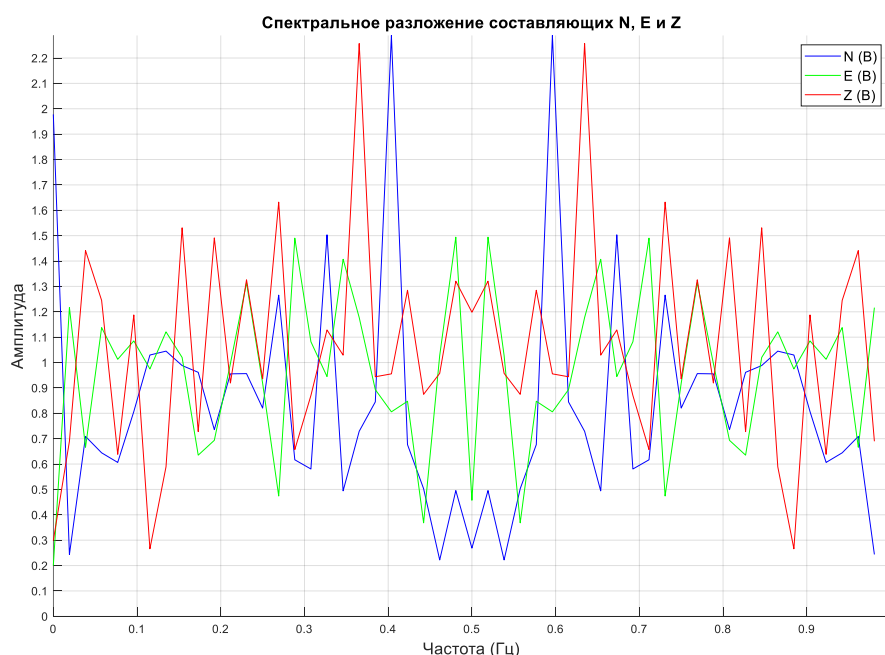


Рисунок 11. Частотные спектры выявленных динамических событий в ноябре.

В результате исследования записей сейсмометров, полученных со стационара «Ледовая база Мыс Баранова», было выявлено множество динамических явлений, показывающих состояние припайного льда в различные моменты времени сезона, но событий, связанных с обрушением ледников и зарождением айсбергов, обнаружено не было. Проведённый анализ данных станции показал нам, что ледотрясения и сходы льда являются событиями локального масштаба, сигналы от которых не могут распространяться на большие расстояния, то есть их можно зарегистрировать только на самом леднике или же на достаточно близком расстоянии от него.

Поэтому основными для исследования будут данные, полученные со станций наблюдений на леднике Норденшельда SVA2 и SVA3 и одной береговой станции Gamma. Аналогично работе с данными НИС «Ледовая база Мыс Баранова» были также построены частотные спектры с помощью процедуры БПФ и произведено вейвлет-преобразование по составляющим N, E и Z с помощью кода, написанного на языке MATLAB, но без предварительной высокочастотной фильтрации, которая осуществляется при работе с записями в ПО Power Graph для более детального и точного анализа. На рисунках 13–17 и

18–23 представлен временной ход получаемых мной данных сейсмометров и наклономеров для исследования за каждый день для измерительных станций. Далее будет представлен детальный анализ данных, полученных со станций Gamma, SVA2 и SVA3 различными методами, описанными ранее.

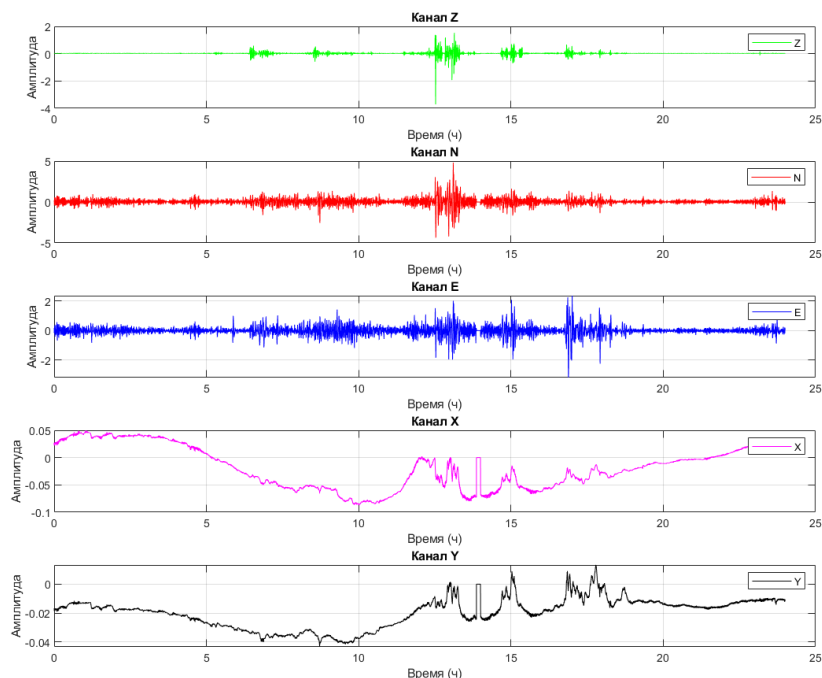


Рисунок 13. Временной ход вертикальной и горизонтальных компонент колебаний льда (каналы N,E,Z) и накломера (X,Y) за 20.08.17 станции Gamma.

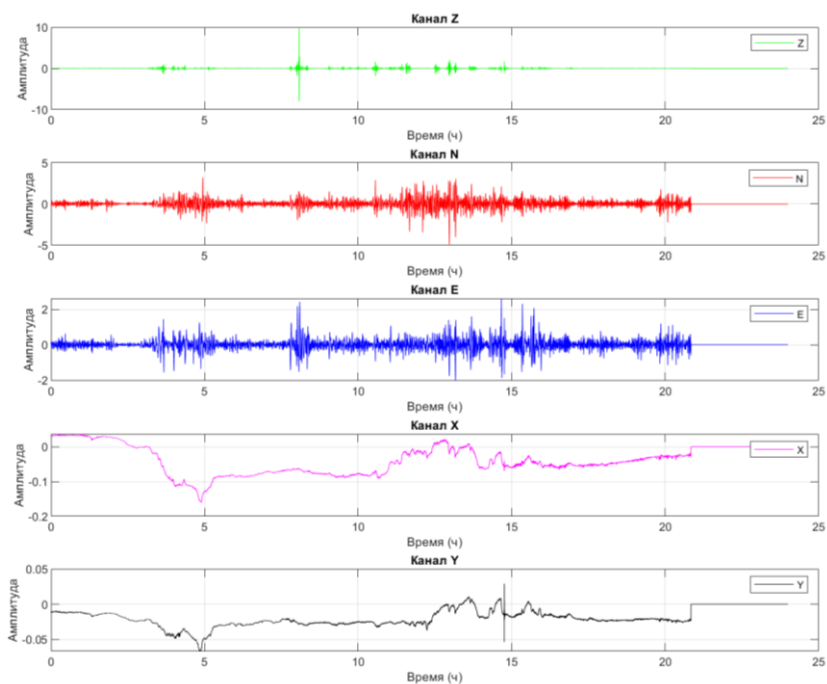


Рисунок 14. Временной ход вертикальной и горизонтальных компонент колебаний льда (каналы N,E,Z) и накломера (X,Y) за 21.08.17 станции Gamma.

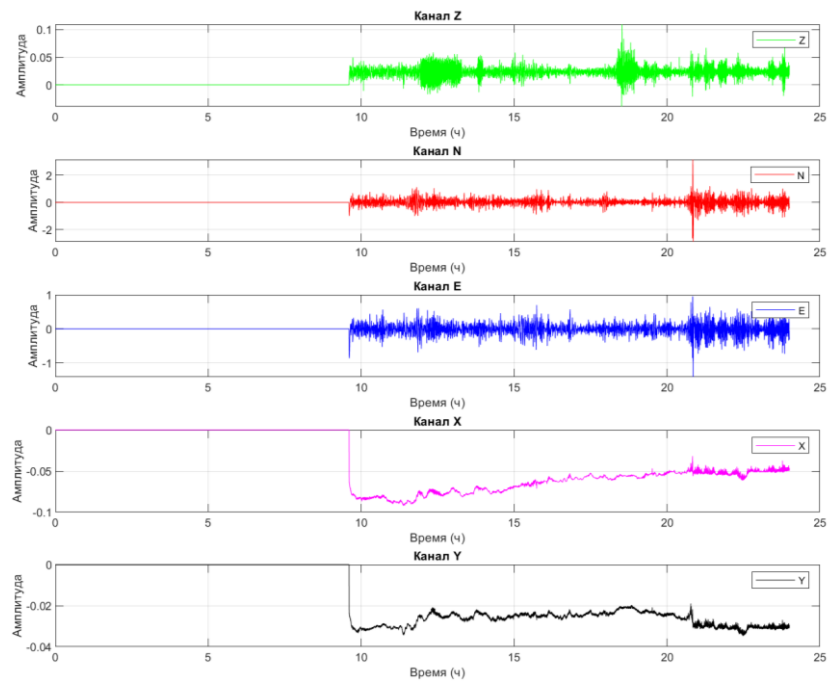


Рисунок 15. Временной ход вертикальной и горизонтальных компонент колебаний льда (каналы N,E,Z) и наклономера (X,Y) за 23.08.17 станции Gamma.

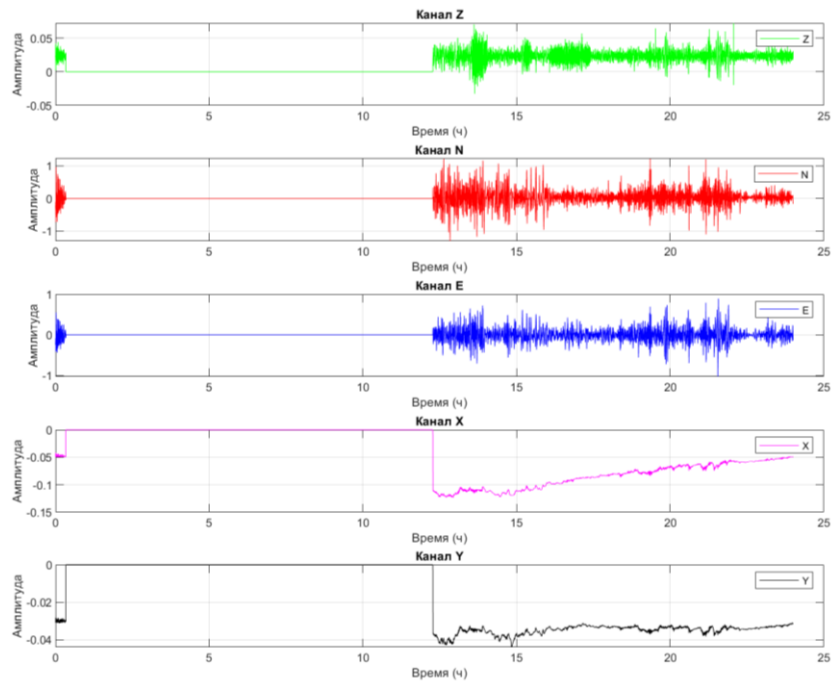


Рисунок 16. Временной ход вертикальной и горизонтальных компонент колебаний льда (каналы N,E,Z) и наклономера (X,Y) за 24.08.17 станции Gamma.

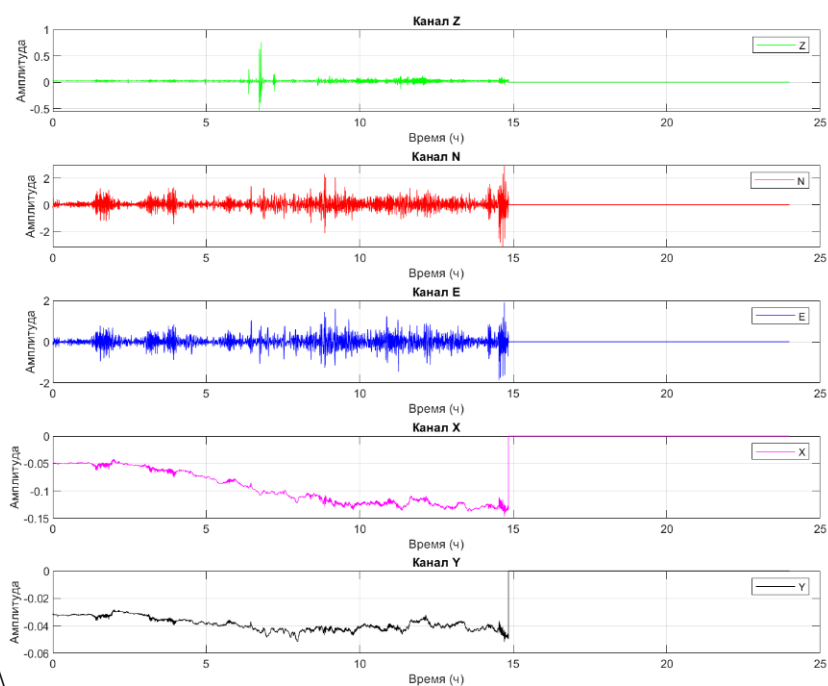
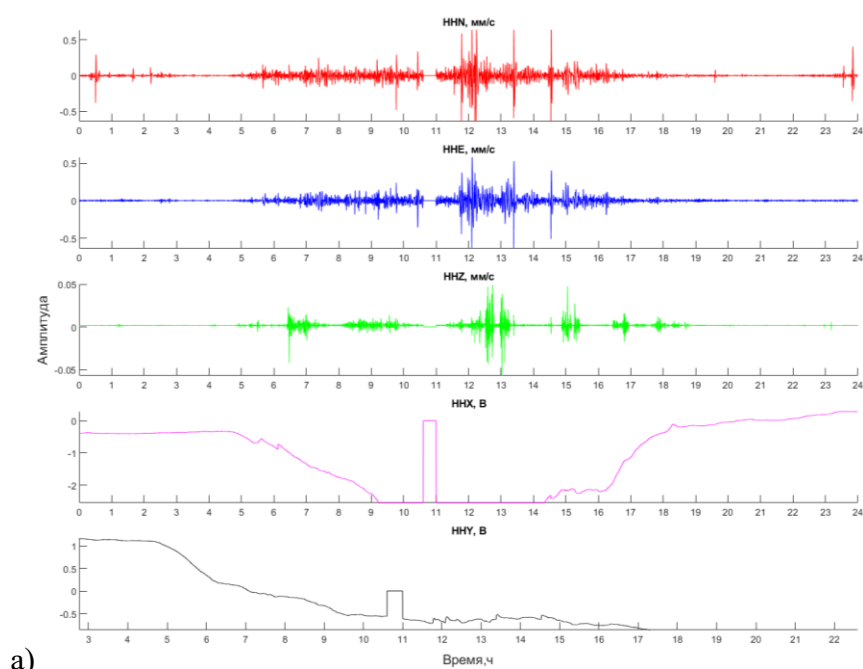
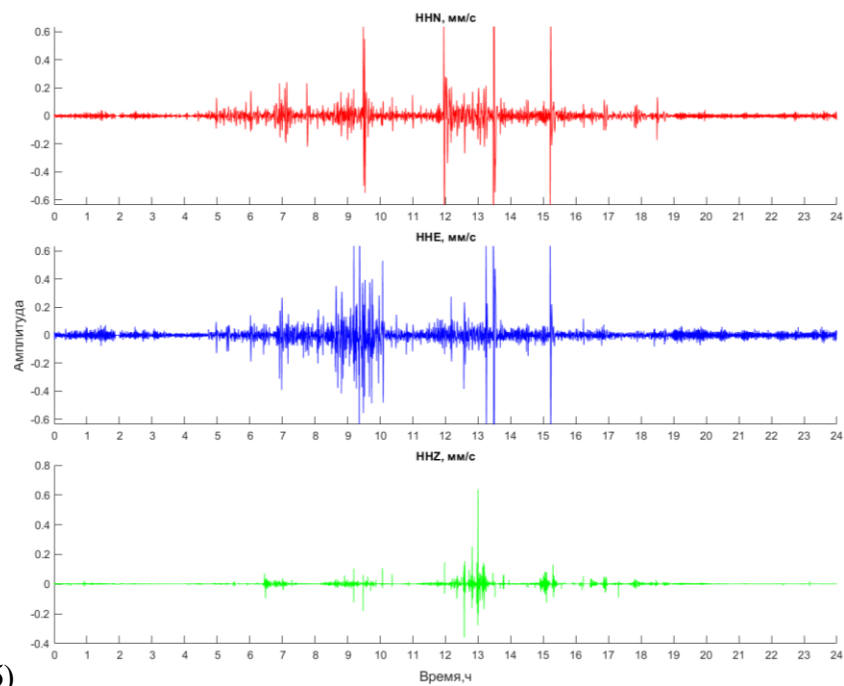


Рисунок 17. Временной ход вертикальной и горизонтальных компонент колебаний льда (каналы N,E,Z) и накломера (X,Y) за 25.08.17 станции Gamma.

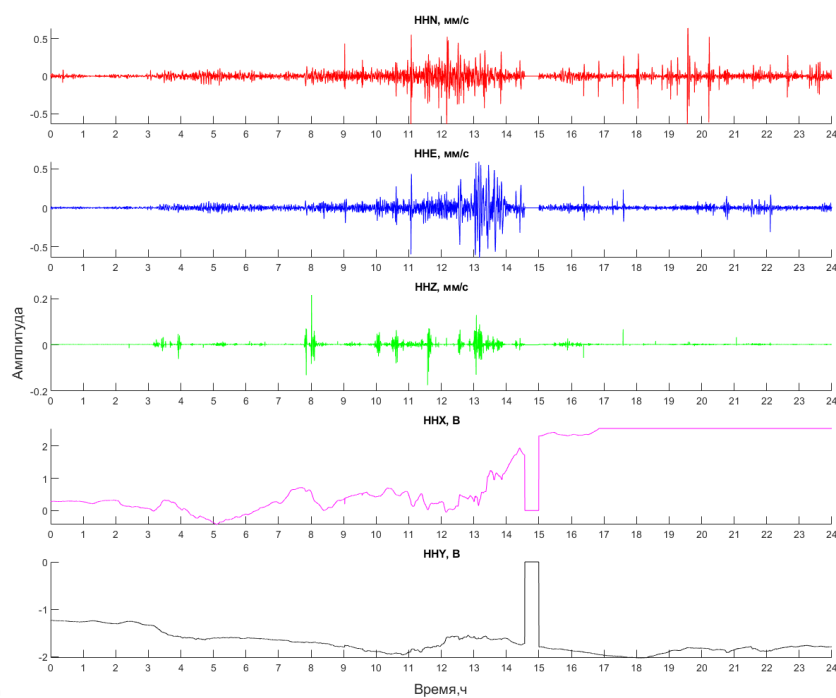


а)

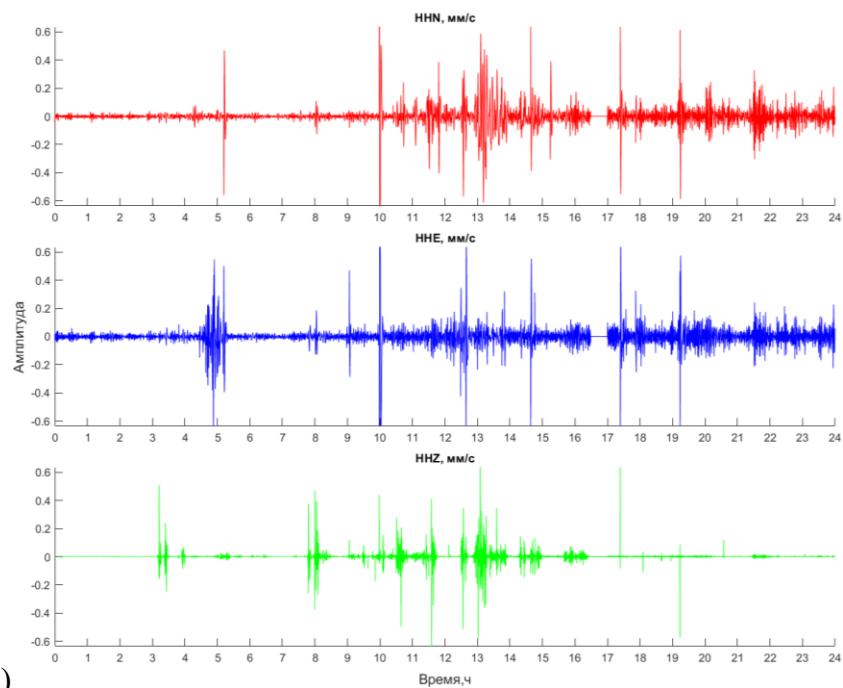


б)

Рисунок 18. Временной ход вертикальной и горизонтальных компонент колебаний льда (каналы N,E,Z) и наклономера (X,Y) за 20.08.17 станциях а)SVA2 и б)SVA3.

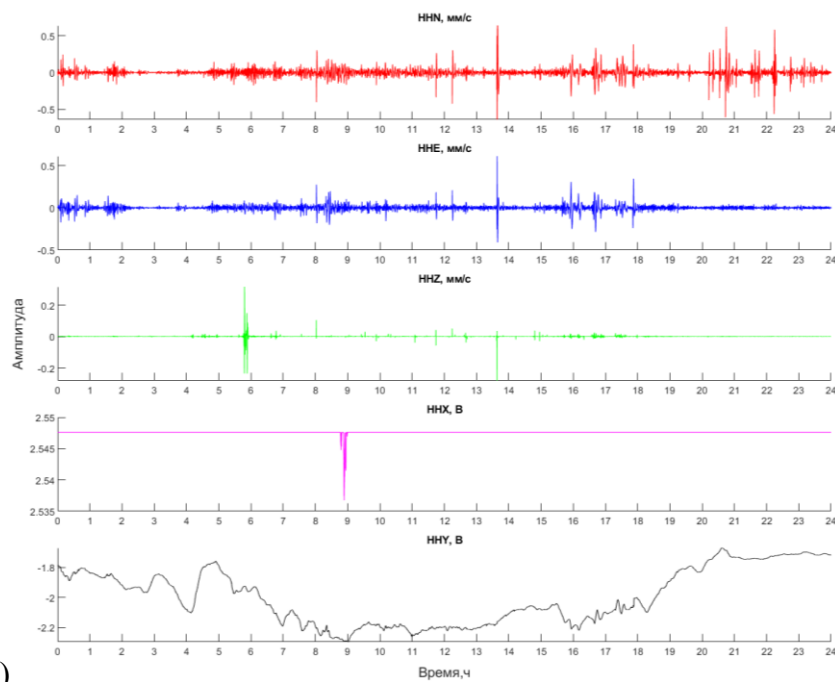


а)

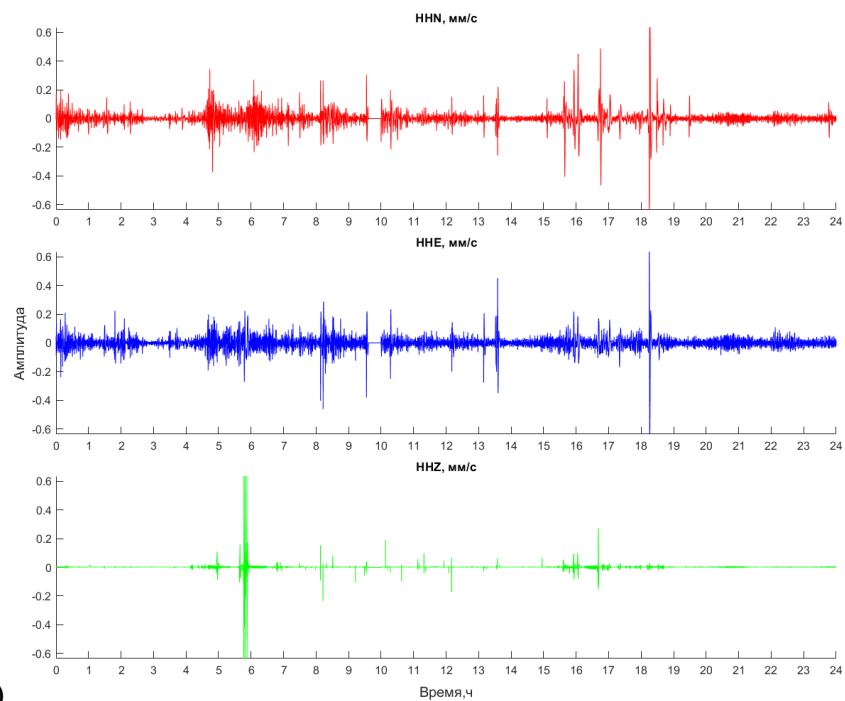


б)

Рисунок 19. Временной ход вертикальной и горизонтальных компонент колебаний льда (каналы N,E,Z) и наклономера (X,Y) за 21.08.17 станциях а)SVA2 и б)SVA3.

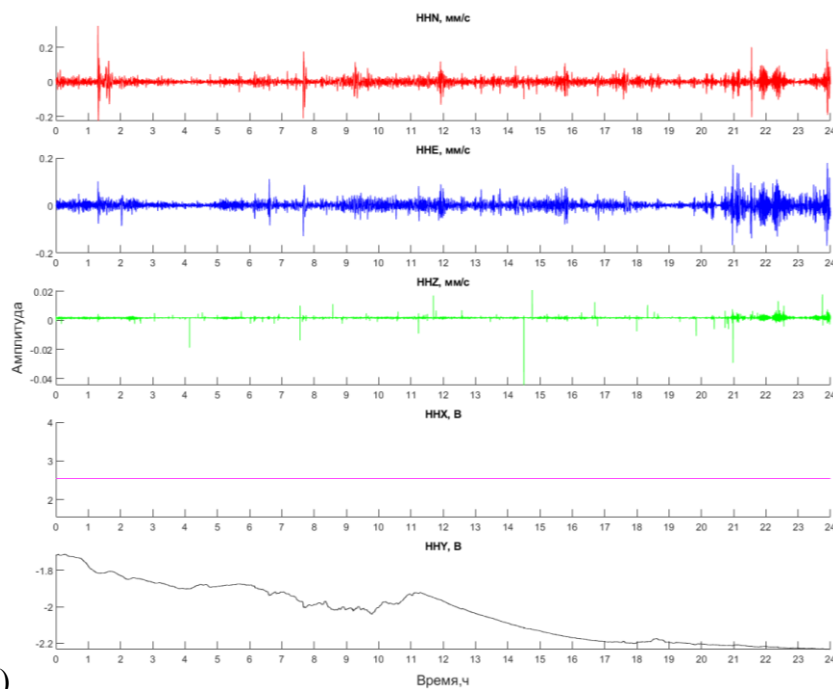


а)

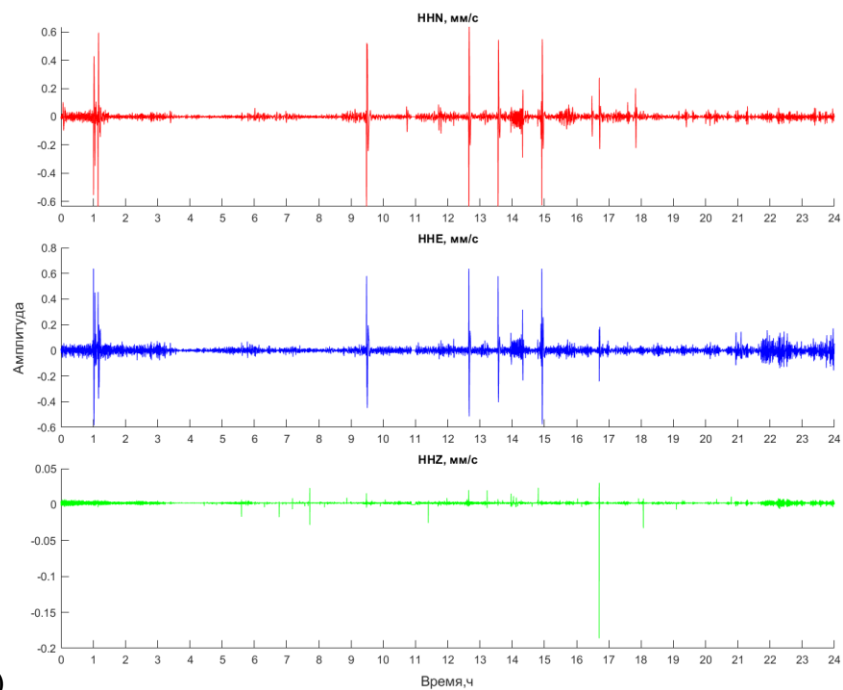


б)

Рисунок 20. Временной ход вертикальной и горизонтальных компонент колебаний льда (каналы N,E,Z) и накломера (X,Y) за 22.08.17 станциях а)SVA2 и б)SVA3.

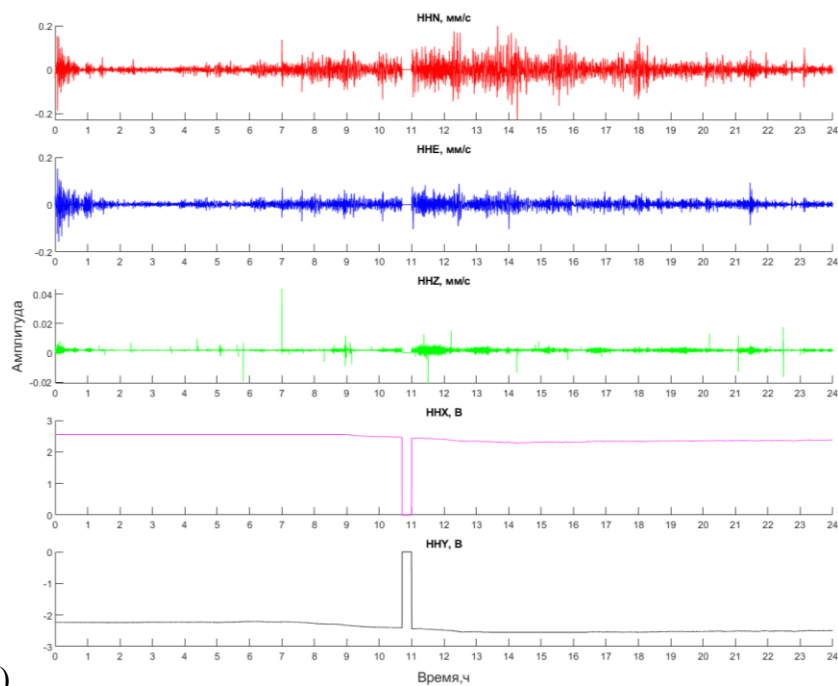


а)

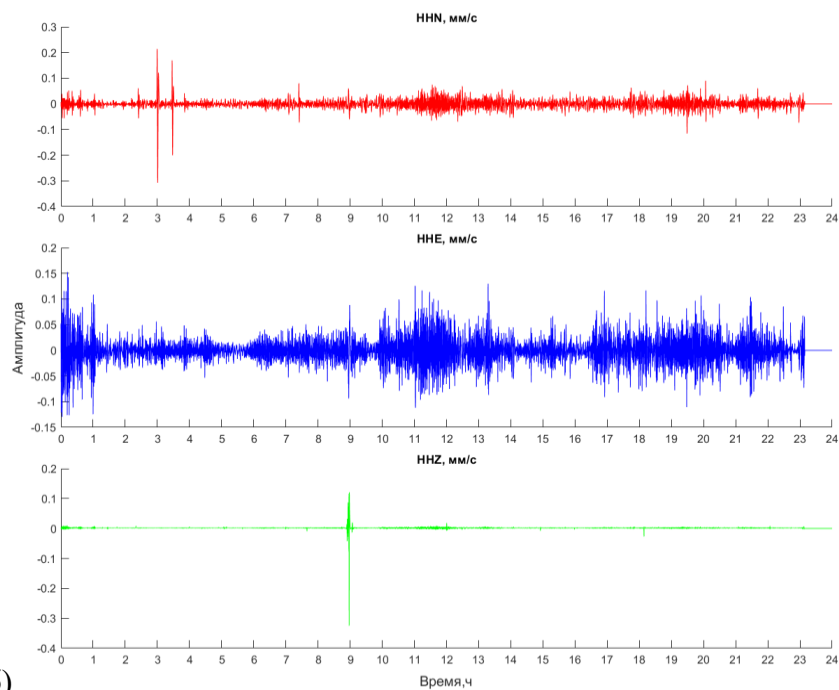


б)

Рисунок 21. Временной ход вертикальной и горизонтальных компонент колебаний льда (каналы N,E,Z) и наклономера (X,Y) за 23.08.17 станциях а)SVA2 и б)SVA3.

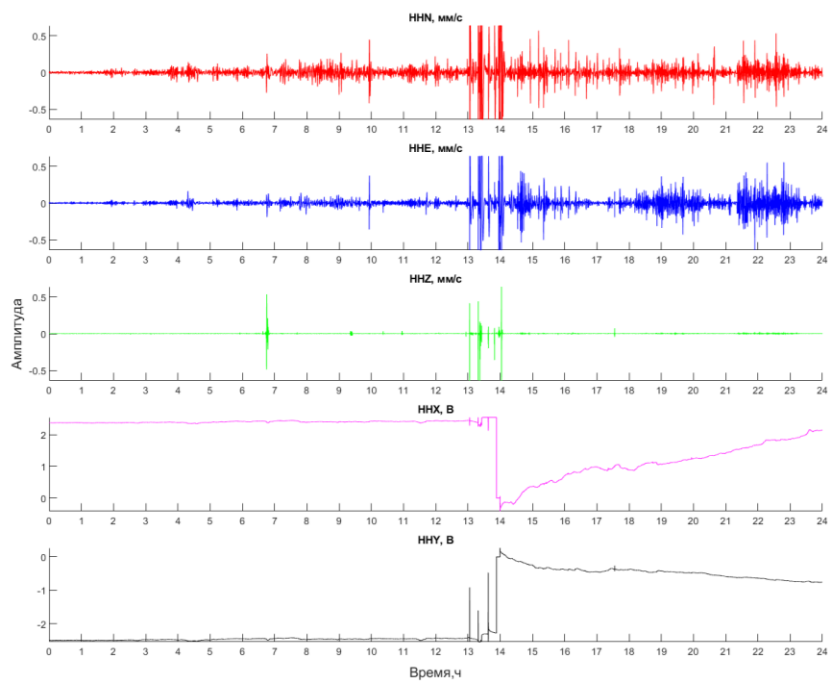


а)

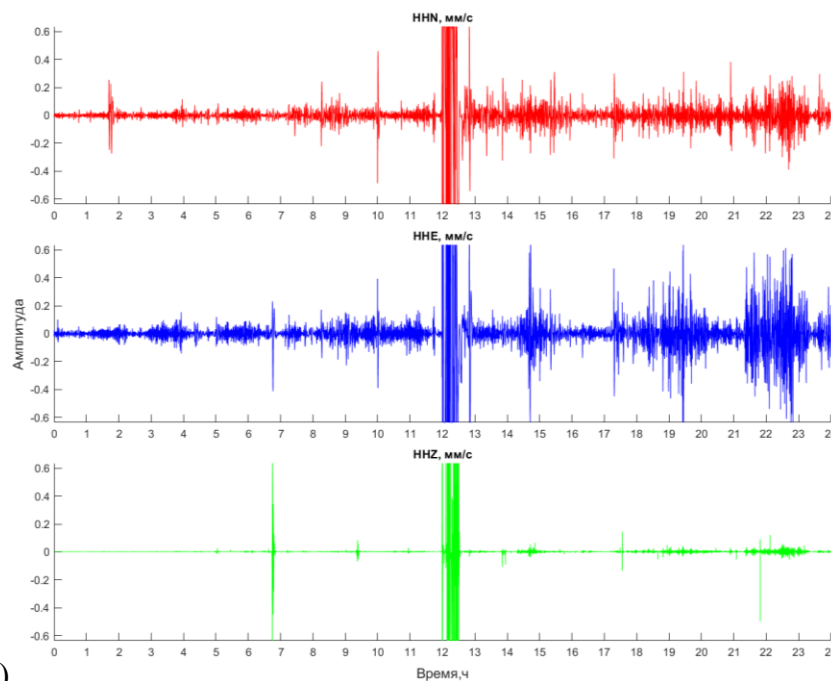


б)

Рисунок 22. Временной ход вертикальной и горизонтальных компонент колебаний льда (каналы N,E,Z) и наклономера (X,Y) за 24.08.17 станциях а)SVA2 и б)SVA3.



а)



б)

Рисунок 23. Временной ход вертикальной и горизонтальных компонент колебаний льда (каналы N,E,Z) и наклономера (X,Y) за 25.08.17 станциях а)SVA2 и б)SVA3.

В приложении 10 содержатся записи сейсмометров, на которых представлены различного вида ледовые события, которые произошли за исследуемый период. Отмечалось динамическое воздействие ветра на поверхность 20.08.17, отмечены разлом 21.08.17 в 14:45:20 на ст. Gamma и также в 14:45:20 на ст. SVA3, 23.08.17 береговой станцией были зарегистрированы сейсмические толчки, 23.08.17 сходы льда с ледника после крупного разлома в 20:38:36 на ст. Gamma. Я считаю важным отметить, что если одно и то же событие одновременно фиксируется на нескольких станциях, то источник сигналов равноудалён от регистраторов измерительного комплекса.

На рисунке 24 а)–в) представлены записи станций SVA2, SVA3 и Gamma измерительного сейсмокомплекса в двух вариантах исходные и после проведения фильтрации с 6 до 9 часов утра ВСВ, в этот промежуток произошло одно довольно значимое ледовое событие, которое проявилось на всех станциях, а именно разлом. На ст. SVA2 разлом начался в 7:47:10, при этом горизонтальная скорость по каналу N была 0.042 мм/с и по каналу E 0.044 мм/с, а вертикальная составила -0.031 мм/с. На ст. SVA3 он зафиксирован несколько раньше в 7:46:41

горизонтальные скорости были -0.35 мм/с и 0.28 мм/с, вертикальная – 0.56 мм/с, а на станции Gamma данное событие зарегистрировано в 7:45:30 в более ярко выраженном виде при горизонтальных скоростях 0.038 мм/с и 0.020 мм/с и вертикальной -0.016 мм/с. По времени возникновения сигналов можно заключить, что ближе всех к источнику была береговая станция, также на ней самые интенсивные сигналы, в отличие от двух других. Масштаб графиков одинаковый, но интенсивность сигналов на каждой станции разная. Это говорит нам о том, что источник сигнала находился на разных расстояниях от станций. Например, сигнал от SVA2 меньше, чем от SVA3 (хотя обе были на леднике), а из этого следует, что последняя была явно ближе к источнику. После проведения процедуры высокочастотной фильтрации на записях станций SVA2 и SVA3, установленных на льду, стали чётко видны высокочастотные скачки, свидетельствующие о трещинах, предвещающих разлом. На береговой же станции Gamma зафиксирован всплеск высокочастотных колебаний незадолго до начала разлома, и судя по виду сигнала, это сход льда.

В контексте данной работы необходимо объяснить, что я имею ввиду под понятием «сход льда». Судя по приведённым примерам записей сейсмометров, «сход льда» – это сползание массивов льда с ледника после крупномасштабных трещин и разломов, совершая при своём движении трение о его стенки.

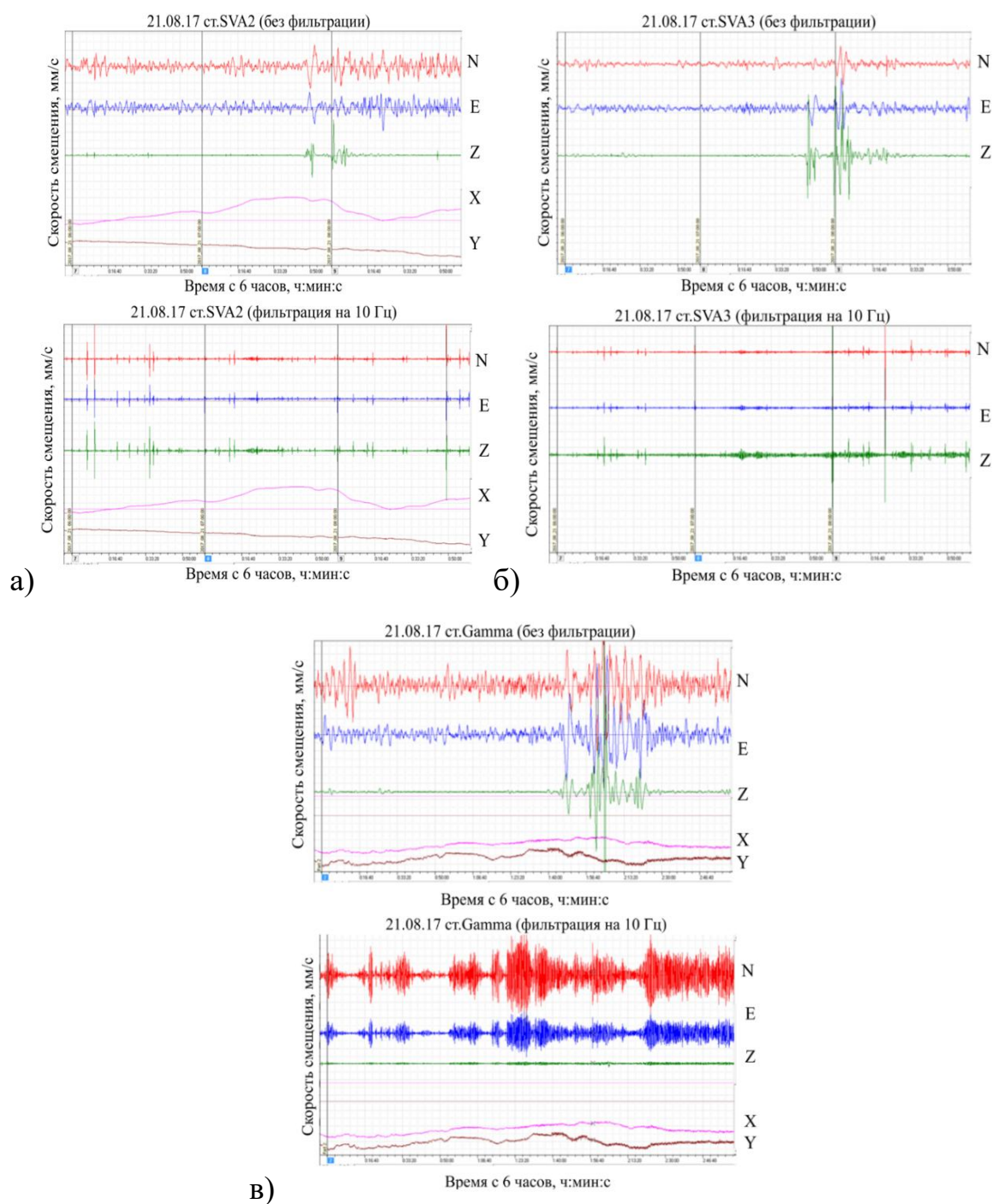
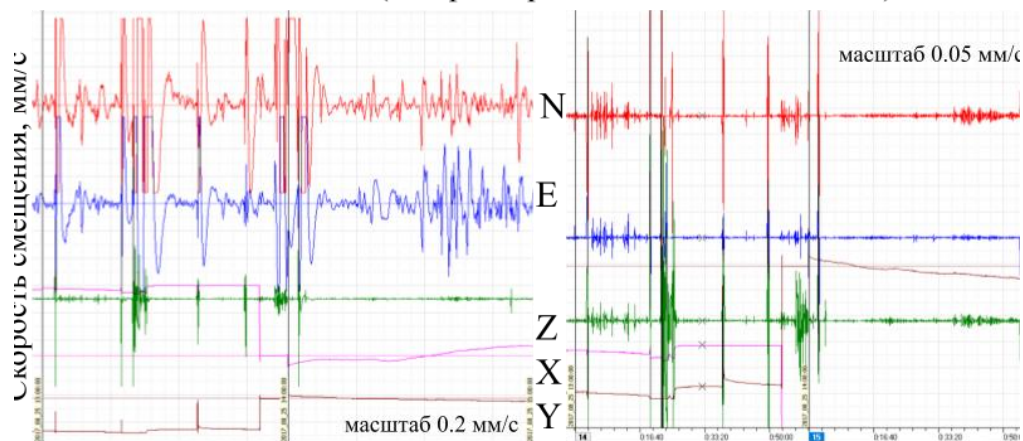


Рисунок 24. Записи станций а) SVA2, б) SVA3 и в) Gamma 21.08.17 с 6:00 до 9:00 ВСВ (UTC).

Рисунок 25 а)–ж) содержит яркие и показательные примеры ледовых событий и предвещающих им признаков, происходящих 25 августа на протяжении всего дня. За этот день произошло множество крупных событий. Одними из первых стали крупномасштабные разломы, зарегистрированные обеими станциями на леднике. По данным ст.SVA3 они начались в 11:59:10 и

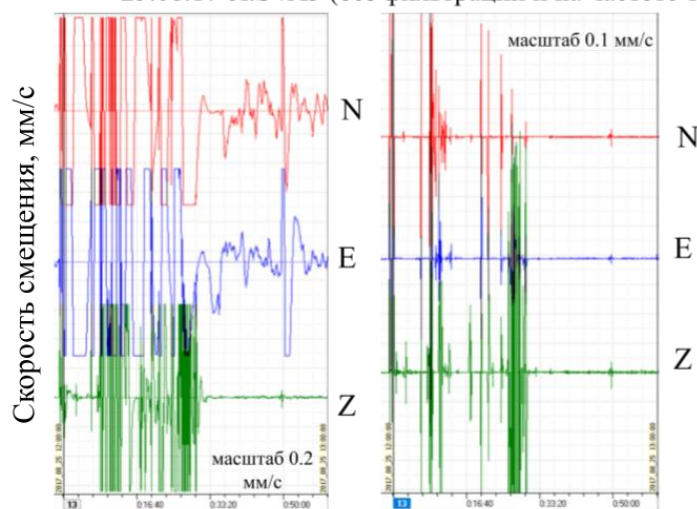
прекратились в 12:30:35, имея значения горизонтальных скоростей -0.74 мм/с и 0.84 мм/с, а вертикальной -0.88 мм/с; станции SVA2 сигнал настиг чуть позднее, а именно в 13:03:04 и длился до 14:04:25, скорость по каналу N была 0.78 мм/с, по E равнялась 0.62 и по Z она составила 0.72 мм/с. На береговой станции с 14:31:36 по 14:50:50 был обнаружен довольно интенсивный сход льда, горизонтальные скорости имели величины 0.24 мм/с и 0.12 мм/с, а вертикальная – -0.014 мм/с. Теперь понятно, что случившиеся до этого события, а именно трещины и разломы, служат предвестниками такого рода событий, как те, что были отмечены ст.Gamma. Также по данным ст.SVA3 в 17:33:00 был зарегистрирован разлом, имеющий значения горизонтальных скоростей 0.12 мм/с и 0.10 мм/с и вертикальную – 0.10 мм/с, после которого происходило интенсивное растрескивание льда (часто возникающие менее крупные трещины). По записям другой станции, установленной не леднике, в 17:33:06 также произошёл идентичный разлом, только с меньшей интенсивностью, величины скоростей составили по горизонтальным каналам -0.08 мм/с и 0.08 мм/с и по вертикальному 0.04 мм/с. А это, в свою очередь, свидетельствует о том, что источник данного сигнала был ближе к первой. Сейсмостанция SVA2 зафиксировала в 21:21:00 начало длительного периода высокочастотных всплесков, по своему виду похожих на сход льда, при которых горизонтальные скорости были -0.028 мм/с и -0.0067 мм/с, вертикальная -0.0022 мм/с. Станция SVA3 после разлома в 17:33 до конца 25 августа были зафиксированы крупные трещины и крупномасштабный разлом с горизонтальными скоростями 0.4 мм/с и 0.24 мм/с, вертикальная была 0.68 мм/с.

25.08.17 ст.SVA2 (без фильтрации и на частоте 10 Гц)



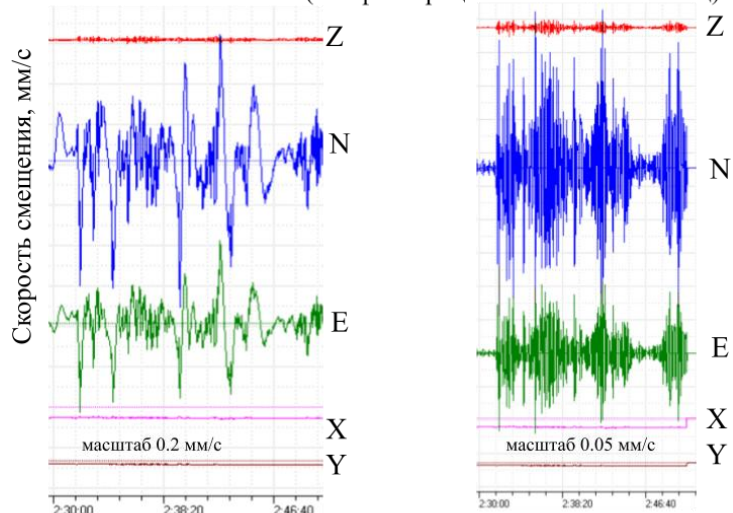
а) Время с 13 часов, ч:мин:с

25.08.17 ст.SVA3 (без фильтрации и на частоте 10 Гц)



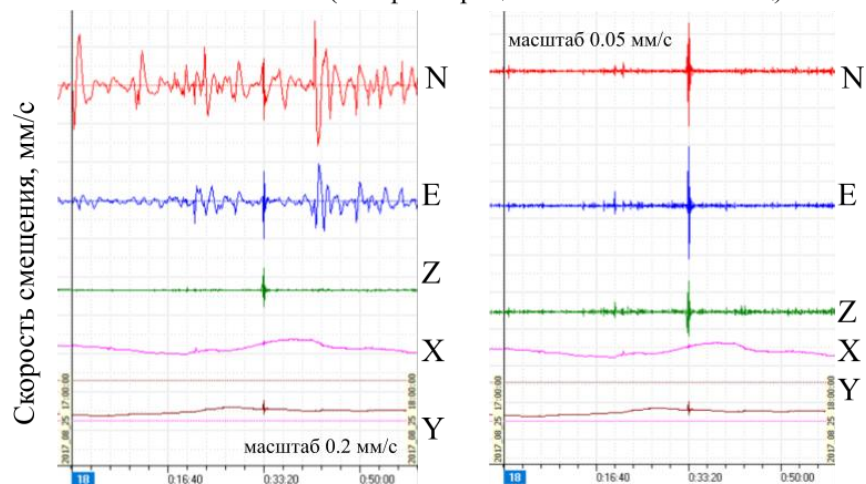
б) Время с 12 часов, ч:мин:с

25.08.17 ст.Gamma (без фильтрации и на частоте 10 Гц)



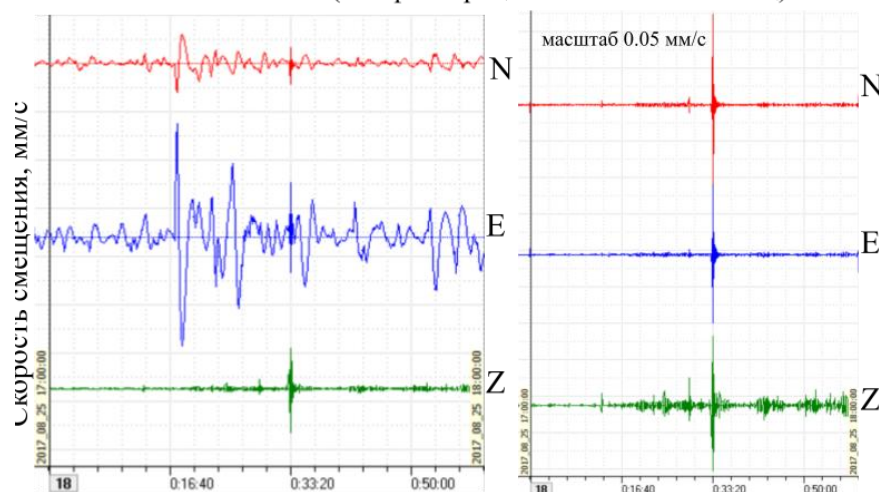
в) Время с 12 часов, ч:мин:с

25.08.17 ст.SVA2 (без фильтрации и на частоте 10 Гц)



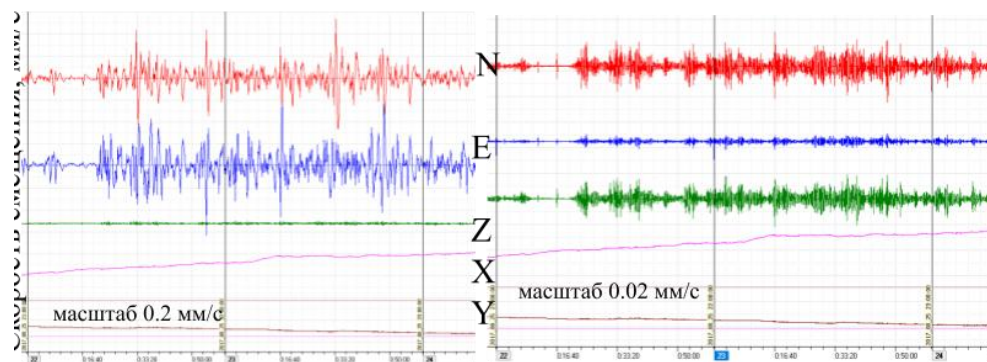
г)

25.08.17 ст.SVA3 (без фильтрации и на частоте 10 Гц)

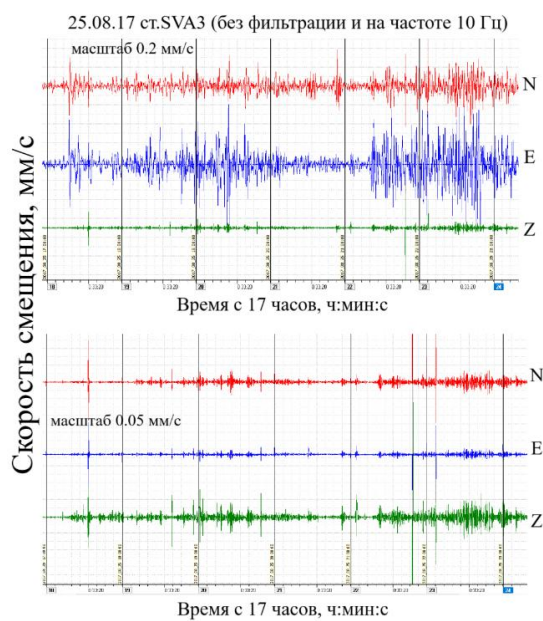


д)

25.08.17 ст.SVA2 (без фильтрации и на частоте 10 Гц)



е)



ж) Рисунок 25. Записи станций а) крупномасштабные разломы на ст.SVA2, б) крупномасштабные разломы на ст.SVA3, в) сход льда на ст.Gamma 25.08.17, г) разлом 25.08.17 в17:33:06 на ст. SVA2, д) разлом 25.08.17 в17:33:00 на ст. SVA3, е) сход льда на ст.SVA2 и ж) трещины на ст.SVA3.

Теперь же можно выделенные события рассмотреть более детально, не только оценить по внешнему виду сигнала на сейсмометре, но и с математической точки зрения. Рассчитанные и построенные посредством того же программного кода частотные спектры (см.рис.26–30) представляют собой графики спектрального разложения, полученные посредством БПФ, которые показывают зависимость амплитуды от частоты, для трёх компонент сигналов сейсмометра Z, N и E.

На рисунке 26 по оси X отложена частота, которая изменяется от 0 до 0.08 Гц, а по оси Y — амплитуда, которая изменяется от 0 до 0.07 Вольт, показывающая интенсивность сигнала на каждой частоте. Все три составляющие (E, N и Z) достигают своего максимального значения амплитуды в районе частоты 0.02 Гц, а это означает, что наибольшая энергия сигнала сосредоточена в низкочастотной области. Это может указывать на наличие низкочастотных колебаний или шумов в сигнале. После достижения пика амплитуда для всех трех компонент начинает плавно уменьшаться, что в свою очередь может быть связано с фильтрацией сигнала или его естественными свойствами.

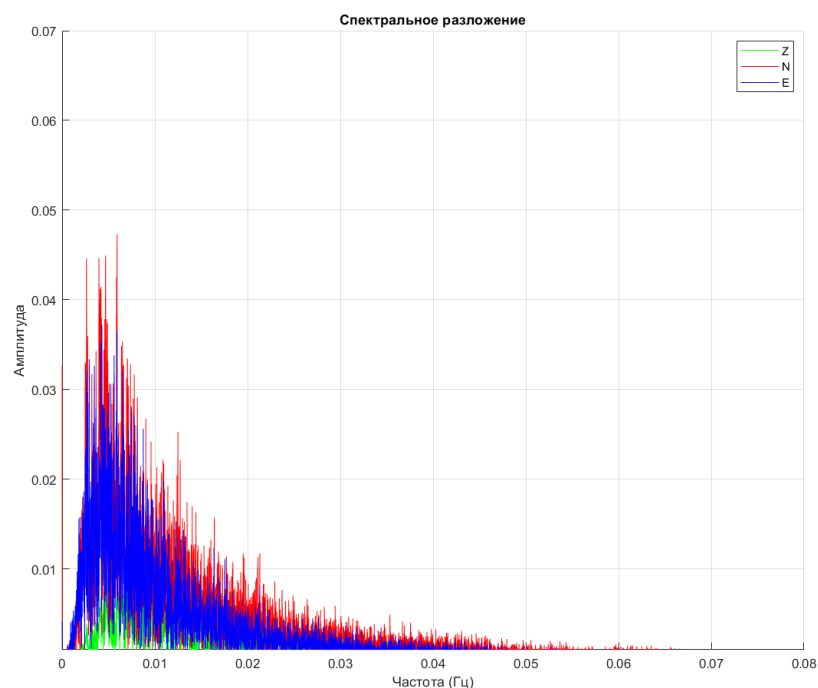


Рисунок 26. Частотные спектры исходных записей сейсмометров за 20.08.17 станции Gamma.

На рисунке 27 по оси X отложена частота, которая изменяется от 0 до 0.08 Гц, а по оси Y — амплитуда, которая изменяется от 0 до 0.07 Вольт. Горизонтальные составляющие E, N имеют максимальное значение амплитуды на частоте примерно 0.01 Гц, а вертикальная Z — в районе частоты 0.02 Гц, а это означает, что наибольшая энергия сигналов также сконцентрирована в низкочастотной области.

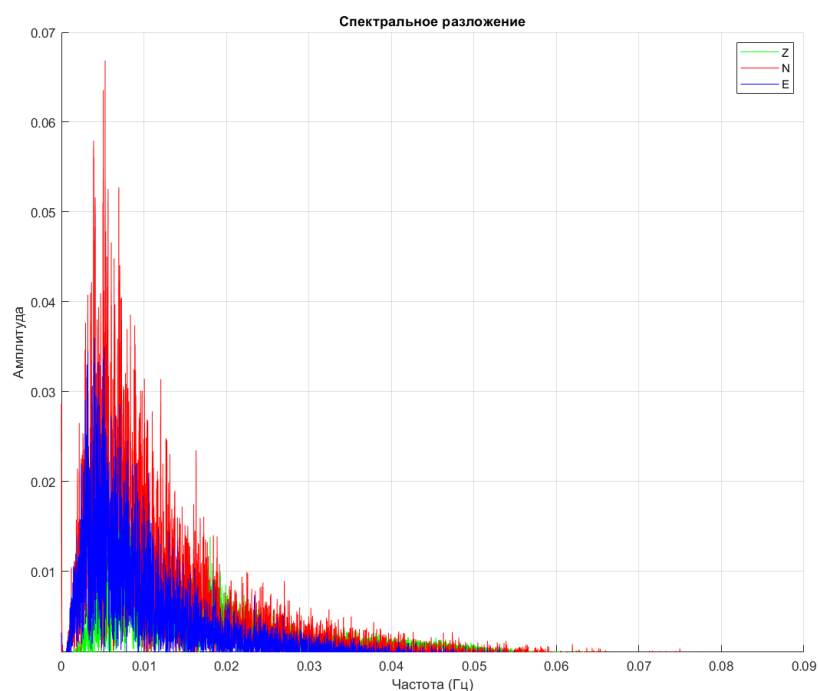


Рисунок 27. Частотные спектры исходных записей сейсмометров за 21.08.17 станции Gamma.

На рисунке 28 по оси X отложена частота, которая изменяется от 0 до 0.07 Гц, а по оси Y — амплитуда, которая изменяется от 0 до 0.03 Вольт. Горизонтальные составляющие E, N имеют максимальное значение амплитуды на частоте примерно 0.01 Гц, а вертикальная Z практически не видна на графике из-за её малости и перекрывания другими. Всё это говорит нам о том, что наибольшая энергия сигналов остаётся в низкочастотной области.

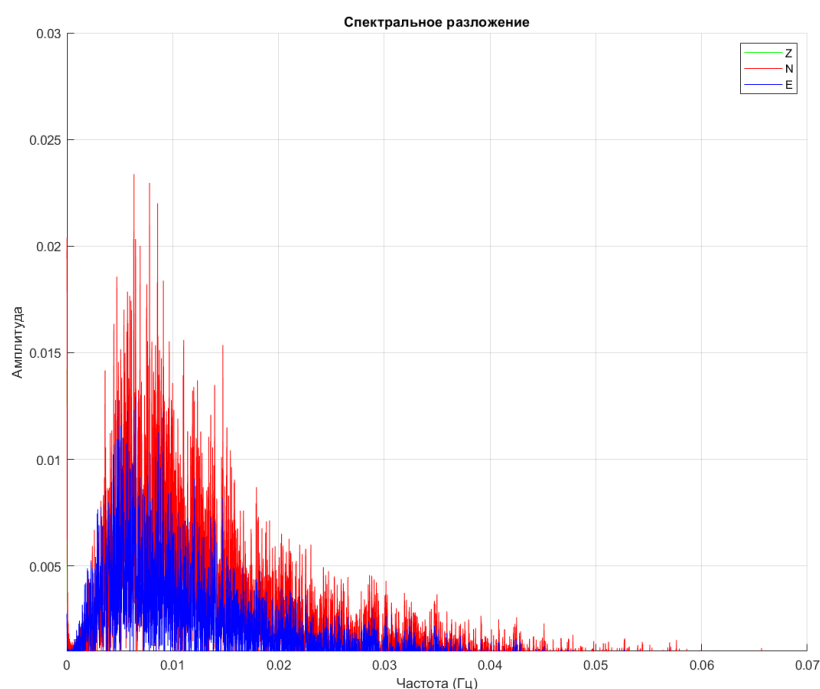


Рисунок 28. Частотные спектры исходных записей сейсмометров за 23.08.17 станции Gamma.

На рисунке 29 на оси X находится частота, которая изменяется от 0 до 0.06 Гц, а по оси Y — амплитуда, которая изменяется от 0 до 0.03 Вольт. Горизонтальные составляющие E, N имеют максимальное значение амплитуды на частоте примерно 0.01 Гц, а вертикальная компонента сигнала также почти практически не видна, а это означает, что наибольшая энергия сигналов также сосредоточена в той же области.

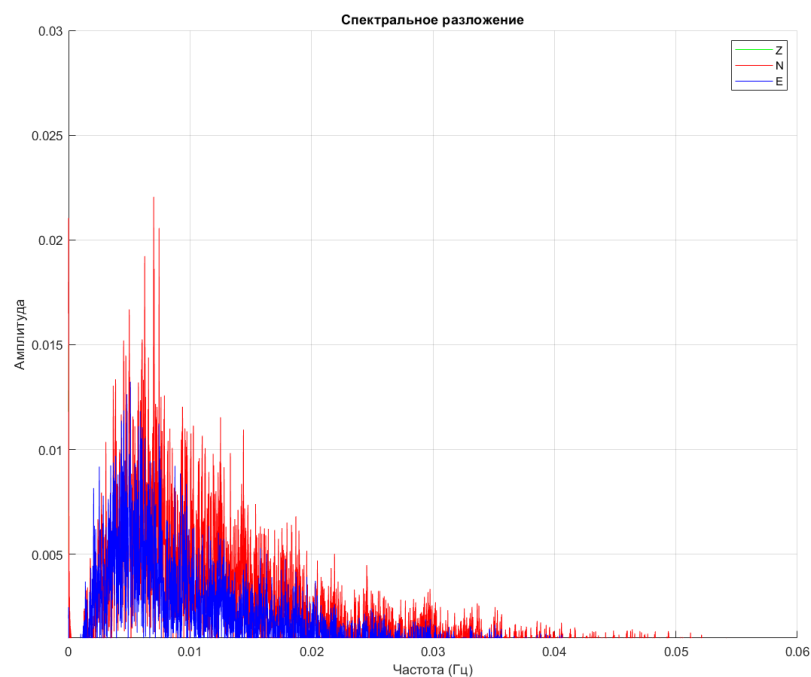


Рисунок 29. Частотные спектры исходных записей сейсмометров за 24.08.17 станции Gamma.

На рисунке 30 частота меняется от 0 до 0.08 Гц, а амплитуда, от 0 до 0.03 Вольт. Все три составляющие (E, N и Z) достигают своего максимального значения амплитуды в районе частоты 0.01 Гц, почти вся энергия сигналов сконцентрирована в области низких частот.

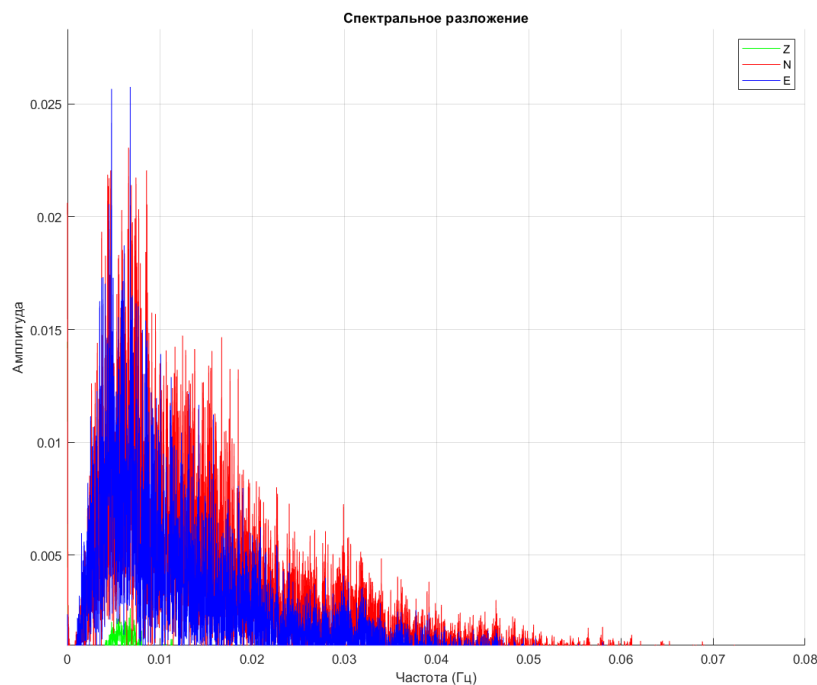


Рисунок 30. Частотные спектры исходных записей сейсмометров за 25.08.17 станции Gamma.

Вейвлет-преобразования были рассчитаны при помощи программного кода в MATLAB. Такой тип анализа позволяет анализировать временные ряды и

выявлять частотные составляющие сигналов в зависимости от времени. В данном случае на графиках на рисунке 31–35 представлены рассчитанные вейвлеты по каждому каналу сигнала (N, E и Z), горизонтальная ось X отображает временной интервал в часах за сутки, а на вертикальной оси Y отложены частоты в Гц.

На графике, изображённом на рисунке 31, где представлены рассчитанные вейвлеты для трёх компонент за 20.08.17, видно, что сигнал горизонтальной составляющей N имеет высокую амплитуду в низкочастотной области, составляющей 1.5–2 Гц, и эта амплитуда сохраняется в течение всего времени, в целом изменяясь в пределах от 1 до 2.5 Гц. Видна область с максимальными значениями амплитуды для горизонтальных составляющих примерно в интервале с 12 до 14 ч. для N и с 13 до 19 ч. для E. Этому промежутку времени соответствовало сильное ветровое воздействие на поверхность и воду, вызывая её колебания, а также небольшой сейсмический толчок в 19:18-19:20 часов по ВСВ (UTC). На вертикальной составляющей Z сигнала практически не было значительных колебаний, в целом отмечается изменчивость амплитуды в области частот от 1.5 до 2.5 Гц.

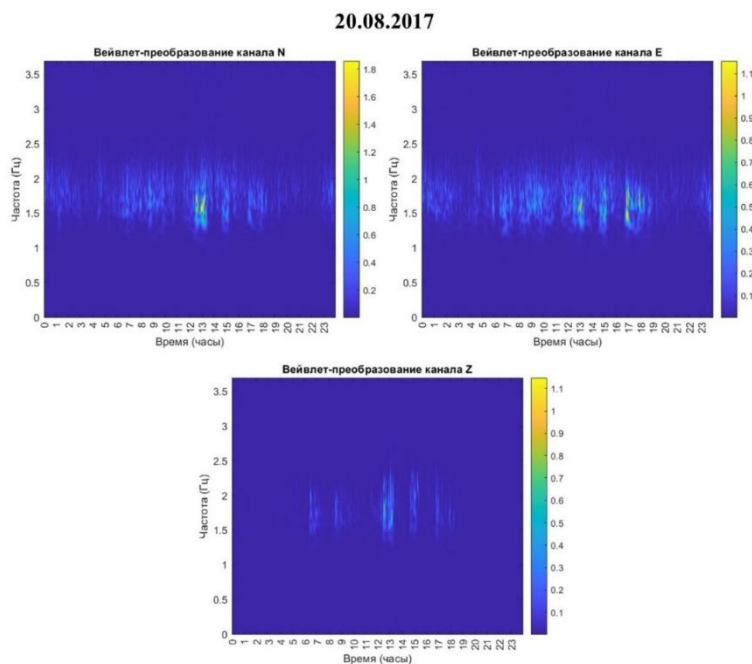


Рисунок 31. Вейвлет-преобразования исходных записей сейсмометров за 20.08.17 станции Gamma.

На рисунке 32 представлены вейвлеты для трёх составляющих на 21.08.17, по графикам можно заметить, что амплитуда варьируется в низкочастотной области от 1.5 до 2.5 Гц. Для горизонтальной компоненты N отмечается область высоких значений примерно с 12 до 14 ч., а для E с 7:19 до 12:00 ч., также с 12 до 13 ч. и с 16:30 до 20 ч., что соответствует сильному ветровому воздействию на поверхность и воду, одному крупному разлому, который произошёл в 14:46, термической трещине в 18:26, с 18:41 череде разломов и затем взаимодействию их стенок друг с другом. Вертикальная составляющая в этот день также мало и незначительно изменялась, но отмечается один её яркий всплеск значений именно в период с 7 до 8 часов утра, соответствующий динамическому действию ветра, более выраженному и по компоненте E.

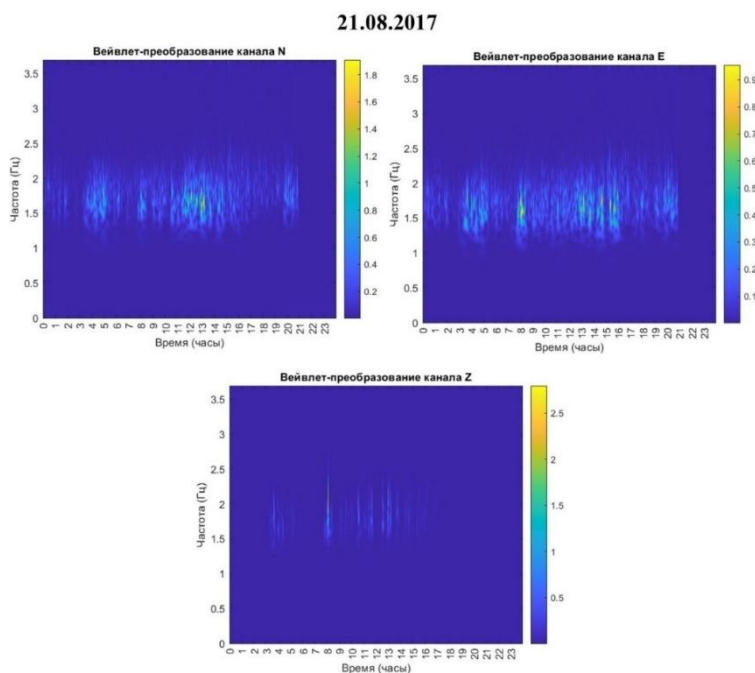


Рисунок 32. Вейвлет-преобразования исходных записей сейсмометров за 21.08.17 станции Gamma.

На графиках вейвлет-преобразования за 23.08.17 присутствуют данные только с 9:36:00 ч. (BCB), представленных на рис.33, так как эта сеймостанция не работала весь день 22.08.17 и часть 23-го числа. Горизонтальные компоненты в противоположность предыдущим дням менее изменчивы, амплитуды всех трёх каналов также колеблются в пределах 1–2.5 Гц. Легко заметить, что составляющая N наиболее интенсивна в период с 12 до 15 часов, когда возникла

термическая трещина, были колебания из-за влияния ветра, а также подвижки льда. Другая же горизонтальная компонента (Е) максимальные значения амплитуды имела примерно с 19 до 22 ч., тогда также отмечалось действие ветра, вдобавок зафиксирована крупная трещина/разлом. Вертикальная составляющая Z в этот день отличалась более высокими величинами амплитуды сигнала по сравнению с другими днями, так участки с наибольшей интенсивностью были с 13 до 14 часов, когда образовалась трещина, и отмечались подвижки льда. Ещё одна область с 15 до 17 ч. приходилась на ветровой фактор и под конец периода на сейсмические толчки. Предположительный сход ледника не отразился ни на одном из графиков вейвлет-преобразования, который отмечался с 20:52 до 00:20 следующего дня (24.08).

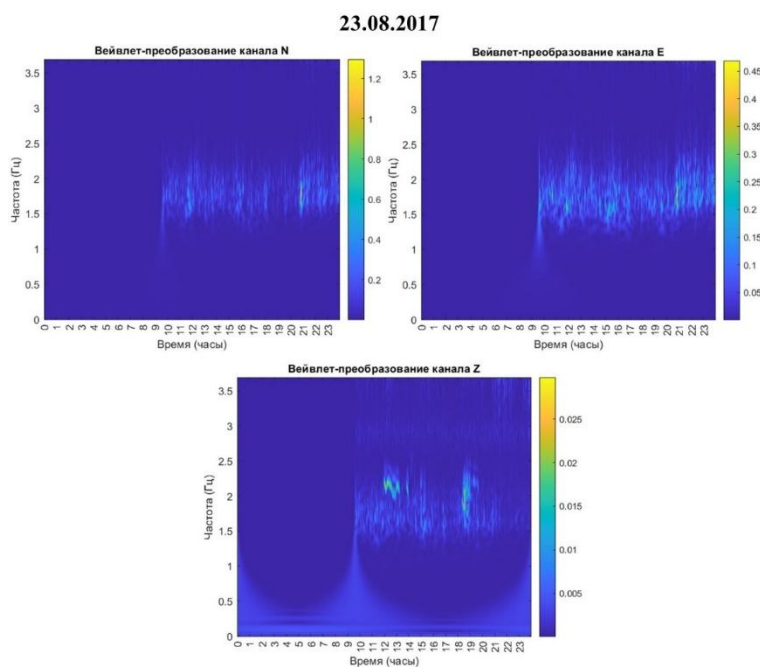


Рисунок 33. Вейвлет-преобразования исходных записей сейсмометров за 23.08.17 станции Gamma.

На следующем рисунке 34 показаны вейвлеты, построенные за 24.08.17, с 00:20 часов до 12:16 отсутствовали данные в связи с прекращением записи сейсмостанцией. Аналогично предыдущему дню амплитуды всех трёх компонент сигнала варьируются в пределах 1–2.5 Гц. Составляющая N имела максимальные значения на протяжении довольно длительного промежутка времени с 12:50 до 16:19, в который отмечалось динамическое воздействие ветра,

множество подвижек, а также появилась трещина. Для другой горизонтальной компоненты сигнала Е видно только два пика амплитуды, приходящиеся на период с 19:16 до 22:11, когда образовывалось множество термических трещин совместно с ветровым форсингом. По вейвлету канала для Z важно отметить тот факт, что также выражена та же область повышенной амплитуды, что и для N, то есть с 12:50 до 13:55 ч., в это время зарегистрировано динамическое действие ветра, весьма заметной является область повышенных значений, приходящаяся на время примерно с 14:56 до 17 часов, когда происходили постоянные подвижки льда и образовалась трещина. Также нужно сказать о том, что вертикальная компонента также среагировала на термические трещины и действие ветра, как и Е.

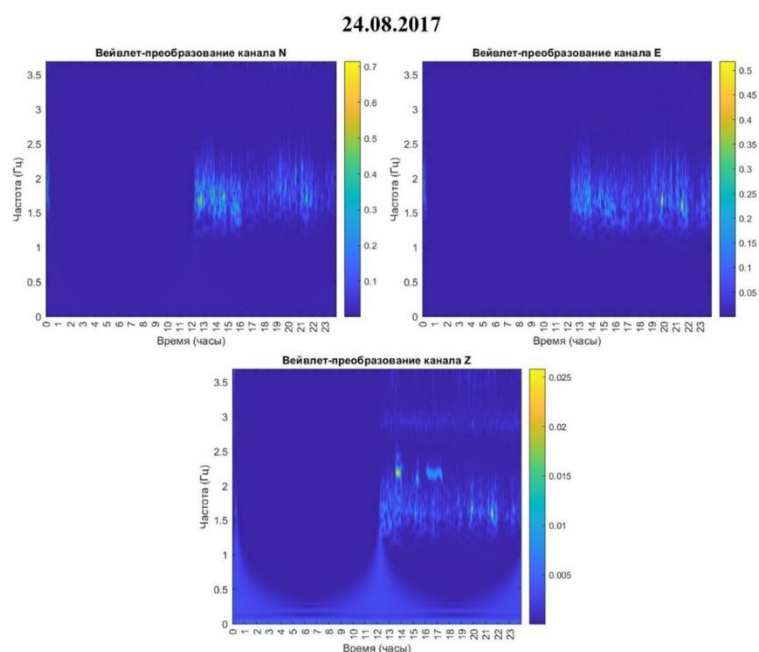


Рисунок 34. Вейвлет-преобразования исходных записей сейсмометров за 24.08.17 станции Gamma.

Графики, представленные на заключительном рисунке 35, отображают вейвлеты на 25.08.17, были получены данные с этой сейсмостанции только до 14:50, потом она перестала работать. Важно отметить, что в этот день из всего исследуемого периода были наибольшие значения амплитуд сигналов по всем каналам, в целом основная энергия сигнала сосредоточена в полосе частот 1–2.5 Гц. Так компонента N наиболее выражена на участках с 6 до 9 часов утра при

многочисленных подвижках, трещинах совместно с ветровым форсингом и с 14 до 14:50, когда предположительно произошёл сход массы с ледника. Другая горизонтальная составляющая сигнала Е имела более ярко выраженные колебания величин амплитуды, также можно выделить утреннюю область с 6 до 8 ч., временной участок с 8:13 до 13 часов дня при значительном действии ветра, трещинах и множественных подвижках льда, и тот интервал времени, когда произошла потеря части льда. Вертикальная компонента Z не так сильно была изменчива за этот день, но всё же можно отметить один единственный яркий всплеск значений сигнала, который произошёл в 6:26–6:27 часов утра, на горизонтальном канале записи сейсмометра Е он также был зафиксирован, что указывает на то, что сигнал о сейсмическом событии был с востока.

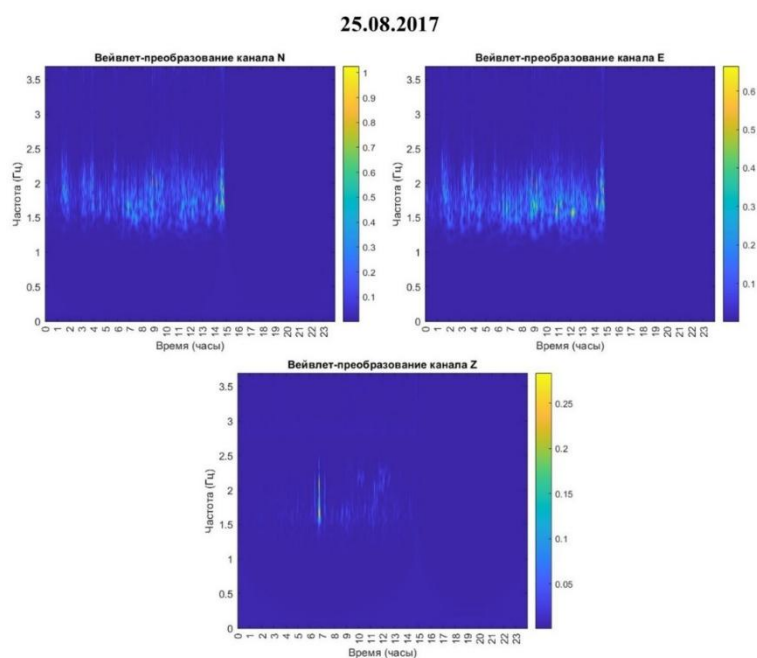


Рисунок 35. Вейвлет-преобразования исходных записей сейсмометров за 25.08.17 станции Gamma.

На рисунке 36 а) и б) представлены рассчитанные спектры по данным двух станций за 20.08.2017, находящихся на леднике, где по оси X отложена частота, которая по большей части изменяется от 0 до 0.2 Гц, а по оси Y — амплитуда, варьирующая от 0 до 0.008 Вольт. Все составляющие Е, N и Z имеют максимальное значение амплитуды на частоте примерно 0.01 Гц. Причём на ст.SVA3 вертикальная компонента более выражена.

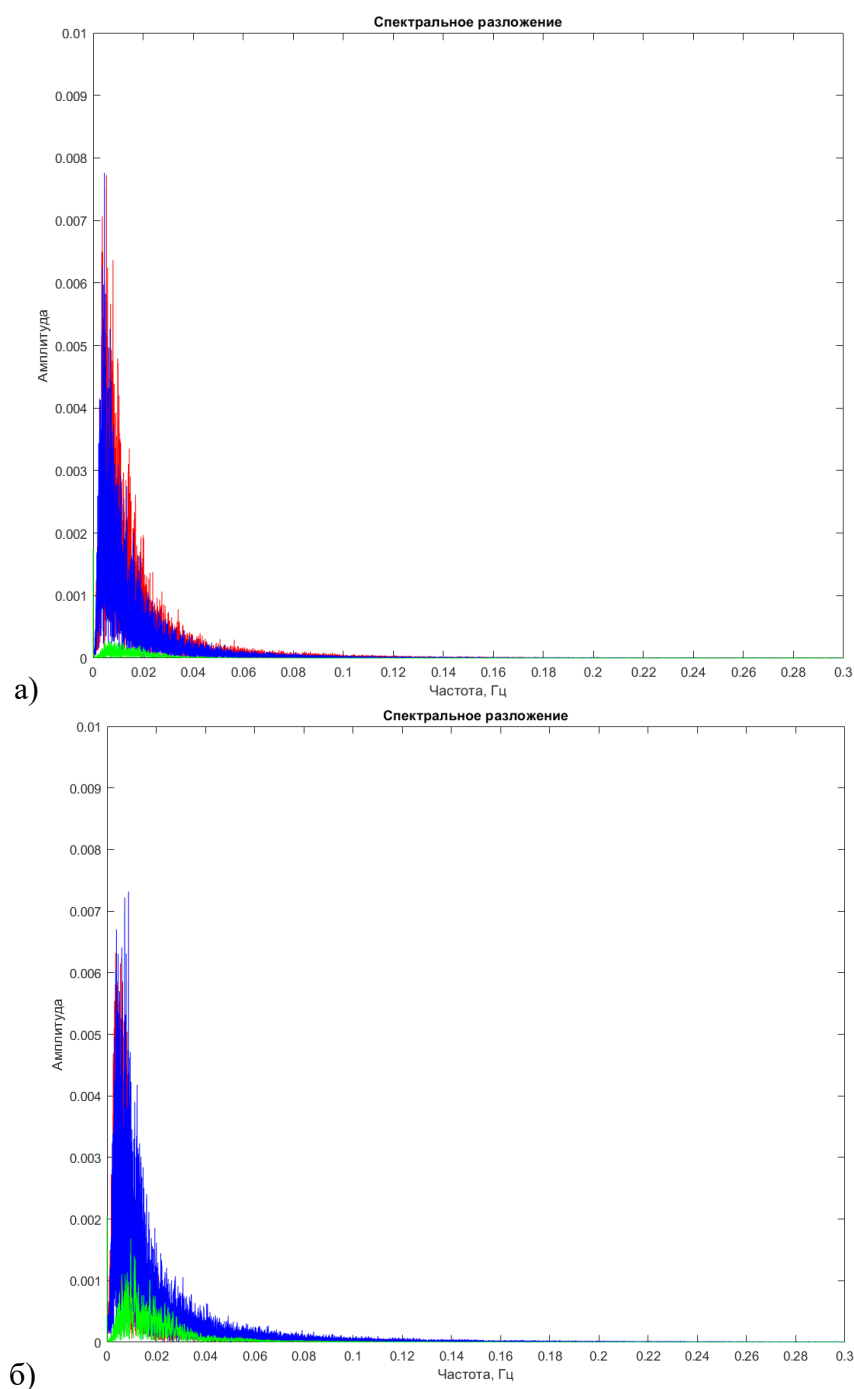


Рисунок 36. Частотные спектры исходных записей сейсмометров за 20.08.17 для станций а)SVA2 и б)SVA3.

На рисунке 37 а) и б) находятся спектры на 21.08.2017 по двум станциям, для которых по X отложена частота, изменяющаяся от 0 до 0.12 Гц и от 0 до 0.2 Гц, а по оси Y — амплитуда, которая колеблется от 0 до 0.01 Вольт. Все составляющие N, E и Z имеют максимальное значение амплитуды на частоте примерно 0.01 Гц. Колебания в вертикальной плоскости на ст.SVA3 больше, чем на другой ледниковой станции.

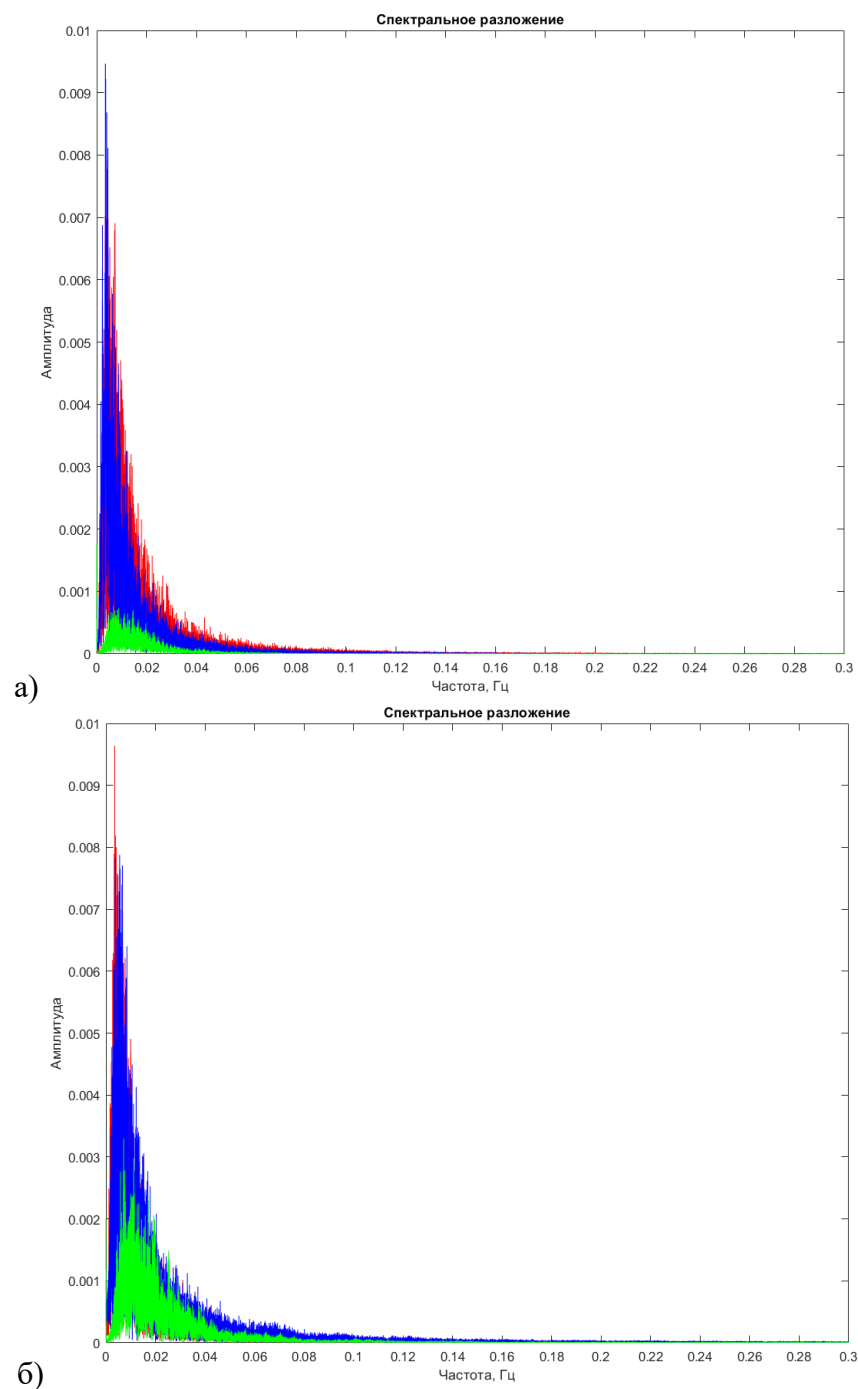


Рисунок 37. Частотные спектры исходных записей сейсмометров за 21.08.17 для станций а)SVA2 и б)SVA3.

На графиках спектрального разложения за 22.08.2017 на рис. 38 а) и б) показаны изменения частоты от 0 до 0.2 Гц и амплитуда, которая колеблется в пределах от 0 до 0.009 Вольт и от 0 до 0.006 Вольт. Все компоненты сигнала имеют максимальное значение амплитуды на частоте примерно 0.01 Гц. Причём на ст.SVA2 горизонтальная составляющая N более выражена.

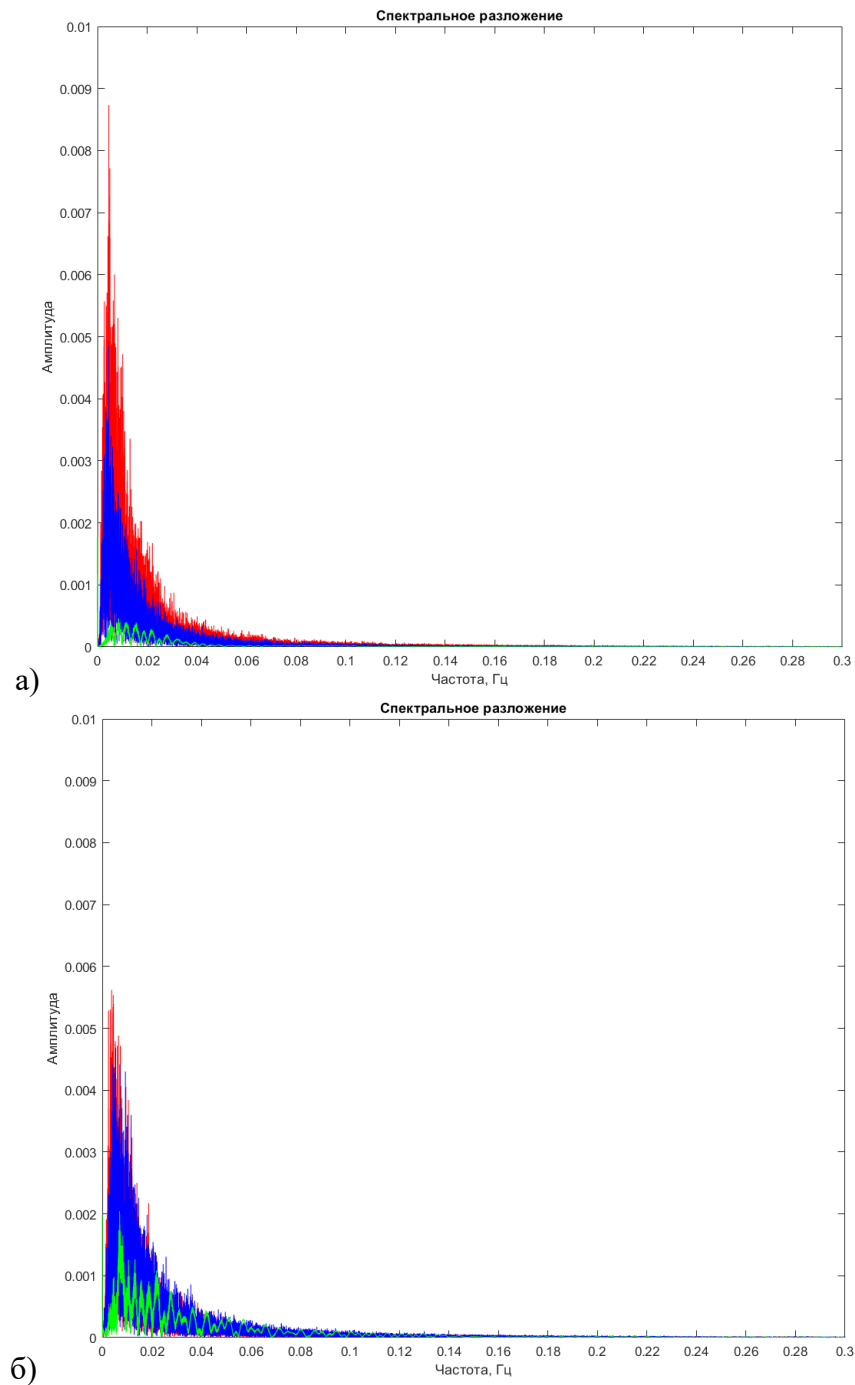


Рисунок 38. Частотные спектры исходных записей сейсмометров за 22.08.17 для станций а)SVA2 и б)SVA3.

На рис. 39 а) и б) находятся построенные спектры за 23.08.2017, для которых частота меняется от 0 до 0.2 Гц и амплитуды, варьирующая в пределах от 0 до 0.003 и до 0.0055 Вольт. Все компоненты имеют максимальное значение амплитуды на частоте около 0.01 Гц. Причём на ст.SVA3 отмечаются более высокие значения амплитуд для всех составляющих.

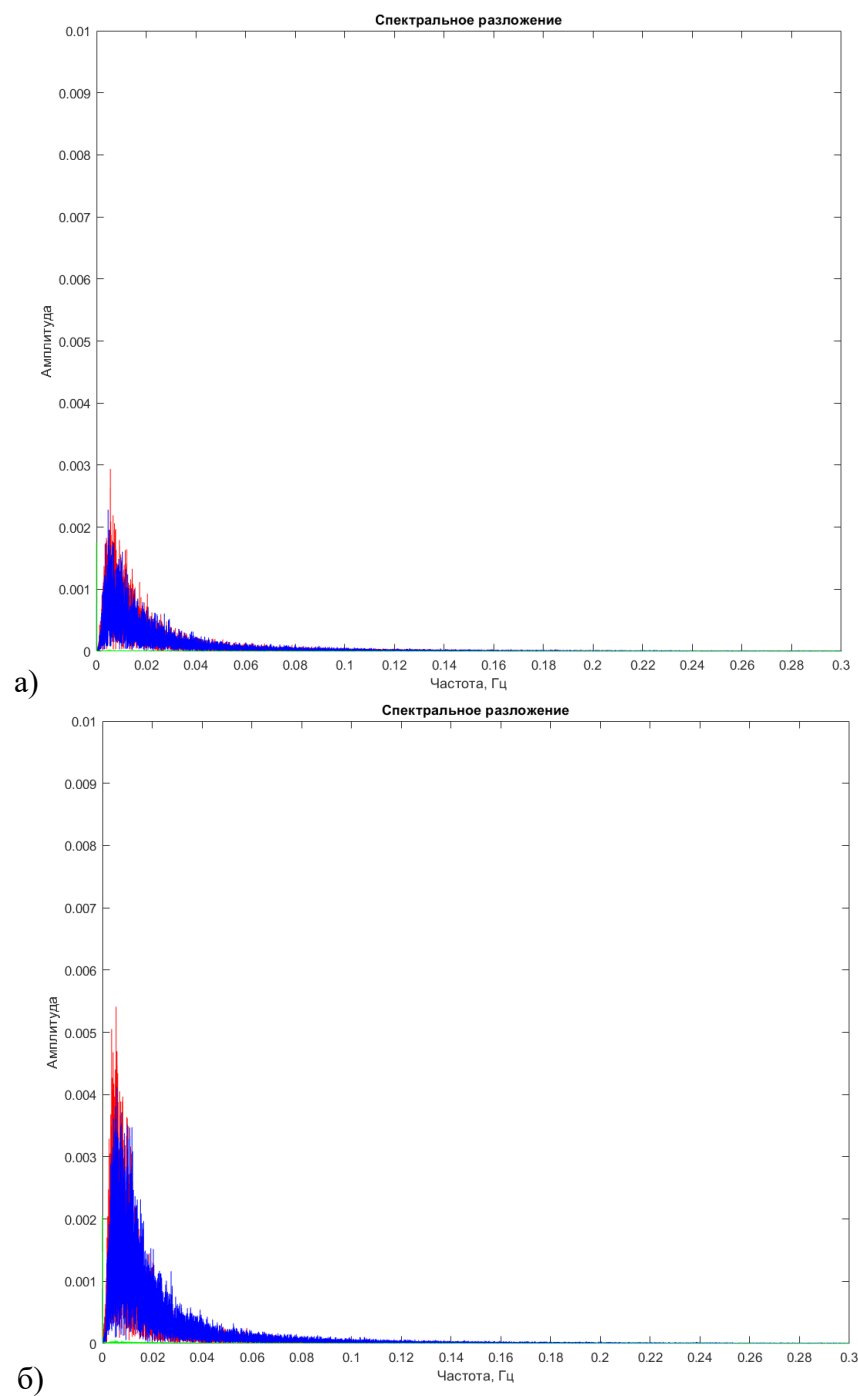


Рисунок 39. Частотные спектры исходных записей сейсмометров за 23.08.17 для станций а)SVA2 и б)SVA3.

На рис. 40 а) и б) демонстрируется разложение в спектр данных от станций за 24.08.2017, установленных на льду. Частота колебаний варьирует в пределах интервала 0–0.16 Гц, а амплитуда меняется от 0 до 0.004 и до 0.002 Вольт. В этот день были зафиксированы самые малые по величине колебания сигналов. Все компоненты имеют максимальное значение амплитуды на частоте в области 0.01

Гц. Причём на ст.SVA2 зарегистрированы величины несколько более нежели на ст.SVA3.

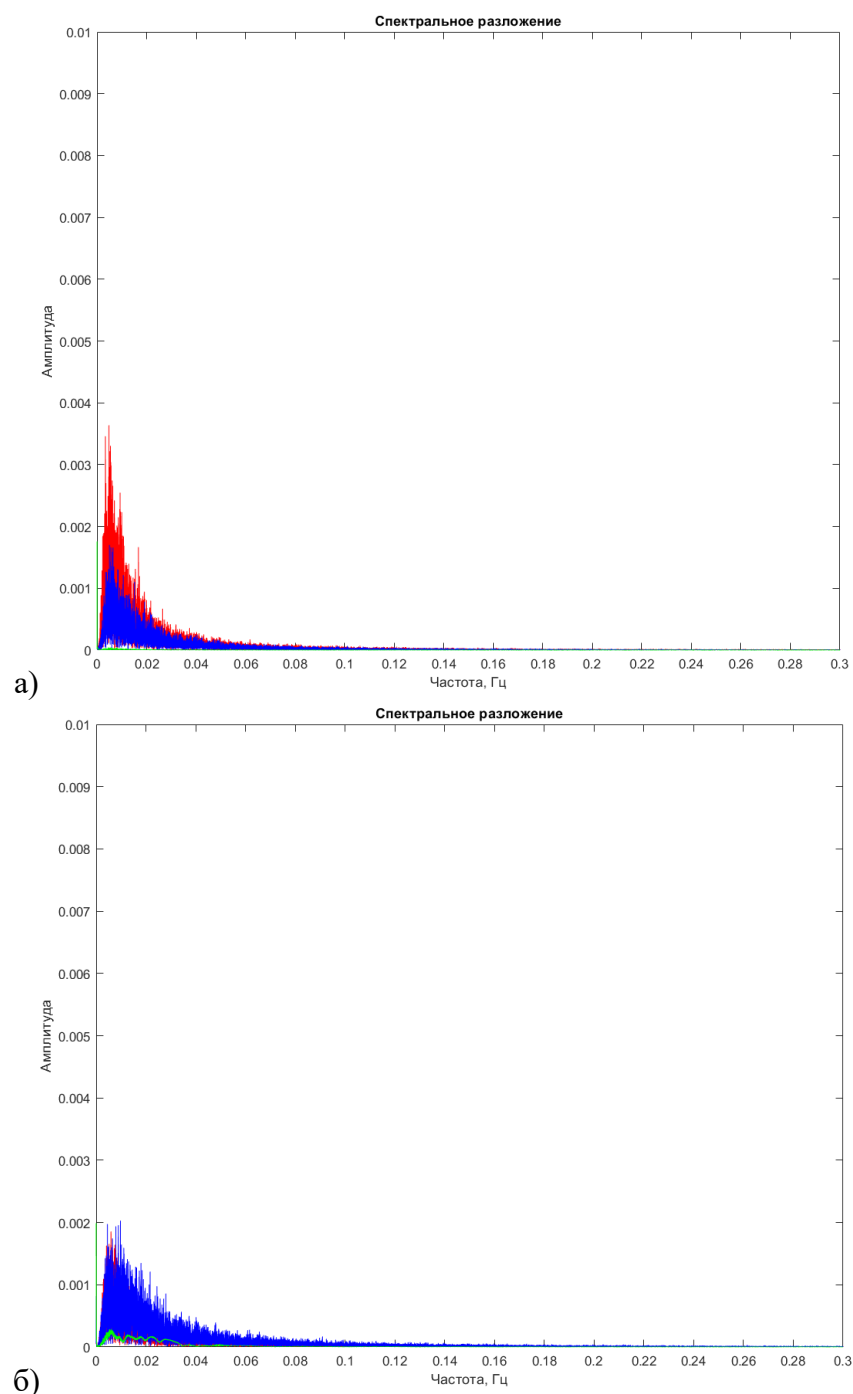


Рисунок 40. Частотные спектры исходных записей сейсмометров за 24.08.17 для станций а)SVA2 и б)SVA3.

На рисунке 41 а) и б) представлены рассчитанные спектры по данным станций SVA2 и SVA3 на 25.08.2017, частота которых находится в пределах от 0 до 0.3 Гц, а амплитуда изменяется от 0 до 0.009 и до 0.014 Вольт. Все составляющие E, N и Z имеют максимальное значение амплитуды на частоте

примерно 0.01 Гц. На ст.SVA3 вертикальная компонента более выражена и интенсивна, её максимумы отмечаются на промежутке частот от 0.005 до 0.02 Гц, да и в целом колебания по её данным больше, чем на другой ледниковой станции. Всё это говорит нам о том, что наибольшая энергия сигналов остаётся в низкочастотной области.

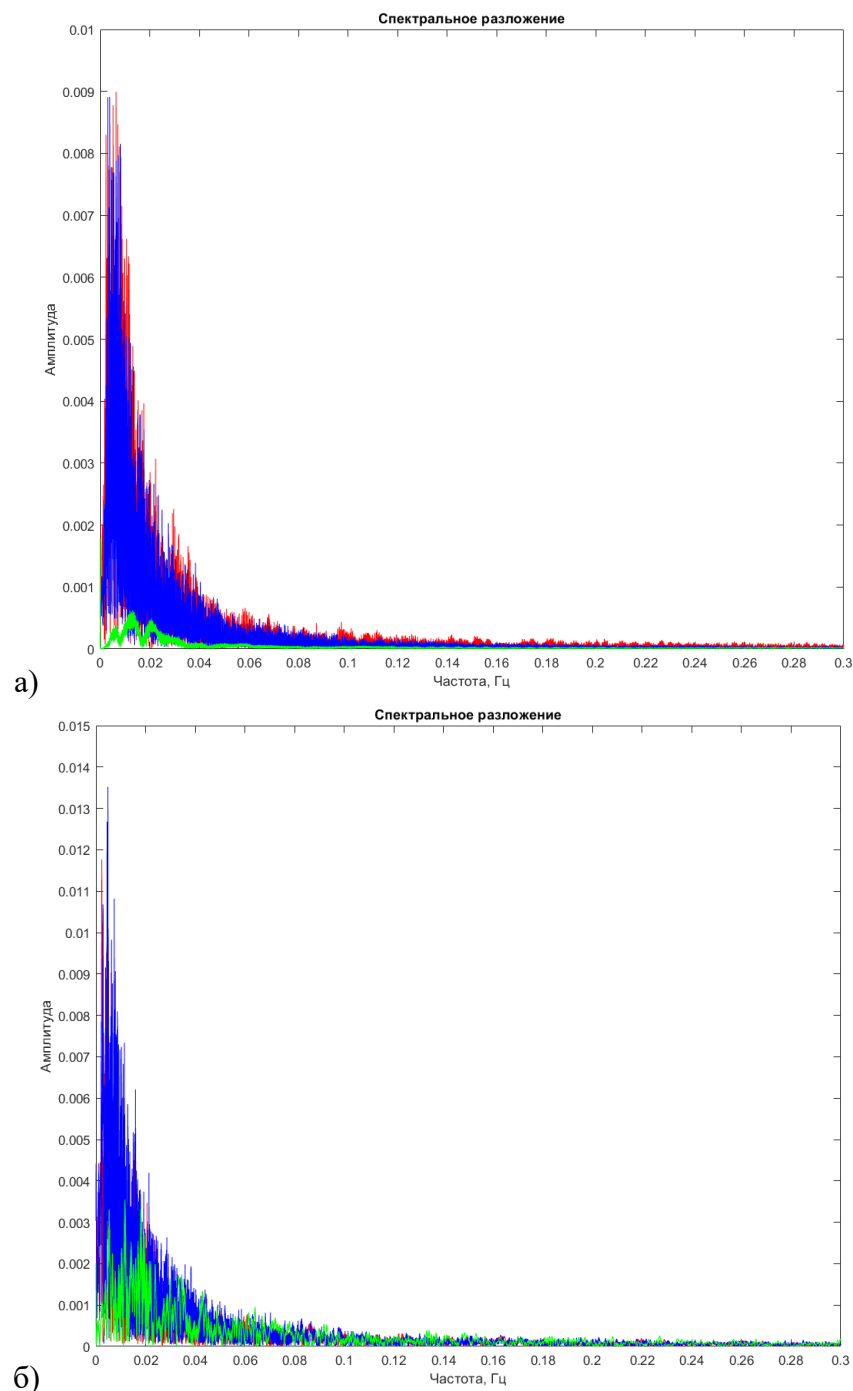
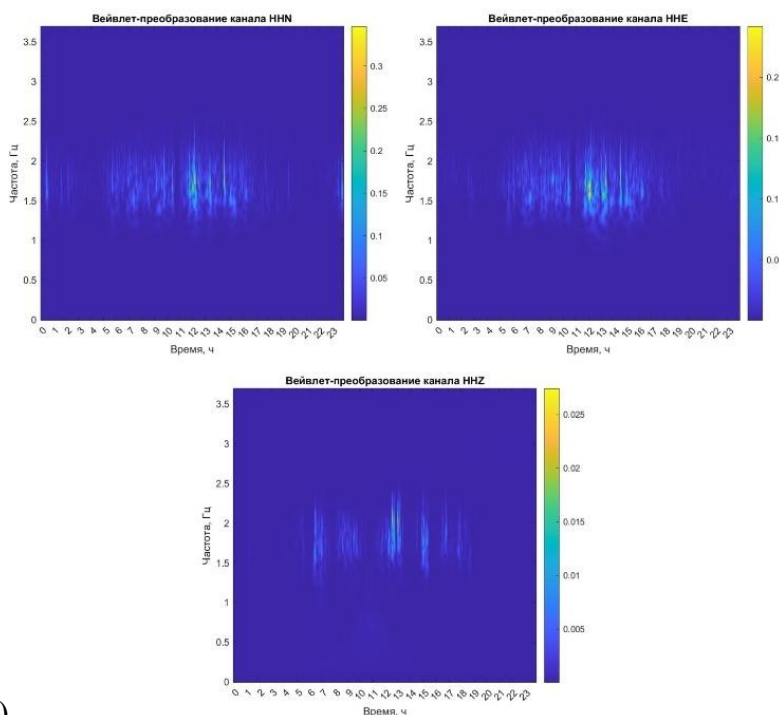


Рисунок 41. Частотные спектры исходных записей сейсмометров за 25.08.17 для станций а)SVA2 и б)SVA3.

В целом все построенные вейвлеты (см.рис. 42–47) довольно чётко отображают структуру исходных рядов, то есть выделенные мной особо выразительные события отображаются на них.

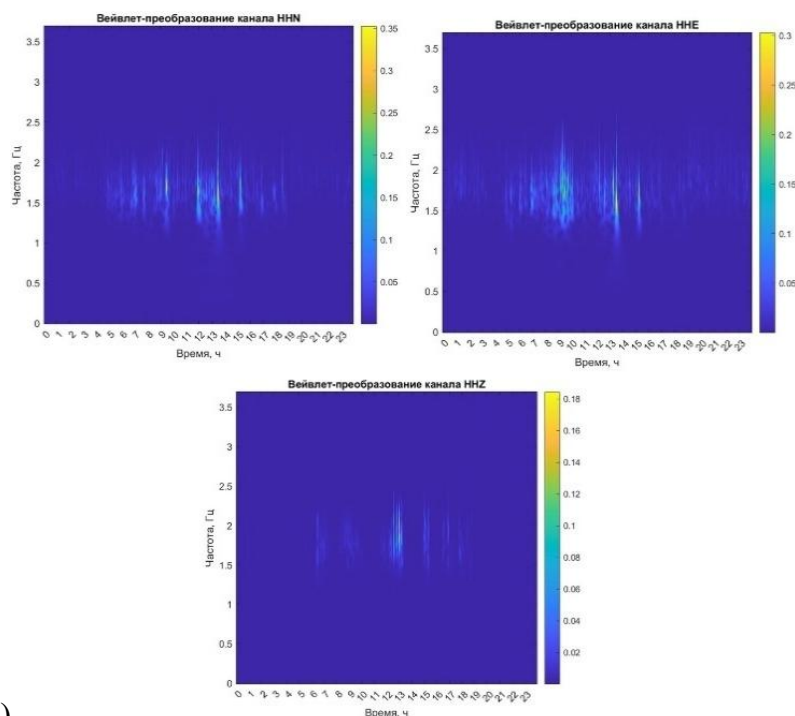
На графике, изображённом на рисунке 42 а) и б), где представлены рассчитанные вейвлеты для каждой из трёх компонент за 20.08.17, частота горизонтальных каналов изменяется от 1.0 до 2.5 Гц, а вертикального от 1.5 до 2.5 Гц. По графикам для ст. SVA2 чётко выделяются области с максимальными значениями амплитуды для горизонтальных составляющих примерно в интервале с 11 до 16 ч. для N и с 12 до 17 ч. для E. Вертикальной составляющей Z имеет наибольшие значения в интервале с 12 до 14 ч. По станции SVA3 интервалы с максимальными значениями для горизонтальных каналов были с 8 до 16 ч. (для N) и с 7 до 16 ч. (для E), а по вертикальному – с 12 до 13:30 часов.

20.08.2017 ст.SVA2



а)

20.08.2017 ст.SVA3

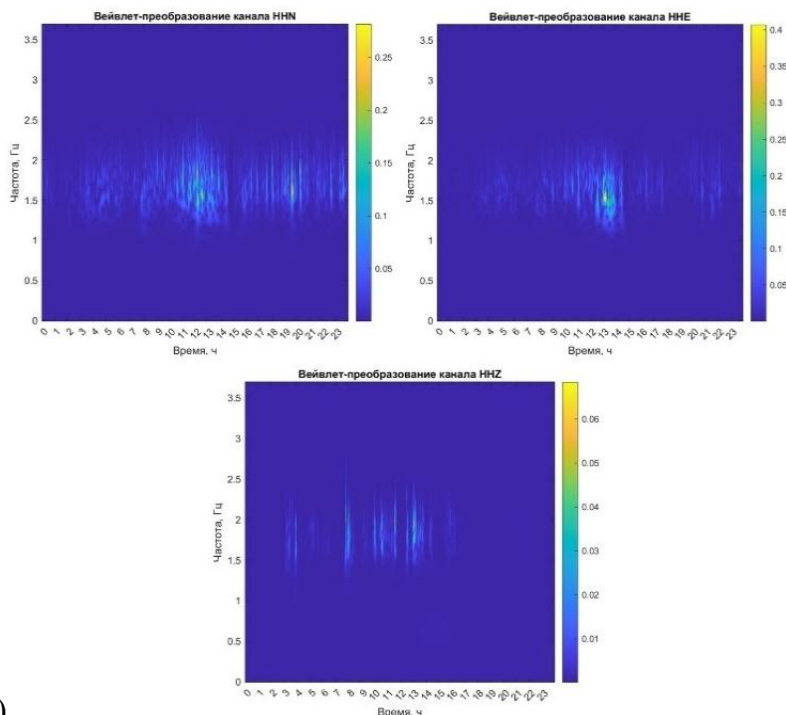


б)

Рисунок 42. Вейвлет-преобразования исходных записей сейсмометров за 20.08.17 для станций а)SVA2 и б)SVA3.

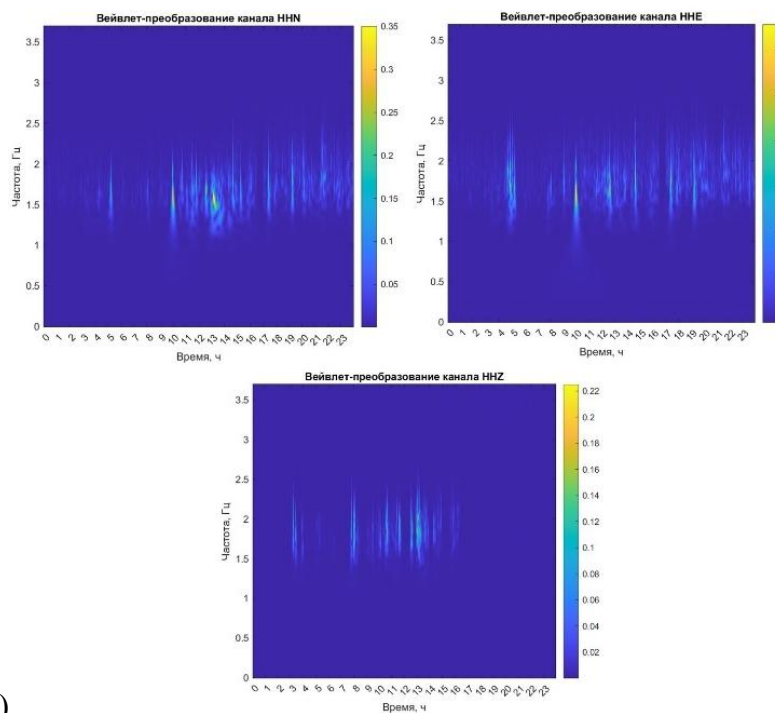
Выполненные вейвлет-преобразования за 21.08.17, помещённые на рисунке 43 а) и б), на которых частота горизонтальных каналов обеих сеймостанций меняется от 1.0 до 2.5 Гц, а вертикального от 1.5 до 3.0 Гц по SVA2 и в пределах 1.5–2.5 Гц по SVA3. По графикам для ст.SVA2 можно выделить участки с наибольшими значениями амплитуды, для горизонтальных составляющих они находятся интервале с 10 до 21 ч. для N и с 11 до 15 ч. для E. Вертикальная составляющая Z имеет максимумы с 7 до 14 ч. По станции SVA3 такие области для горизонтальных каналов были с 5 до 6 ч. и с 9 до 19:30 ч. (для N) и с 4 до 5:30 ч. и также в промежутке 9–19:30 ч. (для E), для составляющей Z – с 3 до 4 ч. и с 7 до 14 часов.

21.08.2017 ст.SVA2



а)

21.08.2017 ст.SVA3



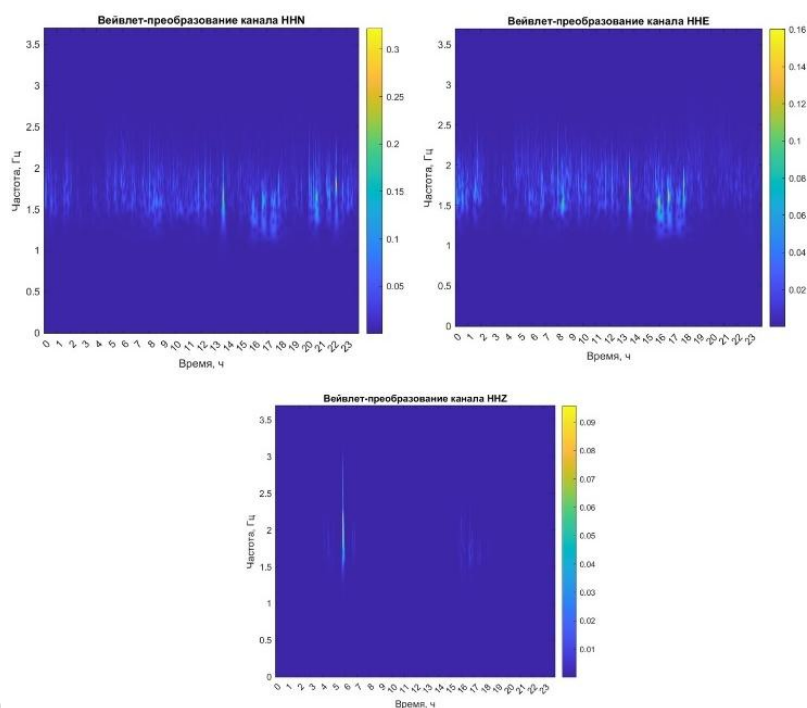
б)

Рисунок 43. Вейвлет-преобразования исходных записей сейсмометров за 21.08.17 для станций а)SVA2 и б)SVA3.

Вейвлеты на 22.08.17 находятся на рис. 44 а) и б). Частота горизонтальных компонент обеих станций варьирует от 1.0 до 2.5 Гц, а вертикальной от 1.0 до 3.0 Гц по SVA2 и в пределах 1.0–2.5 Гц по SVA3. По представленным графикам ст.SVA2 нетрудно увидеть области максимальных значений, для

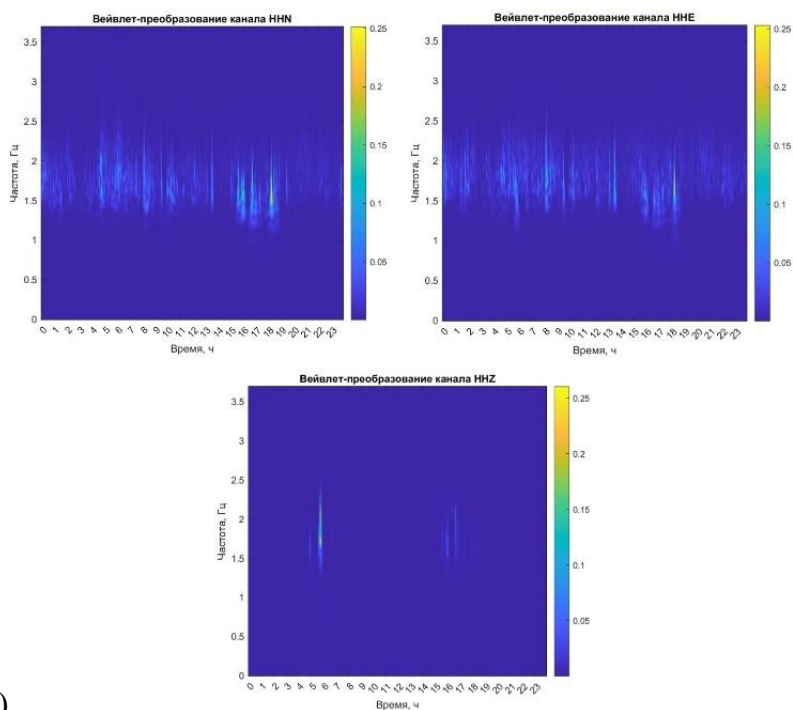
горизонтальных компонент они лежат на промежутке с 13 до 22:30 часов для N и с 8 до 19 ч. для E. Составляющая Z имеет наибольшие величины с 5 до 6 ч. По станции SVA3 такие области для горизонтальных каналов были с 5 до 6 ч. и с 15 до 19 ч. (для N) и с 6 до 8 ч., также в промежутке 18–19 ч. (для E), для Z – с 5 до 6 часов.

22.08.2017 ст.SVA2



а)

22.08.2017 ст.SVA3

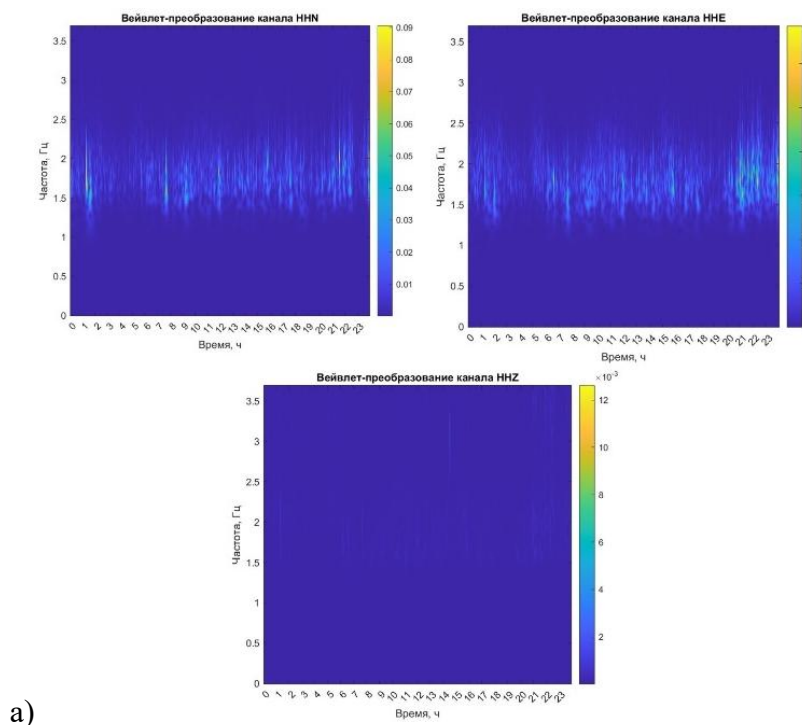


б)

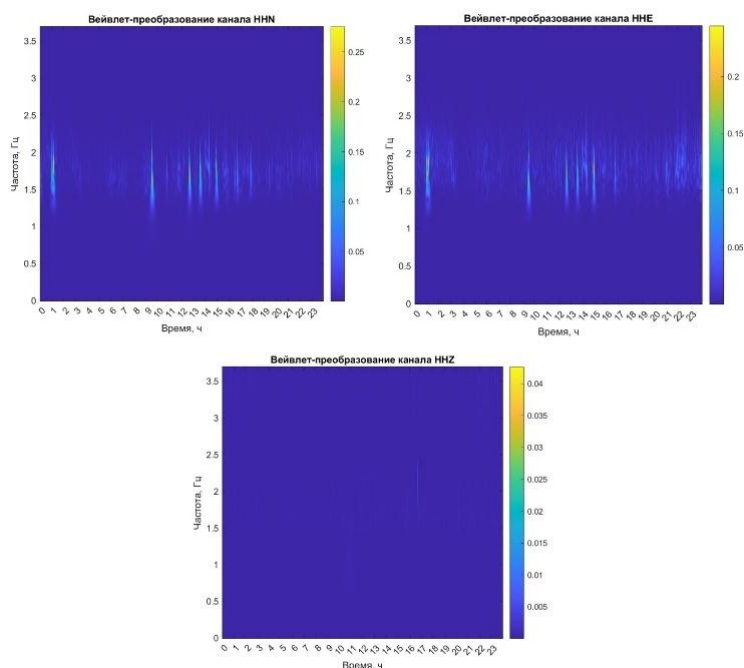
Рисунок 44. Вейвлет-преобразования исходных записей сейсмометров за 22.08.17 для станций а)SVA2 и б)SVA3.

На графике, изображённом на рисунке 45 а) и б), на котором демонстрируются вейвлеты для каждой из трёх компонент за 23.08.17, можно отметить, что частота горизонтальных каналов изменяется от 1.0 до 3.0 Гц для SVA2 и в интервале 1.0–2.5 Гц для SVA3. По Z наблюдается очень слабая изменчивость в пределах 1.5–3.0 Гц и 1.5–2.5 Гц. По вейвлетам для данных ст. SVA2 можно выделить области с максимальными значениями амплитуды, для горизонтальных составляющих они находятся в интервале с 01 до 02 ч., с 08 до 12 ч. и с 21 до 21 часов для N; для E аналогично в интервалах времени 01–02 ч. и с 9 до 15 ч. По вертикальному каналу отмечалась очень слабая интенсивность, но можно обратить внимание на участок 14–15 ч. По станции SVA3 интервалы с наибольшими амплитудами для горизонтальных каналов были с 01 до 02 ч. и в интервале 9–15 часов (для N) и аналогично в промежутке времени 01–02 ч. и 9–15 ч. (для E), а по вертикальному – с 16 до 17 часов.

23.08.2017 ст.SVA2



23.08.2017 ст.SVA3

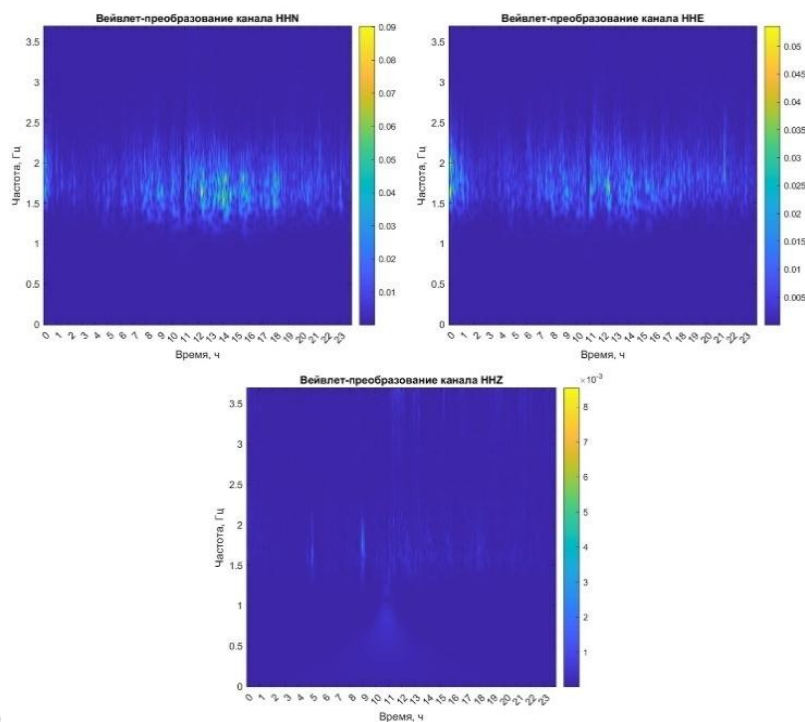


б)

Рисунок 45. Вейвлет-преобразования исходных записей сейсмометров за 23.08.17 для станций а)SVA2 и б)SVA3.

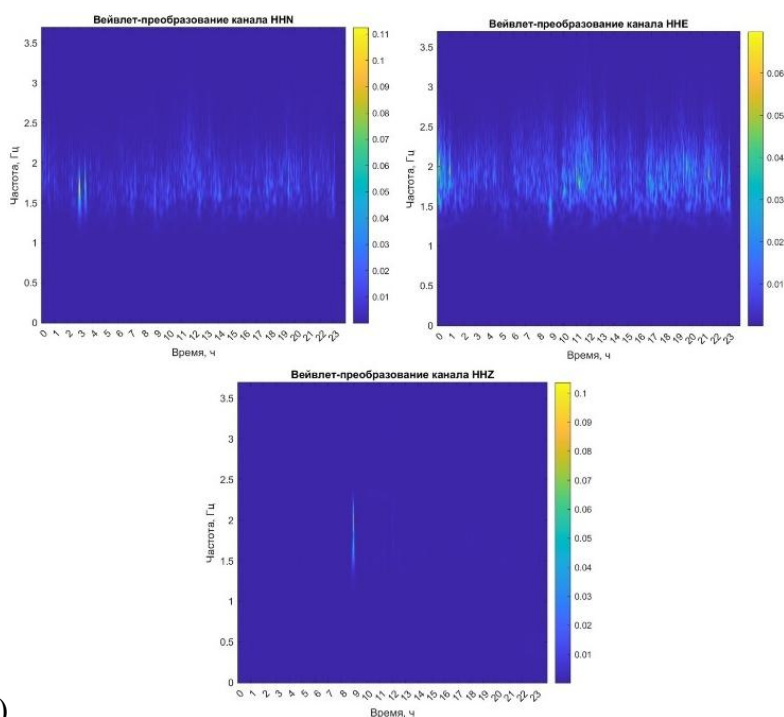
На рисунке 46 а) и б), отражающем рассчитанные вейвлеты за 24.08.17, для которых частота горизонтальных компонент обеих станций варьирует от 1.0 до 3.0 Гц, а вертикальной от 1.5 до 3.0 Гц для SVA2 и в пределах 1.0–2.5 Гц для SVA3. По представленным графикам по станции SVA2 можно выделить участки наибольших значений, для горизонтальных компонент они располагаются в интервале времени 0–1 ч. и 8–19 часов для N; и на 0–1 ч., с 9 до 16 ч. и с 21 до 22 часов для E. Составляющая Z имеет крайне слабую изменчивость, но можно отметить область в 9 часов. По станции SVA3 можно аналогичным образом указать на интервалы с максимальными величинами, для горизонтальных каналов они были с 3 до 4 ч. (для N) и в интервалах 0–2 ч., 10–12 ч. и примерно с 16:30 до 22 часов (для E), а по вертикальному – с 8 до 9 часов.

24.08.2017 ст.SVA2



а)

24.08.2017 ст.SVA3



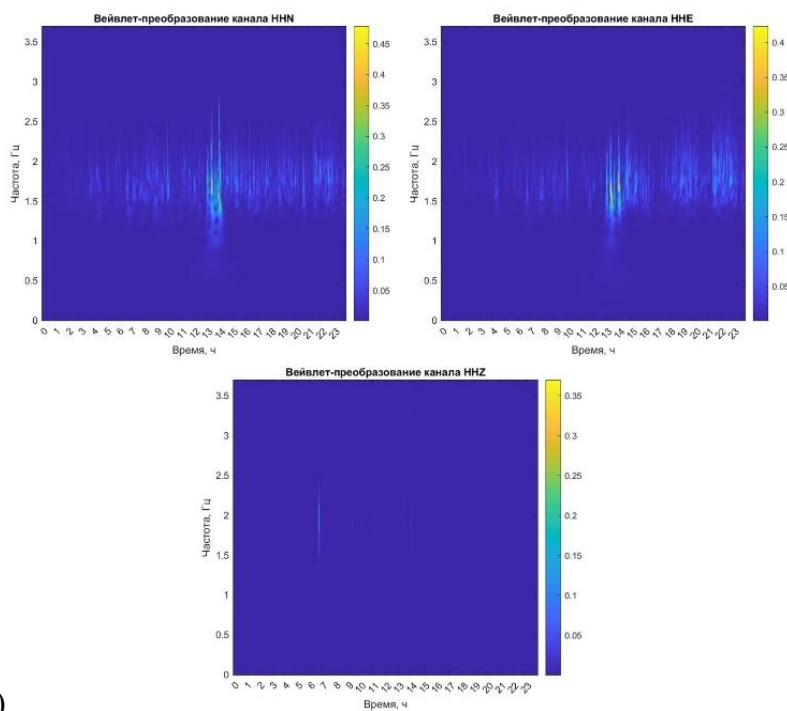
б)

Рисунок 46. Вейвлет-преобразования исходных записей сейсмометров за 24.08.17 для станций а)SVA2 и б)SVA3.

Графики вейвлет-преобразований за 25.08.17 на рисунке 47 а) и б), показывают, что для горизонтальных составляющих частота сигнала обеих станций меняется в пределах 1.0–3.0 Гц, а для Z – от 1.5 до 2.5 Гц для SVA2 и от 1.0 до 3.0 Гц для SVA3. По данным ст.SVA2 для горизонтальных каналов можно

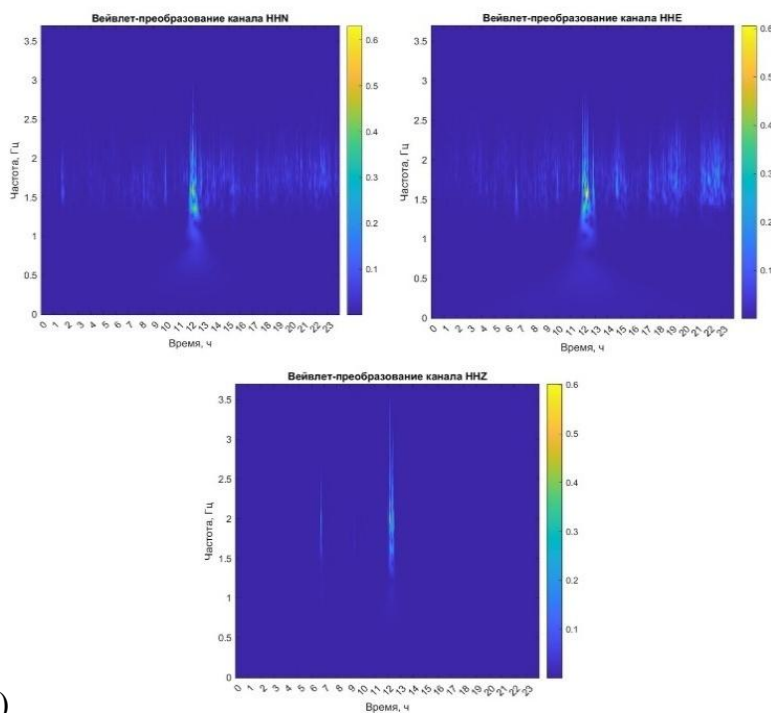
выделить области максимальных величин амплитуды сигнала с 13 до 14 ч. для N и на интервале времени 13–15 часов для E, а для Z – с 6 до 7 часов. По станции SVA3 можно таким же образом указать на участки с наибольшими значениями, для компонент N они были с 12 до 13 ч., для составляющей E в промежуток времени 12–13:30 часов, а по вертикальному каналу – с 12 до 13 часов.

25.08.2017 ст.SVA2



a)

25.08.2017 ст.SVA3



b)

Рисунок 47. Вейвлет-преобразования исходных записей сейсмометров за 25.08.17 для станций а)SVA2 и б)SVA3.

Для всестороннего анализа обработанной мной информации привлекались снимки со спутников Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м, 20 м и 60 м в зависимости от длины волны с атмосферной коррективкой [37] и [38] и Landsat 8 и 9 с пространственным разрешением 15 м в панхроматическом диапазоне с атмосферной коррективкой [39], которые показаны на рисунках 48–50.

При детальном изучении представленных фотографий спутника за 13, 20, 21 и 31 августа, показанных на рисунке 48 а) и за 21.08 и 31.08 на рис. 48 б), становится очевидным, что на данных снимках не зафиксированы сейсмические события и сходы льда, зарегистрированные сейсмостанциями 21, 23 и 25 августа. К сожалению, за период с 22.08 по 30.08 наблюдалась сплошная облачность, что негативно повлияло на возможность визуально оценить произошедшее и подтвердить их. Именно поэтому вследствие неблагоприятных метеорологических условий спутниковые снимки за указанный период времени отсутствуют, что не позволяет изучить ледовые события и их последствия, проявившиеся на записях сейсмометров 23.08.2025 и 25.08.17.

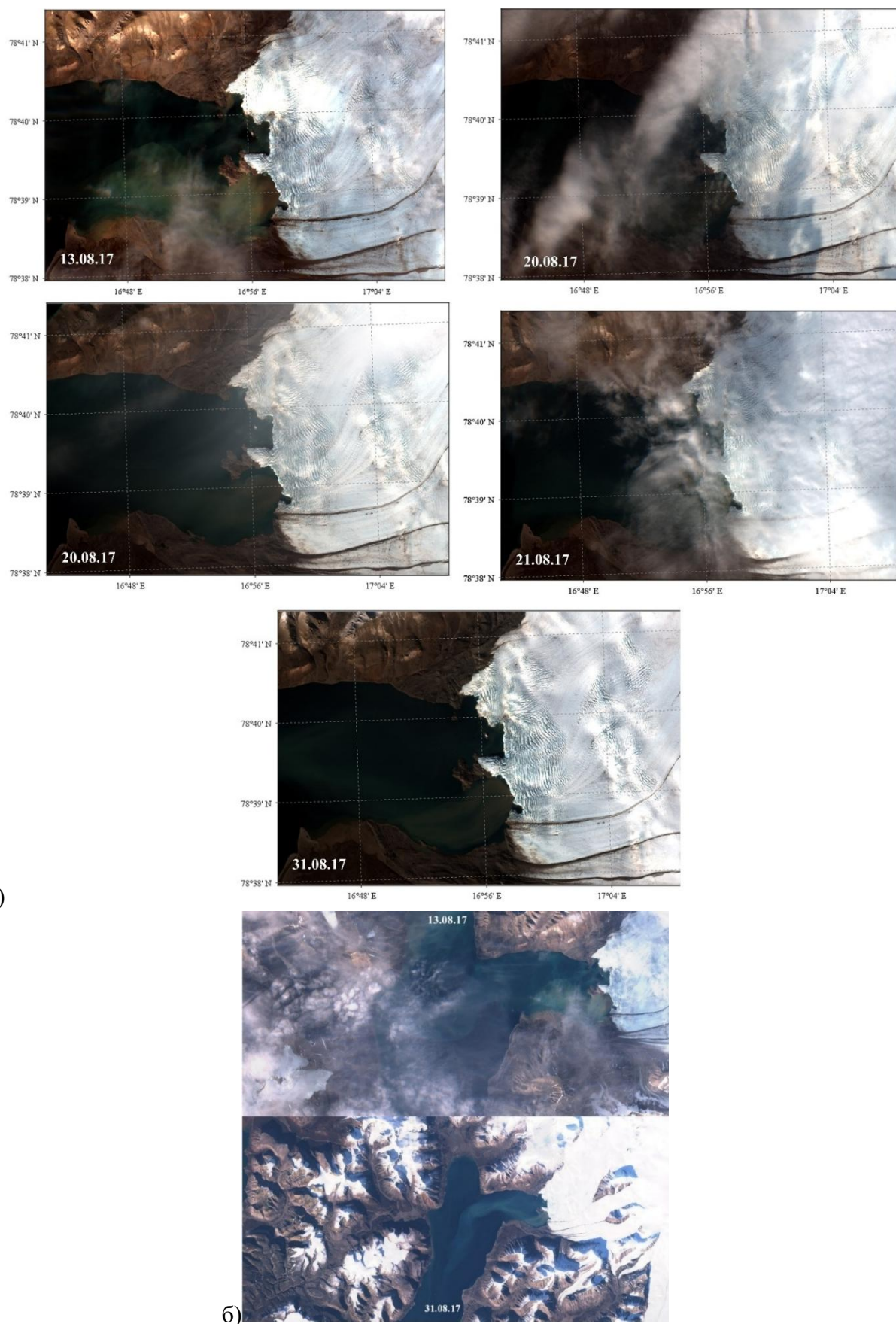


Рисунок 48. Спутниковые снимки Sentinel-2 в августе 2017 года в районе расположения сейсмостанций наблюдения а) с сайта Copernicus Browser [37] и б) с сайта Sentinel Hub EO Browser [38].

Для сравнения динамичности ледника Норденшельда приводится ледник Негрибрин, находящийся на восточном побережье острова Западный Шпицберген примерно на той же широте, что и первый. Вполне возможно, что некоторые сигналы могли прийти именно от него на измерительный сейсмокомплекс. Так как спутники Sentinel-2A и Sentinel-2B пролетали над исследуемым районом 21.08.17 в 12:19 (UTC), 23.08.17 в 12:09 и 12:59 (UTC) и 25.08.17 в 12:49 (UTC), то можно утверждать, что некоторые из событий, зарегистрированные станциями SVA2 и SVA3 в эти дни, произошли именно на леднике Негрибрин. По спутниковым снимкам, показанным на рисунках 49–50 в Приложении 12, видно, что он демонстрирует значительно большую активность по сравнению с исследуемым. На приведённых спутниковых снимках видно, что этот ледник находится в стадии разрушения, потому что наблюдается значительное количество обрушений льда с образованием айсбергов и крупных осколков. Наглядно в этом можно убедиться, глядя на изображения, сделанные 03.08.17, 08.08.17, 21.08.17 и 24.08.17.

Заключение

В результате проведённого мной исследования в полной мере были выполнены сформулированные задачи для достижения поставленной цели. То есть выполнен всесторонний анализ записей сейсмометров, были привлечены спутниковые снимки для визуального подтверждения выдвигаемых предположений, а также выявлены признаки сходов льда и возможного зарождения айсбергов, а именно в большинстве случаев им предшествовали крупные трещины и разломы, иногда длительное время, в ледовом покрове.

Обработанные данные сейсмометров с НИС «Ледовая база Мыс Баранова» за разные временные периоды помогли в оценке динамического состояния припайного льда, было выявлено множество событий, свидетельствующих о его постоянной подвижности и непрерывном взаимодействии с морем, берегом и дрейфующими льдами. Хотя архипелаг Северная Земля является рекорсменом по производству айсбергов в Российском секторе Арктического бассейна, но в ходе исследования сходов льда и формирования айсбергов зафиксировано не было.

Данные сейсмостанций, установленных на леднике Норденшельда на Шпицбергене, оказались более информативными и полезными для данного исследования, так как были найдены новые динамические события (сходы льда с ледника), которых ранее не встречалось при обработке данных со стационара «Ледовая база Мыс Баранова». Они сопровождались масштабными трещинами и даже разломами, которые способствовали этим событиям. К сожалению, мне не удалось получить снимки ледника Норденшельда, где были установлены станции, из-за сплошной облачности. На более ранних из них (за 13.08.17 и 20.08.17) в бухте были видны небольшие осколки льда. Но ледник Негрибрин, по спутниковым изображениям, показал большую активность, что наталкивает на предположение о том, что сигналы зарегистрированных событий могли

прийти именно от него, так как было зафиксировано множество айсбергов и осколков льда на акватории. Всё это позволило глубже понять механизмы формирования айсбергов.

В дальнейшем планируется продолжить исследования, чтобы накопить как можно больше информации о динамическом состоянии припая и ледников, а также их потенциальной айсбергопродуктивности, что поможет в прогнозировании зарождения айсбергов от ледников по данным сейсмометров, для чего понадобится изучить и обработать значительно больше данных, чем на данный момент, то есть необходимо расширить диапазон изучаемого периода.

Ледотрясения, сходы и обрушения льда представляют из себя явления локального характера, которые практически невозможно обнаружить по данным в глобальной сейсмической сети, так как сигналы от них не могут распространяться на такие большие расстояния. Именно поэтому такие динамические события можно зарегистрировать только на станциях, установленных непосредственно на ледниках или в непосредственной близости от них.

Ещё одним перспективным направлением является обнаружение мест источника сигналов о сейсмических событиях по нескольким сеймостанциями, что также необходимо использовать при анализе получаемых данных, чтобы он был более полным. Главная проблема заключается в том, что скорость распространения сигнала должна быть величиной известной и постоянной, чтобы локализовать его источник методом триангуляции. Но это далеко не так из-за различности физических свойств, состояния и структурных особенностей сред, в которых он передаётся, и для решения этой проблемы дополнительно привлекают четвёртую станцию с целью упрощения и уточнения системы уравнений, чтобы можно было вычислить скорость распространения сигнала.

Список использованной литературы

1. Бычкова И.А., Смирнов В.Г., Михальцева С.В., Платонова Е.В. Айсберговая опасность в морях Арктической зоны Российской Федерации в условиях современных климатических изменений // Проблемы Арктики и Антарктики, 2024. Т. 70, № 1. – С. 71–86. doi: 10.30758/0555-2648-2024-70-1-71-86
2. Капица А.П. Динамика и морфология ледникового покрова Центрального сектора Восточной Антарктиды // Тр. Сов. антаркт. экспед., 1961. Т 18. – С. 20-38.
3. Бузин 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 РФФИ, 2020. № 3-4, Вып.107-108. – С. 21-37. doi: 10.22204/2410-4639-2020-106-107-3-4-21-37
4. Шутилин С.В. Макштас А.П., Алексеев Г.В. Модельные оценки ожидаемых изменений ледяного покрова СЛО при антропогенном потеплении в XXI веке // Проблемы Арктики и Антарктики, 2007 г. № 2 (79). – С. 101-110.
5. Воеводин В.А. О механизме откола льда от ледников и образования айсбергов (обзор исследований) // Айсберги Мирового океана: сб. научных статей; редакторы Ю.В. Виноградова, Н.П. Муравьёва, Л.М. Стрович. Государственный научный центр РФ Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, 1996. – С. 37-53.
6. Зубов Н.Н. Льды Арктики. // М.: Изд. ГСМП, 1945. – 357 с.
7. Лосев К.С. Антарктический ледниковый покров. М.: Наука, 1982. – 160 с.
8. Короткевич Е.С. Шельфовые ледники // Атлас Антарктики. Л.: Гидрометеиздат, 1969. – С. 554-563
9. Кручинин Ю. А. Шельфовые ледники Земли Королевы Мод / Ю. А. Кручинин. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1965 – 180 с.
10. Котляков В. М., Алексеев В. Р., Волков Н.В. Гляциологический словарь: справочное издание / В. М. Котляков, В. Р. Алексеев, Н.В. Волков — под ред. В. М. Котляков. — Ленинград: Гидрометеиздат, 1984 – 527 с.
11. Долгушин Л.Д., Кренке А.Н. Катастрофические подвижки ледников // Вестн. АН СССР, 1972. № 6. – С. 52-55.
12. Бузин И.В. Стамухи и айсберги // Опасные ледовые явления для судоходства в Арктике. ГНЦ РФ «АНИИ», 2010. №6. – С. 235-238

13. Бычкова И.А., Смирнов В.Г. Оценка объёма айсбергового стока с выводных ледников Северной Земли за 2014–2019 гг. // Лёд и Снег, 2021. Т. 61, №1. – С.14–25. doi: 10.31857/S2076673421010068
14. База данных: GLIMS Viewer: офиц. сайт. — URL: <https://www.glims.org/maps/glims.html> (дата обращения: 23.01.25)
15. Епифанов В.П., Сазонов К.Е. Волновые структуры в ледяном поле и их влияние на прочность солёного льда // Лёд и снег, 2020. Т. 60, № 4. – С. 623–636. doi: 10.31857/S2076673420040066
16. Епифанов В.П., Сазонов К.Е. Влияние стационарных периодических волновых структур на локальную прочность ледяного поля // Доклады Российской академии наук. Физика, 2020. Том 495, № 1. – С. 18–25. doi: 10.31857/S2686740020060085
17. Виноградов Ю.А., Федоров А.В., Баранов С.В., Асминг В.Э., Федоров И.С. О выделении айсбергообразующих льдотрясений по сейсмоинфразвуковым данным // Лёд и снег, 2021. Т. 61, № 2. – С. 262–270. doi: 10.31857/S2076673421020087
18. Ekstrom G., Nettles M., Abers G.A. Glacial earthquakes // Science, 2003. Vol.302, Is. 5645. P. 622–624. doi: 10.1126/science.1088057.
19. Ekstrom G., Nettles M., Tsai V.C. Seasonality and increasing frequency of Greenland glacial earthquakes // Science, 2006. Vol. 311. Is. 5768. P. 1756–1758. doi: 10.1126/science.1122112.
20. Tsai V.C., Ekstrom G. Analysis of glacial earthquakes // Journ. of Geophys. Research, 2007. Vol. 112, Is. F03S22. doi: 10.1029/2006JF000596.
21. Bartholomaus T.C., Larsen C.F., O’ Neel S., West M.E. Calving seismicity from iceberg–sea surface interactions // Journ. of Geophys. Research, 2012. Vol. 117. Is. F4. P. 1–16. doi:10.1029/2012JF002513.
22. 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. Геология и Геофизика, 2018. Т. 64, № 2. – С. 170–181.
23. Морозов А.Н., Ваганова Н.В. Руководство по обработке локальных и региональных землетрясений западной части Евразийской Арктики // Архангельск: ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН, 2022. – 65 с.
24. Фёдоров 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.

25. Смирнов В.Н., Знаменский М.С., Шейкин И.Б. Волновые процессы в дрейфующем льду Северного Ледовитого океана в экспедиции MOSAiC. Зимний период // Проблемы Арктики и Антарктики, 2022. Т. 68, № 1. – С. 26-47. doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-1-26-47
26. Михайлова Н.Н., Мукамбаев А.С., Казаков Е.Н., Морозов В.Г., Игибаев У.А. Аналитический обзор мировых и отечественных источников по исследованию сейсмических процессов в ледниках под воздействием изменений климата // Вестник НЯЦ РК. 2024. №.3. С. 65-73. doi.org/10.52676/1729-7885-2024-3-65-73
27. Смирнов В.Н. Динамические процессы в морских льдах // СПб.: Гидрометеиздат, ГНЦ РФ-ААНИИ, 1996. – 161 с.
28. Исследование крупномасштабной динамики, физических процессов, механики деформирования и разрушения морских льдов с целью совершенствования методов краткосрочного прогнозирования сжатия и торошения: отчёт о НИР (промежуточный, этап 3) / Арктический и Антарктический науч.-исслед. ин-т; рук. Миронов Е.У.; исполн.: Смирнов В.Н., Колабутин Н.В., Шушлебін А.И., Харитонов В.В., Бородкин В.А., Шейкин И.Б., Знаменский М.С., Керро Л.В., Кушеверский И.А., Егоров Б.П. – Санкт-Петербург, 2022. – 82 с. – Библиогр.: с. 8-49. – № НИОКТР АААА-А20-120041590009-7
29. Heideman Michael T., Johnson Don H., Burrus Charles Sidney Gauss and the history of the fast Fourier transform // Archive for History of Exact Sciences. 1985. Vol.34. Is.3. P. 265–277 doi:10.1007/BF00348431
30. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации: учебник, – издание 2, испр. и доп. – СПб.: РГГМУ, 2020. – 424 с.
31. Регистратор сейсмических сигналов Байкал-7HR: техническое описание. // EXPAS, 2009. – 32 с.
32. Регистратор сейсмических сигналов Байкал-8. Ревизия 1.5: техническое описание. // ООО «Р-сенсорс», 2016. – 25 с.
33. Трехкомпонентный широкополосный молекулярно-электронный цифровой сейсмометр СМЕ-4311: Руководство по эксплуатации // Долгопрудный: ООО «Р-сенсорс», 2019. – 28 с.
34. Измерители угла наклона двухкоординатные ИН-ДЗ: Руководство по эксплуатации МПГТ 401262.03.00.00 РЭ. / Москва: ООО «Научно-техническое производственное предприятие «Горизонт», 2021. – 11 с.
35. Исследование крупномасштабной динамики, физических процессов, механики деформирования и разрушения морских льдов с целью совершенствования методов

краткосрочного прогнозирования сжатия и торошения: отчёт о НИР (заключительный) / Арктический и Антарктический науч.-исслед. ин-т; рук. Миронов Е.У.; исполн.: Смирнов В.Н., Ковалёв С.М., Бородкин В.А., Харитонов В.В., Шушлебин А.И., Колабутин Н.В., Шейкин И.Б., Знаменский М.С., Шиманчук Е.В., Иванов К.Д., Ковалёв И.В., Савин Р.А., Панов Л.В., Соломин В.Н., Кушеверский И.А., Керро Л.В. – Санкт-Петербург, 2024. – 212 с. – Библиогр.: с. 50-58. – № НИОКТР АААА-А20-120041590009-7

36. PowerGraph: офиц. сайт // ООО «ДИСофт». Москва, 2003-2024. – URL: <http://www.powergraph.ru/> (дата обращения: 14.05.2024).
37. Copernicus Browser: Архив снимков Sentinel: офиц. сайт. – URL: <https://link.dataspace.copernicus.eu/7eju> (дата обращения: 06.05.2017, 07.05.2017)
38. Sentinel Hub EO Browser: Архив снимков Sentinel-2: офиц. сайт. – URL: https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/?zoom=8&lat=78.42681&lng=19.33594&themeId=DEFAULT-THEME&visualizationUrl=U2FsdGVkX1%2FSWYa0NmJiXqw%2FJgNJAtSd90mlG9Xfm%2Bb7wWnVxcjDe41j2UkzIWKyrg29X8XEpUm5ZtWUTUy9dLpLvMy%2FX03VSyPbtLD2ckAnHuDxFaZMBjW20UY%2FIRQo&datasetId=S2L1C&fromTime=2017-08-24T00%3A00%3A00.000Z&toTime=2017-08-24T23%3A59%3A59.999Z&layerId=1_TRUE_COLOR#search (дата обращения: 02.04.25, 21.04.25).
39. Sentinel Hub EO Browser: Архив снимков Landsat 8/9: офиц. сайт. – URL: https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/?zoom=5&lat=78.376&lng=16.60034&themeId=DEFAULT-THEME&visualizationUrl=U2FsdGVkX1%2FJqinjoAjt%2B29MpbDCVTUBAZUrRxRtnjPjNz13%2BOzfx0rmpqZkH7kSn4kzASn3q8Z8M3gt1A95qoLaM13NgnP3fQzFPzJqXGwVEMqdFC0XGaRiUvxZ4YJp&datasetId=AWS_LOTL1&fromTime=2017-08-08T00%3A00%3A00.000Z&toTime=2017-08-08T23%3A59%3A59.999Z&layerId=2_TRUE_COLOR_PANSHARPENED (дата обращения: 30.03.25 и 21.04.25).

Приложения

Приложение 1

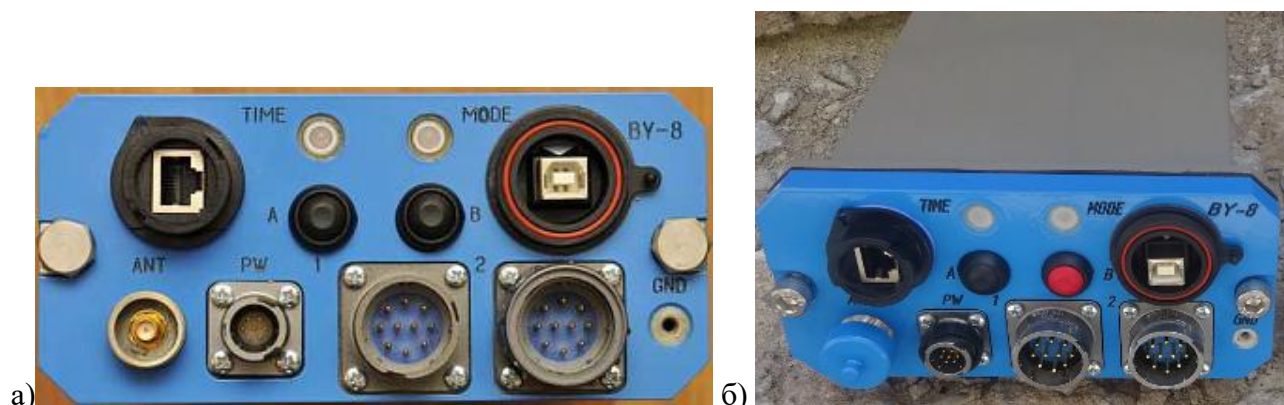


Рисунок 3. Изображение Байкал-8 а) Передняя панель регистратора и б) его общий вид [32].

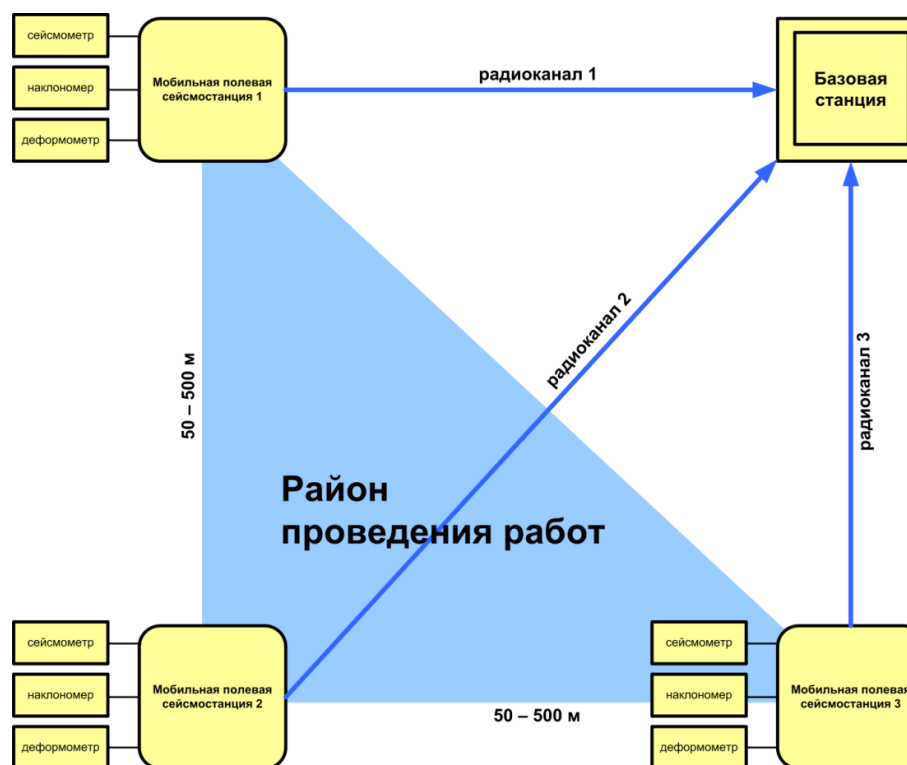


Рисунок 4. Схема установки измерительного комплекса на ледяном покрове [28].

Приложение 2

Таблица 1. Выявленные динамические события за период с 27.02.17 по 05.05.17 на НИС «Ледовая база Мыс Баранова».

Дата	№	начало	конец	Описание	Амплитуд а N, V	Амплитуд а E, V	Амплитуд а Z, V	Амплитуд а N, мм/с	Амплитуд а E, мм/с	Амплитуд а Z, мм/с
04.05.- 05.05.201 7	1	19:28:2 4	3:50:19	экзарация айсбергом	0.16447	0.59254	-0.07299	0.04112	0.14814	-0.01825

...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
03.05-04.05.2017	5	23:27:09	1:37:54	экзарация айсбергом	0.12125	-0.18230	0.06707	0.03031	-0.04558	0.01677
03.05.2017	6	10:47:49	11:40:54	небольшие подвижки	-0.08279	-0.21547	-0.03525	-0.02070	-0.05387	-0.00881
03.05.2017	7	11:41:29	22:03:29	экзарация айсбергом	0.08856	0.24485	0.03964	0.02214	0.06121	0.00991
03.05.2017	8	22:03:59	23:25:59	подвижки	0.05626	0.14394	0.02649	0.01407	0.03598	0.00662
02.05.2017	9	14:15:34	14:26:19	локальное землетрясение	-0.05706	0.16882	-0.02554	-0.01427	0.04221	-0.00638
01.05-02.05.2017	10	4:29:49	5:12:09	торошение	0.06793	0.17556	0.02977	0.01698	0.04389	0.00744
30.04.2017	11	15:17:09	15:28:34	несколько подвижек	0.05034	0.16753	0.02277	0.01259	0.04188	0.00569
29.04.-30.04.2017	12	22:58:20	2:24:20	сильный ветер, волнение	-0.14463	-0.62072	-0.06402	-0.03616	-0.15518	-0.01601
29.04.2017	13	9:22:30	10:16:10	небольшое торошение	0.08843	0.23931	0.04050	0.02211	0.05983	0.01012
29.04.2017	14	8:15:55	9:20:15	подвижки	0.05152	0.13661	0.02353	0.01288	0.03415	0.00588
29.04.2017	15	7:05:35	8:15:30	торошение	0.06506	-0.17597	0.02625	0.01627	-0.04399	0.00656
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
28.04.2017	18	6:15:20	7:03:35	торошение	-0.05771	-0.19022	0.03526	-0.01443	-0.04756	0.00882
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
22.04.2017	22	2:41:29	7:07:09	сильный ветер, волнение	0.12380	-0.61040	0.05573	0.03095	-0.15260	0.01393
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
21.03.2017	30	4:33:03	4:33:43	трещина, трение льдин	0.73354	-2.29280	-0.03763	0.18339	-0.57320	-0.00941
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
28.02.2017	66	10:32:18	10:32:38	подвижка	0.04406	-0.11431	0.00337	0.01102	-0.02858	0.00084
28.02.2017	67	8:42:33	8:44:48	трещина	-0.05224	0.24545	0.04534	-0.01306	0.06136	0.01134
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
27.02.2017	75	10:09:48	10:15:48	2 термические трещины	0.10942	0.29065	-0.17203	0.02736	0.07266	-0.04301
27.02.2017	76	7:15:03	7:15:18	подвижка	0.02185	-0.01149	0.00271	0.00546	-0.00287	0.00068
27.02.2017	77	5:50:23	5:56:58	2 подвижки	-0.06550	0.12400	-0.04990	-0.01638	0.03100	-0.01248

Приложение 3

Таблица 2. Выявленные динамические события за период с 25.02.23 по 28.02.23 на НИС «Ледовая база Мыс Баранова».

Дата	№	начало	конец	Описание	Амплитуда N, V	Амплитуда E, V	Амплитуда Z, V	Амплитуда N, мм/с	Амплитуда E, мм/с	Амплитуда Z, мм/с
25.02.2023	1	2:23:15	2:29:05	торошение	0.017905	-0.02484	0.03	0.00448	-0.00621	0.00750
25.02.2023	2	2:49:35	2:58:55	подвижки	0.008400001	-0.01332	0.008235	0.00210	-0.00333	0.00206
25.02.2023	3	3:00:05	3:03:05	трещина	-0.028465	-0.02762	0.044075	-0.00712	-0.00691	0.01102
25.02.2023	4	3:13:45	3:14:45	трещина	0.09985	-0.17193	-0.07935	0.02496	-0.04298	-0.01984
25.02.2023	5	3:16:10	4:19:45	подвижки после трещины	0.00881	-0.0891	0.01756	0.00220	-0.02228	0.00439
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

25.02.2023	7	4:52:55	4:56:45	трещина	0.004014	0.017165	0.021108	0.00100	0.00429	0.00528
25.02.2023	8	5:04:45	6:18:25	подвижка	- 0.00431399 8	0.06219998	- 0.00190699 9	-0.00108	0.01555	-0.00048
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
26.02.2023	55	16:23:30	17:26:50	ветровое воздействи е	- 0.00332449 9	0.00384999 8	0.000929	-0.00083	0.00096	0.00023
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
27.02.2023	64	4:23:05	6:21:35	ветровое воздействи е	- 0.00496000 1	0.00469000 6	0.00205600 1	-0.00124	0.00117	0.00051
27.02.2023	65	7:33:25	7:56:10	подвижки	-0.003215	0.005175	0.0009535	-0.00080	0.00129	0.00024
27.02.2023	66	10:23:40	10:54:20	ветровое воздействи е	0.00408999 6	0.00372	0.00039200 1	0.00102	0.00093	0.00010
27.02.2023	67	10:59:25	11:17:10	сильное ветровое воздействи е	0.00593999	0.00766000 2	0.00052399 9	0.00148	0.00192	0.00013
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
28.02.2023	84	9:54:50	9:55:10	горизонт. трещина	-0.01131248	0.00830000 6	0.001725	-0.00283	0.00208	0.00043
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
28.02.2023	87	22:47:45	23:02:10	ветровое воздействи е	- 0.00271888 8	0.00362249 8	0.000234	-0.00068	0.00091	0.00006

Приложение 4

Таблица 3. Выявленные динамические события за период с 01.03.23 по 31.03.23 на НИС «Ледовая база Мыс Баранова».

Дата	№	начало	конец	Описание	Амплитуд а N, V	Амплитуд а E, V	Амплитуд а Z, V	Амплитуд а N, мм/с	Амплитуд а E, мм/с	Амплитуд а Z, мм/с
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
01.03.2023	19	19:19:20	20:28:00	локальное землетрясение	-0.002446	0.001460	-0.001997	-0.00061	0.00037	-0.00050
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
05.03.2023	168	19:42:51	19:43:11	крупная горизонтальная трещина	-0.014295	0.021338	-0.004409	-0.00357	0.00533	-0.00110
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
05.03.2023	172	21:56:01	21:56:26	трещина	0.012000	-0.009428	0.007522	0.00300	-0.00236	0.00188
05.03.2023	173	22:44:31	22:59:56	крупные трещины	0.013075	-0.025052	0.010329	0.00327	-0.00626	0.00258
05.03.2023	174	23:07:36	23:18:56	трещины	-0.009164	0.014062	0.013236	-0.00229	0.00352	0.00331
05.03.2023	175	23:20:21	23:40:26	крупные подвижки	0.008664	0.011150	0.003720	0.00217	0.00279	0.00093
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
28.03.2023	405	13:42:21	15:01:59	горизонтальны е колебания	0.002920	0.003085	0.006660	0.00073	0.00077	0.00166
28.03.2023	406	15:05:21	15:05:51	подвижка	-0.005080	0.004240	0.000886	-0.00127	0.00106	0.00022
28.03.2023	407	17:01:56	17:24:21	сильные колебания	0.009152	-0.004775	0.001242	0.00229	-0.00119	0.00031
28.03.2023	408	20:22:31	21:33:51	горизонтальны е колебания	0.003220	0.002425	0.000351	0.00080	0.00061	0.00009

28.03.2023	409	21:33:51	22:09:16	горизонтальные колебания	0.004340	-0.003200	0.000383	0.00108	-0.00080	0.00010
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Приложение 5

Таблица 4. Выявленные динамические события за период с 01.04.23 по 30.04.23 на НИС «Ледовая база Мыс Баранова».

Дата	№	начало	конец	Описание	Амплитуда N, V	Амплитуда E, V	Амплитуда Z, V	Амплитуда N, мм/с	Амплитуда E, мм/с	Амплитуда Z, мм/с
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
01.04.2023	2	2:51:01	3:19:21	горизонтальные колебания, ветер	0.001572	-0.005410	0.000405	0.00039	-0.00135	0.00010
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
01.04.2023	9	11:26:41	11:31:01	небольшие трещины	-0.009450	-0.007860	-0.002842	-0.00236	-0.00196	-0.00071
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
01.04.2023	12	12:55:41	13:02:31	трещина	-0.010045	-0.013100	-0.022228	-0.00251	-0.00328	-0.00556
01.04.2023	13	17:46:01	18:10:51	подвижки	-0.004575	-0.005230	0.001738	-0.00114	-0.00131	0.00043
01.04.2023	14	18:24:56	18:29:51	горизонтальная трещина	0.007130	-0.012115	0.001696	0.00178	-0.00303	0.00042
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
26.04.2023	511	23:21:42	23:23:12	горизонтальная трещина	-0.015190	-0.010070	-0.001066	-0.00380	-0.00252	-0.00027
27.04.2023	512	23:49:42	23:52:17	горизонтальная трещина	-0.010050	-0.013040	0.001572	-0.00251	-0.00326	0.00039
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
27.04.2023	515	4:57:07	5:05:47	горизонтальная трещина	-0.009990	0.013128	0.001245	-0.00250	0.00328	0.00031
27.04.2023	516	5:19:42	6:23:37	крупные подвижки	-0.011205	0.011060	-0.001497	-0.00280	0.00277	-0.00037
27.04.2023	517	6:31:42	6:36:22	горизонтальная трещина	-0.011975	-0.012796	-0.000958	-0.00299	-0.00320	-0.00024
27.04.2023	518	6:41:12	7:08:07	крупные подвижки	-0.007705	-0.010020	0.003281	-0.00193	-0.00251	0.00082
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
27.04.2023	521	12:02:32	12:29:47	горизонтальная трещина	-0.018820	-0.013150	0.000923	-0.00471	-0.00329	0.00023
27.04.2023	522	12:44:17	13:07:37	горизонтальная трещина	-0.013245	-0.012560	-0.001144	-0.00331	-0.00314	-0.00029
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
30.04.2023	570	1:43:09	1:44:19	горизонтальная трещина	-0.013370	-0.010860	0.001198	-0.00334	-0.00272	0.00030
30.04.2023	571	3:47:39	4:10:44	горизонтальная трещина	-0.017090	-0.013360	-0.000948	-0.00427	-0.00334	-0.00024
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
30.04.2023	574	10:23:14	10:35:24	горизонтальные трещины	-0.015423	-0.013520	0.002934	-0.00386	-0.00338	0.00073
30.04.2023	575	10:53:54	10:59:54	горизонтальные трещины	0.014016	-0.009584	0.000925	0.00350	-0.00240	0.00023
30.04.2023	576	11:22:59	11:41:29	подвижки	-0.004708	0.007544	0.001010	-0.00118	0.00189	0.00025
30.04.2023	577	12:17:49	12:40:49	горизонтальные трещины	-0.013854	-0.011844	0.001443	-0.00346	-0.00296	0.00036
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
30.04.2023	584	20:22:49	22:17:31	горизонтальные колебания, ветер	0.006075	0.005875	0.000581	0.00152	0.00147	0.00015
30.04.2023	585	22:46:59	23:51:17	горизонтальные	-0.004400	0.005250	0.000799	-0.00110	0.00131	0.00020

				колебания,вет ер						
--	--	--	--	---------------------	--	--	--	--	--	--

Приложение 6

Таблица 5. Выявленные динамические события за период с 01.05.23 по 01.06.23 на НИС «Ледовая база Мыс Баранова».

Дата	№	начало	конец	Описание	Амплитуд а N, V	Амплитуд а E, V	Амплитуд а Z, V	Амплитуд а N, мм/с	Амплитуд а E, мм/с	Амплитуд а Z, мм/с
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
01.05.2023	7	6:07:14	6:09:24	небольшая горизонт. трещина	0.006120	-0.008488	0.000513	0.00153	-0.00212	0.00013
01.05.2023	8	7:17:19	7:19:49	горизонт. трещина	-0.006765	0.010710	0.001594	-0.00169	0.00268	0.00040
01.05.2023	9	7:36:40	7:38:10	горизонт. трещина	-0.005970	0.009310	0.001035	-0.00149	0.00233	0.00026
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
02.05.2023	38	12:24:10	12:31:40	2 горизонт. трещины	-0.011465	-0.007220	0.000481	-0.00287	-0.00181	0.00012
02.05.2023	39	12:37:00	13:00:50	подвижки	-0.006415	-0.005780	0.001904	-0.00160	-0.00145	0.00048
02.05.2023	40	13:18:15	13:18:35	горизонт. трещина	-0.022225	-0.013000	0.001365	-0.00556	-0.00325	0.00034
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
02.05.2023	45	19:13:20	19:23:15	горизонт. трещина	0.015170	-0.021410	0.002081	0.00379	-0.00535	0.00052
02.05.2023	46	19:49:25	20:03:35	горизонт. трещина	0.014110	-0.006370	0.004344	0.00353	-0.00159	0.00109
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
02.05.2023	48	21:05:05	21:20:10	2 горизонт. трещины	0.012581	0.012645	-0.004131	0.00315	0.00316	-0.00103
02.05.2023	49	22:03:50	22:04:25	трещина	0.029462	-0.012295	-0.008087	0.00737	-0.00307	-0.00202
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
03.05.2023	55	1:47:15	1:51:10	разлом	0.052315	-0.036430	-0.014887	0.01308	-0.00911	-0.00372
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
15.05.2023	322	22:53:52	23:17:17	2 горизонт. трещины	-0.0152725	-0.0143650	0.0044330	-0.00382	-0.00359	0.00111
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
16.05.2023	328	4:06:37	5:04:17	торошение	-0.0094060	-0.0100200	0.0023690	-0.00235	-0.00251	0.00059
16.05.2023	329	5:14:42	5:50:07	горизонт. трещины	-0.0153840	-0.0010420	-0.0015780	-0.00385	-0.00026	-0.00039
16.05.2023	330	6:34:32	9:38:57	торошение	-0.0089240	-0.0075800	-0.0016570	-0.00223	-0.00189	-0.00041
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
31.05.2023	546	17:52:45	17:57:55	горизонт. трещина	0.014662	-0.012110	0.000510	0.00367	-0.00303	0.00013
31.05.2023	547	18:11:35	18:42:30	подвижки	0.011406	0.005680	0.000509	0.00285	0.00142	0.00013
31.05.2023	548	18:56:55	19:32:55	горизонт. трещины	0.014210	-0.012825	0.001221	0.00355	-0.00321	0.00031
31.05.2023	549	19:49:25	20:09:35	крупная подвижка	0.010870	-0.008700	0.001007	0.00272	-0.00217	0.00025
31.05.2023	550	21:04:15	21:56:30	подвижки	-0.006010	-0.010455	0.000431	-0.00150	-0.00261	0.00011
31.05.2023	551	22:30:15	22:39:20	горизонт. трещины	-0.013605	-0.011205	0.002430	-0.00340	-0.00280	0.00061

Приложение 7

Таблица 6. Выявленные динамические события за период с 20.11.23 по 28.11.23 на НИС
«Ледовая база Мыс Баранова».

Дата	№	начало	конец	Описание	Амплитуда N, V	Амплитуда E, V	Амплитуда Z, V	Амплитуда N, мм/с	Амплитуда E, мм/с	Амплиту да Z, мм/с
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
20.11. 2023	3	11:11:3 5	12:39:4 5	4 трещины с растрескивани ем	0.21264	-0.32056	0.21650	0.05316	-0.08014	0.05413
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
21.11. 2023	9	0:21:40	3:47:00	7 трещин с усилением ветрового воздействия	-0.11008	-0.20820	0.15750	-0.02752	-0.05205	0.03938
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
21.11. 2023	17	18:26:1 0	19:23:1 5	торошение	0.01520	0.01319	-0.01832	0.00380	0.00330	-0.00458
21.11. 2023	18	19:31:0 5	21:50:2 0	7 трещин с растрескивани ем	0.18065	-0.16706	-0.35458	0.04516	-0.04177	-0.08865
21.11. 2023	19	22:25:4 0	23:23:3 5	3 небольшие подвижки	0.02706	0.03132	0.02233	0.00677	0.00783	0.00558
22.11. 2023	20	0:30:20	0:39:10	2 трещины	0.04602	-0.05980	0.09203	0.01151	-0.01495	0.02301
22.11. 2023	21	1:40:05	4:03:40	2 крупные трещины с растрескивани ем	0.17234	-0.21112	-0.27287	0.04309	-0.05278	-0.06822
24.11. 2023	22	3:13:21	5:07:11	3 трещины с растрескивани ем	0.10514	-0.15078	0.12594	0.02628	-0.03769	0.03148
24.11. 2023	23	5:53:21	9:01:06	ветровое воздействие	0.04656	0.03510	-0.00932	0.01164	0.00877	-0.00233
24.11. 2023	24	9:03:06	20:22:5 6	крупные трещины с растрескивани ем, ветровое воздействие	-0.32460	-0.22760	0.32168	-0.08115	-0.05690	0.08042
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
27.11. 2023	47	6:41:41	7:46:11	3 трещины, волно вое воздействие	0.08320	-0.04752	0.09302	0.02080	-0.01188	0.02326
27.11. 2023	48	8:03:11	11:07:4 1	волновое воздействие	-0.10060	0.04800	0.04625	-0.02515	0.01200	0.01156
27.11. 2023	49	11:09:3 6	20:32:5 6	сильное ветровое воздействие, тр ещины	0.25320	-0.20800	0.38224	0.06330	-0.05200	0.09556
27.11- 28.11. 2023	50	20:38:0 1	0:27:11	ветровое воздействие	0.10064	0.06080	-0.04934	0.02516	0.01520	-0.01234
28.11. 2023	51	1:04:51	2:07:33	трещина с растрескивани ем, ветровое воздействие	-0.08275	0.10780	-0.08416	-0.02069	0.02695	-0.02104
28.11. 2023	52	2:49:56	3:22:36	2 крупные трещины	0.34005	0.28214	0.27013	0.08501	0.07054	0.06753
28.11. 2023	53	4:44:11	6:03:21	4 трещины	0.08020	-0.09274	0.08221	0.02005	-0.02319	0.02055

Приложение 8

Таблица 7. Выявленные динамические события за период с 20.08.17 по 25.08.17 на архипелаге Шпицберген на станции Gamma, установленной на берегу.

Дата	№	начало	конец	Описание	Амплитуда N, V	Амплитуда E, V	Амплитуда Z, V	Амплитуда N, мм/с	Амплитуда E, мм/с	Амплитуда Z, мм/с
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
20.08.2017	15	19:18:24	19:20:16	небольшой тектонический толчок	-0.16478	-0.07816	-0.00658	-0.04120	-0.01954	-0.00165
20.08.2017	16	19:26:08	19:47:20	ветровое воздействие	0.13334	0.07173	-0.01224	0.03334	0.01793	-0.00306
20.08.2017	17	20:06:08	21:14:16	подвижки	0.12131	0.05978	0.00816	0.03033	0.01495	0.00204
20.08.2017	18	21:18:56	23:05:14	ветровое воздействие	0.17460	0.08651	-0.01559	0.04365	0.02163	-0.00390
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
21.08.2017	21	0:56:02	1:44:24	2 термические трещины, ветровое воздействие	-0.25778	-0.12179	0.01166	-0.06445	-0.03045	0.00291
21.08.2017	22	1:57:10	2:54:22	подвижки	-0.07784	-0.03949	-0.00303	-0.01946	-0.00987	-0.00076
21.08.2017	23	2:59:06	3:08:34	ветровое воздействие	0.11637	0.05579	-0.00492	0.02909	0.01395	-0.00123
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
21.08.2017	30	14:46:06	14:47:38	крупный разлом	0.91136	0.65226	0.35260	0.22784	0.16307	0.08815
21.08.2017	31	15:06:18	18:23:00	сильное ветровое воздействие	-0.43836	-0.23956	0.02978	-0.10959	-0.05989	0.00745
21.08.2017	32	18:26:06	18:27:36	термическая трещина	-0.29906	-0.14645	0.01299	-0.07477	-0.03661	0.00325
21.08.2017	33	18:28:38	18:41:28	подвижки	0.15308	0.07651	-0.00839	0.03827	0.01913	-0.00210
21.08.2017	34	18:41:50	19:35:20	несколько разломов, трение	-0.38962	0.21019	0.02757	-0.09741	0.05255	0.00689
21.08.2017	35	19:38:42	20:50:44	сильное ветровое воздействие, трещина	-0.48194	-0.25390	0.02643	-0.12049	-0.06348	0.00661
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
23.08.2017	47	20:38:36	20:50:48	крупная трещина/разлом	-0.80572	0.40308	0.04313	-0.20143	0.10077	0.01078
23.08.2017	48	20:52:50	23:05:26	сход льда	-0.46812	0.22528	-0.03148	-0.11703	0.05632	-0.00787
23.08-24.08.2017	49	23:08:22	0:20:20	сход льда	0.39892	0.19618	-0.02587	0.09973	0.04905	-0.00647
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
25.08.2017	61	3:05:34	4:01:52	трещины, ветровое воздействие	-0.54144	-0.28404	0.03065	-0.13536	-0.07101	0.00766
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
25.08.2017	65	6:26:10	6:27:07	сейсмический толчок	-0.13812	-0.06930	0.00570	-0.03453	-0.017325	0.0014255
25.08.2017	66	8:13:10	12:00:00	ветровое воздействие, трещины	-0.72752	-0.36134	-0.04288	-0.18188	-0.09034	-0.01072
25.08.2017	67	12:03:26	12:12:18	разлом	0.37360	0.18532	0.01729	0.09340	0.04633	0.00432
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
25.08.2017	70	13:51:18	14:29:04	подвижки, трещина	0.27068	0.13864	0.01203	0.06767	0.03466	0.00301
25.08.2017	71	14:31:34	14:50:48	разломы, сход льда	0.94588	0.51816	-0.05626	0.23647	0.12954	-0.01407

Таблица 8. Выявленные динамические события за период с 21.08.17 по 25.08.17 на архипелаге Шпицберген на станции SVA2, установленной на льду.

Дата	№	начало	конец	Описание	Амплитуда N, мм/с	Амплитуда E, мм/с	Амплитуда Z, мм/с	Амплитуда N, V	Амплитуда E, V	Амплитуда Z, V
------	---	--------	-------	----------	-------------------	-------------------	-------------------	----------------	----------------	----------------

21.08.2 017	1	0:03:54	0:03: 57	подвижка	0.00199	0.00230	0.00271	0.00796	0.00918	0.01084
21.08.2 017	2	0:58:05	0:58: 10	небольшая трещина	0.00429	-0.00305	0.00587	0.01717	-0.01219	0.02349
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
21.08.2 017	6	2:24:34	2:24: 40	крупная трещина/разло м	-0.04025	0.02942	0.02911	-0.16102	0.11766	0.11645
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
21.08.2 017	9	4:41:16	4:41: 23	крупная трещина/разло м	-0.01745	0.01937	0.01623	-0.06978	0.07749	0.06493
21.08.2 017	10	4:47:12	4:57: 42	небольшие трещины	-0.00556	0.00352	-0.00467	-0.02225	0.01409	-0.01866
21.08.2 017	11	5:22:53	5:25: 39	трещина	-0.00572	-0.00725	0.00583	-0.02287	-0.02900	0.02332
21.08.2 017	12	6:06:47	6:10: 14	2 трещины	0.02121	0.01212	0.01804	0.08485	0.04847	0.07216
21.08.2 017	13	6:20:26	6:38: 36	крупная и небольшие трещины	-0.01103	0.00891	-0.01719	-0.04411	0.03562	-0.06874
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
21.08.2 017	18	8:49:08	8:49: 12	крупная трещина/разло м	0.04170	0.04371	-0.03102	0.16681	0.17483	-0.12408
21.08.2 017	19	8:55:04	8:59: 28	2 трещины	0.00616	-0.00626	-0.00366	0.02465	-0.02505	-0.01463
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
21.08.2 017	22	10:14:1 4	10:1 5:45	2 небольшие трещины	0.00392	-0.00229	0.00440	0.01566	-0.00914	0.01759
21.08.2 017	23	10:24:5 8	10:2 5:06	масштабная трещина/разло м	0.05508	-0.03701	-0.04829	0.22032	-0.14805	-0.19317
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
21.08.2 017	26	11:26:2 8	11:5 5:41	крупные трещины	-0.22058	0.12617	0.20742	-0.88230	0.50468	0.82968
21.08.2 017	27	12:04:3 2	13:2 1	крупные трещины	0.04468	-0.02397	-0.03724	0.17873	-0.09587	-0.14896
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
21.08.2 017	34	16:22:2 6	16:2 2:33	масштабная трещина/разло м	0.06932	-0.04083	-0.05629	0.27727	-0.16332	-0.22515
21.08.2 017	35	16:49:3 1	16:5 5:22	крупная трещина/разло м	-0.05915	0.02684	0.03425	-0.23660	0.10735	0.13700
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
21.08.2 017	37	17:35:0 6	17:3 5:13	крупная трещина/разло м	-0.09143	0.04942	0.06762	-0.36574	0.19769	0.27047
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
22.08.2 017	48	2:30:34	2:31: 48	небольшая трещина	0.00843	-0.00467	-0.00634	0.03373	-0.01867	-0.02536
22.08.2 017	49	2:52:20	2:55: 38	2 трещины	-0.00193	-0.00365	-0.00717	-0.00774	-0.01458	-0.02869
22.08.2 017	50	4:32:08	4:32: 13	крупная трещина/разло м	-0.05960	0.02286	0.06533	-0.23841	0.09145	0.26132
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
22.08.2 017	53	8:01:26	17:2 2:40	множество трещин/разло мов	-0.48485	0.26726	0.30331	-1.93940	1.06905	1.21325
22.08.2 017	54	17:23:4 4	17:3 0:30	сход/обрушен ие льда	0.07004	-0.05936	0.01764	0.28016	-0.23743	0.07057
22.08.2 017	55	17:33:2 2	17:5 8:59	несколько трещин	-0.03693	0.00950	-0.02372	-0.14772	0.03799	-0.09488
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
23.08.2 017	66	7:33:50	7:45: 06	крупная трещина и несколько мелких	0.04099	0.03736	0.03041	0.16394	0.14945	0.12165
23.08.2 017	67	8:34:50	8:53: 02	небольшая трещина с растескивание	0.01717	-0.01046	-0.01247	0.06870	-0.04184	-0.04987

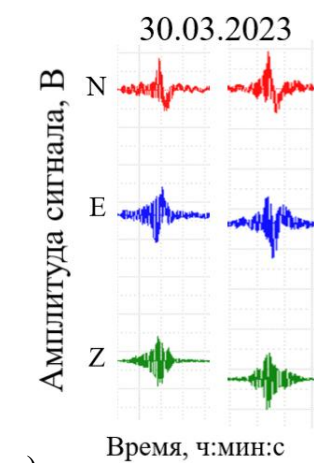
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
23.08.2 017	73	14:29:3 6	14:5 5:58	2 крупные трещины/разл ома	0.11104	-0.03058	-0.00826	0.44418	-0.12232	-0.03305
23.08.2 017	74	15:12:5 0	15:2 8:32	2 небольшие трещины	-0.01101	-0.00698	0.00835	-0.04405	-0.02791	0.03342
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
24.08.2 017	81	1:10:58	1:44: 42	растрескивани е и трещина	-0.03632	-0.02539	0.00575	-0.14527	-0.10156	0.02300
24.08.2 017	82	2:20:00	2:23: 46	трещина/разло м	-0.04018	0.01293	0.04065	-0.16073	0.05170	0.16259
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
24.08.2 017	89	11:01:1 4	12:2 9:15	трещины,проп ахивание/трени е	0.02275	-0.01074	-0.02530	0.09099	-0.04296	-0.10121
24.08.2 017	90	12:36:4 0	14:0 2:55	трещины,проп ахивание/трени е	-0.00607	0.00308	-0.00510	-0.02430	0.01234	-0.02038
24.08.2 017	91	14:14:5 5	14:5 5:50	2 трещины	-0.01356	-0.02080	0.03140	-0.05422	-0.08318	0.12559
24.08.2 017	92	15:00:0 0	15:5 9:00	рост напряжения,не большая трещина	0.00763	-0.00479	0.01111	0.03053	-0.01917	0.04446
24.08.2 017	93	16:13:4 5	17:1 6:50	крупная трещина/разло м	0.00886	-0.03016	-0.01013	0.03545	-0.12065	-0.04052
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
24.08.2 017	95	21:02:5 8	21:4 8:22	крупная трещина/разло м	0.02597	-0.02556	0.02358	0.10390	-0.10223	0.09433
24.08.2 017	96	22:28:0 6	22:2 9:00	крупная трещина	0.02957	-0.02192	0.04531	0.11827	-0.08768	0.18123
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
25.08.2 017	106	12:56:2 8	12:5 6:38	крупная трещина/разло м	0.04688	-0.04654	0.04826	0.18753	-0.18614	0.19304
25.08.2 017	107	13:03:5 8	13:1 8:30	сход льда	-0.00635	0.04570	-0.03948	-0.02541	0.18280	-0.15790
25.08.2 017	108	13:51:4 5	14:0 0:00	сход льда	-0.05625	0.04420	-0.11613	-0.22500	0.17680	-0.46450
25.08.2 017	109	14:03:5 4	15:0 0:00	крупная трещина,сход льда	0.01938	-0.00883	-0.04882	0.07750	-0.03530	-0.19528
25.08.2 017	110	15:00:0 0	15:4 8:45	крупные трещины	0.03426	0.03885	0.04131	0.13705	0.15541	0.16525
25.08.2 017	111	16:03:0 0	16:5 5:55	сход льда	-0.03220	0.03080	-0.01818	-0.12879	0.12321	-0.07270
25.08.2 017	112	17:13:5 5	18:5 6:25	разлом	-0.07502	0.08098	0.04156	-0.30006	0.32391	0.16625
25.08.2 017	113	19:00:5 0	21:0 9:50	подвижки,нап ряжение,трещ ины	-0.01846	-0.01453	0.01677	-0.07384	-0.05811	0.06710
25.08.2 017	114	21:16:3 5	23:1 7:30	сход льда	-0.02784	-0.00666	-0.02219	-0.11136	-0.02662	-0.08877

Таблица 9. Выявленные динамические события за период с 21.08.17 по 25.08.17 на архипелаге Шпицберген на станции SVA3, установленной на льду.

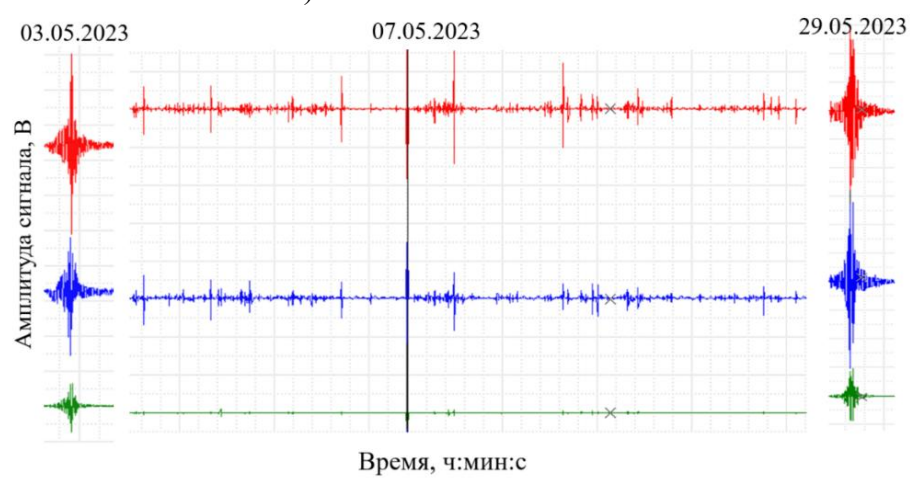
Дата	№	начал о	конец	Описание	Амплитуд а N, мм/с	Амплитуд а E,мм/с	Амплитуда Z,мм/с	Амплитуда N,V	Амплитуд а E,V	Амплиту да Z,V
21.08.20 17	1	1:56:5 5	1:58:5 3	небольшая трещина	-0.00771	-0.00626	0.01373	-0.03082	-0.02502	0.05491
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
21.08.20 17	6	8:06:5 2	9:03:3 2	2 крупные трещины/разлом а	-0.06112	-0.03315	-0.12978	-0.24449	-0.13260	-0.51910
21.08.20 17	7	9:22:3 0	12:55: 12	множество крупных трещин/разломов	-0.01625	-0.05293	0.20307	-0.06501	-0.21170	0.81228

21.08.20 17	8	13:05: 12	14:27: 06	множество крупных трещин/разломов	0.09890	-0.07602	0.23484	0.39560	-0.30406	0.93935
21.08.20 17	9	14:45: 20	14:53: 28	разлом	0.06449	0.05919	0.10095	0.25795	0.23675	0.40380
21.08.20 17	10	14:55: 00	16:00: 00	напряжение,3 трещины	0.01170	0.00827	-0.01309	0.04681	0.03308	-0.05234
21.08.20 17	11	16:01: 40	16:29: 10	2 крупные трещины/разлом а	0.03764	0.02692	-0.06211	0.15056	0.10769	-0.24842
21.08.20 17	12	17:05: 10	20:19: 50	множество крупных трещин/разломов	0.02362	-0.02257	0.15137	0.09446	-0.09030	0.60548
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
22.08.20 17	21	6:53:4 2	9:33:4 4	множество крупных трещин/разломов	0.01684	0.10790	0.19954	0.06736	0.43161	0.79815
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
23.08.20 17	30	7:19:5 4	7:43:1 8	трещина	-0.02368	-0.03155	0.07310	-0.09473	-0.12621	0.29239
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
23.08.20 17	33	11:23: 40	11:58: 48	крупная трещина/разлом	0.02021	0.03429	0.04561	0.08084	0.13714	0.18243
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
23.08.20 17	36	15:53: 48	16:17: 54	трещины	0.01481	0.01978	0.01245	0.05925	0.07910	0.04980
23.08.20 17	37	17:55: 12	18:04: 24	крупная трещина/разлом	-0.02472	-0.00320	-0.00312	-0.09887	-0.01278	-0.01246
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
24.08.20 17	50	10:27: 28	12:29: 16	рост напряжения,мик ротрещины	0.00462	0.00950	-0.00730	0.01847	0.03801	-0.02922
24.08.20 17	51	14:55: 04	14:55: 38	трещина	0.00704	-0.02473	-0.01251	0.02818	-0.09891	-0.05006
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
24.08.20 17	53	18:08: 40	18:08: 52	крупная трещина	0.03799	0.01934	0.06812	0.15195	0.07737	0.27247
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
25.08.20 17	64	12:00: 00	12:41: 40	крупные трещины/разлом ы	0.22938	-0.07270	-0.01070	0.91750	-0.29080	-0.04279
25.08.20 17	65	12:43: 22	13:38: 04	трещины	0.00395	0.00789	-0.01673	0.01580	0.03157	-0.06692
25.08.20 17	66	13:48: 06	15:56: 14	сход льда,трещины	0.05821	0.03548	-0.11209	0.23285	0.14193	-0.44834
25.08.20 17	67	16:05: 18	16:45: 12	крупные трещины	-0.02438	0.01244	-0.02753	-0.09753	0.04977	-0.11013
25.08.20 17	68	17:12: 50	18:00: 50	трещины, масштабный разлом	0.12385	0.09618	0.09528	0.49540	0.38471	0.38114
25.08.20 17	69	18:04: 06	23:20: 00	сход льда,трещины	0.21542	-0.14339	0.17671	0.86168	-0.57354	0.70682

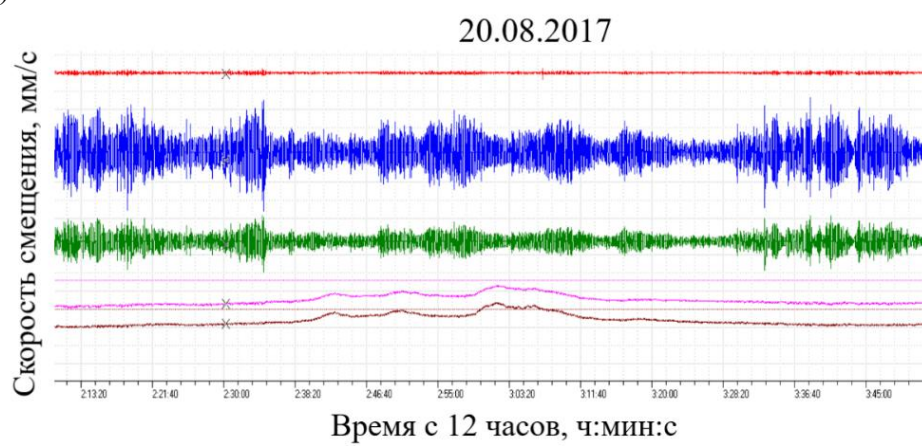
Приложение 9



а)

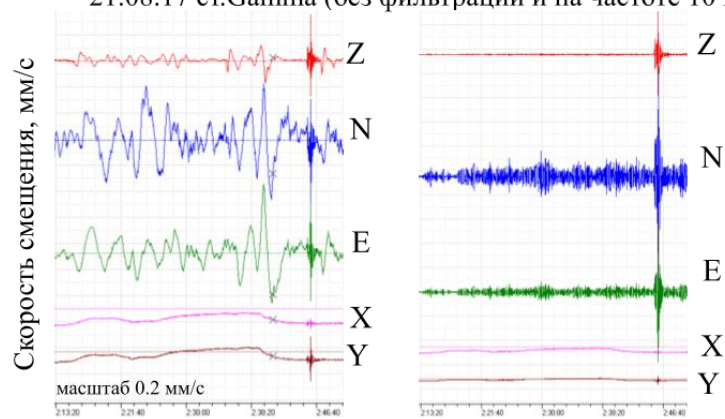


б)



в)

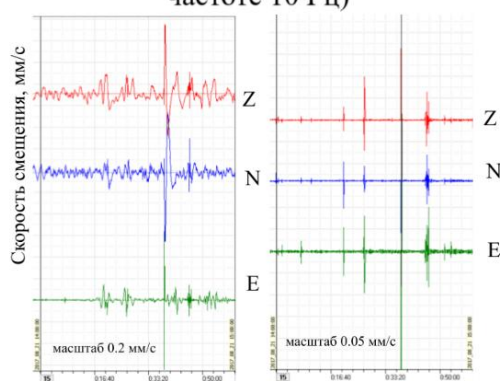
21.08.17 ст.Gamma (без фильтрации и на частоте 10 Гц)



г)

Время с 12 часов, ч:мин:с

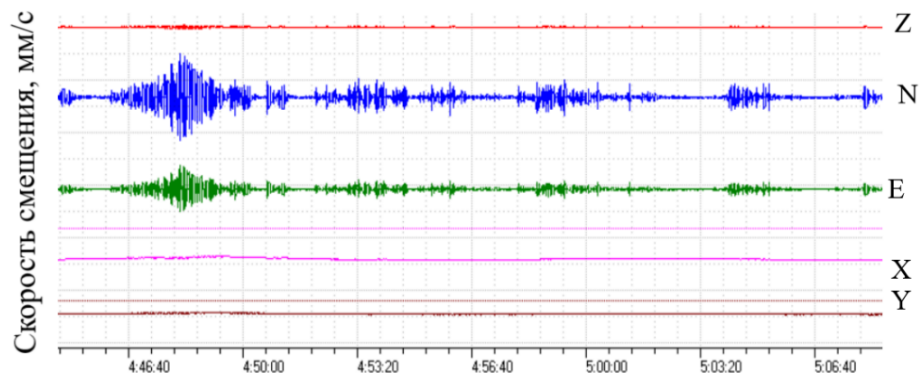
21.08.17 ст.SVA3(без фильтрации и на частоте 10 Гц)



д)

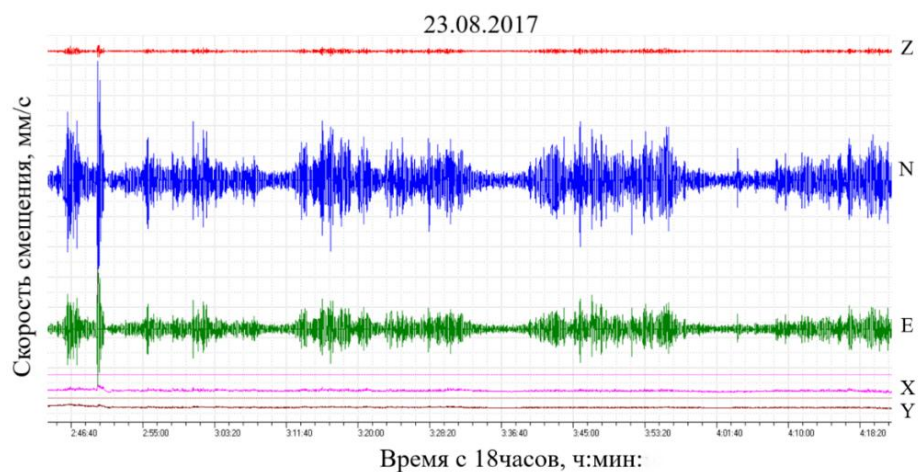
Время с 14 часов, ч:мин:с

23.08.2017



е)

Время с 12 часов,ч:мин:с



ж)

Рисунок 6. Примеры ледовых событий в марте и мае на НИС «Ледовая база Мыс Баранова»
 а) 2 разлома и б) крупные трещины и термические трещины; а также на леднике Норденшельда на станциях Gamma, SVA2 и SVA3 в) динамическое воздействие ветра 20.08.17, фиксируемое ст. Gamma, г) разлом 21.08.17 в 14:45:20 на ст. Gamma, д) разлом 21.08.17 в 14:45:20 на ст. SVA3, е) сейсмические толчки на ст. Gamma 23.08.17, ж) сходы льда с ледника после крупного разлома 23.08.17 на ст. Gamma.

Приложение 10

Программный код для расчёта частотных спектров и вейвлет-преобразования данных сейсмометров.

```
filename = 'C:\\Users\\Карина\\Desktop\\Магистерская диссертация\\Шпицберген 2017 Берег\\21.08.17 25.08.17  
Spitsbergen\\24.08.17.mat';  
  
data = load(filename);  
variableNames = fieldnames(data);  
disp('Имена переменных в загруженных данных:');  
disp(variableNames);  
  
disp('Характеристики переменных:');  
for i = 1:length(variableNames)  
    varName = variableNames{i};  
    varInfo = whos('-file', filename, varName);  
    disp(['Имя переменной: ', varName]);  
    disp(['Размер: ', num2str(varInfo.size)]);  
    disp(['Тип: ', varInfo.class]);  
    disp(['Bytes: ', num2str(varInfo.bytes)]);  
    disp('-----');  
end  
  
if isfield(data, 'Block_Data')  
    block_data = data.Block_Data;  
    [num_channels, num_points] = size(block_data);  
    disp(['Количество каналов: ', num2str(num_channels)]);  
    disp(['Количество точек: ', num2str(num_points)]);  
  
    if isfield(data, 'delta')  
        delta = data.delta;  
        time = (0:num_points-1) * delta;  
        time_hours = time / 3600;  
        colors = {'g', 'r', 'b', 'm', 'k'};  
        channel_names = {'Z', 'N', 'E', 'X', 'Y'};  
  
        figure('Position', [25, 25, 1000, 900]);  
        for i = 1:num_channels  
            subplot(num_channels, 1, i);  
            plot(time_hours, block_data(i, :), 'Color', colors{i});  
            xlabel('Время (ч)');  
            ylabel('Амплитуда');  
            title(['Канал ', channel_names{i}]);  
            grid on;  
            legend(channel_names{i});  
        end  
  
        saveas(gcf, 'C:\\Users\\Карина\\Desktop\\Магистерская диссертация\\Шпицберген 2017 Берег\\21.08.17  
25.08.17 Spitsbergen\\24.08.17MATLAB.png');  
  
        figure('Position', [25, 25, 1000, 900]);  
        hold on;  
        for i = 1:3  
            Y = fft(block_data(i, :));  
            P2 = abs(Y / num_points);  
            P1 = P2(1:num_points/2+1);  
            P1(2:end-1) = 2 * P1(2:end-1);  
            f = (0:(num_points/2)) * (1/(delta * num_points));  
            plot(f, P1, 'Color', colors{i}, 'DisplayName', channel_names{i});
```

```

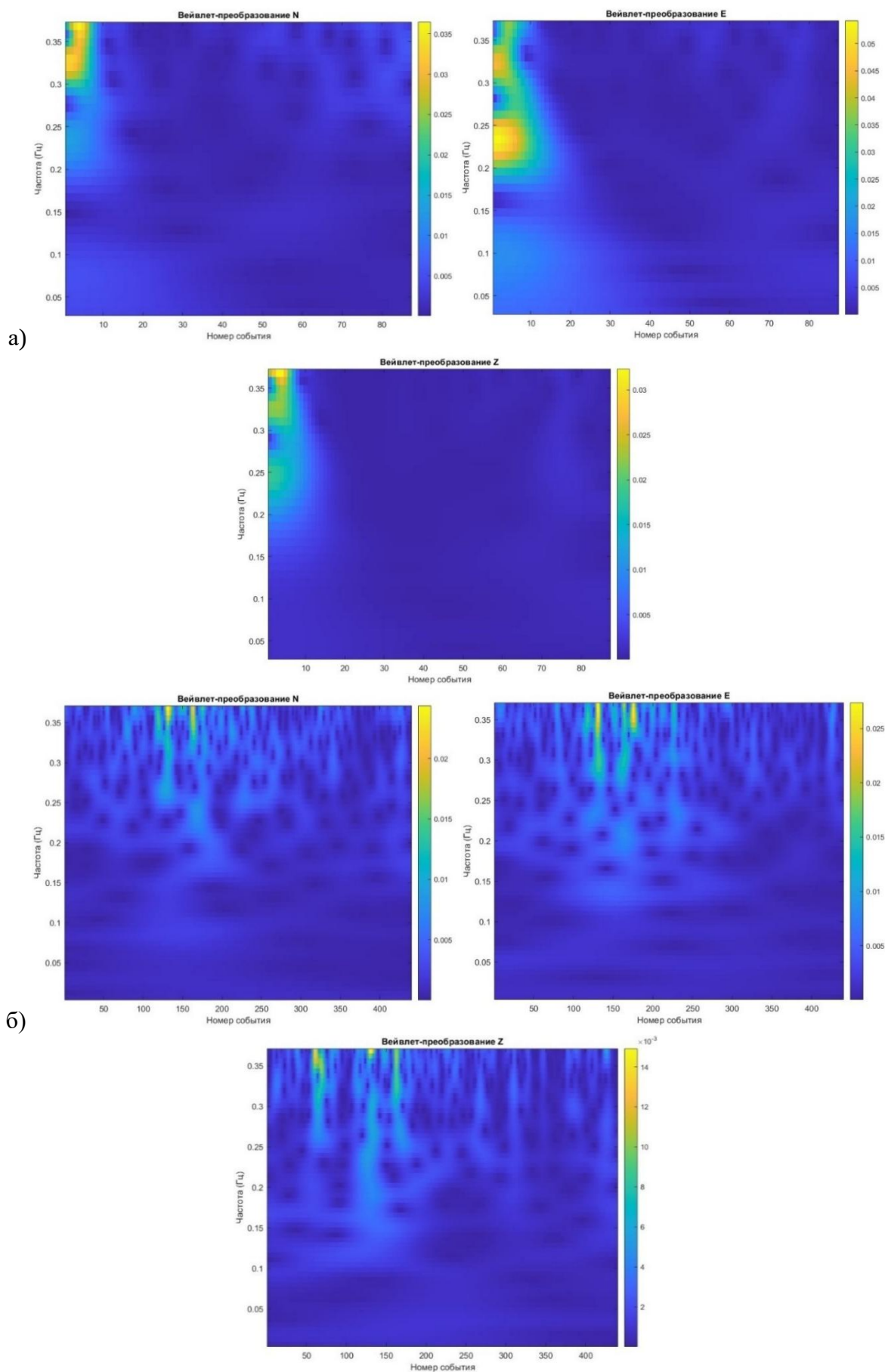
end

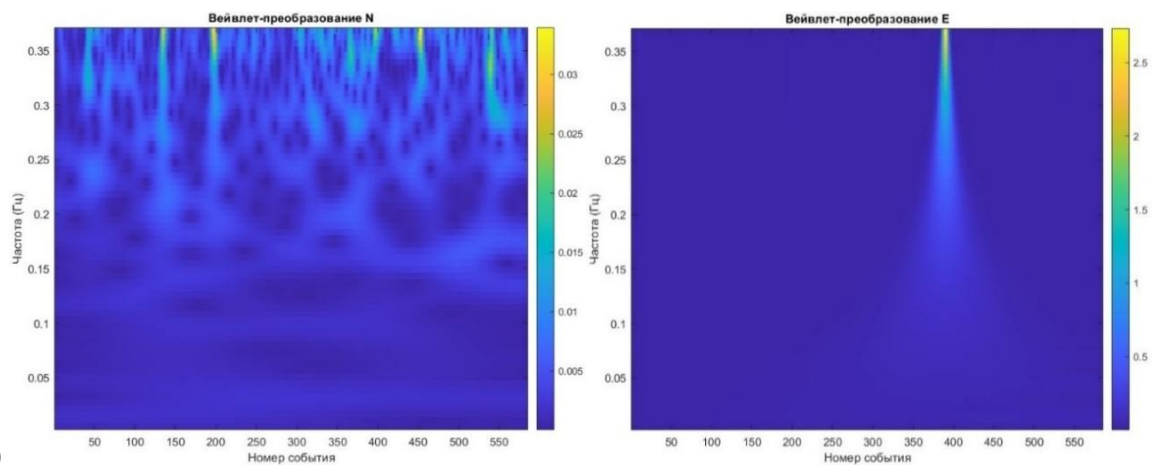
hold off;
xlabel('Частота (Гц)');
ylabel('Амплитуда');
title('Спектральное разложение');
grid on;
legend show;
ylim([0.001,0.03]);
end
%%
for i = 1:3
    signal = block_data(i, :);
    [C, F] = cwt(signal, 'amor', 1/delta);

    figure;
    imagesc(time_hours, F, abs(C));
    axis xy;
    xlabel('Время (часы)');
    ylabel('Частота (Гц)');
    title(['Вейвлет-преобразование канала ', channel_names{i}]);
    colorbar;
end
end

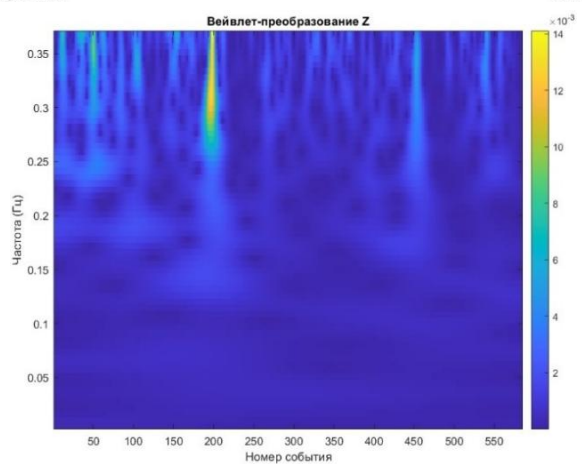
```

Приложение 11





В)



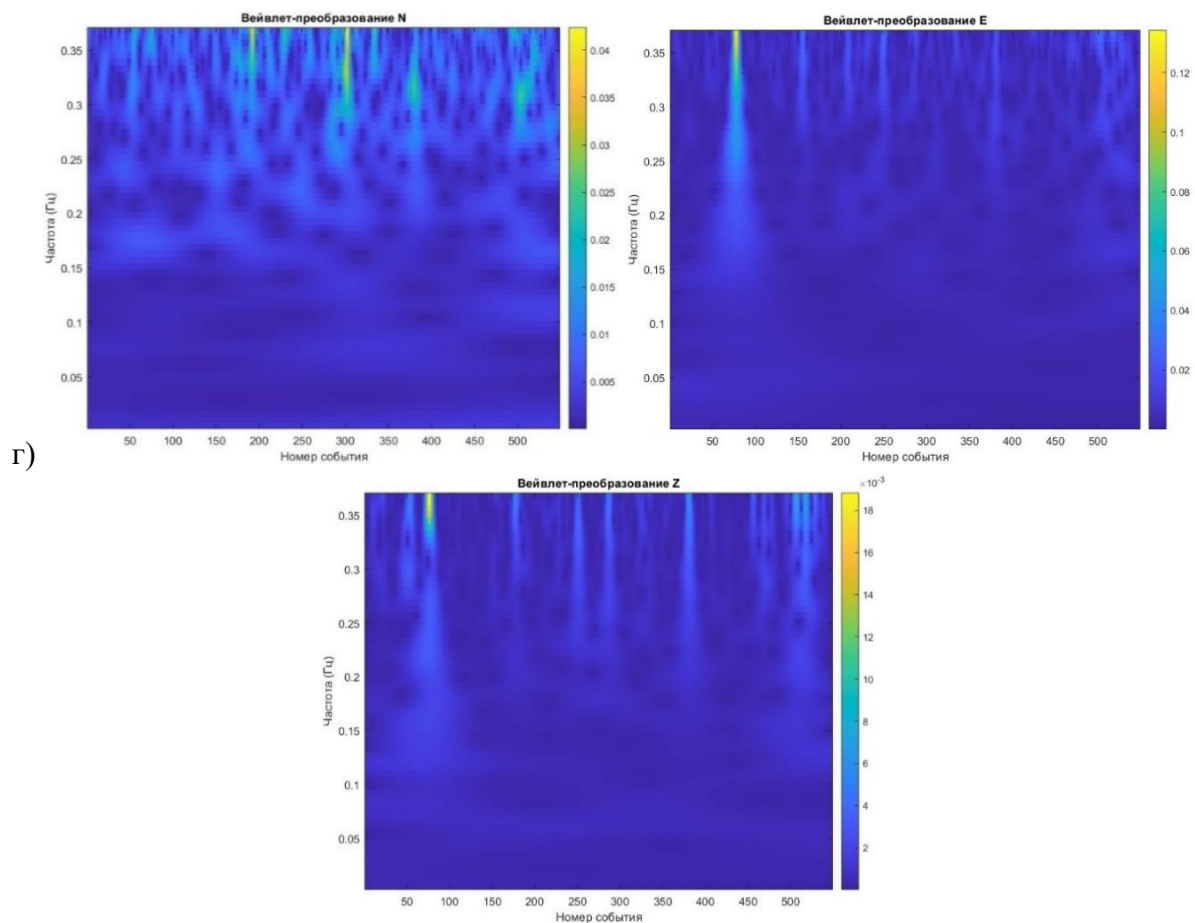


Рисунок 12. Вейвлет-преобразования выявленных динамических событий по составляющим в а) феврале, б) марте, в) апреле, г) мае.

Приложение 12

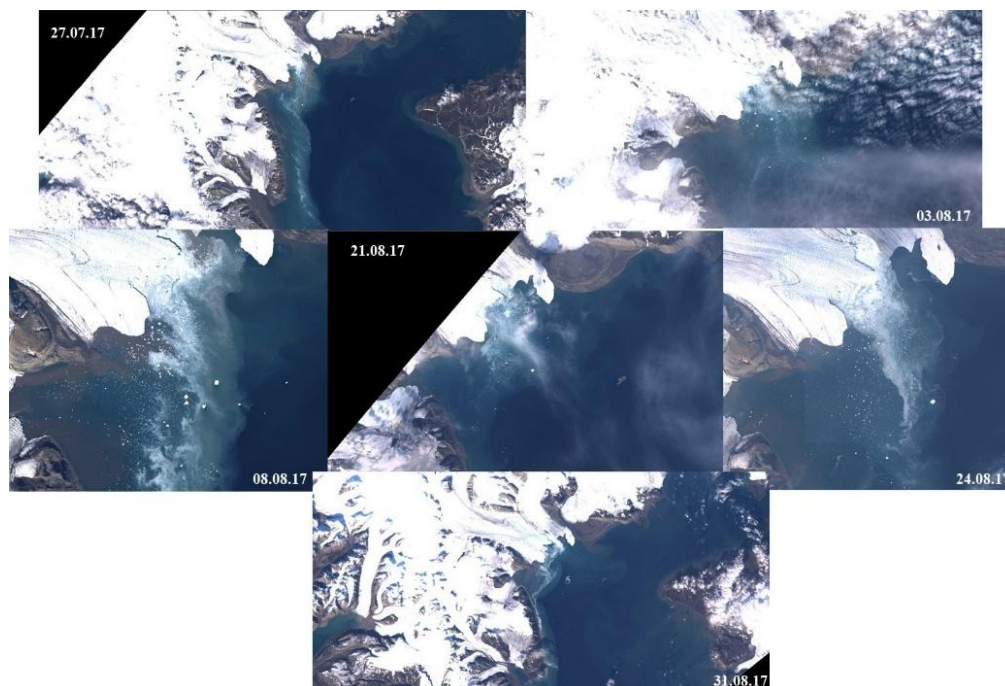


Рисунок 49. Спутниковые снимки Landsat 8/9 2017 года в районе ледника Негрибрин [39].

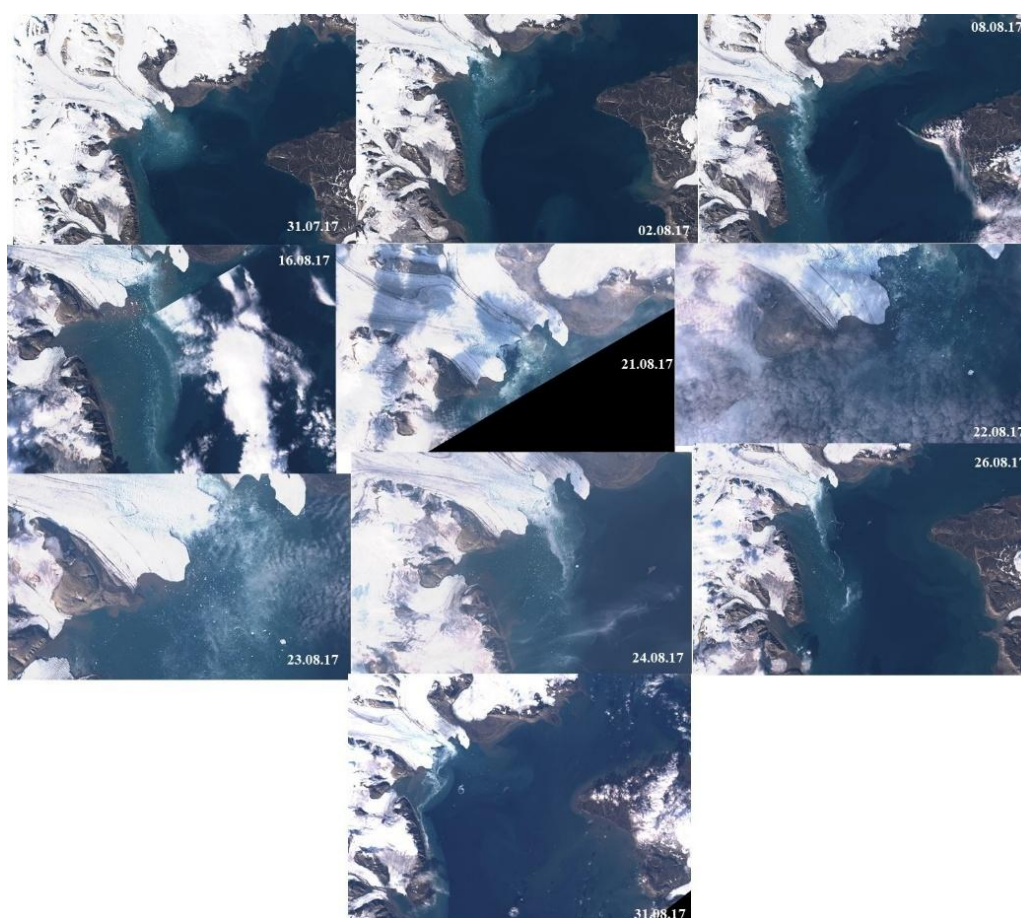


Рисунок 50. Спутниковые снимки Sentinel-2 за август 2017 года в районе ледника Негрибрин [38].