

УДК 550.34

ВЛИЯНИЕ ЭКЗОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА ПАРАМЕТРЫ МИКРОИМПУЛЬСОВ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ ПРИБРЕЖНОЙ АРКТИЧЕСКОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИЕЙ, И ИХ СВЯЗЬ С ЛЕДОВОЙ ОБСТАНОВКОЙ

© 2026 г. Г. Н. Антоновская^{1*}, Я. В. Конечная¹, Н. К. Капустян^{1,2},
Е. В. Шахова¹, Е. Р. Морозова¹

¹Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова Уральского отделения РАН, Архангельск, Россия

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

*e-mail: antonovskaya@fciarctic.ru

Поступила 29.09.2025 г.

После доработки 05.12.2025 г.

Принята к печати 23.03.2026 г.

Представлены результаты многолетнего (2017–2023) мониторинга микроимпульсов, регистрируемых сейсмической станцией Северная Земля (SVZ), установленной на берегу о. Большевик одноимённого архипелага. Микроимпульсы представляют собой колебания низкой энергии длительностью от 1 до 10–15 с и частотами от нескольких Гц до первых десятков Гц. На сейсмической записи они проявляются как в виде отдельных событий, так и их цугов, в количестве до тысяч штук в день. Цель исследования – выявление происхождения микроимпульсов, регистрируемых сейсмической станцией, путём анализа влияния экзогенных факторов на их параметры и оценка связи с ледовой обстановкой. Для выделения микроимпульсов на сейсмической записи и их классификации разработан специальный алгоритм автоматической обработки данных, позволяющий сформировать список событий, содержащий времена вступления, тип волны, азимут на источник и основную частоту. С использованием этой информации анализируется связь экзогенных факторов (вариации температуры воздуха, атмосферного давления, скорости и силы ветра, и ледовая обстановка) с параметрами микроимпульсов. Показано, что их природа обусловлена динамикой процессов в системе атмосфера–гидросфера–литосфера, в том числе связанных с состоянием припая и источниками вблизи береговой линии. На основе данных о микроимпульсах из пролива Шокальского, произошедших на расстояниях до 5 км от станции SVZ, проведена оценка состояния морского льда в зимний период. Показано, что максимальное количество микроимпульсов наблюдается в период установившегося льда при низких отрицательных температурах воздуха – ниже -25°C . Информация о микроимпульсах совместно с метеоданными и картами ледовой обстановки может быть применена для оценки состояния льда, которая в свою очередь – важная составляющая для проводки судов, размещения грузов и пр.

Ключевые слова: архипелаг Северная Земля, припай, одиночная сейсмическая станция, микроимпульсы, сейсмическая активность, мониторинг, метеоусловия

DOI: 10.7868/S2412376526020094

ВВЕДЕНИЕ

Изучение свойств и состояния ледового покрова акваторий всегда было важной задачей как фундаментальной науки, так и востребовано на практике, прежде всего для судоходства.

В прикладных задачах наибольшее внимание уделялось припаю (неподвижному ледяному покрову, связанному с берегом), который рассматривался не только с точки зрения судоходства (Smirnov et al., 1999), но и перспектив строительства ледостойких гидротехнических сооружений

(Козлов, Соломатин, 2023). Оценка деформационных процессов, происходящих в припае, – актуальная задача, связанная как с возрастанием объёма ледокольных проводок, так и с производимыми операциями выгрузки транспортных судов через припай на необорудованный берег (Степанюк, Смирнов, 2001). Кроме этого, при прогнозе основных линий взлома припая в весенне-летний период важна информация о трещинах, особенно в зонах функционирования разведочных буровых установок на шельфе. Качественные и своевременные результаты способствуют обеспечению безаварийности работ.

В работе (Степанюк, Смирнов, 2001) распределение напряжений в припайных льдах в большинстве случаев обуславливается неоднородностями ледового покрова, создающими зоны концентрации напряжений. Такими неоднородностями могут быть: границы пресноводного и морского льдов; границы льдов разной толщины; поля и пояса торосов; застамушенные торосы (когда торос касается дна, закорив таким образом дрейфующую льдину, на которой он находится) и др.

Среди геофизических методов исследования ледовых покровов мы будем применять сейсмические методы исследования свойств морского льда в локальном масштабе, обеспечивающие высокую точность и пространственное разрешение. Первые сейсмические эксперименты на морском льду относятся к концу 1950-х годов, когда упругие константы и толщина морского льда оценивались по скоростям распространяющихся в ледяном покрове сейсмических волн от источников (Crary, 1954; Anderson, 1958; Hunkins, 1960). С появлением цифровой обработки сигналов стали возможны методы, основанные на анализе Фурье, что позволяет получить более точные оценки толщины льда и его упругих свойств (Yang, Giellis, 1994; Stein et al., 1998). Поэтому не удивительно, что в последнее время вновь во всём мире возрос интерес к сейсмическим методам как к дополнительному средству мониторинга толщины, плотности и упругих свойств морского льда (Marsan et al., 2012; Moreau et al., 2020 а, б; Romeyn et al., 2021; Serripierri et al., 2022; Преснов и др., 2023).

Существенно, что обычно для решения задач выявления геометрии (преимущественно толщины) ледового покрова применяют сейсмические методы, основанные на регистрации сигналов группой датчиков (профильные, площадные расстановки) с использованием корре-

ляции записей от источников (сейсморазведка) или микросейсм. Такие работы относительно кратковременные, выполняются не на труднодоступных участках, они технологически сложны, что практически исключает длительный мониторинг ледовой ситуации.

В работе рассмотрен достаточно необычный подход – мониторинг свойств припайного льда по данным единичной широкополосной трёхкомпонентной стационарной сейсмической станции, установленной на островном архипелаге в Арктике. Идея работы состоит в том, чтобы максимально полно применять непрерывно регистрируемые данные – не только сейсмические события, но и микросейсм.

Отмечено, что по записям одиночной сейсмической станции оценить “напрямую” параметры напряжённо-деформированного состояния ледяного покрова без привлечения специальных источников сигналов не представляется возможным. Тем не менее, с учётом метеорологических данных, а также спутниковых наблюдений за ледовой обстановкой можно получить дополнительную оперативную информацию о состоянии ледяного покрова и его изменениях, прежде всего степени консолидации льда в районе расположения станции. Замечено, что такая информация о локальном состоянии ледяного покрова может быть полезна в первую очередь для проводки судов в припайных льдах.

Кроме того, изучение свойств сейсмического шума, и в том числе микроимпульсов, важно для исследования литосферной сейсмичности, так как позволяет разделять сигналы, связанные с эндогенными и экзогенными процессами. Здесь важно максимально полно выявить глубинные сейсмические импульсы, учитывая, что они могут отображать иные процессы, отличные от ледовых.

Цель работы – выявление происхождения микроимпульсов, регистрируемых одиночной арктической островной сейсмической станцией, путём анализа влияния экзогенных факторов на их параметры и оценка связи с ледовой обстановкой.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В ноябре 2016 г. совместными усилиями Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаврова Уральского отделения РАН (ФИЦКИА

УрО РАН) и Арктическим и Антарктическим научно-исследовательским институтом (АНИИ) на архипелаге Северная Земля (о. Большевик) на территории научно-исследовательского стационара “Ледовая база “Мыс Баранова” открыта сейсмическая станция “Северная Земля” с кодом SVZ (рис. 1; Антоновская и др., 2018). Ледовая база размещена на пологом берегу пролива Шокальского, шириной до 40 км и глубиной до 350 м, разделяющего острова Большевик и Октябрьской Революции. В целом береговая линия острова Большевик сильно изрезана, крутая (до 60°), иногда скалистая, склоны в некоторых местах покрыты сплошными каменными осыпями (Егизаров, Воскресенский, 1951).

Станция вошла в состав Архангельской сейсмической сети ФИЦКИА УрО РАН (Antonovskaya et al., 2024). В качестве оборудования установлен широкополосный трёхкомпонентный сейсмический датчик CMG-6TD с встроенным регистратором фирмы Guralp (Турова, Морозова, 2019). Данная станция включена в систему непрерывного сейсмологического мониторинга и, помимо регистрации далеких и региональных землетрясений, является единственным источником информации о круглогодичной сейсмичности архипелага. Вблизи станции (до 5 км) нет массивных ледовых куполов, но присутствует широкий набор проявлений природного льда: морского, дрейфующего и припайного, озёрного и речного (см. рис. 1, б).

Установить сейсмическую сеть для локализации местных землетрясений и льдотрясений, как это обычно делается на освоенных территориях (Deichmann et al., 2000; O’Neel, Pfeffer, 2007), пока не представляется возможным. С этим связана основная проблема в локации сейсмических событий – в сейсмологии принято проводить обработку минимум по трём сейсмическим станциям. Тем не менее, на заре сейсмологии и в ряде случаев проводится обработка по данным единичной станции (Kohler et al., 2019).

Обработка сейсмических записей велась двумя способами: сначала вручную в программе WSG (Акимов, Красилов, 2020) – просматривалась запись и выделялись микроимпульсы, превышающие уровень фона, а затем была создана программа для автоматической обработки, позволяющая не только их обнаруживать, но и определять такие параметры микроимпульсов, как центральная частота, длительность и азимут на источник. В основе данной программы лежит алгоритм обнаружения импульсов STA/LTA (Trnkoczy, 2012) и поляризационный анализ. Программный код был написан на языке Python с применением библиотек, предназначенных для обработки сейсмических записей (ObsPy и NumPy).

Для настройки программы были применены результаты визуального анализа сейсмических данных, которые показали, что на сейсмической

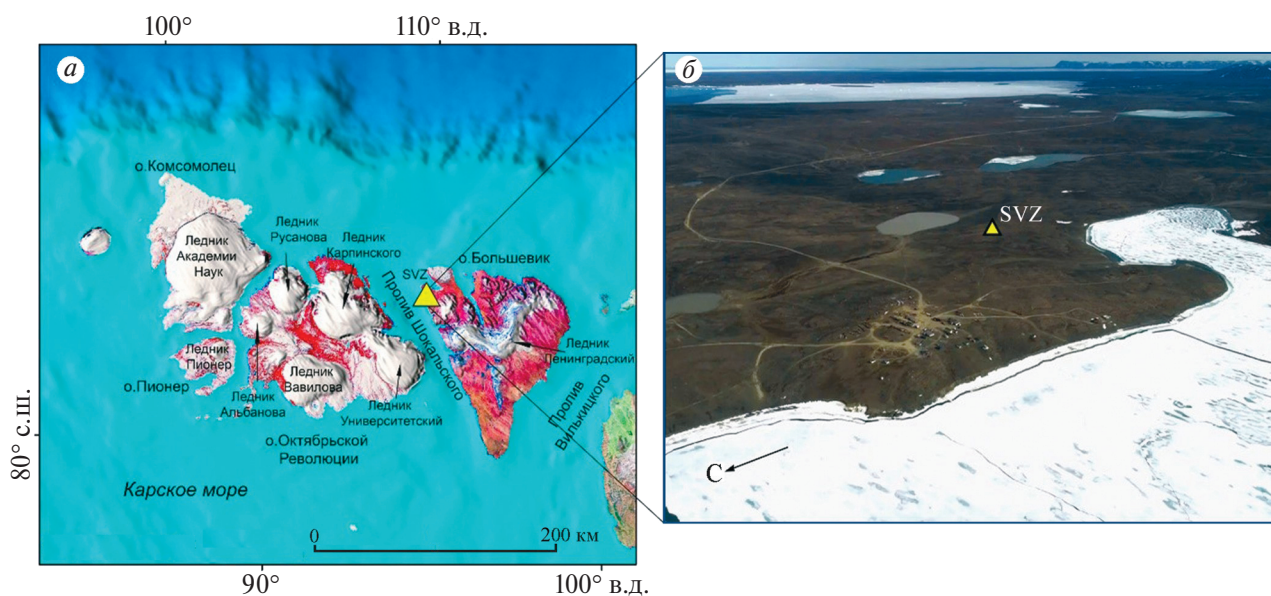


Рис. 1. Физическая карта рельефа архипелага Северная Земля (а) и фотография мыса Баранова (Ветер Свободы..., 2025). Треугольник – сейсмическая станция “Северная Земля” (SVZ)

Fig. 1. A topography map of the Severnaya Zemlya archipelago (a) and photo of Cape Baranov (The Wind of Freedom..., 2025). Triangle – “Severnaya Zemlya” seismic station (SVZ)

записи микроимпульсы объединены в огромные по продолжительности цуги часто повторяющихся микрособытий низкой энергии с очень простой волновой формой. Длительность отдельного события изменяется от 1 до 10–15 секунд. События в цуге обычно имеют схожий частотный состав. Отмечено, что частоты (до 12 Гц) и короткие по длительности волновые формы микроимпульсов характерны для близко расположенных источников от приёмника (в данном случае – стационарной сейсмической станции; Antonovskaya et al., 2024). Для выбора оптимальных параметров детектирования микроимпульсов применён список ледниковых сейсмических событий, выделенных вручную. Путём варьирования значения порога обнаружения был сформирован список событий, который сравнивался с “ручным” списком выявленных на той же самой записи продолжительностью один месяц (декабрь 2021). Оптимальные параметры выбраны из условия максимального соответствия “автоматического” и “ручного” списков событий. В нашем случае получены длины окон: для STA = 1.7 с, для LTA = 11.5 с с полосой частот предварительной фильтрации 5–20 Гц.

Второй этап автоматической обработки включает в себя расчёт характеристик обнару-

женных микроимпульсов: типа волны и азимута на источник. Для расчёта применён алгоритм, основанный на поляризационном анализе трёхкомпонентной сейсмической записи (Flinn, 1965; Jurkevics, 1988). Для классификации сейсмических событий рассчитана центральная частота спектра (Galuzzo et al., 2020; Kramer, 2024). Спектр мощности рассчитывался для временного окна длительностью, равной длительности события (в большинстве случаев 3–10 секунд), содержащего максимальную амплитуду обнаруженного события. Статистические моменты рассчитаны в полосе частот 2–40 Гц.

Таким образом, программа формирует список микроимпульсов, который содержит времена вступлений, тип волны, азимут на источник и центральную частоту. Из полученного списка отобраны события, представленные объёмными волнами и имеющие центральные частоты до 14 Гц. Отмечено, что по техническим причинам станция практически не функционировала в 2021/22 г.

На рис. 2, составленном из карт ААНИИ (Арктический и антарктический..., 2025), на примере ситуации 2017/18 г. приведена характерная

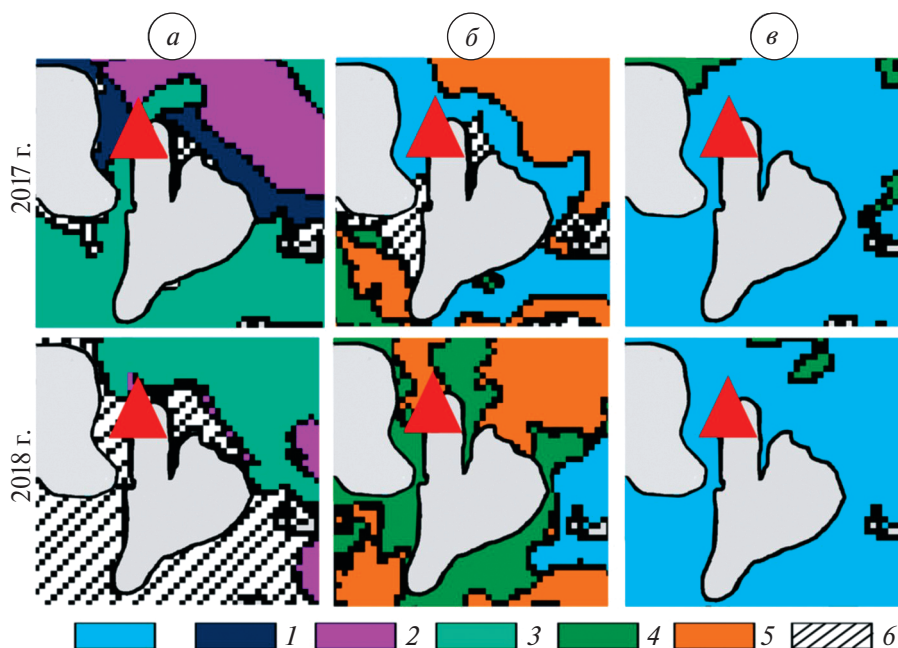


Рис. 2. Ледовая обстановка в районе стационарной сейсмической станции “Северная Земля” за 2017/18 г. по данным (Арктический и антарктический..., 2025). Период: начало февраля (а); середина июля (б); начало сентября (в). Ледовая обстановка: 1 – открытая вода, 2 – нилас, 3 – молодой лёд, 4 – однолетний лёд. Сплочённость льда: 5 – 1–6 баллов, 6 – 7–10 баллов, 7 – припай. Треугольник – местоположение сейсмической станции

Fig. 2. Sea ice conditions near the permanent seismic station “Severnaya Zemlya” for 2017/18 according to (Arctic and Antarctic ..., 2025). Period: early February (a); mid-July (b); early September (v). Ice conditions: 1 – open water, 2 – nilas, 3 – young ice, 4 – first-year ice. Ice concentration: 5 – 1/10–6/10, 6 – 7/10–10/10, 7 – fast ice. Triangle – seismic station location

подборка для ледовой обстановки и трёх ключевых моментов динамики морского льда – середины зимы, середины лета и осени (переходный период). Сравнение карт показывает, что в феврале и сентябре ледовая ситуация в проливе сравнительно стабильная, но она существенно различается в феврале, когда пролив скован льдом, и в сентябре, когда здесь чистая вода. В июле состав и сплочённость льдов в разные годы меняются (Арктический и антарктический..., 2025). Таким образом, для понимания закономерностей связи микроимпульсов с ледовой обстановкой основной акцент будет сделан на анализ данных февраля и сентября, т.е. для периода сплошного ледяного покрова и периода чистой воды перед началом становления льда.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основании оценки поляризации количество микроимпульсов, представленных объёмными волнами, N (шт./сутки) для всего интервала наблюдений (около 7 лет) сравнивалось с различными параметрами, характеризующими экзогенные воздействия: вариациями температуры воздуха, атмосферного давления, скорости и силы ветра (Арктический и антарктический научно-исследовательский институт..., 2025). Наиболее яркую картину корреляции параметров экзогенного воздействия и микроимпульсов даёт сравнение с ходом температуры воздуха (рис. 3), выполнено сглаживание скользящим средним по 10 дням. Практически для всех годов наблюдается резкий всплеск количества микроимпульсов через 1.5–2 месяца непрерывной фиксации положительного значения температуры воздуха.

Анализ годового хода количества импульсов N показывает, что в летне-осенний период (с середины июля до середины сентября) их существенно больше, чем в зимний, причём N увеличивается с уменьшением температуры (см. рис. 3). Во временном ходе параметров видна цикличность, поэтому каждый год, исходя из значений температуры, был условно разделён на четыре сезона. Для весеннего периода температурный диапазон был взят от -5 до -1 °С, для осеннего – от 1 до -5 °С, для зимнего и летнего периодов – интервалы температур между весной и осенью. Отмечено, что эти сезоны, которые будут использоваться ниже, не совпадают с обычными календарными временами года.

Отмеченная цикличность позволяет применять приём наложения эпох для полноценных лет наблюдений за выделенные условные сезоны (рис. 4), который показывает удивительное подобие двух групп: 2017, 2020 и 2023 гг. и 2018/19 г. В 2018/19 г. количество микроимпульсов в день в летний период меньше, чем в другие годы, но оно восполняется повышенным значением осенью. Полученный результат согласуется с ледовой ситуацией на акватории, см. обзорные ледовые карты (Арктический и антарктический..., 2025), и позволяет предположить, что происхождение большинства регистрируемых микроимпульсов связано с ледовыми процессами на акваториях, а не на ледниках. Сравнение полученных закономерностей (см. рис. 3) с картами ледовой обстановки (см. рис. 2), а также с другими обзорными ледовыми картами согласно (Арктический и антарктический..., 2025), показывает следующее: в зимний сезон, когда пролив Шокальского и озёра скованы льдом, количество микроим-

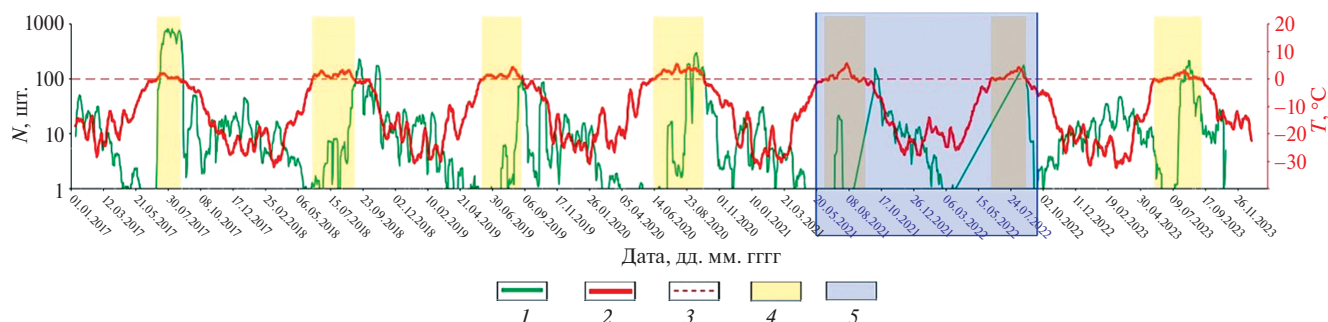


Рис. 3. Временные изменения количества импульсов (N) и температуры (T), произведено сглаживание 10-дневным скользящим средним: 1 – количество импульсов; 2 – температура; 3 – отметка нулевой температуры; 4 – промежутки, когда температура имела положительные значения $T > 0$; 5 – промежуток, когда станция практически не функционировала

Fig. 3. Time variations in the number of pulses (N) and temperature (T) were smoothed using a 10-day moving average: 1 – the number of pulses; 2 – temperature; 3 – zero temperature mark; 4 – intervals when the temperature had positive values $T > 0$; 5 – the interval when the station was practically not functioning

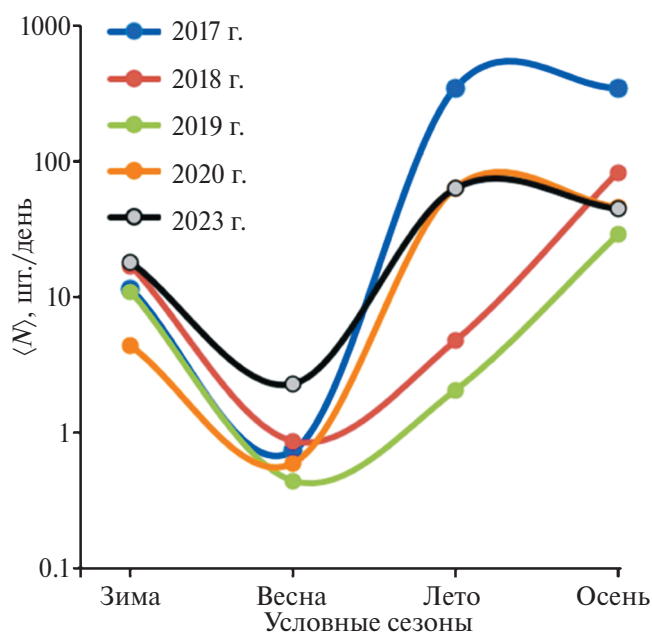


Рис. 4. Средние за условно разделенные сезоны значения количества импульсов в день для пяти полноценных лет наблюдений

Fig. 4. The number of pulses per day average values for five full-fledged years of observations over conditionally divided seasons

пульсов практически постоянное из года в год; в кратковременный весенний сезон количество микроимпульсов минимально из года в год. Малое число импульсов, скорее всего, объясняется переходными процессами, протекающими во льду, изменением свойств льда и незначи-

тельным перепадом температур; в летний сезон разнообразие форм взаимодействия льда, воды и берега суммарно даёт большее количество микроимпульсов; в осенний сезон начинаются процессы становления льда, что напрямую связано с такими экзогенными факторами, как температура и ветер.

Для проработки вопроса происхождения микроимпульсов проанализированы диаграммы азимутального распределения их количества, используя вычисленные значения азимутов на источник. На рис. 5 приведены диаграммы азимутов на источники микроимпульсов для февраля и сентября – наиболее показательных месяцев для всех лет мониторинга за исключением периодов, когда станция по техническим причинам не работала. Величина лепестка диаграммы пропорциональна количеству микроимпульсов в день, обнаруженных программой, и указывает на источник, но не соответствует расстоянию до него. Напомним, что по одной станции и при отсутствии локального годографа определить точное местоположение источника не представляется возможным, можно только определить направление, откуда приходит волна. Тем не менее в зимний сезон источниками микроимпульсов служат не только изменения свойств припайного (морского) льда, но и озёрного – лепестки диаграммы достаточно чётко указывают на близлежащие озёра (см. карту на рис. 5). Возможно также, что имеет место

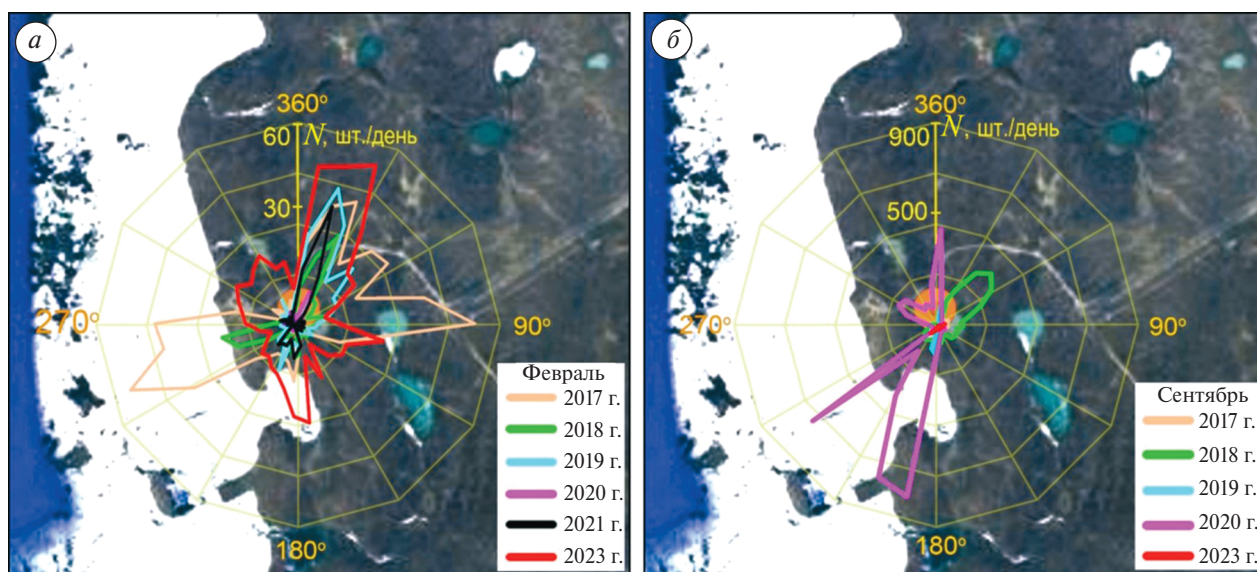


Рис. 5. Диаграммы азимутов на источники микроимпульсов для февраля (а) и сентября (б) для всех лет мониторинга, нанесенные на космоснимок из Google Earth Pro

Fig. 5. Azimuth diagrams for micro-pulse sources for February (a) and September (b) for all monitoring years, plotted on a satellite image from Google Earth Pro

проявление эндогенных процессов (в виде микроимпульсов), связанных с активностью зон трещиноватости (локальными разрывными нарушениями). В данном предположении, в связи с отсутствием детальной геолого-тектонической информации, авторы опираются на свой опыт, например (Юдахин и др., 2008; Karustian et al., 2022).

В сентябре (период чистой воды) практически за все годы мониторинга наблюдается сокращение количества микроимпульсов, связанных с береговыми и озёрными локациями, и лепестки диаграмм указывают на сушу. Возможно, что источником этих микроимпульсов служат локальные разрывные нарушения, зоны трещиноватости, которые в отсутствие снежного покрова больше реагируют на экзогенные факторы (Юдахин и др., 2008; Karustian et al., 2022). Исключение составляет ситуация в 2020 г., что требует отдельной детальной проработки и не анализируется в данной работе.

Рассмотрен такой метеопараметр, как направление ветра и его связь с преобладающим направлением на источники микроимпульсов на основе данных 2017 г. На рис. 6 приведены диаграммы среднего значения направления ветра (WD_{cp}) в сравнении с распределением количества микроимпульсов за разные месяцы 2017 г. В зимние календарные месяцы преобладает ветер с акватории, при этом наблюдается хорошая корреляция с преобладающим количеством микроимпульсов, источником которых служат процессы, происходящие в припае. Отмечено, что азимут таких микроимпульсов несколько смещён влево от направления ветра (см. рис. 6, б), возможно, это связано с ландшафтными особенностями — изгибом береговой линии, высотой берега (в среднем 30 м) и его блочной структурой (см. рис. 1, б).

Согласно рис. 6в, в июле и августе происходят активные процессы вскрытия ледяного покрова, наблюдается уменьшение сплочённости льда и полностью свободная от снега береговая линия. В июле 2017 г. преобладающее количество микроимпульсов происходит в небольшой бухте (см. рис. 1, б; рис. 6, а), что из-за её формы и узкого горла, а также направления ветра, не позволяет акватории быстро освободиться ото льда. В августе ветер меняет направление, воздействию льдин подвергается другой участок береговой линии, и наблюдается достаточно резкая смена преобладающего количества микро-

импульсов (см. рис. 6, в). Мы предполагаем, что, помимо ледовой природы, экзогенные процессы (большой частью направление и сила ветра) активизируют микроимпульсы, связанные с трещиноватостью пород побережья.

В сентябре—ноябре чаще дуют восточные, юго-восточные и южные ветры. Количество микроимпульсов в этот период сокращается. Азимут начинает варьировать в диапазоне от 10° до 60° и указывает на источник, находящийся на суше (см. рис. 6, г). Согласно карте (см. рис. 6, а), в этом секторе присутствует изгиб реки. Реки, как известно, текут по вытянутым понижениям рельефа, обычно частично или полностью совпадающим с тектоническими разломами. Гипотеза присутствия здесь разрывных нарушений требует подтверждения путём проведения инструментальных работ, например, с применением комплекса пассивных сейсмических методов (Danilov et al., 2025).

По литературным данным, океанические приливы оказывают влияние на уровень микросейсм и сейсмичность в целом (Богомолов, 2011; Shebalin, Baranov, 2020), а также на напряжённо-деформированное состояние припая (Степанюк, Смирнов, 2001). С таким видом деформаций в основном связаны приливные трещины, формирующиеся на границе между собственно припаем и подошвой припая. Из-за отсутствия у нас информации о фазах приливов для района работ предпринята попытка проанализировать влияние данного параметра на временной ход количества микроимпульсов следующим образом. Оценка роли приливов проводилась по вариациям количества микроимпульсов в течение суток, происходящих в диапазоне азимутов от 140° до 360° , т.е. максимально связанных с акваторией. Известно, что между полным и малым приливом (или отливом) проходит примерно 6 часов. Мы взяли эту длительность за временной шаг и для четырёх временных интервалов в течение суток (0–6, 6–12, 12–18 и 18–24 час.) был проведён подсчёт количества микроимпульсов в течение 2017 г. (рис. 7). Результат представлен для календарных месяцев, так как выделенные сезоны изменяются из года в год. Это оценочный результат, тем не менее он важен для понимания общей природы наблюдаемых микроимпульсов.

Распределение по временным интервалам выполнено следующим образом: зимние месяцы — декабрь—март, весенние — апрель—май, летние — июнь—август, осенние — сентябрь—ноябрь.

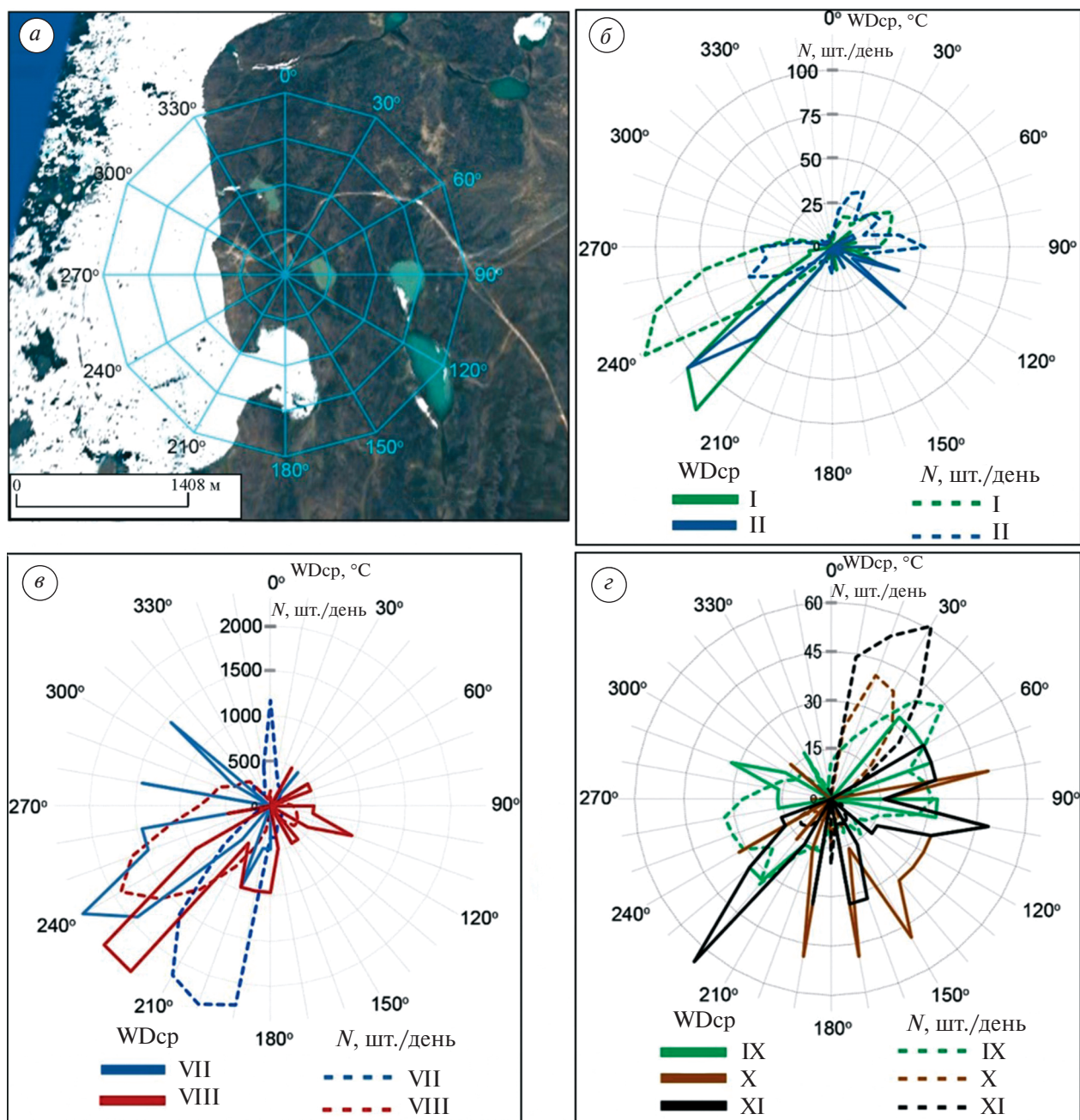


Рис. 6. Сопоставление преобладающего среднего значения направления ветра ($WD_{ср}$, сплошная линия) с распределением количества импульсов (пунктирная линия) в различные месяцы 2017 г.: карта района исследования с нанесённой градусной сеткой (а); сравнение месяцев: январь и февраль (б); июль и август (в); сентябрь, октябрь и ноябрь (г). На оси диаграммы показано количество импульсов в день

Fig. 6. Comparison of the prevailing average wind direction (WD_{sr} , solid line) with the distribution of the number of pulses (dotted line) in various months of 2017: a study area map with a degree grid (a); comparison of months: January and February (б); July and August (в); September, October and November (г). The axis shows the number of pulses per day

Сравнение суточных вариаций суммарного количества импульсов по интервалам показывает, что полусуточные вариации от минимальных значений до максимальных, т.е. действие приливов, отчётливо проявляются летом и осенью при открытой воде. Припайный лёд

в зимне-весенний период, когда пролив полностью скован льдом, практически “не отзывается” на приливы, т.е. приливные деформации 10^{-8} – 10^{-9} (Капустян, Юдахин, 2007) не влияют на напряжённо-деформированное состояние льда.

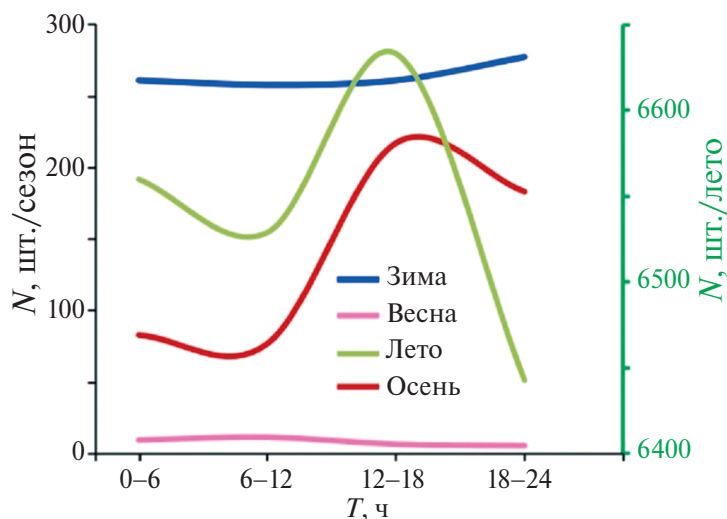


Рис. 7. Распределение количества импульсов, произошедших в диапазоне азимутов от 140° до 360° за 2017 г.
Fig. 7. Distribution of the number of pulses occurring in the azimuth range from 140° to 360° for 2017

ОБСУЖДЕНИЕ

Параметры сейсмических микроимпульсов сопоставлялись с экзогенными факторами: ледовой обстановкой, изменениями во времени температуры воздуха и направления ветра, действием приливов. В результате выявлено, что основные экзогенные факторы, влияющие на возникновение цугов микроимпульсов, регистрируемых станцией “Северная Земля” (SVZ), установленной на побережье пролива Шокальского, — это вариации температуры и направление ветра. По существу, во временном ходе параметров микроимпульсов наблюдается годовая цикличность, при этом можно выделить два условных сезона относительно устойчивого проявления микроимпульсов — зима и лето, и переходные сезоны — весна и осень. Отмеченная сезонность не совпадает с общепринятыми календарными интервалами, так как определяется устойчивыми значениями температуры воздуха. Для весны температурный диапазон от -5 до -1 °С, для осени — от 1 до -5 °С, для зимы и лета — временные интервалы между весной и осенью. Наиболее стабильным по состоянию ледяного покрова по картам ААНИИ (Арктический и антарктический..., 2025) — февраль и сентябрь, для февраля присущ припайный лёд, для сентября — открытая вода. Анализ сейсмических данных для сезонов зима и лето—осень отображает основные типы ледовой ситуации и является обучающим массивом данных для автоматизированной методики слежения за ледовой обстановкой.

Результаты применения автоматизированного алгоритма таковы:

1) разделение микроимпульсов по типам волн (объёмные, поверхностные) с использованием оценки поляризации позволяет отсеять основную часть приповерхностных шумов и принять объёмные волны как основу интерпретации;

2) параметр N (количество сейсмических микроимпульсов в день) не всегда однозначно соответствует состоянию ледяного покрова. Этот параметр меняется в зависимости от времени года и экзогенных факторов и отличается в разные годы. Всё это свидетельствует о чувствительности параметра к ряду факторов, что даёт возможность подобрать ситуацию, когда можно его использовать для характеристики состояния ледяного покрова. Наименьшие вариации N за анализируемые годы наблюдаются в весенний период, наибольшие — в летне-осенний;

3) влияние морских приливов отображается в суточных вариациях N в выделенных условных сезонах лето и осень, но практически не прослеживается в зимний и весенний периоды, т.е. при ледяном покрове. Это указывает на то, что импульсы генерируются при действии прибоя у берега, а не в толще льда;

4) отмеченная вариативность параметра N определяется суперпозицией причин генерации импульсов, что показывает построение поляризационных диаграмм направленности, которые имеют не только основные, но и боковые лепестки;

5) сравнение диаграмм (поляризационных для N и направления ветра) показывает, что при достаточно однородных свойствах морской акватории (открытая вода или установившийся припай) эти диаграммы достаточно хорошо совпадают. Основные лепестки диаграмм направленности указывают на пролив Шокальского, где на формирование сейсмических микроимпульсов также могут оказывать влияние микроподвижки в горных породах, вызванные экзогенными воздействиями. При смене сезонов диаграммы имеют много лепестков, причём для сейсмических микроимпульсов источники могут находиться как в проливе, так и на суше. В межсезонье одной из причин проявления микроимпульсов служит раздробленность льда (морского и озёрного).

На основании полученных данных можно охарактеризовать процесс генерации сейсмических микроимпульсов следующим образом. В зимний сезон при температуре ниже -15°C регистрируются достаточно интенсивные отдельные импульсы с чёткими вступлениями. В весенний сезон наблюдается наименьшее количество микроимпульсов, слабая зависимость от температуры и ветровых вариаций. В летний сезон количество микроимпульсов за сезон в разные годы может существенно различаться, что следует объяснить ледовой обстановкой, которая тоже изменчива от года к году. В осенний сезон при понижении температуры наблюдается “затухание” количества событий со временем. Связи со сменой температуры не наблюдается, что объясняется в том числе относительно “чистой водой” в проливе. В микросейсмах доминируют воздействия прибойных явлений.

Анализ диаграмм направленности за разные месяцы показывает существенную приуроченность микроимпульсов к акваториям и береговой линии. Учитывая относительно высокий частотный состав микроимпульсов, отсутствие вблизи станции ледовых куполов, выявленные сезонные особенности и формы рельефа берега, можно предположить, что основные вариации параметров микроимпульсов связаны с морскими льдами (припайными процессами), и в меньшей степени с озёрными льдами. Связь источников колебаний с особенностями рельефа берегов отмечалась в литературе и ранее при изучении ледяного покрова акваторий (Moreau et al., 2023).





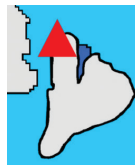















Высокая производительность автоматического обнаружения, классификация на сейсми-

ческих записях микроимпульсов по типам волн (использование поляризации) и непрерывные сейсмологические наблюдения в совокупности с полученными выше результатами связи с экзогенными факторами позволили предложить новую возможность для криосейсмологического мониторинга. Задача таких работ – получить дополнительные данные о механических свойствах, характеризующих состояние ледяного морского покрова в радиусе до 5 км на основании обработки сейсмологических данных, выполняемых в фоновом режиме при стандартных сейсмологических наблюдениях на арктических островах.

Объект такого криосейсмологического мониторинга – свойства ледяного покрова при его становлении (обозначим как процесс А), при образовании припая (процесс В) и его устойчивом состоянии до весенней деградации (процесс С). Выбраны эти три стадии по ряду причин: во-первых, они наиболее чётко отслеживаются по картам ледовой обстановки (Арктический и антарктический..., 2025) и, во-вторых, на практике эти интервалы важны для проводки судов или использования припая для размещения грузов.

В табл. 1 приведены карты и основные параметры для выбранных временных интервалов. Рассмотрены четыре зимних периода (I–IV) полноценных наблюдений за 2017/18, 2018/19, 2019/20 и 2020/21 гг., по которым оценивалась статистика количества микроимпульсов для каждого временного интервала. Разделение данных по времени проводилось на основании карт, которые в среднем составляют раз в неделю (Арктический и антарктический..., 2025). Для оценки чувствительности методики подобраны моменты времени, между которыми ситуация может кардинально меняться, например, интервал IV-A (становление льда в зимний период 2020 г., начиная с появления отдельных льдин) соответствует процессам между ситуациями на картах 27.10.2020 и 15.12.2020, а интервал IV-AA (становление льда, начиная с чистой воды) – 6.10.2020 и 15.12.2020. Для построения гистограмм количества событий и связи с температурой воздуха подбирался интервал для подсчёта количества импульсов при изменении температур, для чего рассчитывалась гистограмма температур (рис. 8). Согласно распределению, интервал температур в 3°C (медианное значение \pm стандартное отклонение) даст информативную оценку количества импульсов, зарегистрированных при этом интервале температур.

Таблица 1. Зависимость количества импульсов от состояния ледяного покрова**Table 1.** Dependence of the number of pulses on the ice cover state

Интервал, годы	Процесс/параметр	Начало процесса – чистая вода	Становление – молодой лед	Формирование припая	Стабильное состояние припая
2017/18	Карты/дата	26.09.2017 	17.10.2017 	5.12.2017 	29.05.2018 
	Обозначение интервала	I-A		I-B	I-C
	Длительность процесса, дни		22	50	175
	Среднее кол-во импульсов в день		0.83	1.36	0.76
2018/19	Карты/дата	23.10.2018 	6.11.2018 	22.01.2019 	30.04.19 
	Обозначение интервала	II-A		II-B	II-C
	Длительность, дни		14	76	99
	Среднее кол-во импульсов в день		4.54	1.57	0.67
2019/20	Карты/дата	01.10.2019 	05.11.2019 	03.12.2019 	25.02.2020 
	Обозначение интервала	III-A		III-B	III-C
	Длительность процесса, дни		35	28	84
	Среднее кол-во импульсов в день		3.38	1.42	0.67
2020/21	Карты/дата	27.10.2020 	15.12.2020 	30.03.2021 	04.05.2021 
	Обозначение интервала	IV-A		IV-B	IV-C
	Длительность процесса, дни		50	105	35
	Среднее кол-во импульсов в день		0.52	0.79	0.26
2020/21	Карты/дата	06.10.2020 	15.12.2020 	30.03.2021 	04.05.2021 
	Обозначение интервала	IV-AA		IV-B	IV-C
	Длительность процесса, дни		71	105	35

Примечание: Легенду для карт см. на рис. 2.

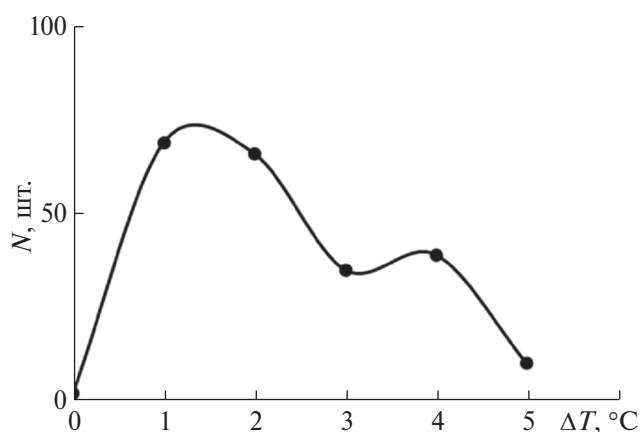


Рис. 8. Распределение величин изменений температуры воздуха за сутки

Fig. 8. Distribution of the values of air temperature changes per day

С учётом хорошо известного в механике деформируемых сред факта связи количества микроимпульсов с параметрами напряжённо-деформированного состояния, мы попытались связать количество микроимпульсов с механическими свойствами ледяного покрова, который, как известно, зависит от температуры (Доронин, Хейсин, 1975). На рис. 9 приведены для каждого временного интервала распределения количества импульсов в день в зависимости от температуры. Нормировка графиков при интервале в один день необходима для их сопоставления, так как длительности периодов различны (см. табл. 1).

Сравнение кривых на рис. 9 показывает следующее. При становлении льда (процесс А) максимальное количество импульсов приходится на малые значения отрицательных температур (единицы градусов, до -20°C), причём при незначительных отрицательных температурах импульсов может быть существенно больше, чем в другие периоды. Согласно диаграммам направленности, это может быть связано со столкновением кусков молодого льда между собой и с берегом (см. рис. 5–6). Образование припая (процесс В) приводит к уменьшению количества импульсов, они происходят в основном в диапазоне от -20 до -30°C , иногда от -10°C (сезон I). Согласно диаграммам направленности N , это может указывать на взаимодействие льда как с морским берегом, так и на более раннее по времени становление льда на озёрах. Состояние устойчивого припая (процесс С) даёт максимум импульсов в интервале температур от -25 до -30°C , и это может характеризовать крепкую спаянность льда. Этот вывод, конечно, требует лабораторных подтверждений.

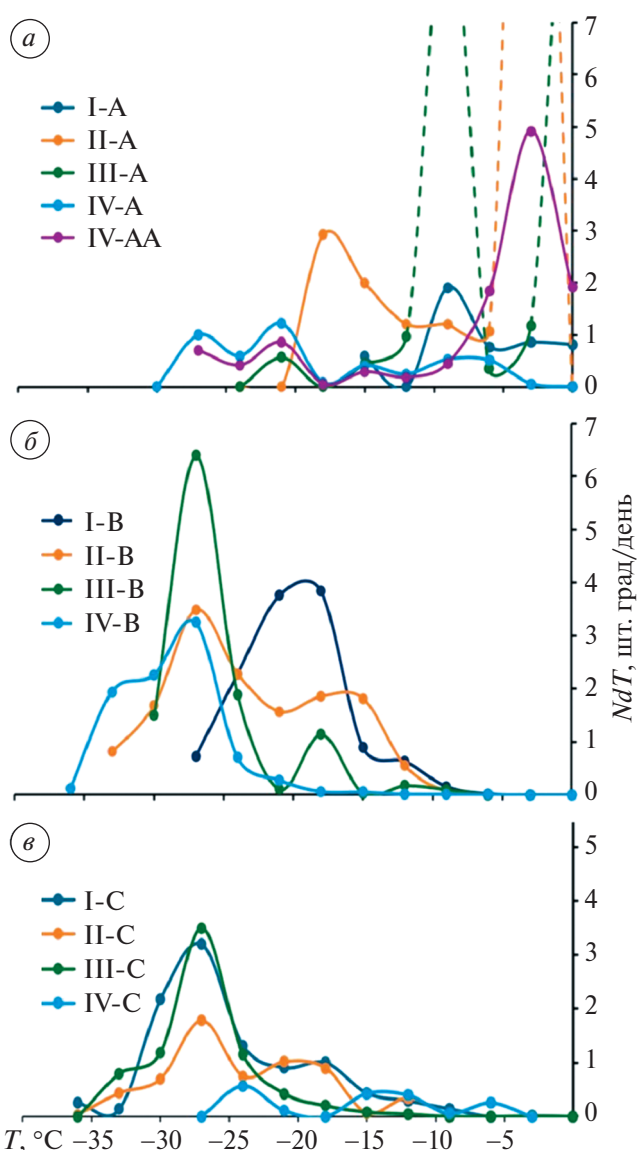


Рис. 9. Зависимость количества импульсов в сутки, наблюдаемых при изменении температуры на 3°C , от температуры воздуха для трёх процессов А (а), В (б), С (в) и четырёх сезонов наблюдения (I–IV) за 2017–2021 гг. в соответствии с табл. 1

Fig. 9. The dependence of the number of pulses per day observed with a temperature change of 3°C on the air temperature for three processes A (a), B (б), C (в) and four observation seasons (I–IV) for 2017–2021 in accordance with Table 1

Сопоставление графиков для интервалов образования припая, начиная с чистой воды (см. табл. 1, IV-AA) и возникновения отдельных льдин (см. табл. 1, IV-A), показывает чувствительность рассмотренного выше подхода. При образовании льдин на соответствующей кривой IV-AA (см. рис. 9, а) появляется чёткий максимум на низких температурах.

Анализ совокупности данных и отмеченные выше особенности допускают следующее объяснение природы микроимпульсов. В соответствии с результатами детального изучения ледяного покрова (Доронин, Хейсин, 1975), для морского льда характерно образование термических трещин вследствие изменения его физических свойств, образующихся при понижении температуры либо при исчезновении снежного покрова в условиях низких температур. Возникновение трещин в кристаллической решётке льда происходит в процессе его пластической деформации и определяется дислокационным механизмом. Для пресного льда это явление очень подробно исследовалось Л.У. Голдом (Gold, 1963). Согласно (Доронин, Хейсин, 1975), основные закономерности – общие и для морских, и для пресных льдов, однако у морского льда процессы образования и распространения трещин более чувствительны к температуре. Это связано с наличием жидкой фазы и возможностью фазовых переходов внутри структуры льда. При неизменной температуре чувствительность морского льда к трещинам определяется его солёностью.

Возникновение наиболее опасных открытых трещин, проходящих сквозь всю толщу льда, в основном связано с воздействием ветра и приливных течений (Доронин, Хейсин, 1975). Приливные трещины характерны для берегового припая и проходят примерно параллельно берегу (см. рис. 1, б). Ветер и волнение вызывают трещины в дрейфующих ледяных полях и у границы припайных льдов. Локальные нарушения сплошности припая (трещины и торосы) вызваны локальными подвижками либо термическим расширением или сжатием ледяных полей (Доронин, Хейсин, 1975).

Тем не менее, согласно полученным азимутальным распределениям (см. рис. 5–6), ряд лепестков диаграмм направленности указывают не на расположенные вблизи станции озёра, а направлены между ними. Чаще подобный эффект наблюдается в выделенные летние и осенние сезоны. С учётом погрешности оценки азимутального направления (примерно 10°) и опыта (Капустян, Юдахин, 2007; Юдахин и др., 2008, Kapustian et al., 2022) предположено, что природа микроимпульсов может быть связана с активизацией зон трещиноватости в многометровой толще мёрзлых пород. Для детализации природы микроимпульсов необходимо большее количество сейсмических станций, а также проведение детальных геофизических исследований по изу-

чению строения района размещения сейсмической станции, как, например, это было сделано в (Danilov et al., 2025).

ВЫВОДЫ

Выявлена связь экзогенных факторов с количеством регистрируемых микроимпульсов одиночной сейсмической станцией “Северная Земля” (SVZ), установленной на побережье пролива Шокальского на территории научно-исследовательского стационара “Ледовая база “Мыс Баранова”. Показано, что их природа в большей степени обусловлена динамикой процессов взаимодействия в системе атмосфера–гидросфера–литосфера, в том числе связанных с припаем преимущественно вблизи побережья в радиусе до 5 км.

Информация о трещинах при прогнозе основных линий взлома припая в летний период, особенно в зонах функционирования разведочных буровых установок на шельфе, является не только актуальным, но и недостаточно изученным вопросом. Исследования показали, что даже по данным одиночной сейсмической станции имеется возможность вести мониторинг нарушения сплошности ледяного покрова. При этом процесс можно автоматизировать и осуществлять передачу обработанных данных онлайн. Такая информация может служить дополнительным и независимым параметром при мониторинге ледовой обстановки.

Благодарности. Исследования выполнены в рамках государственных заданий Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаврова Уральского отделения Российской академии наук (№ 125021702395-9) и для Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (FMWU-2025-0047).

Выражаем глубокую благодарность Н.Ю. Афонину за помощь в реализации алгоритма автоматической обработки данных.

Acknowledgement. The studies were carried out under state assignments from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (No. 125021702395-9) and for Schmidt

Institute of the Physics of the Earth Russian Academy of Sciences (FMWU-2025-0047).

We would like to express our deep gratitude to N.Yu. Afonin for his help in implementing the automatic data processing algorithm.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акимов А.П., Красилов С.А.* Программный комплекс WSG “Система обработки сейсмических данных”. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664678 от 16.11.2020.
- Антоновская Г.Н., Ковалев С.М., Конечная Я.В., Смирнов В.Н., Данилов А.В.* Новые сведения о сейсмичности российской Арктики по данным пункта сейсмических наблюдений “Северная Земля” // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Т. 64. № 2 (116). С. 170–181.
<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2018-64-2-170-181>
- Арктический и антарктический научно-исследовательский институт // Электронный ресурс. URL: <https://aari.ru/>; <https://www.aari.ru/data/climate> (Дата обращения 05.07.2025).
- Богомолов Л.М.* От исследований штормовых микросейсм к анализу сейсмо-ионосферных эффектов // Вестник Дальневосточного отделения РАН. 2011. № 6. С. 27–33.
- Ветер Свободы // Электронный ресурс. URL: <https://veter-s.ru/product/hatanga-severnaja-zemlja/> (Дата обращения 05.07.2025).
- Доронин Ю.П., Хейсин Д.Е.* Морской лёд. Ленинград: Гидрометеиздат, 1975. 320 с.
- Егизаров Б.Х., Воскресенский С.В.* Геологическое строение острова Большевик (Северная Земля) // Труды НИИ геологии Арктики Главсевморпути при Совете министров СССР. Т. XXV. Л.–М.: Изд-во Главсевморпуть, 1951. 80 с.
- Капустян Н.К., Юдахин Ф.Н.* Сейсмические исследования техногенных воздействий на земную кору и их последствий. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 416 с.
- Козлов Д.В., Соломатин С.В.* Развитие методов расчета ледовой нагрузки на морские гидротехнические сооружения в условиях устойчивого припая // Природообустройство. 2023. № 3. С. 72–84.
<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-3-72-84>
- Преснов Д.А., Собисевич А.Л., Шуруп А.С.* Определение параметров ледового покрова с помощью сейсмоакустического шума // Акустический журнал. 2023. Т. 69. № 5. С. 637–651.
<https://doi.org/10.31857/S0320791923600385>
- Степанюк И.А., Смирнов В.Н.* Методы измерений характеристик динамики ледяного покрова. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 2001. 136 с.
- Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Шахова Е.В.* Исследования активности платформенных территорий с использованием микросейсм. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 129 с.
- Anderson D.* Preliminary results and review of sea ice elasticity and related studies // Transactions of the Engineering Institute of Canada. 1958. № 2. P. 2–8.
- Antonovskaya G.N., Kapustian N.K., Konechnaya Y.V., Morozova E.R.* Glacial and seismic events investigation from a single-station record at Severnaya Zemlya archipelago (Arctic region) // Journal of Seismology. 2024. № 28. P. 615–633.
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2931088/v1>
- Crary A.P.* Seismic studies on Fletcher’s Ice Island // V. 3. Eos, Transactions American Geophysical Union. 1954. № 35. P. 293–300.
<https://doi.org/10.1029/TR035i002p00293>
- Danilov K.B., Antonovskaya G.N., Basakina I.M., Shakhova E.V., Kapustian N.K.* Passive Seismic Investigation of Intraplate Earthquakes Epicentral Zones in the North of Russia as One of the Ways to Understand Their Source Mechanics // Journ. of Earth Science. 2025. № 36 (2). P. 764–780.
<https://doi.org/10.1007/s12583-024-0053-9>
- Deichmann N., Ansorge J., Scherbaum F., Aschwanden A., Bernardi F., Gudmundsson G.H.* Evidence for deep icequakes in an Alpine glacier // Annals of Glaciology. 2000. V. 31. № 1. P. 85–90.
<https://doi.org/10.3189/172756400781820462>
- Flinn E.A.* Signal analysis using rectilinearity and direction of particle motion // Proc. of the IEEE. 1965. № 53 (12). P. 1874–1876.
- Galluzzo D., Nardone L., La Rocca M., Esposito A.M., Manzo R., Di Maio R.* Statistical moments of power spectrum: A fast tool for the classification of seismic events recorded on volcanoes // Advances in Geosciences. 2020. № 52. P. 67–74.
- Gold L.W.* Deformation mechanisms in ice // Research paper № 193 of the Division of Building Research. 1963.
<https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/ft/?id=692848af-721c-4537-82a5-710659a82e40>
- Hunkins K.* Seismic studies of sea ice // Journ. Geophys. Res. 1960. № 65. P. 3459–3472.
- Jurkevics A.* Polarization analysis of three-component array data // Bulletin of the seismological society of America. 1988. № 78 (5). P. 1725–1743.
- Kapustian N.K., Shakhova E.V., Antonovskaya G.N.* New Opportunities for Epicentral Seismic Observations // Seismic Instruments. 2022. № 58 (6). P. 732–742.
<https://doi.org/10.3103/S0747923922060068>
- Köhler A., Maupin V., Nuth C., Van Pelt W.* Characterization of seasonal glacial seismicity from a single-station on-ice record at Høltedahlfonna, Svalbard // Annals of Glaciology. 2019. № 60 (79).
<https://doi.org/10.1017/aog.2019.15>
- Kramer S.L., Stewart J.P.* Geotechnical earthquake engineering. 2nd Edition. CRC Press. 2024.
<https://doi.org/10.1201/9781003512011>

- Marsan D., Weiss J., Larose E., Métaixian J.-P. Sea-ice thickness measurement based on the dispersion of ice swell // *Journ. of the Acoustic Society of America*. 2012. № 131. P. 80–91.
- Moreau L., Boué P., Serripierri A., Weiss J., Hollis D., Pondaven I., Vial B., Garambois S., Larose É., Helmstetter A., Stehly L., Hillers G., Gilbert O. Sea ice thickness and elastic properties from the analysis of multimodal guided wave propagation measured with a passive seismic array // *Journ. of Geophys. Research. Oceans*. 2020a. № 125. e2019JC015709. <https://doi.org/10.1029/2019JC015709>
- Moreau L., Weiss J., Marsan D. Accurate estimations of sea-ice thickness and elastic properties from seismic noise recorded with a minimal number of geophones: from thin landfast ice to thick pack ice // *Journ. of Geophys. Research. Oceans*. 2020b. № 125. e2020JC016492. <https://doi.org/10.1029/2020JC016492>
- Moreau L., Seydoux L., Weiss J., Campillo M. Analysis of microseismicity in sea ice with deep learning and Bayesian inference: application to high-resolution thickness monitoring // *The Cryosphere*. 2023. № 17. P. 1327–1341. <https://doi.org/10.5194/tc-17-1327-2023>
- O’Neil S., Pfeffer W.T. Source mechanics for monochromatic icequakes produced during iceberg calving at Columbia Glacier, AK // *Geophys. Research Letters*. 2007. № 34. L22502/. <https://doi.org/10.1029/2007GL031370>
- Romeyn R., Hanssen A., Ruud B.O., Johansen T.A. Sea ice thickness from air-coupled flexural waves // *The Cryosphere*. 2021. № 15. P. 2939–2955. <https://doi.org/10.5194/tc-15-2939-2021>
- Serripierri A., Moreau L., Boué P., Weiss J., Roux P. Recovering and monitoring the thickness, density, and elastic properties of sea ice from seismic noise recorded in Svalbard // *The Cryosphere*. 2022. № 16. P. 2527–2543. <https://doi.org/10.5194/tc-16-2527-2022>
- Shebalin P.N., Baranov A.A. Aftershock Rate Changes at Different Ocean Tide Heights // *Front. Earth Sci.* 2020. № 8. 559624 p. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.559624>
- Smirnov V.G., Bychenkov Ju.D., Priamikov S.M., Shcherbakov Ju.A. The use of satellite information for ice navigation support // *Proc.15th Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC’99)*, Helsinki, August 23–27, 1999. V. 1. P. 154–165.
- Stein P.J., Euerle S.E., Parinella J.C. Inversion of pack ice elastic wave data to obtain ice physical properties // *Journ. of Geophys. Research. Oceans*. 1998. № 103. P. 21783–21793.
- Trnkoczy A. Understanding and parameter setting of STA/LTA trigger algorithm. In *New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2)*. Edited by P. Bormann. Deutsches Geo Forschungs Zentrum GFZ, Potsdam. 2012. № 1–20. https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_IS_8.1
- Turova A.P., Morozova E.R. The contribution of the seismic station “Severnaya Zemlya” to the study of arctic seismicity // *Arctic Environmental Research*. 2019. № 19 (4). P. 139–145. <https://doi.org/10.3897/issn2541-8416.2019.19.4.139>
- Yang T., Giellis G. Experimental characterization of elastic waves in a floating ice sheet // *Journ. of Acoustic Society of America*. 1994. № 96. P. 2993–3009.

Citation: Antonovskaya G.N., Konechnaya Ya.V., Kapustian N.K., Shakhova E.V., Morozova E.R. Influence of Exogenous Factors on Micro-Pulse Parameters at Arctic Coastal Seismic Station and Their Relation to Ice Conditions. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2026, 66 (2): 348–364. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376526020094

Influence of Exogenous Factors on Micro-Pulse Parameters at Arctic Coastal Seismic Station and Their Relation to Ice Conditions

© 2026 G. N. Antonovskaya^{a,*}, Ya. V. Konechnaya^a, N. K. Kapustian^{a,b},
E. V. Shakhova^a, E. R. Morozova^a

^a*Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, Russia*

^b*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*e-mail: antonovskaya@fciarctic.ru

Received September 29, 2025; revised December 5, 2025; accepted March 23, 2026

The results of the long-term (2017–2023) monitoring of micro-pulses recorded by the Severnaya Zemlya seismic station (SVZ), installed near the coastline in the archipelago of the same name, Bolshevik Island, are presented. Micro-pulses are recordings of low-energy microseismic events and are characterized by a duration from 1 to 10–15 seconds with frequencies from several Hz to the first tens of Hz and the presence of only one arrival. In seismic recordings, they usually appear as clusters, the individual elements of which have

such common characteristics as frequency composition, duration, and polarization. To detect the signals from these events on the seismic record and classify them, an algorithm for automatic data processing has been developed that makes it possible to generate a representative list of events containing the arrival time, wave type, azimuth to the source and the central frequency. Based on this information, the relationship of exogenous factors (variations in air temperature, atmospheric pressure, wind speed and strength, and ice conditions) with the number of micro-pulses is analyzed. It is shown that their nature is largely determined by the dynamics of interaction processes in the atmosphere-hydrosphere-lithosphere system, including those related to coast ice and mainly near the coastline. Based on data on micro-pulses from the Shokalsky Strait, which occurred at distances of up to 5 km from the SVZ station, an assessment of the state of sea ice in winter was carried out. It was shown that the maximum number of micro-pulses is observed during the period of stable ice at low negative air temperatures – below -25°C . Information about micro-pulses, together with meteorological data and ice condition maps, can be used to assess the condition of the ice, which in turn is an important factor for ship navigation, cargo placement, etc.

Keywords: Severnaya Zemlya archipelago, coast ice, single seismic station, micro-pulses, seismic activity, monitoring, weather activity

REFERENCES

- Akimov A.P., Krasilov S.A.* The WSG software package “Seismic Data processing System”. Certificate of state registration of the computer program No. 2020664678 dated 11/16/2020. [In Russian].
- Antonovskaya G.N., Kovalev S.M., Konechnaya Ya.V., Smirnov V.N., Danilov A.V.* New information on the seismicity of the Russian Arctic according to the data of the Severnaya Zemlya seismic observation point. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of the Arctic and Antarctic. 2018, 64 (2 (116)): 170–181. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2018-64-2-170-181> [In Russian].
- Arctic and Antarctic Research Institute: official site. Retrieved from: URL: <https://aari.ru/>; <https://www.aari.ru/data/climate> (Last access: July 5, 2025). [In Russian].
- Bogomolov L.M.* From studies of storm microseisms to the analysis of seismic-ionospheric effects. *Vestnik DVO RAN*. Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. 2011, (6): 27–33. [In Russian].
- The Wind of Freedom: official site. Retrieved from: URL: <https://veter-s.ru/product/arhipelag-severna-ja-zemlja> (Last access: July 5, 2025). [In Russian].
- Doronin Yu.P., Heisin D.E.* *Morskoy lyod*. Sea ice. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1975: 320 p. (In Russian).
- Egizarov B.Kh., Voskresensky S.V.* The geological structure of Bolshevik Island (Severnaya Zemlya). *Trudy NII geologii Arktiki Glavsevmorputi pri Sovete ministrov SSSR*. Proceedings of the Research Institute of Arctic Geology of the Glavsevmorput under the Council of Ministers of the USSR. Vol. XXV. Leningrad–Moscow: Glavsevmorput, 1951: 80 p. [In Russian].
- Kapustyan N.K., Yudakhin F.N.* *Seismicheskie issledovaniya tekhnogennykh vozdeystvij na zemnyuyu koru i ih posledstvij*. Seismic studies of anthropogenic impacts on the Earth’s crust and their consequences. Yekaterinburg: Ural Branch of the RAS, 2007: 416 p. [In Russian].
- Kozlov D.V., Solomatina S.V.* Development of methods for calculating the ice load on marine hydraulic structures in conditions of coast ice stable. *Prirodoobustrojstvo*. Environmental management. 2023, 3: 72–84. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-3-72-84> [In Russian].
- Presnov D.A., Sobisevich A.L., Shurup A.S.* Determination of ice cover parameters using seismoacoustic noise. *Akusticheskij zhurnal*. Journ. of the Acoustic. 2023, 69 (5): 637–651. <https://doi.org/10.31857/S0320791923600385> [In Russian].
- Stepanyuk I.A., Smirnov V.N.* *Metody izmerenij harakteristik dinamiki ledyanogo pokrova*. Methods of measuring characteristics of ice cover dynamics. Saint Petersburg: Hydrometeoizdat, 2001: 136 p. [In Russian].
- Yudakhin F.N., Kapustyan N.K., Shakhova E.V.* *Issledovaniya aktivnosti platformnykh territorij s ispol'zovaniem mikrozejsm*. Studies of the activity of platform territories using microseisms. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2008: 129 p. [In Russian].
- Anderson D.* Preliminary results and review of sea ice elasticity and related studies. Transactions of the Engineering Institute of Canada. 1958, 2: 2–8.
- Antonovskaya G.N., Kapustyan N.K., Konechnaya Y.V., Morozova E.R.* Glacial and seismic events investigation from a single-station record at Severnaya Zemlya archipelago (Arctic region). *Journ. of Seismology*. 2024, 28: 615–633. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2931088/v1>
- Crary A.P.* Seismic studies on Fletcher’s Ice Island. V. 3. Eos, Transactions American Geophysical Union. 1954, 35: 293–300. <https://doi.org/10.1029/TR035i002p00293>
- Danilov K.B., Antonovskaya G.N., Basakina I.M., Shakhova E.V., Kapustyan N.K.* Passive Seismic Investigation of Intraplate Earthquakes Epicentral Zones in the North of Russia as One of the Ways to Under-

- stand Their Source Mechanics. *Journ. of Earth Science*. 2025, 36 (2): 764–780.
<https://doi.org/10.1007/s12583-024-0053-9>
- Deichmann N., Ansgor J., Scherbaum F., Aschwanden A., Bernardi F., Gudmundsson G.H. Evidence for deep icequakes in an Alpine glacier. *Annals of Glaciology*. 2000, 31 (1): 85–90.
<https://doi.org/10.3189/172756400781820462>
- Flinn E.A. Signal analysis using rectilinearity and direction of particle motion. *Proc. of the IEEE*. 1965, 53 (12): 1874–1876.
- Galluzzo D., Nardone L., La Rocca M., Esposito A.M., Manzo R., Di Maio R. Statistical moments of power spectrum: A fast tool for the classification of seismic events recorded on volcanoes. *Advances in Geosciences*. 2020, 52: 67–74.
- Gold L.W. Deformation mechanisms in ice. Research paper № 193 of the Division of Building Research, 1963.
<https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/ft/?id=692848af-721c-4537-82a5-710659a82e40>
- Hunkins K. Seismic studies of sea ice. *Journ. Geophys. Res.* 1960, 65: 3459–3472.
- Jurkevics A. Polarization analysis of three-component array data. *Bulletin of the seismological society of America*. 1988, 78 (5): 1725–1743.
- Kapustian N.K., Shakhova E.V., Antonovskaya G.N. New Opportunities for Epicentral Seismic Observations. *Seismic Instruments*. 2022, 58 (6): 732–742.
<https://doi.org/10.3103/S0747923922060068>
- Köhler A., Maupin V., Nuth C., Van Pelt W. Characterization of seasonal glacial seismicity from a single-station on-ice record at Holtedahlfonna, Svalbard. *Annals of Glaciology*, 2019: 60 (79).
<https://doi.org/10.1017/aog.2019.15>
- Kramer S.L., Stewart J.P. *Geotechnical earthquake engineering*. 2nd Edition. CRC Press. 2024.
<https://doi.org/10.1201/9781003512011>
- Marsan D., Weiss J., Larose E., Métaixian J.-P. Sea-ice thickness measurement based on the dispersion of ice swell. *Journ. of Acoustic Society of America*. 2012, 131: 80–91.
- Moreau L., Boué P., Serrapierrri A., Weiss J., Hollis D., Pondaven I., Vial B., Garambois S., Larose É., Helmstetter A., Stehly L., Hillers G., Gilbert O. Sea ice thickness and elastic properties from the analysis of multimodal guided wave propagation measured with a passive seismic array. *Journ. of Geophys. Research. Oceans*. 2020a, 125: e2019JC015709.
<https://doi.org/10.1029/2019JC015709>
- Moreau L., Seydoux L., Weiss J., Campillo M. Analysis of microseismicity in sea ice with deep learning and Bayesian inference: application to high-resolution thickness monitoring. *The Cryosphere*. 2023, 17: 1327–1341. <https://doi.org/10.5194/tc-17-1327-2023>
- Moreau L., Weiss J., Marsan D. Accurate estimations of sea-ice thickness and elastic properties from seismic noise recorded with a minimal number of geophones: from thin landfast ice to thick pack ice. *Journ. Geophys. Res.-Oceans*. 2020b, 125: e2020JC016492.
<https://doi.org/10.1029/2020JC016492>
- O’Neil S., Pfeffer W.T. Source mechanics for monochromatic icequakes produced during iceberg calving at Columbia Glacier, AK. *Geophysical Research Letters*. 2007, 34: L22502. <https://doi.org/10.1029/2007GL031370>
- Romeyn R., Hanssen A., Ruud B.O., Johansen T.A. Sea ice thickness from air-coupled flexural waves. *The Cryosphere*. 2021, 15: 2939–2955.
<https://doi.org/10.5194/tc-15-2939-2021>
- Serrapierrri A., Moreau L., Boué P., Weiss J., Roux P. Recovering and monitoring the thickness, density, and elastic properties of sea ice from seismic noise recorded in Svalbard. *The Cryosphere*. 2022, 16: 2527–2543.
<https://doi.org/10.5194/tc-16-2527-2022>
- Shebalin P.N., Baranov A.A. Aftershock Rate Changes at Different Ocean Tide Heights. *Front. Earth Sciences*. 2020, 8: 559624.
<https://doi.org/10.3389/feart.2020.559624>
- Smirnov V.G., Bychenkov Ju.D., Priamikov S.M., Shcherbakov Ju.A. The use of satellite information for ice navigation support. *Proc. 15th Intern. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC’99)*, Helsinki, August 23–27, 1999, 1: 154–165.
- Stein P.J., Euerle S.E., Parinella J.C. Inversion of pack ice elastic wave data to obtain ice physical properties. *Journ. of Geophys. Research. Oceans*. 1998, 103: 21783–21793.
- Trnkoczy A. Understanding and parameter setting of STA/LTA trigger algorithm. *In New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2)*. Edited by P. Bormann. Deutsches Geoforschungs Zentrum GFZ, Potsdam, 2012: 1–20.
https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_IS_8.1
- Turova A.P., Morozova E.R. The contribution of the seismic station “Severnaya Zemlya” to the study of arctic seismicity. *Arctic Environmental Research*. 2019, 19 (4): 139–145.
<https://doi.org/10.3897/issn2541-8416.2019.19.4.139>
- Yang T., Giellis G. Experimental characterization of elastic waves in a floating ice sheet. *Journ. Acoustic Society of America*. 1994, 96: 2993–3009.