

О выделении айсбергообразующих льдотрясений по сейсмоинфразвуковым данным© 2021 г. Ю.А. Виноградов¹, А.В. Федоров^{2*}, С.В. Баранов², В.Э. Асминг², И.С. Федоров²¹Единая геофизическая служба РАН, Обнинск, Россия;²Кольский филиал Единой геофизической службы РАН, Апатиты, Россия

*Afedorov@krsc.ru

Identification of iceberg-forming ice quakes from seismic and infrasound dataYu.A. Vinogradov¹, A.V. Fedorov^{2*}, S.V. Baranov², V.E. Asming², I.S. Fedorov²¹Geophysical Survey of Russian Academy of Science, Obninsk, Russia;²Kola branch of Geophysical Survey, Russian Academy of Science, Apatity, Russia

*Afedorov@krsc.ru

Received September 21, 2020 / Revised January 22, 2021 / Accepted March 19, 2021

Keywords: iceberg formation, Svalbard Archipelago, calving, glacier, ice quake, video recording, infrasound monitoring, seismic monitoring.**Summary**

The application of a joint method of recording seismic and infrasound signals generated during ice calving from the terminal part of the outlet glaciers to identify the process of iceberg formation is considered. For many years, the Kola Branch of the Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences has been developing technology for remote monitoring of the processes of destruction of ice sheets in the Arctic. To improve the methodology of geophysical monitoring of processes of the iceberg calving in the Arctic seas in the Svalbard archipelago, the experiment was conducted for the first time on the complex recording of the destruction of the Nordenskiöld glacier using seismometers, infrasound microphones and video cameras. The aim of the experiment was to obtain time-synchronized recordings of seismic, infrasound and video signals produced by calving of the glacier edge. The synchronized recordings obtained as a result of the experiment were used to identify specific attributes that characterize the recordings of iceberg-inducing ice quakes. Results of the experiment showed that the calving events that produce floating icebergs generate seismic and infrasonic signals of a special spectral composition and are characterized by the presence of pronounced bands in the spectral-time representation. The revealed characteristic is a distinguishing evidence of a calving event with the iceberg-inducing potential from other types of ice quakes, such as cracking and movement of the glacier body. The experimental results obtained may be used for development of a system for seismic-infrasound monitoring of processes of the iceberg formation.

Citation: Vinogradov Y.A., Fedorov A.V., Baranov S.V., Asming V.E., Fedorov I.S. Identification of iceberg-forming ice quakes from seismic and infrasound data. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2021. 61 (2): 262–270. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673421020087.

Поступила 21 сентября 2020 г. / После доработки 22 января 2021 г. / Принята к печати 19 марта 2021 г.

Ключевые слова: айсбергообразование, архипелаг Шпицберген, калвинг, ледник, льдотрясение, видеорегистрация, инфразвуковой мониторинг, сейсмический мониторинг.

Рассматриваются результаты эксперимента по комплексной регистрации процессов деструкции ледника Норденшельда (архипелаг Шпицберген) при помощи сейсмометров, инфразвуковых датчиков и видеокамер. Задачи эксперимента заключаются в регистрации синхронизированных по времени сейсмических, инфразвуковых сигналов и видеозаписей, генерируемых обрушением края ледника, выявлении характерных особенностей этих сигналов, а также проверке возможности применения метода совместного сейсмического и инфразвукового мониторинга для обнаружения случаев образования айсбергов. Анализ полученных данных показал, что калвинговые события, порождающие плавающие айсберги, генерируют сейсмические сигналы особого спектрального состава, которые характеризуются наличием ярко выраженных полос в спектрально-временной диаграмме.

Введение

Процессы деструкции ледниковых покровов, к которым относятся растрескивание (crevassing) тела ледника, аномально-быстрые подвижки (surging) пульсирующих ледников, краевое обрушение выводных ледников, выходящих на поверхность моря, — калвинг (glacier calving), генерируют сейсмические сигналы, называемые льдотрясения-

ми [1–6]. Вероятно, первым научно зафиксированным свидетельством того, что при разрушении ледника генерируются сейсмические и инфразвуковые колебания, является публикация известного норвежского путешественника Фритъофа Нансена [7], так описавшего это явление: «...шум, как выстрелы орудий... и дрожь Земли» [8]. Научный интерес к исследованию сейсмичности ледников начал проявляться только с середины 1950-х годов

и к 2000 г. насчитывалось не более 50 публикаций по этой тематике [7]. Современный этап в исследовании сейсмичности ледников начался с серии статей американского сейсмолога Горона Экстрёма [9–11]. В этих работах были описаны порождённые крупными выводными ледниками побережья Гренландии низкочастотные сигналы, зарегистрированные глобальной сейсмологической сетью, установлены сезонные вариации количества льдотрясений и предложена модель очага льдотрясения, связанная с подвижкой тела ледника по ложу. После работ Экстрёма научный интерес к сейсмичности ледников резко вырос — за период с 2000 по 2016 г. опубликовано более 100 работ по этой тематике [7].

Из всех типов льдотрясений наибольший, прежде всего практический интерес вызывают обрушения края выводного ледника (калвинг). Обрушению часто предшествует или сопутствует растрескивание ледника (crevassing). Образование больших трещин в ледниковых покровах также регистрируется сейсмометрами как импульсные сейсмические события, которые тоже называются льдотрясениями [12]. В работе [13] выявлена чёткая корреляционная связь между длительностью обрушения края ледника и длительностью сейсмической записи льдотрясения. Непрерывные наблюдения за состоянием ледниковых покровов в Арктике в разных временных масштабах возможны только с помощью систем удалённого мониторинга.

Геофизические методы удалённого мониторинга с применением сейсмических и инфразвуковых станций представляют собой относительно малозатратный, круглогодичный и всепогодный инструмент для проведения подобных работ [14]. Совместное использование сейсмических и инфразвуковых методов мониторинга позволяет надёжно отличать льдотрясения от слабых землетрясений, а также более точно определять координаты эпицентров ледниковых событий по сравнению с использованием только сейсмических или только инфразвуковых данных [15, 16]. Применение геофизических методов мониторинга ледниковых покровов Арктики даёт возможность собирать непрерывные данные и вести статистический анализ интенсивности обрушений ледников, что способствует получению новых сведений о реакции ледников на современные изменения климатических условий.

Как известно, обрушения или крупные отколы ледника с падением ледяных блоков в воду приводят к образованию айсбергов, представляющих собой реальную угрозу судоходству и шельфовой инфраструктуре арктических морей. Практическое приложение технологии непрерывного геофизического мониторинга разрушения ледников — прогноз айсберговой опасности. Задачи настоящей работы — рассмотреть результаты уникального эксперимента по одновременной сейсмической, инфразвуковой и видеорегистрации обрушений фронта ледника Норденшельда (архипелаг Шпицберген), а также выяснить особенности сейсмограмм и инфразвуковых записей, связанных с отколом и падением ледяных блоков в воду залива, чтобы выработать критерии отличия айсбергогенных событий от других типов льдотрясений.

Оборудование

Эксперимент по комплексному наблюдению за фронтальной частью ледника Норденшельда проходил в августе 2016 г. Для этого 17 августа 2016 г. на скальном обнажении в ближней зоне (на удалении от первых сотен метров до километра) от края ледника были установлены две видеокамеры, оснащённые GPS-приёмниками, и сейсмическая станция. Для регистрации инфразвуковых и акустических сигналов, генерируемых льдотрясениями, использовался сейсмоинфразвуковой комплекс PÜR, расположенный в посёлке Пирамида на удалении 12 км от края ледника [16]. Схема размещения оборудования показана на рис. 1, координаты размещения оборудования приведены в табл. 1.

Для видеорегистрации использовали две видеокамеры с частотой съёмки 30 кадров в секунду и разрешениями 2569×1090 и 1920×109 , установленные на треножные штативы. Для точной привязки ко времени видеорегистраторы оснащали GPS-приёмниками. Видеорегистраторы вели запись информации на съёмные носители (флэш карты объёмом 256 Гб). Карты памяти в видеорегистраторах заменяли ежедневно. Для регистрации сейсмических событий в ближней зоне использовался широкополосный трёхкомпонентный цифровой сейсмометр GuralpCMG-6TD, сохраняющий данные во внутренней памя-

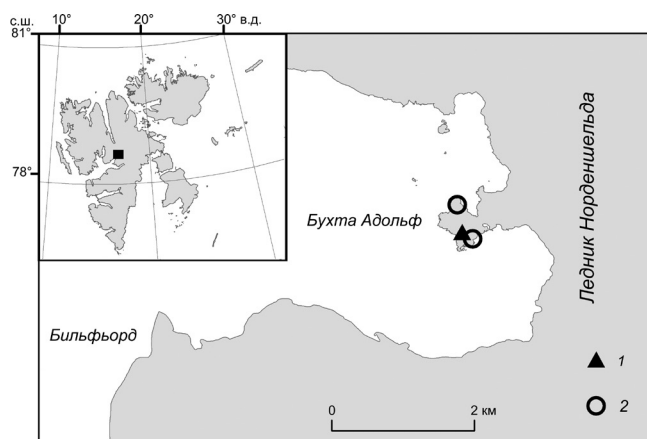


Рис. 1. Расположение сейсмической станции NRSH (1) и двух видеорегистраторов (2), оснащённых GPS-приёмниками, установленными 17.08.2016 г. вблизи фронта ледника Норденшельда (архипелаг Шпицберген)

Fig. 1. Location of the seismic station NRSH (1) and two video recorders (2) equipped with GPS receivers, installed on 08.17.2016, near the front of the Nordenskjöld Glacier (Spitsbergen archipelago)

Таблица 1. Координаты аппаратуры, установленной вблизи фронта ледника Норденшельда

Аппаратура	С.ш./В.д., градусы
Сейсмостанция (NRSH)	78,6523/16,9213
Видеорегистратор 1	78,6528/16,9205
Видеорегистратор 2	78,6571/ 16,9122

ти. Временная сейсмостанция была установлена на скальный грунт, а так как она располагалась вблизи ледника Норденшельда, ей был присвоен уникальный код – NRSH. Питание временно установленного оборудования давали два аккумулятора с батареями ёмкостью 70 А/ч каждая, причём к одному из аккумуляторов были подключены сейсмодатчик и видеорегистратор, другой аккумулятор обеспечивал питание только видеорегистратора. Суммарное энергопотребление сейсмодатчика и видеорегистратора составляло 200 А/ч, следовательно, расчётное время работы системы наблюдения составляло около 15 суток.

Как уже указывалось, инфразвуковые сигналы регистрировались сейсмоинфразвуковой группой PYR, установленной в пос. Пирамида. Она состояла из трёх низкочастотных конденсаторных микрофонов МРА-201, разнесённых в пространстве, и широкополосной трехкомпонентной сейсмической станции GuralpCMG-6T. Регистрация всех

Таблица 2. Координаты инфразвуковых датчиков (микрофонов) и трёхкомпонентной сейсмической станции, входящих в состав сейсмоинфразвукового комплекса PYR, расположенного в пос. Пирамида (архипелаг Шпицберген)

Аппаратура	С.ш./В.д., градусы
Сейсмостанция	78,6555/16,3525
Микрофон М1	78,6560/16,3515
Микрофон М2	78,6558/16,3560
Микрофон М3	78,6552/16,3513

шести измерительных каналов велась цифровым 24-разрядным регистратором геофизических сигналов «Байкал-8». Координаты элементов сейсмоинфразвуковой группы приведены в табл. 2.

Запланированная длительность комплексных наблюдений за кромкой ледника Норденшельда составляла 10–15 дней. За это время необходимо было собрать представительную базу данных наблюдений геофизических сигналов, вызванных разрушением кромки ледника, сопровождаемых видеорядом, также точно привязанным ко времени. Однако уже на третий день эксперимента при посещении временной сейсмостанции и одного из пунктов видеонаблюдений было обнаружено, что одна из камер полностью разрушена, сейсмостанция опрокинута, а коммутационные провода разорваны. По данным видеонаблюдения, сохранившимся на карте памяти видеорегистратора, установлено, что причина разрушений на пункте мониторинга – нападение белого медведя. Сам медведь находился близко, но не проявлял признаков агрессии. В связи с реальной угрозой столкновения исследователей с белым медведем эксперимент был прекращён. Таким образом, для дальнейшего анализа в нашем распоряжении было 66 часов непрерывных наблюдений.

Методология

Поскольку при разрушении ледниковых покровов генерируются как сейсмические, так и акустические (в том числе и в инфразвуковом диапазоне) колебания, использование сейсмических и инфразвуковых датчиков для регистрации лютотрясений представляется наиболее целесообразным. Эффективность совместного использования сейсмических и инфразвуковых данных многократно подтверждена в ходе экспериментов по мониторингу ледников Шпицбергена [15, 16].

Обработка данных

Для наблюдений за обрушением кромок ледников сейсмоинфразвуковым методом в первую очередь необходимо отличать события, связанные с отколом от других типов льдотрясений, например расстрескиванием. Очевидная на первый взгляд идея в качестве дискриминационного критерия событий, связанных с обрушением кромок, использовать местоположение эпицентра, приуроченное к краевой зоне ледника, сталкивается со следующими трудностями: вступления объёмных сейсмических волн льдотрясений нечёткие [16, 17], а их поляризация картина выражена слабо [18], в результате локация может быть недостаточно точной.

Дополнительная сложность в определении вступлений различных фаз волн обусловлена сложной волновой картиной в случае регистрации айсбергообразующих процессов, одновременно инициированных на протяжённых участках ледникового фронта [18, 19]. Частично проблему определения времени вступлений сейсмических волн, вызванных льдотрясениями, удаётся нивелировать привлечением инфразвуковых данных, используя в качестве вступления вторичной волны время прихода акустического сигнала [16]. В этом случае эпицентр события расположен в точке пересечения окружности, соответствующей $t_A - t_P$ (t_A – время прихода инфразвуковой волны на акустический датчик; t_P – время прихода волны P на сейсмический датчик), и азимута, рассчитанного по инфразвуковой группе [20]. Совместное использование сейсмических и инфразвуковых данных повышает точность определения координат эпицентра, но не позволяет однозначно сделать вывод о природе события, поскольку фактический эпицентр может находиться на леднике в нескольких сотнях метра от его края [15, 16].

Таким образом, для надёжного отличия айсбергообразующих событий от других типов льдотрясений необходимо привлекать дополнительные критерии, основанные на анализе особенностей сейсмических и инфразвуковых записей. Источники сейсмических и акустических сигналов связаны с различными фазами айсбергообразования: отрыв (откол) льда от края ледника; осыпание отколовшегося льда по фронтальной стенке ледника; ударение отколовшейся массы о воду и/или дно [2, 21, 22]. Возможность обнаружения и фиксации различных фаз айсбергообразования на сейсмических и инфразвуковых записях позволит сделать вывод о природе льдотрясения.

Выявление записей айсбергообразующих событий проводилось в два этапа. На первом этапе устанавливали возможные сейсмические события, связанные с этим явлением, с помощью детектора STA/LTA [20] по данным станции NRSН, находящейся вблизи ледника. Применение простой схемы детектирования в данном случае оправдано, так как прибор устанавливался на скальный грунт вблизи от целевого источника сигналов и вдали от источников шума. На втором этапе выполнялся поиск видеозаписей в соответствующих обнаруженным сейсмическим событиям временных рамках. Таким способом были установлены видеозаписи 20 событий, связанных с обрушением фронтальной части ледника. Отметим, что вопросы оценки магнитуды или сейсмической энергии таких событий лежат за рамками настоящей работы.

Поиск инфразвуковой пары для обнаруженных сейсмических событий выполняли по данным постоянно действующего с 2015 г. сейсмоинфразвукового комплекса PYR, установленного в пос. Пирамида [16] на расстоянии 13 км от терминальной части ледника, и временной сейсмической станции NRSН. Методика поиска инфразвуковой пары основывалась на вычислении временной задержки между обнаруженным на станции NRSН сейсмическим сигналом и сейсмоинфразвуковой группой PYR с учётом скорости распространения звуковой волны при условии, что сейсмический и акустический сигналы порождены одним источником [15, 16]. Если полученная временная задержка соответствовала времени пробега волны между двумя пунктами со скоростью, соответствующей скорости распространения звука в атмосфере ($0,32 \pm 0,05$ км/с), то пара обнаруженных сигналов считалась сейсмоинфразвуковым событием. Из 20 зафиксированных за 66 часов работы видеоаппаратуры обрушений фронта ледника только одно сопровождалось сейсмоинфразвуковой парой сигналов. На рис. 2 приведены волновые формы целевого события на леднике Норденшельда, записанные сейсмической станцией NRSН и инфразвуковой микрогруппой PYR в пос. Пирамида. Временная задержка между сейсмическим и инфразвуковым сигналами (41 с) соответствует времени пробега волны от источника до сейсмоинфразвукового

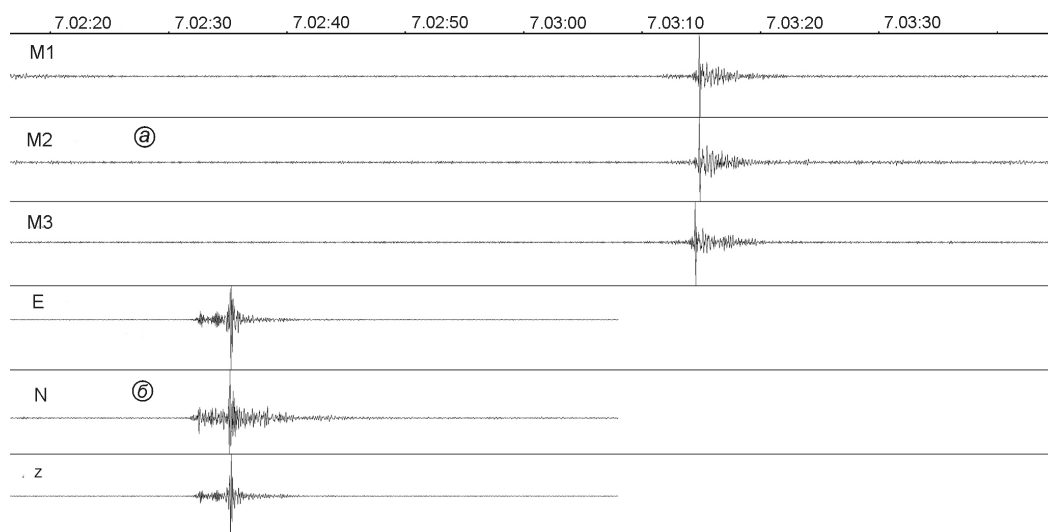


Рис. 2. Пример инфразвукового (а) и сейсмического (б) сигналов, сгенерированных калвинговым событием на фронте ледника Норденшельда 17.08.2016 в 07:02:32.2 UTC:

а – инфразвуковая запись датчиками М1, М2, М3 сейсмоинфразвукового комплекса PYR; б – трёхкомпонентная сейсмограмма (ориентация датчиков: Е – восток, N – север, Z – вертикальный) на станции NRSН

Fig. 2. An example of infrasonic (a) and seismic (б) signals generated by a calving event on the front of the Norden skjold glacier on 08.17.2016 at 07: 02: 32.2 UTC:

а – infrasound recording of sensors M1, M2, M2 of the PYR seismoinfrasound group; б – 3-component seismogram (sensor directions: E – east, N – north, Z – vertical) of the NRSН station

комплекса PYR, расположенного на расстоянии 13 км от фронта ледника Норденшельда.

Особенности сейсмических и инфразвуковых записей айсбергообразующих событий

Совместный анализ синхронизированных по времени сейсмических данных и видеозаписей обнаруженных событий позволил сопоставить фазы айсбергообразования (начало отрыва глыбы льда, завершение отрыва, падение глыбы льда в воду, осыпание мелких фрагментов льда и отражение звуковой волны от морского дна и поверхности воды) с особенностями спектрально-временного представления сейсмограммы. На рис. 3 приводится совместное отображение фотофиксации моментов отрыва и падения края ледника и сейсмического сигнала, вызванного этими событиями. Начало вступления сейсмического сигнала соответствует началу отрыва глыбы льда от края ледника (см. рис. 3, а). Максимум амплитуды сейсмограммы соответствует падению отколовшегося льда в воду (см. рис. 3, а). Участок сейсмограммы, порождённый падением льда в воду, – более низкочастотный по сравнению с участком, соответ-

ствующим отрыву глыбы (см. рис. 3), поскольку при падении генерируется сильная поверхностная волна. Частотно-временное представление участка поверхностной волны (см. рис. 3, б) имеет несколько несущих частот (полос), возникающих в результате переотражений сейсмических волн от морского дна и поверхности воды.

Механизм генерации сейсмического сигнала при обрушении стенки ледника схож с механизмом обрушения консолей в карьерах горнорудных предприятий. Сравнение сейсмограмм обрушения ледовых блоков от кромки ледника и записей обрушений консолей скальной породы, регистрируемых на рудниках в Хибинском горном массиве, показало высокую степень подобия; отличие заключается в появлении нескольких полос, возникающих из-за падения отколовшейся глыбы льда в воду. Именно эта особенность спектрального представления сигнала и представляет собой отличительный признак айсбергообразующего события от других типов льдотрясений. А наличие полос в спектре записи однозначно показывает, что отколовшийся ледяной блок упал в воду залива. На рис. 4 приводятся запись инфразвукового сигнала на сейсмоинфразвуковой комплекс PYR, вызванного айсбергообразующим событием на фронте

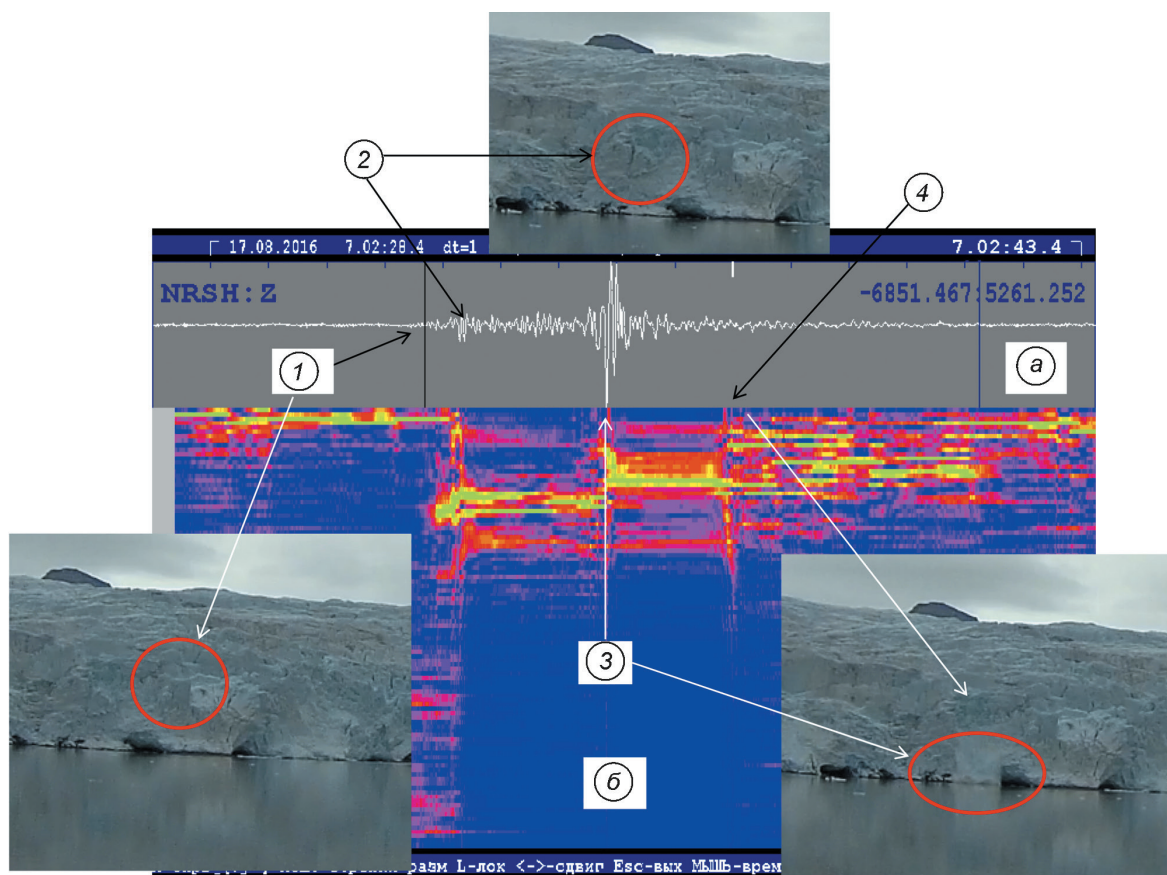


Рис. 3. Сопоставление частотно-временного представления сейсмической записи станцией NRSH и видеозаписи типичного калвингового события на фронте леднике Норденшельда 17.08.2016 в 07:02:32.2 UTC: *a* – волновая форма; *б* – спектрограмма Фурье, нормированная на максимумы по частотам. Стрелками показаны соответствующие места на фрагментах видео и сейсмической записей: 1 – начало отрыва глыбы льда; 2 – отрыв глыбы льда произошёл; 3 – падение льда в воду; 4 – обрушение мелких фрагментов и отражение звуковой волны от дна и поверхности воды. На стоп-кадрах видеозаписи эти места обведены красным цветом

Fig. 3. Comparison of the time-frequency representation of the seismic recording by the NRSH station and the video recording of a typical calving event on the front of the Nordenskjold Glacier on 17.08.2016 at 07:02:32.2 UTC: *a* – waveform; *b* – Fourier spectrogram, normalized to maxima in frequencies. The arrows show the corresponding places on the fragments of video and seismic records: 1 – the beginning of the ice block detachment; 2 – the ice block has been detached; 3 – falling ice into the water; 4 – the collapse of small fragments and the reflection of a sound wave from the bottom and surface of the water. In the videos, these places are circled in red

ледника Норденшельда, а также сопоставление частотно-временного представления инфразвукового сигнала и видеозаписи (см. рис. 4, б). На частотно-временном представлении обрушения ледяного блока с фронта ледника Норденшельда (см. рис. 4, а) также просматриваются основные фазы (отрыв глыбы льда и падение льда в воду), генерирующие инфразвуковые колебания в атмосфере. Как и в случае сейсмограммы, инфразвуковая запись имеет несколько несущих частот (полос), возникающих из-за переотражения звуковых волн от поверхности воды. К сожалению, в нашем распоряжении имеется только одна ин-

фразвуковая запись подтверждённого откола ледяного блока, сопровождаемая видеорядом. Тем не менее мы считаем, что при расположении инфразвуковых датчиков у края ледника на участке, свободном от препятствий, мешающих прохождению звуковых волн, инфразвуковая запись всегда будет содержать несколько частотных полос.

Таким образом, сопоставление синхронизированных по времени видеозаписей айсбергообразующих событий с сейсмограммами и инфразвуковыми записями позволило обнаружить наличие характерных фаз процесса обрушения фронта ледника на сейсмических и инфразвуковых записях.

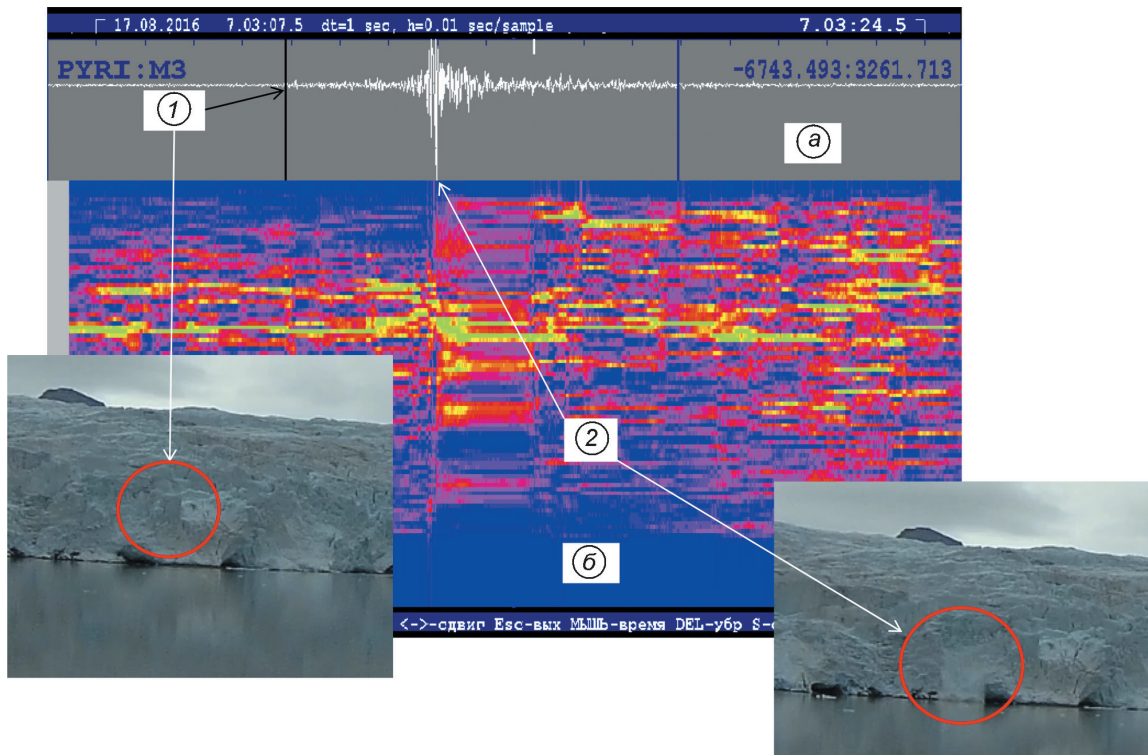


Рис. 4. Сопоставление частотно-временного представления инфразвуковой записи на сейсмоинфразвуковой комплекс PYR и видеозаписи типичного калвингового события на фронте ледника Норденшельда 17.08.2016 в 07:02:32.2 UTC:

a – волновая форма; *b* – спектрограмма Фурье, нормированная на максимумы по частотам. Стрелками показаны соответствующие места на фрагментах видео и сейсмической записей: 1 – отрыв глыбы льда; 2 – падение льда в воду. На стоп-кадрах видеозаписи эти места обведены красным цветом

Fig. 4. Comparison of the time-frequency representation of the infrasound recording of the PYR seismoinfrasound group and the video recording of a typical calving event on the Nordenskjold glacier front on August 17, 2016 at 07:02:32.2 UTC:

a – waveform; *b* – Fourier spectrogram, normalized to maxima in frequencies. The arrows show the corresponding places on the fragments of video and seismic records: 1 – detachment of a block of ice; 2 – ice falling into the water. These places are circled in red in the video recordings

Установлено, что льдотрясения, порождающие плавающие айсберги, генерируют сейсмические и акустические сигналы особого спектрального состава и характеризуются наличием ярко выраженных полос в спектрограмме на участке записи, следующем за сигналом от падения ледяного блока в воду. Детальный анализ различных фаз генерации таких сигналов показал, что явные чётко выраженные признаки айсбергогенного события в спектре записи на сейсмических и инфразвуковых каналах формируются в результате отражений, генерируемых падением ледяного блока в воду, волн от дна и поверхности воды.

Описанные в настоящей статье наблюдения проводили на относительно небольшом расстоянии от источника генерации целевых сигналов – порядка 12 км. Ранее, в ходе эксперименталь-

ных наблюдений в районе ледника Эсмарка в 2012–2014 гг. [15], сейсмоинфразвуковой группой Баренцбург были зарегистрированы пары сейсмоинфразвуковых сигналов с расстояния порядка 25 км, однако их приуроченность к процессам айсбергообразования не была подтверждена видеонаблюдениями. Предложенный подход к обнаружению фактов айсбергообразования на фронтах выводных ледников требует дальнейшей верификации на больших удалениях источника от сейсмоинфразвуковой группы. Полученные в ходе проведения данного эксперимента амплитудно-частотные характеристики сейсмических и инфразвуковых сигналов будут использованы для дальнейшего развития метода мониторинга откола айсбергов на расстояниях в первые сотни километров.

Заключение

В результате эксперимента по совместному сейсмическому, инфразвуковому и видеомониторингу ледника Норденшельда в августе 2016 г. было обнаружено 20 сейсмических записей обрушений фронтальной части ледника, сопровождаемых видеорядом. Часть событий зарегистрирована инфразвуковой микрогруппой PYR в пос. Пирамида. В результате сопоставления синхронизированных по времени видеозаписей обрушения фронта ледника Норденшельда, а также сейсмического и инфразвукового сигналов установлено, что характерные фазы процесса айсбергообразования (откол фрагмента льда от фронта ледника, падение ледяного блока в воду, отражение волн от дна и поверхности воды.) присутствуют на сейсмических и инфразвуковых записях таких событий. Установленные спектрально-временные особенности сигналов от айсбергогенных ледотрясений будут

положены в основу автоматической системы классификации ледотрясений.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01304-20) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

Acknowledgments. The work was supported by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (№ 075-01304-20). The data used in the work were obtained with large-scale research facilities «Seismic infrasound array for monitoring Arctic cryolitozone and continuous seismic monitoring of the Russian Federation, neighbouring territories and the world» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

Литература

1. Benn D.I., Kristensen L., Gulley J.D. Surge propagation constrained by a persistent subglacial conduit, Bakaninbreen–Paulabreen, Svalbard // *Annals of Glaciology*. 2009. V. 50 (52). P. 81–86.
2. Amundson J.M., Burton J.C., Correa-Legisos S. Impact of hydrodynamics on seismic signals generated by iceberg collisions // *Annals of Glaciology*. 2012. V. 53 (60). P. 106–112.
3. Köhler A., Chapuis A., Nuth C., Kohler J., Weidle C. Autonomous detection of calving-related seismicity at Kronebreen, Svalbard // *The Cryosphere*. 2012. № 6. С. 393–406.
4. Mansell D., Luckman A., Murray T. Dynamics of tidewater surge-type glaciers in northwest Svalbard // *Journ. of Glaciology*. 2012. V. 58. № 207. doi: 10.3189/2012JoG11J058.
5. Епифанов В.П., Глазовский А.Ф. Акустические характеристики как индикатор особенностей движения льда в ледниках // *Криосфера Земли*. 2010. Т. XIV. № 4. С. 42–55.
6. Епифанов В.П., Саватюгин Л.М. Акустические исследования абляционного слоя ледника на примере ледника Альдегонда (Шпицберген) // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2011. № 4 (90). С. 87–97.
7. Podolskiy E.A., Walter F. Cryoseismology // *Review Geophysics*. 2016. V. 54. P. 708–758. doi: 10.1002/2016RG000526.
8. Nansen F. *Farthest North*. V. 2. New York: Harper and Brothers Publishers, 1898. 729 p.
9. Ekström G., Nettles M., Abers G.A. Glacial earthquakes // *Science*. 2003. V. 302. Is. 5645. P. 622–624. doi: 10.1126/science.1088057.
10. Ekström G., Nettles M., Tsai V.C. Seasonality and increasing frequency of Greenland glacial earthquakes //

References

1. Benn D.I., Kristensen L., Gulley J.D. Surge propagation constrained by a persistent subglacial conduit, Bakaninbreen–Paulabreen, Svalbard. *Annals of Glaciology*. 2009. V. 50 (52): 81–86.
2. Amundson J.M., Burton J.C., Correa-Legisos S. Impact of hydrodynamics on seismic signals generated by iceberg collisions. *Annals of Glaciology*. 2012, 53 (60): 106–112.
3. Köhler A., Chapuis A., Nuth C., Kohler J., Weidle C. Autonomous detection of calving-related seismicity at Kronebreen, Svalbard. *The Cryosphere*. 2012, 6: 393–406.
4. Mansell D., Luckman A., Murray T. Dynamics of tidewater surge-type glaciers in northwest Svalbard. *Journ. of Glaciology*. 2012, 58 (207). doi: 10.3189/2012JoG11J058.
5. Epifanov V.P., Glazovskii A.F. Akusticheskie kharakteristiki kak indikator osobennosti dvizheniya l'da v lednikakh. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2010, XIV (4): 42–55. [In Russian].
6. Epifanov V.P., Savatyugin L.M. Akusticheskie issledovaniya ablyatsionnogo sloya lednika na primere lednika Al'degonda (Shpitsbergen). *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2011, 4 (90): 87–97. [In Russian].
7. Podolskiy E.A., Walter F. Cryoseismology. *Review Geophysics*. 2016, 54: 708–758. doi: 10.1002/2016RG000526.
8. Nansen F. *Farthest North*. V. 2. New York: Harper and Brothers Publishers, 1898: 729 p.
9. Ekström G., Nettles M., Abers G.A. Glacial earthquakes. *Science*. 2003, 302 (5645): 622–624. doi: 10.1126/science.1088057.
10. Ekström G., Nettles M., Tsai V.C. Seasonality and increasing frequency of Greenland glacial earthquakes.

- Science. 2006. V. 311. Is. 5768. P. 1756–1758. doi: 10.1126/science.1122112.
11. Tsai V.C., Ekström G. Analysis of glacial earthquakes // Journ. of Geophys. Research. 2007. V. 112. № F03S22. doi: 10.1029/2006JF000596.
 12. Amundson J.M., Truffer M., Luthi M.P., Fahnestock M., West M., Motyka R.J. Glacier, fjord, and seismic response to recent large calving events, JakobshavnIsbræ, Greenland // Geophys. Research Letters. 2008. V. 35. № L22501. doi: 10.1029/2008GL035281.
 13. Bartholomaus T.C., Larsen C.F., O'Neel S., West M.E. Calving seismicity from iceberg–sea surface interactions // Journ. of Geophys. Research. 2012. V. 117. Is. F4. P. 1–16. doi: 10.1029/2012JF002513.
 14. Маловичко А.А., Виноградов А.Н., Виноградов Ю.А. Развитие систем геофизического мониторинга в Арктике // Арктика: экология и экономика. 2014. № 2. С. 16–23.
 15. Виноградов Ю.А., Асминг В.Э., Баранов С.В., Федоров А.В., Виноградов А.Н. Сейсмоинфразвуковой мониторинг деструкции ледников (пилотный эксперимент на архипелаге Шпицберген // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50. № 1. С. 5–14.
 16. Vinogradov A., Asming V., Baranov S., Fedorov A., Vinogradov Yu. Joint seismo-infrasound monitoring of outlet glaciers in the Arctic: case study of the Nordenskiöld outlet glacier terminus near Pyramiden (Spitsbergen) // 16th Intern. Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016. Book 1. Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. Conference Proceedings. V. III. Hydrology, Engineering Geology & Geotechnics, Applied and Environmental Geophysics, Oil and Gas Exploration. Albatna, Bulgaria, 30 June – 6 July, 2016. Sophia: STEF92 Tehcnology, 2016. P. 521–528. ISBN 978-619-7105-57-5. ISSN 1314-2704. doi: 10.5593/SGEM2016B13.
 17. Mikesell T.D., van Wijk K., Haney M.M., Bradford J.H., Marshall H-P., Harper J.T. Monitoring glacier surface seismicity in time and space using Rayleigh waves // Journ. of Geophys. Research. 2012. V. 117. Is. F02020. P. 1–12. doi: 10.1029/2011JF002259.
 18. Федоров А.В., Асминг В.Э., Баранов С.В., Виноградов А.Н., Евтюгина З.А., Горюнов В.А. Сейсмологические наблюдения за активностью ледников архипелага Шпицберген // Вестн. МГТУ. 2016. Т. 19. № 1. С. 151–159. doi: 10.21443/1560-9278-2016-1/1-151-159.
 19. Veitch S.A., Nettles M. Spatial and temporal variations in Greenland glacial-earthquake activity, 1993–2010 // Journ. of Geophys. Research. 2012. V. 117. № F5. doi: 10.1029/2012JF002412.
 20. Асминг В.Э., Баранов С.В., Виноградов А.Н., Виноградов Ю.А., Федоров А.В. Использование инфразвукового метода для мониторинга деструкции ледников в арктических условиях // Акустический журнал. 2016. Т. 62. № 5. С. 582–591. doi: 10.7868/S0320791916040031.
 21. O'Neel S., Larsen C.F., Rupert N., Hansen R. Iceberg calving as a primary source of regional-scale glacier-generated seismicity in the St. Elias Mountains, Alaska // Journ. of Geophys. Research. 2010. V. 115. № F4. doi: 10.1029/2009JF001598.
 22. Pettit E.C., Nystuen J.A., O'Neel S. Listening to glaciers: Passive hydroacoustics near marine-terminating glaciers // Oceanography. 2012. V. 25. № 3. P. 104–105. Science. 2006, 311 (5768): 1756–1758. doi: 10.1126/science.1122112.
 11. Tsai V.C., Ekström G. Analysis of glacial earthquakes. Journ. of Geophys. Research. 2007, 112 (F03S22). doi: 10.1029/2006JF000596.
 12. Amundson J.M., Truffer M., Luthi M.P., Fahnestock M., West M., Motyka R.J. Glacier, fjord, and seismic response to recent large calving events, JakobshavnIsbræ, Greenland. Geophys. Research Letters. 2008, 35 (L22501). doi: 10.1029/2008GL035281.
 13. Bartholomaus T.C., Larsen C.F., O'Neel S., West M.E. Calving seismicity from iceberg–sea surface interactions. Journ of Geophys. Research. 2012, 117 (F4): 1–16. doi: 10.1029/2012JF002513.
 14. Malovichko A.A., Vinogradov A.N., Vinogradov Yu.A. Razvitie system geofizicheskogo monitoringa v Arktike. Arktika: ekologiya I ekonomika. Arctic: ecology and economy. 2014, 2: 16–23. [In Russian].
 15. Vinogradov Yu.A., Asming V.E., Baranov S.V., Fedorov A.V., Vinogradov A.N. Seismoinfrasvukovoi monitoring destruktсии lednikov (pilotnyi eksperiment na arhipelage Shpitsbergen. Seismicheskie pribory. Seismic Instruments. 2014, 50 (1): 5–14. [In Russian].
 16. Vinogradov A., Asming V., Baranov S., Fedorov A., Vinogradov Yu. Joint seismo-infrasound monitoring of outlet glaciers in the Arctic: case study of the Nordenskiöld outlet glacier terminus near Pyramiden (Spitsbergen). 16th Intern. Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016. Book 1. Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. Conference Proceedings. V. III. Hydrology, Engineering Geology & Geotechnics, Applied and Environmental Geophysics, Oil and Gas Exploration. Albatna, Bulgaria, 30 June – 6 July, 2016. Sophia: STEF92 Tehcnology. 2016: 521–528. ISBN 978-619-7105-57-5. ISSN 1314-2704. doi: 10.5593/SGEM2016B13.
 17. Mikesell T.D., van Wijk K., Haney M.M., Bradford J.H., Marshall H-P., Harper J.T. Monitoring glacier surface seismicity in time and space using Rayleigh waves. Journ. of Geophys. Research. 2012, 117 (F02020): 1–12. doi: 10.1029/2011JF002259.
 18. Fedorov A.V., Asming V.E., Baranov S.V., Vinogradov A.N., Evtyugina Z.A., Goryunov V.A. Seismological observations of the activity of glaciers in the Spitsbergen archipelago. Vestnik MGTU. Vestnik of MSTU. 2016, 19 (1): 151–159. doi: 10.21443/1560-9278-2016-1/1-151-159. [In Russian].
 19. Veitch S.A., Nettles M. Spatial and temporal variations in Greenland glacial-earthquake activity, 1993–2010. Journ. of Geophys. Research. 2012, 117 (F5). doi: 10.1029/2012JF002412.
 20. Asming V.E., Baranov S.V., Vinogradov A.N., Vinogradov Yu.A., Fedorov A.V. Ispol'zovanie infrazvukovogo metoda dlya monitoringa destruktсии lednikov v arkticheskikh usloviyakh. Akusticheskiy zhurnal. Acoustic Journal. 2016, 62 (5): 582–591. doi: 10.7868/S0320791916040031. [In Russian].
 21. O'Neel S., Larsen C.F., Rupert N., Hansen R. Iceberg calving as a primary source of regional-scale glacier-generated seismicity in the St. Elias Mountains, Alaska. Journ. of Geophys. Research. 2010, 115 (F4). doi: 10.1029/2009JF001598.
 22. Pettit E.C., Nystuen J.A., O'Neel S. Listening to glaciers: Passive hydroacoustics near marine-terminating glaciers. Oceanography. 2012, 25 (3): 104–105.