

УДК 550.34:[551.322:551.578.48]

О регистрации схода снежных лавин геофизическими методами в Хибинском массиве

И. С. Федоров*, А. В. Федоров, В. Э. Асминг

*Единая геофизическая служба РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия;
e-mail: ifedorov@krsc.ru

Информация о статье Реферат

Поступила в редакцию
13.01.2021;

получена
после доработки
04.03.2021

Ключевые слова:

снежные лавины,
инфразвук,
регистрация,
локация,
мобильный
инфразвуковой
комплекс

В зимние месяцы 2018–2020 гг. Кольский филиал Единой геофизической службы РАН проводил эксперименты по совместной регистрации сходов снежных лавин в Хибинском горном массиве с помощью сейсмических и инфразвуковых датчиков во время работ по принудительному спуску снежной массы. Цель экспериментов – оценка возможности регистрации схода снежных лавин геофизическими методами. Актуальность развития методов дистанционной регистрации фактов схода снежных лавин обусловлена отсутствием представительной статистики о частоте и закономерностях возникновения данного опасного природного явления. Сложность регистрации снежных лавин связана с их сходом зачастую в труднодоступных районах и в условиях плохой видимости. Для регистрации сигналов, генерируемых сходом лавин, применялись различные конфигурации инфразвуковых групп, состоящих из трех разнесенных в пространстве датчиков (микрофонов МРА 201 или микробарографов Hyperion IFS-4000), а также портативная сейсмическая станция Guralp CMG-6TD. В результате экспериментов получены записи инфразвуковых сигналов на различных удалениях от лавинного очага. Данные записи обработаны при помощи автоматического детектора, реализующего амплитудные и кросс-корреляционные методы обнаружения сигналов. Проанализированы спектральный состав записей и их характерный вид. Отличительными чертами сигналов, вызванных сходом лавин, являются большая длительность и изменение азимута на источник. Доминирующие частоты сигнала лежат в области 1–10 Гц. Сделаны выводы о недостаточной чувствительности сейсмического метода при размещении сейсмометра на удалении первых километров от лавинного очага, а также о высокой применимости инфразвукового метода для регистрации фактов схода лавин. Полученные результаты позволяют разработать методику автоматического детектирования сигналов, генерируемых лавинами, по данным инфразвуковой регистрации, необходимую для построения системы непрерывного мониторинга лавинной активности.

Для цитирования

Федоров И. С. и др. О регистрации схода снежных лавин геофизическими методами в Хибинском массиве. Вестник МГТУ. 2021. Т. 24, № 1. С. 69–79. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-1-69-79>.

Registration of avalanches in the Khibiny Mountains by the geophysical methods

Ivan S. Fedorov*, Andrey V. Fedorov, Vladimir E. Asming

*Geophysical Survey RAS, Apatity, Murmansk region, Russia;
e-mail: ifedorov@krsc.ru

Article info

Received
13.01.2021;

received in revised
04.03.2021

Key words:

snow avalanches,
infrasound,
registration,
location,
mobile
infrasound complex

Abstract

In the winter months of 2018–2020 the Kola Branch of the Unified Geophysical Service RAS conducted experiments on the joint registration of avalanches in the Khibiny mountain range using seismic and infrasonic sensors during work on the forced descent of the snow mass. The aim of the experiments is to assess the possibility of avalanche detection using the geophysical methods. The lack of representative statistics on the frequency and regularity of avalanches is the reason for the relevance of developing methods of their remote registration. The difficulty of registering avalanches is due to their occurrence often in hard-to-reach areas and in poor visibility conditions. To record signals generated by avalanches, different configurations of infrasound panels consisting of three spatially separated sensors (MPA 201 or Hyperion IFS-4000 microbarographs) and a portable seismic station Guralp CMG-6TD were used. As a result of the experiments, infrasound recordings were obtained at different distances from the avalanche source. The infrasound group recordings collected from the experiments were processed using an automatic detector implementing amplitude and cross-correlation signal detection methods. The spectral composition of the recordings and their characteristic appearance were analyzed. Avalanche-induced signals are characterized by long duration and changes in azimuth to the source. The dominant frequencies of the signal lie in the region of 1–10 Hz. Conclusions are made about the insufficient sensitivity of the seismic method when the seismometer is located at a distance of the first kilometers from the avalanche source, as well as the high applicability of the infrasound method for recording the facts of avalanches. The results obtained will make it possible to develop a methodology for automatic detection of signals generated by avalanches using the data of infrasound registration. This is the necessary basis for building a system for continuous monitoring of avalanche activity.

For citation

Fedorov, I. S. et al. 2021. Registration of avalanches in the Khibiny Mountains by the geophysical methods. *Vestnik of MSTU*, 24(1), pp. 69–79. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-1-69-79>.

Введение

Снежная лавина является одним из природных источников опасности, обладающим большой разрушительной силой. Ежегодно только на территории Российской Федерации под лавины попадают десятки людей (Иванов и др., 2015; Викулина, 2019), сход лавин на инженерные и транспортные коммуникации влечет значительный экономический ущерб (География..., 1992). Проблема лавинной опасности особенно актуальна для горных районов, в которых ведется деятельность человека как промышленная, связанная с добычей полезных ископаемых, так и рекреационное использование горных склонов в основном в качестве горнолыжных курортов. При этом снежные лавины являются недостаточно изученным природным явлением. В основном это объясняется трудностью наблюдения. Лавины часто происходят в труднодоступных районах в условиях плохой видимости во время и после сильных снегопадов, а также зачастую в темное время суток (География..., 1992). Это ведет к отсутствию полной статистики по сходу снежных лавин, необходимой для их прогнозирования. Хотя в настоящее время делается упор на предупреждение лавинообразования на опасных склонах путем принудительного спуска излишней снежной массы (Панков, 2014), проблема регистрации естественных сходов лавин остается актуальной.

На территории России по статистике многолетних наблюдений наибольшее число жертв и наибольший урон от лавинных проявлений зафиксирован в Хибинском горном массиве (География..., 1992). Хибинны представляют собой небольшой по линейным размерам и высотам (максимальная высота 1 208 м) горный массив. Однако высокий уровень промышленного освоения, значительное скопление как промышленных, так и муниципальных объектов инфраструктуры в совокупности с благоприятными для лавинообразования формами рельефа обуславливают высокий урон от лавинных проявлений, фиксируемых здесь. Таким образом, Хибинский горный массив является оптимальным местом для разработки и апробации системы инфразвукового мониторинга снежных лавин.

Традиционными способами регистрации схода лавин являются визуальное наблюдение и использование различных видов обвальной сигнализации (Пильгаев и др., 2017). Эти способы, хотя и довольно надежны, обладают рядом недостатков, связанных с вышеупомянутыми трудностями наблюдения и необходимостью размещения оборудования непосредственно на лавиноопасном склоне.

Существует еще один метод регистрации лавин, основанный на детектировании акустического сигнала, создаваемого вследствие движения снежной массы по склону (Kogelnig et al., 2011; Herwijnen et al., 2011). Факт того, что сходы снежных лавин порождают сильные инфразвуковые сигналы, подтвержден исследованиями конца 80-х – начала 90-х годов прошлого века (Bedard et al., 1988; Фурстов и др., 1990). Для регистрации инфразвуковых сигналов используются инфразвуковые группы (infrasonic arrays), представляющие собой системы разнесенных в пространстве микробарографов или низкочастотных микрофонов (Infrasound..., 2010). По временным задержкам прихода когерентного сигнала на датчики группы можно определить азимут на источник сигнала и кажущуюся скорость его подхода (Cansi et al., 2008). Существуют системы мониторинга лавин, основанные на регистрации инфразвуковых сигналов, данные системы установлены в Норвегии (Humstad et al., 2016), Австрии (Marchetti et al., 2015), Италии (Ulivieri et al., 2011), США (Scott et al., 2006). Однако в России такие системы не применяются.

В Кольском филиале Федерального исследовательского центра "Единая геофизическая служба РАН" (КоФ ФИЦ ЕГС РАН) имеется многолетний опыт работы с сейсмическими и инфразвуковыми группами. Установлены стационарные комплексы в районе г. Апатиты (Виноградов, 2004) и на архипелаге Шпицберген (Асминг и др., 2008; 2016), разработаны мобильные группы, которые могут быть быстро доставлены в любой район и развернуты для временных наблюдений (Виноградов и др., 2010). Разработаны и успешно применяются автоматические детекторы инфразвуковых сигналов. Обобщение накопленного опыта позволило поставить задачу построения системы дистанционного мониторинга лавинных проявлений по данным регистрации геофизических сигналов.

В данной статье рассматриваются эксперименты по регистрации снежных лавин геофизическими методами, проводившиеся КоФ ФИЦ ЕГС РАН в Хибинском горном массиве в 2018–2020 годах. Цель экспериментов – оценка принципиальной возможности регистрации схода снежных лавин сейсмическим и инфразвуковым методами в сложных горных условиях, а также оценка их разрешающей способности.

Материалы и методы

Для регистрации инфразвуковых сигналов используются группы разнесенных в пространстве однотипных датчиков (барографов или микрофонов). Датчики в таких группах могут располагаться в пространстве различными способами, расстояния между ними варьируют от сотен метров до нескольких километров (Gibbons et al., 2015).

Существуют два основных метода детектирования целевого акустического сигнала: алгоритм последовательной многоканальной корреляции (PMCC) и суммирование со сдвигами (бимформинг). Оба они основаны на предположении о плоской форме фронта звуковой волны, что справедливо для больших расстояний между источником и приемником звука. При использовании алгоритма PMCC считаются взаимные корреляции записей всех датчиков группы с учетом задержек прихода сигнала для каждого из них, зависящих от азимута фронта волны и кажущейся скорости (Cansi et al., 2008). В основе бимформинга лежит суммирование

записей отдельных датчиков со сдвигами, зависящими также от предполагаемых азимута прихода и кажущейся скорости прихода сигнала (*Blom et al., 2013*). Оба эти алгоритма являются универсальными в том смысле, что могут быть использованы для инфразвуковых групп с любым количеством и расстановкой датчиков.

Для инфразвуковых групп, состоящих из трех датчиков, можно построить более простой, чем упомянутые выше, алгоритм детектирования, который быстро и эффективно работает. Такой алгоритм был реализован в КоФ ФИЦ ЕГС РАН в программе QACD. Программа может обнаруживать инфразвуковые события, оценивать длительность когерентных сигналов и изменение азимута источника сигнала со временем. По направлению прихода сигналов и изменению азимута со временем можно распознавать движущиеся источники, например, снежные лавины.

Оборудование

В ходе работ по регистрации схода лавин, проводившихся в Хибинском горном массиве в 2018–2020 гг., применялись различные варианты проводных и беспроводных инфразвуковых станций, в зависимости от удобства установки на месте регистрации. Все они включали по три низкочастотных микрофона либо барографа (рис. 1) с фильтрами от ветровых помех.

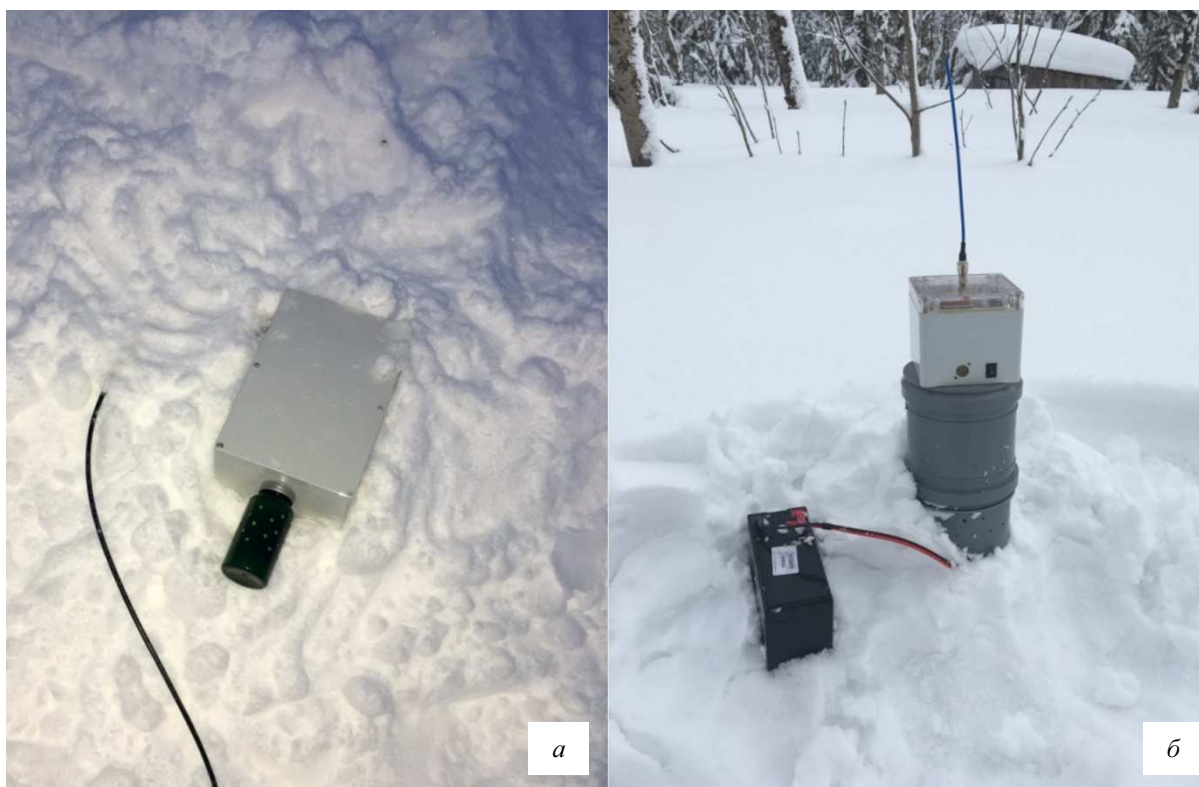


Рис. 1. Установка микробарографа HyperionIFS-4000 (а)
и беспроводной инфразвуковой станции с интегрированным микрофоном MPA-201 (б)
Fig. 1. Installation of the HyperionIFS-4000 microbarograph (a)
with an integrated microphone MPA-201 (b)

Конструктивно проводная инфразвуковая станция состоит из двух частей: подсистемы регистрации и датчиков. В качестве регистратора может выступать любой современный регистратор, удовлетворяющий техническим условиям. В первых работах применялись приборы на основе 24-битного АЦП: 6-канальный регистратор сейсмических сигналов Байкал-8 производства компании R-sensors и система сбора данных на основе АЦП E-24 фирмы L-card совместно с мини-ПК со специализированным ПО. Питание станций осуществлялось от 12-вольтовых гелиевых свинцово-кислотных аккумуляторов емкостью 12 Ач. При среднем потреблении систем 250-500 мА таких источников питания хватало для работы станций на время всех мероприятий по принудительному спуску лавин (обычно продолжающихся 2–4 ч).

Подсистема датчиков представляет собой три низкочастотных микрофона MP-201, оснащенных усилителями MA-231 производства компании BSWA Technology Co., Ltd. Микрофоны разнесены в пространстве на расстояние порядка 150 м от модуля регистрации, в форме равностороннего треугольника. Для уменьшения влияния ветровой помехи каждый микрофон помещен в перфорированный пластиковый контейнер с пористым материалом – поролоном.

Аналоговый сигнал с микрофонов по коаксиальным высокочастотным кабелям RG-58 подается на подсистему регистрации. По этим же кабелям осуществляется питание микрофонов через преобразователь напряжений.

При использовании микробарографов Hyperion IFS-4000 (в пилотном эксперименте) их подключение к регистратору осуществлялось при помощи кабеля UTP 8 (витая пара) для внешней прокладки; по нему также подавалось питание на микробарограф непосредственно от регистратора.

Частота дискретизации акустической записи составляла 100 Гц.

Сравнение инфразвуковых записей, сделанных при помощи микробарографов и микрофонов, использованных в первом эксперименте, показало их практически идентичность в целевом диапазоне частот. Хотя по заявленным паспортным характеристикам частотный диапазон микрофонов МРА 201 составляет 20–20000 Гц и не включает инфразвуковые частоты, в реальности спад чувствительности ниже заявленного диапазона не резкий, что позволяет уверенно регистрировать сигналы частотой в единицы герц. Таким образом, было принято решение в дальнейшей работе использовать более дешевые и компактные инфразвуковые микрофоны (Федоров и др., 2018).

Станции с проводным подключением микрофонов использовались на широких открытых пространствах, например, при установке на озере. Основным минусом такой конфигурации является долгое время развертывания и последующего демонтажа по окончании работ, а также риск попадания снега и влаги на разъемы оборудования во время монтажа и опасность повреждения проводов проезжающими снегоходами. К плюсам относится относительная простота изготовления, возможность подключения ко многим промышленным регистраторам, используя лишь модуль преобразования питания микрофонов, централизованное электропитание станции и удобная организация передачи данных. Таким образом, проводная конфигурация станции наиболее целесообразна в случае стационарной установки станции мониторинга лавин.

Беспроводная инфразвуковая станция на основе микрофонов МРА 201 – следующий вид оборудования, активно использовавшийся в ходе экспериментов (Виноградов и др., 2010). Каждая беспроводная станция включает в себя собственно низкочастотный микрофон, микросхему АЦП, микроконтроллер, микросхему GPS-приемника, радиопередатчик и аккумулятор. Данные с трех разнесенных в пространстве станций передаются по радиоканалу на частоте 433 МГц на приемное устройство, объединяющее поступающую информацию и передающее ее в компьютер. Для уменьшения влияния ветровых помех были применены фильтры в виде перфорированных пластиковых контейнеров с поролоном в качестве наполнителя.

Беспроводная конфигурация позволяет развертывать станцию намного быстрее проводной, особенно в условиях сложного рельефа. Основные минусы – меньшее время работы из-за высокого электропотребления радиопередатчиков и возможное влияние промышленных источников радиоволн на канал связи микрофон – база.

Учитывая минусы предыдущих вариантов регистрации, под данную конкретную задачу регистрации инфразвука схода лавин была модернизирована система беспроводных микрофонов, входящих в состав пунктов автоматического мониторинга, разработанных в КоФ ФИЦ ЕГС РАН.

Каждый модуль микрофона, оснащенный своим 24-битным одноканальным АЦП, flash-памятью и GPS приемником использовался для построения модульной системы независимых датчиков. Необходимость центрального модуля сбора данных и беспроводной передачи для данной задачи развертывания временных станций отпала. Данные с каждого отдельного модуля объединяются уже на этапе обработки. Оценка погрешности измерений для инфразвуковых волн показала, что точности GPS/GLONASS приемника достаточно для синхронизации данных отдельных модулей.

Такое решение позволило строить различные конфигурации инфразвуковой сети, повысило мобильность и автономность.

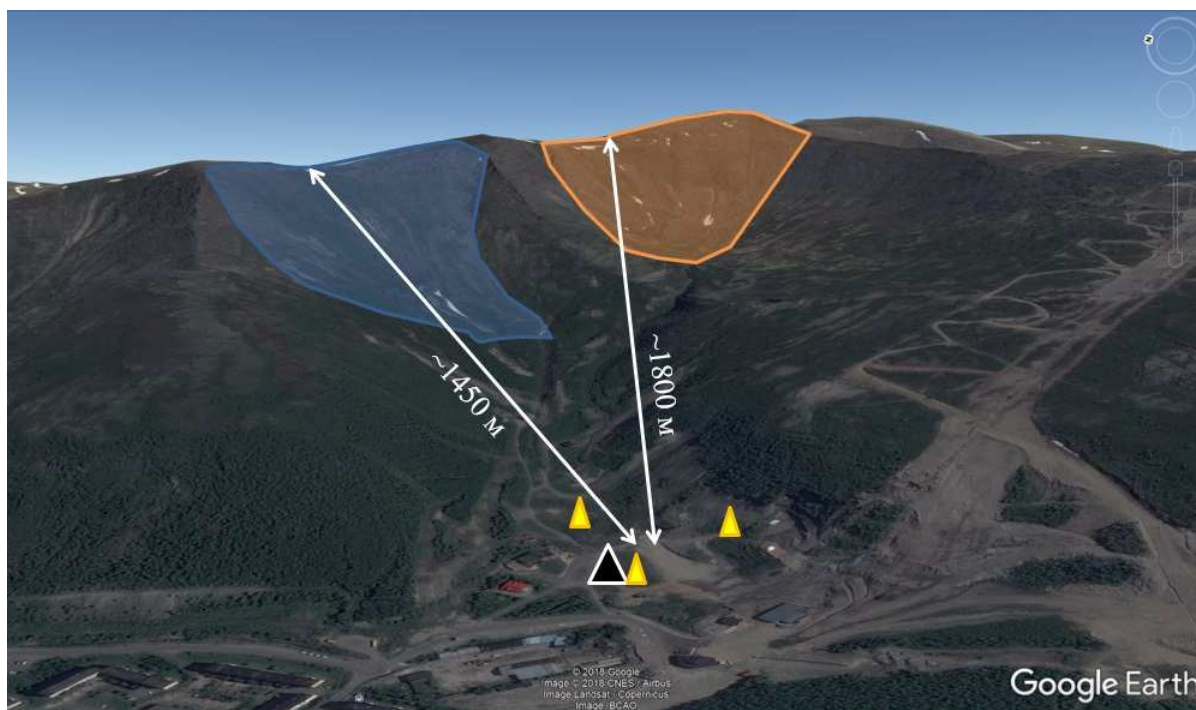
В первых экспериментах одновременно с инфразвуковой проводилась регистрация сейсмических колебаний, вызванных сходом лавины, на значительном расстоянии. Для этой цели применялся цифровой широкополосный трехкомпонентный велосиметр со встроенным регистратором CMG-6TD производства компании Guralp. Однако в ходе экспериментов не удалось зафиксировать сейсмическую составляющую сигнала движения лавины, поэтому в дальнейших экспериментах такая регистрация не применялась. Хотя в случае наблюдения тяжелых водо-снежных лавин в весенний период дополнительное использование сейсмической регистрации, по-видимому, может расширить возможности детектирования (Hammer et al., 2017).

Эксперименты

Пилотный эксперимент был проведен 05.04.2018 г. на территории горнолыжного комплекса Большой Вудъявр, расположенного на горе Айкуайвенчорр в Хибинском горном массиве (координаты 67.610° с. ш. 33.697° в. д.). Целью было определение принципиальной возможности регистрации, а также основных параметров целевого сигнала схода снежной лавины. В первых опытах на расстояниях 1,8 и 1,4 км от лавинного очага были установлены комплекты аппаратуры, включающие три вида оборудования: сейсмическая станция, инфразвуковые станции на основе микробарографов и низкочастотных микрофонов (рис. 2).

Оборудование для регистрации сейсмических сигналов было установлено на бетонный блок, заглубленный в землю, являвшийся ранее частью фундамента демонтированного здания.

Для регистрации непосредственно акустических сигналов схода снежной лавины были установлены две инфразвуковые станции. Первая состояла из трех микробарографов NuRegion IFS-4000, разнесенных в пространстве на удаление 150 м в форме равностороннего треугольника. Оцифровка и запись сигналов с микробарографов осуществлялась регистратором Байкал-8.



▲ Сейсмометр ▲ Инфразвуковой датчик

Рис. 2. Места установки инфразвуковой и сейсмической станции у подножья горы Айкуайвенчорр, вблизи лавиносборов

Fig. 2. Locations of the infrasound and seismic station at the foot of the Aikuayvenchorr mountain, not far from the avalanche sites

Параллельно с первой была развернута вторая станция, состоящая из трех также разнесенных в пространстве на удаление 150 м низкочастотных акустических микрофона МРА-201, интегрированных в блоки беспроводных инфразвуковых станций, разработанных в КоФ ФИЦ ЕГС РАН (Виноградов и др., 2010).

Объем принудительно спущенной лавины составил порядка 10 тыс. куб. м. Процесс схода сопровождался незначительным снежно-пылевым облаком. Волновые формы зарегистрированных сигналов и описание процесса их обработки приведены далее.

Всего в лавинные сезоны 2019–2020 гг. было проведено восемь экспериментов по регистрации схода лавин для набора базы записей сигналов, оценки пределов применимости метода в зависимости от различных погодных условий и объемов сошедшей снежной массы, велась отработка методов автоматического детектирования целевых сигналов.

Результаты и обсуждение

Использование различных типов датчиков (велосиметра, микробарографов и микрофонов) было обусловлено отсутствием полных данных о генерируемых сходом лавин сигналах. Таким образом, первые эксперименты решали следующие задачи: получение первых данных о параметрах сигналов, вызываемых сходом лавин, сравнение эффективности различного оборудования, оценка применимости сейсмических и инфразвуковых методов к регистрации схода лавин и возможности автоматического детектирования таких событий.

Как показали результаты обработки записей первых нескольких регистраций, сейсмическая составляющая сигнала схода лавины практически отсутствует. На записи присутствует только сейсмический сигнал подрыва инициирующего заряда и сигнал, вызванный воздействием на датчик акустической волны от него же. Поэтому в дальнейших экспериментах сейсмическая регистрация не применялась. На рис. 3

в качестве примера приведена запись сейсмических и акустических сигналов, зарегистрированных мобильным сейсмоинфразвуковым комплексом в результате первого эксперимента.

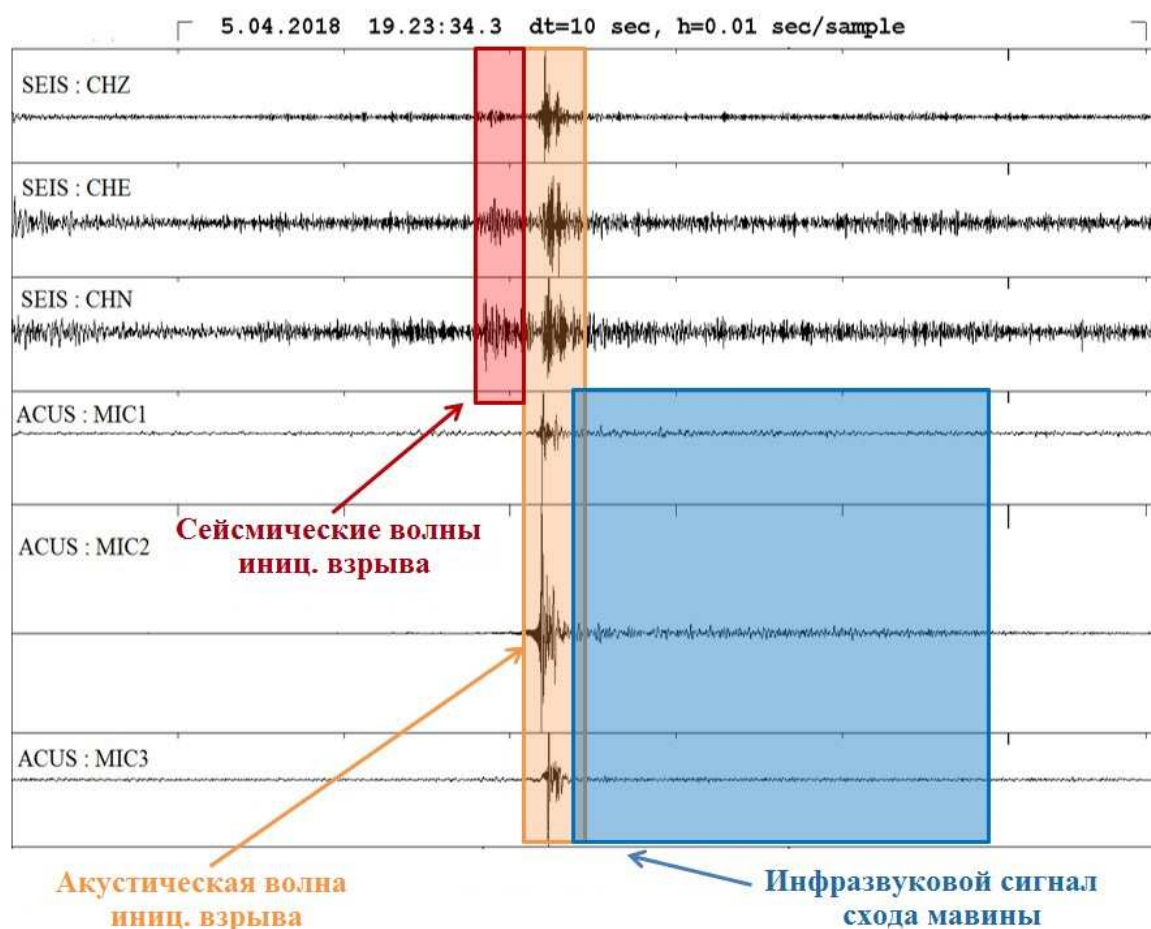


Рис. 3. Запись сейсмических и акустических сигналов, зарегистрированных мобильным сейсмоинфразвуковым комплексом в ходе эксперимента по регистрации схода снежной лавины. Верхние три канала – запись сейсмометра, три нижних канала – низкочастотные микрофоны
 Fig. 3. Recording of seismic and acoustic signals recorded by a mobile seismic-infrasound complex during an experiment to register a snow avalanche. The top three channels are seismometer recording, the bottom three channels are low frequency microphones

На записи явно виден акустический сигнал инициирующего взрыва, далее следует длительный (порядка 30 с) инфразвуковой сигнал, вызванный движением снежной массы по склону. Этот сигнал и представляет интерес в задаче дистанционного мониторинга схода снежных лавин. Частотный анализ инфразвуковой записи показал, что практически весь интересующий сигнал схода лавины лежит в области частот ниже 10 Гц (рис. 4, б).

Негативным фактором является то, что ветровая помеха находится в том же диапазоне частот, поэтому использование прямых методов амплитудного детектирования, основанных на применении соотношения STA/LTA (Allen, 1978), не представляется возможным вследствие низкого значения отношения сигнал – шум. Однако детальный анализ показал, что записи целевого сигнала на разных каналах инфразвуковой группы (рис. 4, а) обладают высокой взаимной корреляцией, что отчетливо видно на графике вариаций значения кросс-корреляции трех каналов инфразвуковой группы, в зависимости от азимута и времени для фиксированной скорости звука (рис. 4, в). Яркие цвета соответствуют наилучшей оценке азимута на графике. Четко прослеживаются максимальные значения корреляции для азимута 65–70°, что в данном случае соответствует направлению на лавинный очаг.

Ниже рассмотрим один из наиболее ярких примеров регистрации сигнала от схода снежной массы 01.02.2019 на северном склоне горы Юкспор. Регистрирующее оборудование было размещено на территории Полярно-арктического ботанического сада-института в лесном массиве (координаты 67.645° с. ш., 33.671° в. д.) на расстоянии порядка 2,5 км от лавинного очага (рис. 5). Инфразвуковая группа представляла собой три разнесенных в пространстве на удаление 150 м низкочастотных акустических микрофона МРА-201, интегрированных в блоки беспроводных инфразвуковых станций.

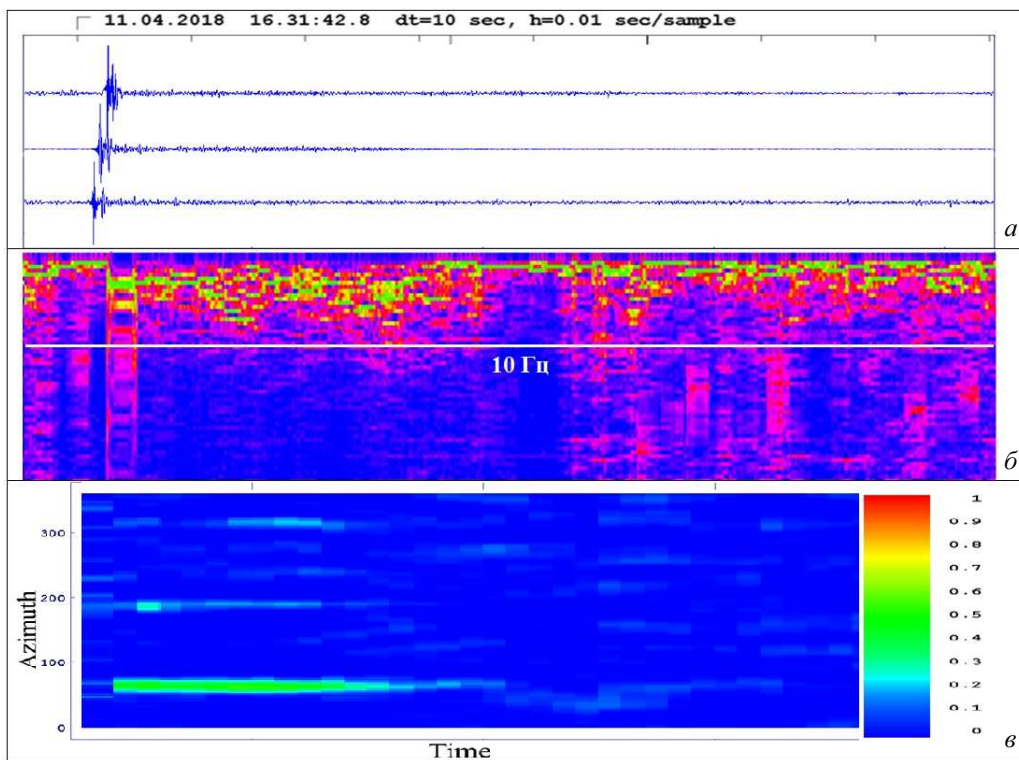


Рис. 4. Запись акустического сигнала схода снежной лавины (а) и его спектрограмма (б) и соответствующая ей диаграмма кросс-корреляции каналов (в)
 Fig. 4. Recording of the acoustic signal of the avalanche descent (a) and its spectrogram (b) and the corresponding channel cross-correlation diagram (c)

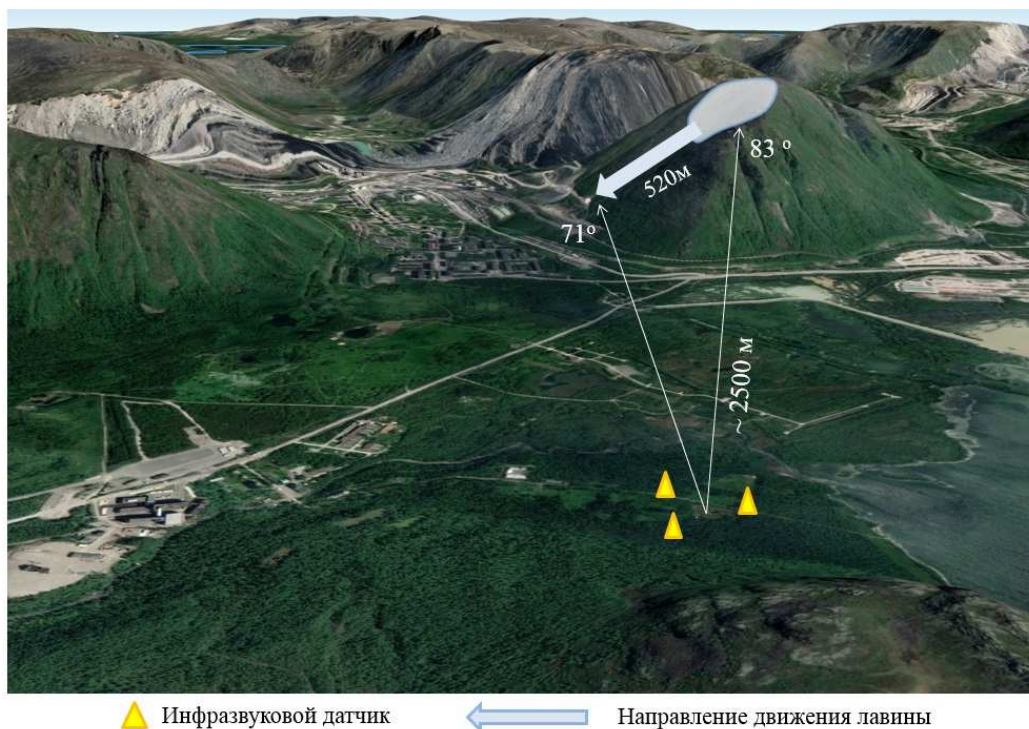


Рис. 5. Расположение инфразвуковой станции возле горы Юкспор (эксперимент по регистрации лавин 01.02.2019). Лучами обозначены направления на источник сигнала в начале и конце протяженной записи, широкой стрелкой – направление движения лавины
 Fig. 5. Location of the infrasound station near Mount Yukspor (experiment on registration of avalanches on 02/01/2019). The rays indicate the directions to the signal source at the beginning and end of the extended recording, the wide arrow – the direction of the avalanche movement

Иницирующий взрыв был произведен на вершине горы с южного склона в лавинном кулуаре. Спровоцированная им лавина прошла почти весь склон до подножья горы, что подтверждается визуальным осмотром места схода. Длина пробега составила порядка 520 м. Объем сошедшей снежной массы по предварительным оценкам составил порядка 10 тыс. куб. м. Лавина такого объема в данном месте представляет незначительную опасность для транспортных коммуникаций (Викулина, 2009). Ее регистрация инфразвуковым методом дает основание судить о такой возможности и для более крупных лавин.

Кросс-корреляционный анализ полученных волновых форм позволил явно идентифицировать сигнал от схода снежной лавины (рис. 6). Длительность зафиксированного сигнала составила 39 с. В начале записи направление прихода инфразвуковых волн соответствует направлению на лавинный кулуар. При этом источник перемещался в пространстве, изменив азимут с 83° до 71° , что согласуется с траекторией движения лавины по склону.

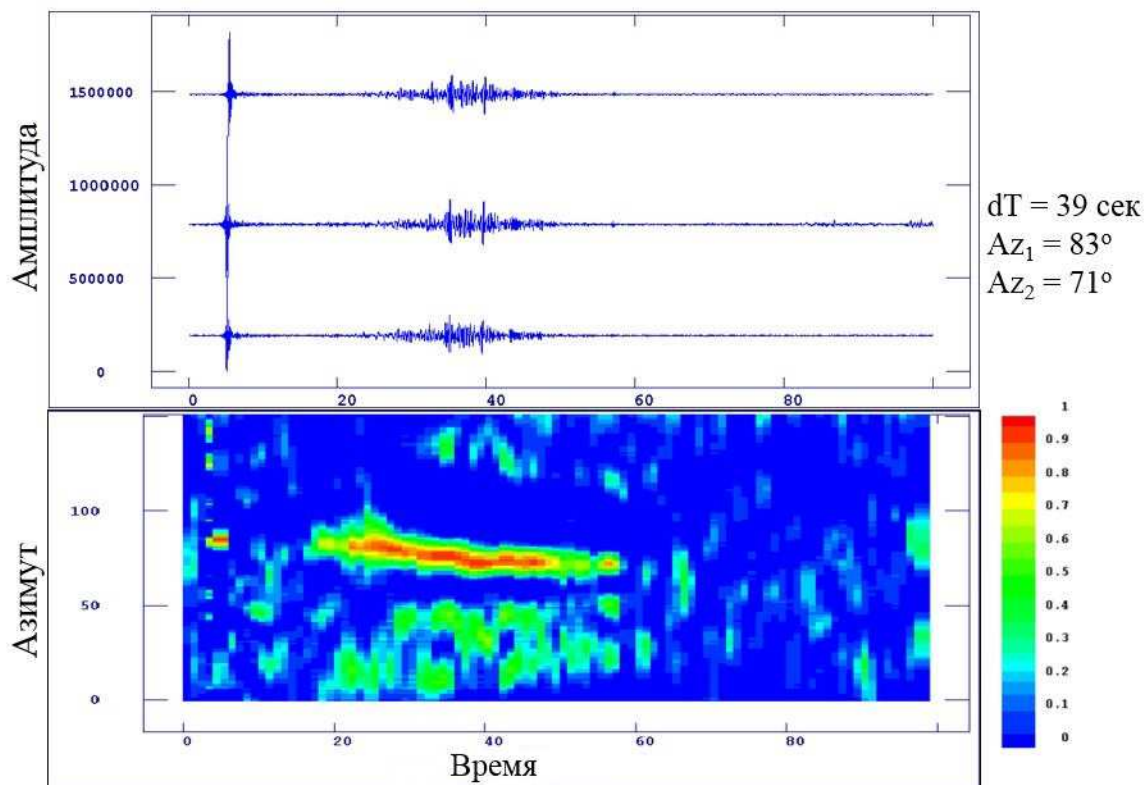


Рис. 6. Запись инфразвукового сигнала принудительного спуска снежной лавины с горы Юкспор 01.02.2020 и диаграмма кросс-корреляции каналов инфразвуковой группы

Fig. 6. Recording of the infrasonic signal of the initiating controlled avalanches from Yukspor Mountain on 01/02/2020 and the diagram of the cross-correlation of the channels of the infrasonic group

Записи, полученные в данном эксперименте, были также пропущены через автоматический детектор QACD. Детектор обнаружил и обработал целевой сигнал, порожденный спуском лавины, вычислил его длительность и диапазон изменения азимутов. Таким образом, была показана применимость детектора для автоматического мониторинга сходов лавин.

Заключение

В ходе работ по развитию дистанционных методов регистрации снежных лавин по данным сейсмических и инфразвуковых наблюдений был проведен ряд экспериментов. Получены записи нескольких принудительно инициированных лавин, проанализированы их параметры, выявлены специфические черты, использованные в развитии средств автоматического обнаружения и локации источников ассоциируемых с лавинами сигналов.

Сход снежной лавины генерирует инфразвуковой сигнал в диапазоне частот 1–10 Гц. Сейсмический сигнал даже на небольшом отдалении порядка двух километров зарегистрировать не удалось.

В отличие от коротких импульсных сигналов от промышленных взрывов, инфразвуковые сигналы от лавин длительные (до нескольких десятков секунд, в зависимости от длины склона). Характерной особенностью является изменение азимутов со временем, указывающее на движение источника.

Использование кросс-корреляционного анализа дало хороший результат при детектировании сигнала и определении направления на источник.

Таким образом, в экспериментальном режиме отработаны аппаратные и программные средства дистанционного мониторинга лавинной активности, созданы предпосылки для создания полностью автоматической системы геофизического мониторинга схода лавин.

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/>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Асминг В. Э., Баранов С. В., Виноградов А. Н., Виноградов Ю. А. [и др.]. Использование инфразвукового метода для мониторинга деструкции ледников в арктических условиях // *Акустический журнал*. 2016. Т. 62, № 5. С. 582–591. DOI: <https://doi.org/10.7868/s0320791916040031>.
- Асминг В. Э., Виноградов Ю. А., Евтюгина З. А., Кременецкая Е. О. [и др.]. О результатах наблюдений на Апатитском сейсмо-инфразвуковом комплексе // *Вестник МГТУ*. 2008. Т. 11, № 3. С. 512–518.
- Викулина М. А. Оценка лавинного риска в Хибинах // *Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий : материалы Междунар. конф. Мурманск (Россия), 30 января – 02 февраля, Токио (Япония), 19 июля 2019 г. : [конференция ИнтерКарто/ИнтерГИС]. М. : Изд-во Московского университета, 2019. Т. 25, Ч. 2. С. 66–67. DOI: <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2019-2-25-66-76>.*
- Викулина М. А. Оценка лавинной активности, опасности и риска (на примере Хибин) : автореф. дис. ... канд. географ. наук. М., 2009. 24 с.
- Виноградов Ю. А. Сейсмоинфразвуковой комплекс "Апатиты" – новый инструмент дистанционного геомониторинга в Евро-Арктическом регионе // *Север – 2003: Проблемы и решения : сб. ст. Апатиты : КНЦ РАН, 2004. С. 103–108.*
- Виноградов Ю. А., Асминг В. Э. Мобильная инфразвуковая группа [Электронный ресурс] // *Наука и образование : материалы междунар. науч.-техн. конф., Мурманск, 5–9 апреля 2010 г. Мурманск : МГТУ, 2010. С. 379–382.*
- География лавин / под ред. С. М. Мягкова, Л. А. Канаева. М. : Изд-во МГУ, 1992. 330 с.
- Иванов М. Н., Федотова Д. А. Случаи гибели людей в лавинах в Хибинах // *Материалы 8-й междунар. молодежной школы-конф. "Меридиан". Курская биосферная станция ИГ РАН, 21–24 мая 2015 г. М. : ИГ РАН, 2015. С. 42–45.*
- Панков М. Современные средства борьбы и защиты от снежных лавин // *Инженерная защита*. 2014. № 1. С. 20–25.
- Пильгаев С. В., Черноус П. А., Филатов М. В., Ларченко А. В. [и др.]. Комплекс лавинной сигнализации и результаты его испытаний // *III Международный симпозиум "Физика, химия и механика снега", Южно-Сахалинск, 2–6 октября 2017 г. : сб. тр. : в 2 ч. Южно-Сахалинск, 2017. Ч. 2. С. 31–36.*
- Федоров А. В., Федоров И. С., Воронин А. И. Регистрация снежных лавин сейсмоинфразвуковым методом // *Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных : Материалы XIII Междунар. сейсмологической школы, Таджикистан, Душанбе, 11–15 сентября 2018 г. Обнинск : ФИЦ ЕГС РАН, 2018. С. 273–276.*
- Фирстов П. П., Суханов А. А., Пергамент В. Х., Радионовский М. В. Акустические и сейсмические сигналы от снежных лавин // *Доклады Академии наук СССР*. 1990. Т. 312, № 1. С. 67–71.
- Allen R. V. Automatic earthquake recognition and timing from single traces // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1978. Vol. 68, N 5. P. 1521–1532.
- Bedard A., Greene G. E. Jr., Intrieri J., Rodriguez R. On the feasibility and value of detecting and characterizing avalanches remotely by monitoring radiated sub-audible atmospheric sound at long distances // *Proceedings; A Multidisciplinary Approach to Snow Engineering, Santa Barbara, CA, 1988.*
- Blom P., Waxler R., Frazier W. G. Beamforming methods in infrasonic array processing – Continuous signals // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2013. Vol. 134, Iss. 5. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.4831515>.
- Cansi Y., Pichon A. L. Infrasound event detection using the progressive multi-channel correlation algorithm // *Handbook of Signal Processing in Acoustics*. New York, NY : Springer, 2008. P. 1425–1435. DOI: https://doi.org/10.1007/978-0-387-30441-0_77.
- Hammer C., Fäh D., Ohrnberger M. Automatic detection of wet-snow avalanche seismic signals // *Natural Hazards*. 2017. Vol. 86, Iss. 2. P. 601–618.

- Gibbons S. J., Asming V., Eliasson L., Fedorov A. [et al.]. The European Arctic: A laboratory for seismoacoustic studies // *Seismological Research Letters*. 2015. Vol. 86, Iss. 3. P. 917–928. DOI: <https://doi.org/10.1785/0220140230>.
- van Herwijnen A., Schweizer J. Monitoring avalanche activity using a seismic sensor // *Cold Regions Science and Technology*. 2011. Vol. 69, Iss. 2–3. P. 165–176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.06.008>.
- Humstad T., Söderblom Ø., Olivieri G., Langeland S. [et al.]. Infrasound detection of avalanches in Grasdalen and Indreidsdalen, Norway // *Proceedings, International Snow Science Workshop, Breckenridge, Colorado*, 2016. P. 621–627.
- Infrasound monitoring for atmospheric studies / eds.: A. Le Pichon et al. Springer Netherlands, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9508-5>.
- Kogelnig A., Suriñach E., Vilajosana I., Hübl J. [et al.]. On the complementariness of infrasound and seismic sensors for monitoring snow avalanches // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2011. Vol. 11, Iss. 8. P. 2355–2370. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-11-2355-2011>.
- Marchetti E., Ripepe M., Olivieri G., Kogelnig A. Infrasound array criteria for automatic detection and front velocity estimation of snow avalanches: Towards a real-time early-warning system // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2015. Vol. 15, Iss. 11. P. 2545–2555. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-15-2545-2015>.
- Scott E. D., Hayward C. T., Colgan T. J., Hamann J. C. [et al.]. Practical implementation of avalanche infrasound monitoring technology for operational utilization near Teton pass Wyoming // *International Snow Science Workshop (ISSW)*, 2006.
- Olivieri G., Marchetti E., Ripepe M., Chiambretti I. [et al.]. Monitoring snow avalanches in Northwestern Italian Alps using an infrasound array // *Cold Regions Science and Technology*. 2011. Vol. 69, Iss. 2–3. P. 177–183. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.09.006>.

References

- Asming, V. E., Baranov, S. V., Vinogradov, A. N., Vinogradov, Yu. A. et al. 2016. The use of the infrasound method for monitoring the destruction of glaciers in arctic conditions. *Acoustical Physics*, 62(5), pp. 582–591. DOI: <https://doi.org/10.7868/s0320791916040031>. (In Russ.)
- Asming, V. E., Vinogradov, Yu. A., Evtugina, Z. A., Kremenetskaya, E. O. et al. 2008. On the results of observations at the Apatity seismic-infrasound complex. *Vestnik of MSTU*, 11(3), pp. 512–518. (In Russ.)
- Vikulina, M. A. 2019. Assessment of avalanche risk in the Khibiny. *Gi support of sustainable development of territories. InterCarto/InterGIS*, 25(2), pp. 66–67. DOI: <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2019-2-25-66-76>. (In Russ.)
- Vikulina, M. A. 2009. Assessment of avalanche activity, hazard and risk (by the example of Khibiny). Abstract of Ph.D. dissertation. Moscow. (In Russ.)
- Vinogradov, Yu. A., Asming, V. E. 2010. Mobile infrasound group. *Proceedings of Intern. conf. Science and education*, 5–9 April, 2010. Murmansk, pp. 379–382. (In Russ.)
- Vinogradov, Yu. A. 2004. The Apatity seismic-infrasound complex is a new instrument for remote geomonitoring in the Euro-Arctic region. In coll. articles *North – 2003. Challenges and solutions*. Apatity, pp. 103–108. (In Russ.)
- Geography of avalanches. 1992. Eds.: S. M. Myagkov, L. A. Kanaev. Moscow. (In Russ.)
- Ivanov, M. N., Fedotova, D. A. 2015. Cases of deaths in avalanches in the Khibiny. *Proceedings of the VIII Intern. School-conf. "Meridian"*, 21–24 May, 2015. Moscow, pp. 42–45. (In Russ.)
- Pankov, M. 2014. Modern means of fighting and protecting against avalanches. *Inzhenernaya zashchita*, 1, pp. 20–25. (In Russ.)
- Pilgaev, S. V., Chernous, P. A., Filatov, M. V., Larchenko, A. V. et al. 2017. Avalanche signaling complex and the results of its tests. *Proceedings of the III Intern. Symposium Physics, chemistry and mechanics of snow*, 2–6 October, 2017. Yuzhno-Sakhalinsk, pp. 31–36. (In Russ.)
- Firstov, P. P., Sukhanov, A. A., Pergament, V. Kh., Radionovskiy, M. V. 1990. Acoustic and seismic signals from avalanches. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 312(1), pp. 67–71. (In Russ.)
- Fedorov, A. V., Fedorov, I. S., Voronin, A. I. 2018. Registration of snow avalanches by seismic-infrasound method. *Proceedings of the XIII Intern. Seismological School Modern methods of processing and interpretation of seismological data*. Tajikistan, Dushanbe, 11–15 September, 2018. Obninsk, pp. 273–276. (In Russ.)
- Allen, R. V. 1978. Automatic earthquake recognition and timing from single traces. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 68(5), pp. 1521–1532.
- Bedard, A., Greene, G. E. Jr., Intrieri, J., Rodriguez, R. 1988. On the feasibility and value of detecting and characterizing avalanches remotely by monitoring radiated sub-audible atmospheric sound at long distances. *Proceedings; A Multidisciplinary Approach to Snow Engineering*, Santa Barbara, CA.
- Blom, P., Waxler, R., Frazier, W. G. 2013. Beamforming methods in infrasonic array processing – Continuous signals. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(5). DOI: <https://doi.org/10.1121/1.4831515>.

- Cansi, Y., Pichon, A. L. 2008. Infrasound event detection using the progressive multi-channel correlation algorithm. *Handbook of Signal Processing in Acoustics*. New York, NY : Springer, pp. 1425–1435. DOI: https://doi.org/10.1007/978-0-387-30441-0_77.
- Hammer, C., Fäh, D., Ohrnberger, M. 2017. Automatic detection of wet-snow avalanche seismic signals. *Natural Hazards*, 86(2), pp. 601–618.
- Gibbons, S. J., Asming, V., Eliasson, L., Fedorov, A. et al. 2015. The European Arctic: A laboratory for seismoacoustic studies. *Seismological Research Letters*, 86(3), pp. 917–928. DOI: <https://doi.org/10.1785/0220140230>.
- van Herwijnen, A., Schweizer, J. 2011. Monitoring avalanche activity using a seismic sensor. *Cold Regions Science and Technology*, 69(2–3), pp. 165–176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.06.008>.
- Humstad, T., Söderblom, Ø., Ulivieri, G., Langeland, S. et al. 2016. Infrasound detection of avalanches in Grasdalen and Indreidsdalen, Norway. *Proceedings, International Snow Science Workshop, Breckenridge, Colorado*, pp. 621–627.
- Infrasound monitoring for atmospheric studies. 2009. Eds.: A. Le Pichon et al. Springer Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9508-5>.
- Kogelnig, A., Surinfiach, E., Vilajosana, I., Hübl, J. et al. 2011. On the complementariness of infrasound and seismic sensors for monitoring snow avalanches. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(8), pp. 2355–2370. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-11-2355-2011>.
- Marchetti, E., Ripepe, M., Ulivieri, G., Kogelnig, A. 2015. Infrasound array criteria for automatic detection and front velocity estimation of snow avalanches: Towards a real-time early-warning system. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(11), pp. 2545–2555. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-15-2545-2015>.
- Scott, E. D., Hayward, C. T., Colgan, T. J., Hamann, J. C. et al. 2006. Practical implementation of avalanche infrasound monitoring technology for operational utilization near Teton pass Wyoming. *International Snow Science Workshop (ISSW)*.
- Ulivieri, G., Marchetti, E., Ripepe, M., Chiambretti, I. et al. 2011. Monitoring snow avalanches in Northwestern Italian Alps using an infrasound array. *Cold Regions Science and Technology*, 69(2–3), pp. 177–183. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.09.006>.

Сведения об авторах

Федоров Иван Сергеевич – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Единая геофизическая служба РАН, мл. науч. сотрудник; e-mail: ifedorov@krsc.ru

Ivan S. Fedorov – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geophysical Survey RAS, Junior Researcher; e-mail: ifedorov@krsc.ru

Федоров Андрей Викторович – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Единая геофизическая служба РАН, канд. физ.-мат. наук; e-mail: afedorov@krsc.ru

Andrey V. Fedorov – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geophysical Survey RAS, Cand. Sci (Phys.&Math.); e-mail: afedorov@krsc.ru

Асминг Владимир Эрнестович – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Единая геофизическая служба РАН, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: AsmingVE@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3317-2488>

Vladimir E. Asming – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geophysical Survey RAS, Cand. Sci. (Phys.&Math.), Leader Researcher; e-mail: AsmingVE@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3317-2488>