УДК 551.578.483

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ИНФРАЗВУКОВОГО МЕТОДА ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА СНЕЖНЫХ ЛАВИН В ХИБИНАХ

© 2025 г. А.В. Федоров, И.С. Федоров*, В.Э. Асминг, А.Ю. Моторин

Кольский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Апатиты, Россия

*e-mail: ifedorov@krsc.ru Поступила 27.08.2024 г. После доработки 29.10.2024 г. Принята к печати 25.12.2024 г.

Выполнен анализ результатов экспериментов по применению сейсмических и инфразвуковых методов дистанционного мониторинга схода снежных лавин, проводимых в Хибинском горном массиве. Применение кросс-корреляционного анализа для данных инфразвуковых групп позволяет обнаруживать факты схода снежных лавин, а при использовании нескольких станций также определить место их схода. Создан первый в России экспериментальный стационарный комплекс инфразвукового мониторинга снежных лавин.

Ключевые слова: снежные лавины, инфразвук, мониторинг, Хибины

DOI: 10.31857/S2076673425010064, EDN: GZEZVS

ВВЕДЕНИЕ

На территории Российской Федерации по статистике многолетних наблюдений одним из наиболее опасных с точки зрения возможных рисков воздействия лавин является Хибинский горный массив (География ..., 1992). Несмотря на небольшие линейные размеры и высоты гор (максимальная высота 1208 м), в Хибинах практически ежегодно регистрируются несчастные случаи и чрезвычайные ситуации, связанные с попаданием людей в лавины и воздействием их на объекты инфраструктуры. Здесь же зарегистрирована одна из крупнейших трагедий на территории Российской Федерации, вызванных сходом снежной лавины – в 1935 г., 5 декабря в результате последовательного схода трёх снежных лавин с горы Юкспорр, было разрушено два двухэтажных деревянных дома, в результате чего погибло 88 человек (Снежно-метеорологическая ..., 2017). Высокие лавинные риски в Хибинском горном массиве в первую очередь связаны с высоким уровнем промышленного освоения массива и размещением инфраструктуры и транспортных коммуникаций непосредственно в зоне потенциального воздействия лавин. В последние годы к факторам риска добавляется активное развитие горного туризма.

Обеспечение лавинной безопасности на локальных территориях, таких как точечные объекты инфраструктуры, участки автомобильных и железных дорог, горнолыжные курорты, как правило, основано на оперативном контроле за уровнем и интенсивностью снегонакопления и принятием оперативных мер по активному воздействию для контролируемого спуска снежных лавин. Для обширных территорий гористой местности такие подходы не применимы, однако возможен общий прогноз степени лавинной опасности.

Оперативное прогнозирование лавин в основном опирается на метеорологические наблюдения и прогнозы в сочетании с наблюдениями за снежным покровом, в том числе за его неустойчивостью (McClung, Schaerer, 2006). Точные данные о фактах схода лавин имеют решающее значение для прогнозирования лавиной опасности на больших территориях, поскольку сведения о зарегистрированных лавинах в режиме около реального времени дают прямые свидетельства нестабильности снежного покрова.

В большинстве лавиноопасных регионов мира до недавнего времени вся статистика лавинных проявлений строилась на визуальных наблюдениях, иногда применялись так называемые системы обвальной сигнализации, построенные по принципу регистрации физического разрыва кабельных линий (Шмелев 2011; Пильгаев и др., 2016). В последние десятилетия стали развиваться автоматизированные системы обнаружения фактов схода лавин, построенные на применении различных сенсоров: доплеровских радаров (Gauer et al., 2007; Steinkogler et al., 2018), сейсмических датчиков (Pérez-Guillén et al., 2016), оптоволоконных кабельных линий (Prokop et al., 2014) и инфразвуковых групп (Marchetti et al., 2015; Mayer et al., 2020). Из перечисленных инструментальных методов наблюдения за лавинами лишь инфразвуковые системы позволяют проводить мониторинг больших площадей, а не отдельных лавиносборов.

Идея применения инфразвуковых датчиков для наблюдения за лавинами и оценки их параметров была предложена в конце 1980-х годов в работах американских и советских учёных (Bedard, 1989; Фирстов и др., 1990). Эти идеи получили развитие в ряде работ, подтвердивших возможности инфразвукового метода регистрации и описавших имеющиеся ограничения (Comey, Mendenhall, 2004; Scott et al., 2007). С 2018 г. эксперименты по инфразвуковой регистрации снежных лавин в Хибинском горном массиве проводятся КоФ ФИЦ ЕГС РАН.

ОБОРУДОВАНИЕ И ДАННЫЕ

Отработку методики регистрации снежных лавин инфразвуковыми методами выполняли на контролируемых спусках лавин, проводившихся Службой лавинной безопасности г. Кировска в рамках мероприятий по обеспечению безопасности близлежащих к городу склонов. В таких экспериментах имелась возможность проводить регистрацию запланированных сходов снежных лавин, а также иметь точные данные об их размерах, траекториях движения и фиксировать времена событий. Всего за период с 2018 по 2020 г. было проведено девять таких экспериментов.

В ходе полевых экспериментов по регистрации снежных лавин для сбора данных 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 с фильтрами от ветровых помех. В качестве регистрирующей аппаратуры применялись несколько вариантов регистраторов с 24-битными АЦП (аналого-цифровым преобразователем) (Федоров и др., 2021).

Проводные станции состояли из трёх низкочастотных микрофона MP-201, оснащённых усилителями MA-231 производства компании BSWA Technology Co., Ltd, либо трёх микробарографов Нурегіоп IFS-4000. Датчики были разнесены в пространстве на расстояние порядка 150 м от центральной точки регистрации в форме равностороннего треугольника. Оцифровка сигналов производилась многоканальным регистратором Байкал-8, либо АЦП Е-24, подключённым к компьютеру.

Используемые микробарографы имеют следующие характеристики: частотный диапазон: 0.01–100 Гц, полный динамический диапазон 100 Па при чувствительности 20 мВ/Па. Второй вариант датчиков – MP-201 преполяризованный микрофон свободного поля с чувствительностью 50 мВ/Па при частотном диапазоне 6-20 000 Гц. Однако в реальности спад чувствительности микрофона в области низких частот незначителен, так что он подходит для регистрации акустических колебаний от 1 Гц. Доминирующие частоты инфразвуковых сигналов, генерируемых во время движения лавины, по данным предыдущих научных исследований находятся в диапазоне 3–10 Гц (Фирстов и др., 1990), поэтому оба варианта оборудования подходят для целей эксперимента. Микробарограф имеет запас по частотному диапазону, но при этом микрофоны более компактные, простые в использовании и дешёвые. Именно с целью определения применимости обоих видов датчиков в большинстве экспериментов они устанавливались параллельно (рис. 1).

Для проведения экспериментов разработаны беспроводные инфразвуковые станции, передающие данные по радиоканалу и сохраняющие данные на внутреннюю flash-память. В беспроводном исполнении инфразвуковая группа представляет собой три разнесённых в пространстве регистрирующих модуля. Каждый модуль состоит из низкочастотного микрофона, одноканального АЦП, микроконтроллера, GPS-приёмника,



Рис. 1. Беспроводная станция на инфразвуковых микрофонах МР-201. Один из трёх регистрирующих модулей с аккумуляторной батареей. Фото А.И. Воронина, 19.03.2019

Fig. 1. Wireless station containing MP-201 infrasound microphones. One of three recording modules with a rechargeable battery. Photo by A.I. Voronin, 19.03.201



Рис. 2. Места проведения экспериментов по сейсмо-инфразвуковой регистрации принудительных спусков лавин: 1 - места размещения регистрирующей аппаратуры, 2 - лавинные очаги, подвергшиеся активному воздействию **Fig. 2.** Locations of experiments on seismic-infrasound recording of forced avalanches: 1 - the locations of recording equipment, 2 - avalanche sites that were affected

радиопередатчика, модуля с flash-памятью и аккумулятора. Из таких модулей строится система произвольной конфигурации.

В ряде экспериментов одновременно с инфразвуковой проводилась регистрация сейсмических колебаний, вызванных сходом лавины, на значительном расстоянии. Для этой цели применялся цифровой широкополосный трёхкомпонентный велосиметр со встроенным регистратором CMG-6TD производства компании Guralp (Fedorov et al., 2021). Он устанавливался на мёрзлый грунт или заглублённый в землю бетонный блок (там, где была такая возможность) рядом с инфразвуковой станцией.

Места установки оборудования для отработки методики регистрации снежных лавин, а также лавинные очаги, в которых производились работы по контролируемому спуску лавин, обозначены на рис. 2. Расстояния от станций регистрации до мест схода лавин варьировались от 1.5 до 3.5 км.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ПОЛЕВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Пилотный эксперимент по инфразвуковой регистрации схода снежной лавины был проведён 5 апреля 2018 г. на территории горнолыжного комплекса Большой Вудьявр, расположенного на горе Айкуайвенчорр в Хибинском горном массиве

ЛЁДИСНЕГ том 65 № 1 2025

(67.610° с. ш., 33.697° в. д.). Оборудование состояло из двух инфразвуковых групп (первая состояла из трёх низкочастотных микрофонов MP-201, вторая из трёх микробарографов Нурегіоп IFS-4000) и одной сейсмической станции. Оцифровка всех сигналов производилась с частотой 100 Гц.

В ходе работ по активному воздействию на снежный покров при помощи взрывчатых веществ, сотрудниками противолавинной службы была спровоцирована контролируемая лавина объёмом порядка 5000 м³. Расстояние от места закладки взрывчатых вешеств до регистрирующего оборудования составило 1.8 км. На рис. 3 приведена запись фильтрованных в полосе частот 1-10 Гц сейсмических (см. рис. 3, *a*) и акустических (см. рис. 3, *б*-*в*) сигналов, зарегистрированных в результате первого эксперимента. На записи явно виден импульсный акустический сигнал инициирующего взрыва и следом за ним можно выделить длительный (порядка 30 с) сигнал, вызванный движением снежной массы по склону. Пиковая амплитуда акустического сигнала, вызванного лавиной, составила около 1 Ра.

Для оценки параметров инфразвуковых сигналов лавин, полученных в экспериментах, применён кросс-корреляционный анализ (Асминг и др., 2021). Он основан на предположении о плоской форме фронта звуковой волны (что справедливо для больших расстояний между источником



ЛЁД И СНЕГ том 65 № 1 2025

и приёмником звука) и заключается в расчёте взаимной корреляции записей всех датчиков группы с учётом задержек прихода сигнала для каждого из них, зависящих от угла падения фронта волны и кажущейся скорости. Анализ полученных в результате эксперимента инфразвуковых записей позволил оценить обратный азимут на источник, а также длительность когерентного сигнала. Яркие цвета на диаграмме кросс-корреляции (см. рис. 3, *г*) соответствуют максимальному значению кросс-корреляции. По ним можно оценить обратный азимут в 65–70°, что в данном случае совпадает с направлением на лавинный очаг.

Доминирующая частота инфразвукового сигнала, генерируемого сходом снежной лавины, составила 2–5 Гц. Оба вида датчиков (микробарографы и инфразвуковые микрофоны) показали сопоставимое качество регистрации данного диапазона частот. Серьёзная проблема, которая была выявлена в ходе первых экспериментов, заключалась в том, что ветровая помеха также находится в диапазоне ниже 10 Гц. В дальнейших экспериментах для её подавления тестировались различные варианты акустических фильтров.

Как показали результаты обработки записей первых нескольких экспериментов, сейсмический сигнал от схода лавины на удалении регистрации (1.8 км) практически отсутствует. На записи виден только сейсмический сигнал подрыва инициирующего заряда и сигнал, вызванный воздействием на датчик акустической волны от него же (см. рис. 3, а). Судя по тому, что в одних исследованиях методы сейсмического мониторинга с использованием нескольких датчиков вдоль траектории движения лавины (Biescas et al., 2003; Vilajosana et al., 2007; Marchetti et al., 2020) или сейсмических групп (van Herwijnen, Schweizer, 2011; Lacroix et al., 2012; Heck et al., 2017) позволяли определить место схода лавины на расстоянии, а в других (Schimmel et al., 2017) сейсмическая регистрация также не давала никакого значимого результата, эффективность этого метода сильно зависит от рельефа, по которому движется лавина, а также от свойств самого снега (сухая или мокрая лавина) и толшины подстилающего слоя.

Поэтому в последующих экспериментах внимание было сконцентрировано на регистрации только инфразвуковых сигналов от снежных лавин.

В качестве иллюстрации возможности и точности инфразвукового метода для мониторинга не только фактов схода лавин, но и определения траектории её движения, рассмотрим эксперимент по регистрации принудительного спуска снежной лавины с горы Юкспорр 01.02.2019. На рис. 4. а приведена запись акустического сигнала схода лавины, сделанная беспроводной станцией из трёх микрофонов МРА-201, располагавшейся на расстоянии около 2.5 км от места схода. На записи виден короткий мощный сигнал от инициирующего взрыва, за которым приблизительно через 20 секунд следует длительный (порядка 40 секунд) усиливающийся, а затем ослабевающий сигнал, генерируемый движением снежной массы вниз по склону. Веретенообразная форма объясняется постепенным набором скорости лавины в зоне транзита (пути движения), а затем замедлением и остановкой в зоне отложения (выброса). Максимальная амплитуда акустического сигнала, вызванного сходом данной лавины, составила 0.65 Па.

Кросс-корреляционный анализ полученных волновых форм позволил идентифицировать явный сигнал от схода снежной лавины. На диаграмме (рис. 4, б) яркие цвета соответствуют наиболее достоверной оценке азимута когерентного сигнала, генерируемого движением снежной массы по склону. Длительность зафиксированного сигнала составила 39 с. В начале записи направление прихода инфразвуковых волн соответствует направлению на верхнюю часть лавиносбора. При этом источник перемещался в пространстве, изменив азимут с 83° до 71°, что согласуется с траекторией движения лавины по склону. Дальность выброса из расчёта проекции на рельеф составила порядка 520 м. Рассчитанные параметры с точностью до первых метров совпали с результатами осмотра места схода лавины на местности.

По оценкам специалистов противолавинной службы, объём этой лавины составил порядка 8 тыс. м³. Лавина такого объёма относится к средним и способна вызвать значительный ущерб (Викулина, 2019).

Рис. 3. Запись сейсмического и инфразвукового сигнала принудительного спуска снежной лавины с горы Юкспор 01.02.2019. (*a*) Z-канал записи сейсмометра CMG-6TD, (δ) запись низкочастотного микрофона MP-201 (полоса пропускания 1–10 Гц), (*a*) запись барографа IFS-4000 (полоса пропускания 1–10 Гц), (*c*) диаграмма кросс-корреляции трёх каналов инфразвуковой группы (яркие цвета соответствуют максимальному значению кросс-корреляции). Все графики представлены в единой шкале времени. Обозначения на графиках: *1* – сейсмический сигнал инициирующего взрыва, *2* – акустический сигнал инициирующего взрыва, *3* – акустический сигнал схода лавины

Fig. 3. Recording of seismic and acoustic signals recorded by a mobile seismic and infrasound complex during an experiment to register a snow avalanche. All graphs are presented in a common base of time. (*a*) Z-channel of CMG-6TD seismometer recording, (δ) low frequency microphone MP-201 recording (1–10 Hz bandpass), (*s*) barograph IFS-4000 recording (1–10 Hz bandpass), (*s*) cross-correlation diagram (the bright colours correspond to the maximum cross-correlation value). Designations on the graphs: *1* – seismic signal of the initiating explosion, *2* – acoustic signal of the initiating explosion, *3* – acoustic signal of the avalanche



Рис. 4. Запись инфразвукового сигнала принудительного спуска снежной лавины с горы Юкспор 01.02.2020. (*a*) Запись низкочастотного микрофона MP-201 (полоса пропускания 1–10 Гц); (*б*) Диаграмма кросс-корреляции каналов инфразвуковой группы, яркие цвета на диаграмме соответствуют наиболее достоверной оценке азимута. Все графики представлены в единой шкале времени. Обозначения на графиках: *1* – акустический сигнал иниции-рующего взрыва, *2* – акустический сигнал схода лавины

Fig. 4. Record of infrasound signal of forced avalanche descent from Yukspor 01.02.2020 (*a*) Recording of low-frequency microphone MP-201 (bandwidth 1-10 Hz); (δ) Cross-correlation diagram of infrasound group channels, bright colours on the diagram correspond to the most reliable azimuth estimation. All graphs are presented in a common base of time. Designations on the graphs: 1 – acoustic signal of the initiating explosion, 2 – acoustic signal of the avalanche

СОЗДАНИЕ СТАЦИОНАРНОГО КОМПЛЕКСА ИНФРАЗВУКОВОГО МОНИТОРИНГА ЛАВИН

Результаты полевых экспериментов по дистанционной регистрации снежных лавин инфразвуковым методом нашли развитие в создании стационарного комплекса непрерывного мониторинга сходов лавин. Основная задача такого комплекса накопление базы записей как инициированных, так и естественных снежных лавин, для дальнейшего развития методов автоматического распознавания целевых сигналов. В конце ноября 2020 г. в Хибинском горном массиве, вблизи г. Кировск, такой комплекс был создан. Комплекс получил код PABG (Polar-Alpine Botanical Garden) по названию места расположения в Полярно-альпийском ботаническом саду-институте им. Н.А. Аврорина КНЦ РАН (ПАБСИ КНЦ РАН).

Изначально комплекс состоял из трёх низкочастотных микрофонов МРА-201, разнесённых в пространстве на 200 м относительно друг друга в форме треугольника. В 2023 г. конфигурация была изменена — добавлен 4-й датчик, группа приобрела форму ромба со стороной 200 м. Каждый датчик оснащён пространственным фильтром подавления ветровых помех веерного типа апертурой 6 метров (рис. 5). Такой фильтр позволяет улучшить соотношение сигнал—шум для когерентного сигнала относительно случайной ветровой помехи (Michael., 2003), что в сочетании с дополнительными фильтрующими свойствами толщи снега даёт значительное ослабление высокочастотных и случайных помех относительно целевых низкочастотных сигналов.

Для оценки важности применения пространственных фильтров в задаче инфразвукового мониторинга снежных лавин рассмотрим рис. 6. На рис. 6, а представлено сравнение записей двух параллельно работавших инфразвуковых датчиков: сверху – оборудованного пространственным фильтром ветровых помех, снизу – без него. На рис. 6, б приведён спектр шума в логарифмическом масштабе для данного участка записи. Как видно из рис. 6, б, фильтр обеспечивает ослабление некогерентного ветрового шума на 1-2 порядка, при этом низкочастотный когерентный сигнал не ослабляется. На записи (см. рис. 6, а) выделен фрагмент, содержаший импульсный инфразвуковой сигнал от удалённого источника. Амплитуда данного сигнала на обоих каналах приблизительно одинакова.

На экспериментальном инфразвуковом комплексе PABG реализована следующая процедура работы. Аналоговые сигналы низкочастотных микрофонов оцифровываются 24-битным дельта-сигма АЦП многоканального регистратора Байкал-8 с частотой 100 Гц, полученные данные волновых форм по протоколу seedlink по каналам мобильного интернет-соединения в режиме близком к реальному времени передаются в региональный информационно-обрабатывающий центр (далее – РИОЦ) КоФ ФИЦ ЕГС РАН в г. Апатиты. В РИОЦ происходит их автоматическая обработка: обнаружение полезных сигналов и выделение сигналов, вызванных вероятным сходом снежных лавин.

Инфразвуковые сигналы обнаруживают с помощью специально разработанной в организации программы автоматического обнаружения QACD (Асминг и др., 2021). По результатам работы автоматического детектора формируется web-бюллетень, содержащий данные о всех зарегистрированных и обнаруженных инфразвуковых сигналах.

За период функционирования комплекса с ноября 2020 г. были оценены максимальная дальность регистрации лавины и их минимальный объём. В январе 2022 г. была зарегистрирована лавина, сошедшая в лавиносборе «Снежный» на удалении 7 км от комплекса, её объём составил 5 тыс. м³. Наименьший объём лавины, зарегистрированной комплексом, был отмечен 08.03.2021. Лавина объёмом 0.5 тыс. м³ сошла со склона горы Юкспор в 2.5 км от комплекса.

Основная сложность автоматизации мониторинга снежных лавин по данным одиночного инфразвукового комплекса — это вопрос дифференциация целевых сигналов, генерируемых



Рис. 5. Станция инфразвукового мониторинга PABG: камера с низкочастотным микрофоном MPA-201, оснащённая пространственным фильтром фетровых помех. Фото А.И. Воронина, 20.11.2020

Fig. 5. PABG infrasound monitoring station: camera with MPA-201 low-frequency microphone equipped with a spatial felt noise filter. Photo by A.I. Voronin, 20.11.2020

ЛЁДИСНЕГ том 65 №1 2025



Рис. 6. Эффект применения фильтра ветровых помех: (*a*) сравнение записей, параллельно работающих двух каналов инфразвуковой станции PABG: оснащённого фильтром ветровых помех (сверху) и без такого фильтра (снизу). Сигналы приведены в единой временной шкале; (*б*) сравнение спектров шума в логарифмическом масштабе для двух датчиков, оснащённого фильтром ветровых помех (синий) и без (красный)

Fig. 6. The effect of applying a wind noise filter: (*a*) comparison of records of two channels of the PABG infrasound station operating in parallel: equipped with a wind noise filter (top) and without such a filter (bottom); (δ) comparison of noise spectra in logarithmic scale for two sensors equipped with a wind noise filter (blue) and without (red)

снежными лавинами, от сигналов другой природы. На данный момент для решения этой задачи мы выработали ряд критериев, совместное применение которых позволяет решать задачу в экспертном режиме:

– длительность сигнала более 10 с;

изменение направления на источник (признак движущегося источника);

обратный азимут направлен на лавинный очаг;

 – кажущаяся скорость в диапазоне 330–370 м/с (признак локального источника на уровне поверхности земли);

 отсутствие ассоциируемого по направлению и времени сейсмического сигнала.

Применение сети инфразвуковых комплексов, расположенных на расстоянии, позволяющем вести совместную регистрацию фактов схода лавин, позволяет значительно упростить задачу распознавания целевых сигналов, а также решить задачу локализации источника и трассировки линии пробега лавины по склону.

В зимний сезон 2021/22 г. на удалении первых километров от комплекса РАВС устанавливались две временные инфразвуковые станции мониторинга лавин. Первая инфразвуковая станция установлена в апреле 2021 г. на окраине г. Кировск (далее KIR) на два месяца. В марте 2022 г. на территории отдела лавинной безопасности была развёрнута ещё одна временная станция мониторинга лавинной активности (далее YUKS), проработавшая до мая 2022 г.

ЛОКАЦИЯ СХОДОВ ЛАВИН И ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ СИГНАЛОВ

Отмечено, что при использовании одной инфразвуковой группы для регистрации схода снежных лавин мы можем определить лишь направление на источник сигнала и по набору косвенных признаков сделать экспертное заключение о лавинной природе источника сигнала. При наличии нескольких инфразвуковых групп, разнесённых в пространстве на расстояние порядка 3-5 км, появляется возможность точной локации источника сигнала по пересечению азимутов на источник, рассчитанных по разным группам. В таблице приведён список лавин, зарегистрированных одновременно двумя инфразвуковыми станциями PABG и KIR или PABG и YUKS за время их параллельной работы в зимний сезон 2021/22 г., когда было точно определено местоположение. Объём лавин, представленных в таблице, получен по оценке службы лавинной безопасности г. Кировска.

Всего за период работы комплекса PABG с 2020 по 2022 г. в зоне потенциального контроля было зарегистрировано 36 подтверждённых случаев схода лавин, как самопроизвольных, так и спровоцированных в ходе проведения противолавинных мероприятий. Хорошо регистрировались сухие лавины с крутых склонов. Регистрация мокрых лавин в весенний период инфразвуковыми методами затруднительна из-за слабой генерации ими инфразвука при малой скорости. На возможность регистрации также значительное влияние оказывает рельеф

Дата	Время (UTC)	Место схода лавины: лавинный очаг (ЛО), гора	Зарегистриро- вавшие станции	Дистанция до лавинного очага (км)	Объём лавины, м ³
26.03.2021	13:35	ЛО № 43 гора Кукисвумчорр	PABG KIR	2.1 3	5000
02.04.2021	12:28	ЛО № 230 гора Кукисвумчорр	PABG KIR	2 3.1	2000
06.04.2021	9:52	ЛО «Дорога 7» гора Айкуайвенчорр	PABG KIR	2.6 1	неизвестно
15.04.2022	6:15	ЛО № 2 гора Айкуайвенчорр	PABG YUKS	4 2.4	4000
15.04.2022	10:03	ЛО № 7 гора Айкуайвенчорр	PABG YUKS	3.7 1.8	50000
18.04.2022	8:34	ЛО № 17 гора. Юкспорр	PABG YUKS	2 1.1	1000
20.04.2022	9:12	ЛО № 14 гора Юкспорр	PABG YUKS	2.3 0.9	1500
21.04.2022	9:31	ЛО «Ботанический цирк» гора Вудьяврчорр	PABG YUKS	2.1 4	3500

Таблица. Список лавин, место и время схода которых было определено по двум инфразвуковым станциям

местности. Лавины, сошедшие за перегибом рельефа, либо на склонах, обращённых от инфразвуковой станции, регистрировались весьма редко.

Следующая серьёзная задача заключается в дифференциации акустических сигналов лавин от сигналов других источников инфразвука, таких как землетрясения, массовые взрывы на открытых рудниках и др. Опыт эксплуатации экспериментального комплекса РАВС показал, что станцией регистрируется значительное количество сигналов такой природы. Они могут быть похожи на сигналы лавин по форме, длительности и направлению прихода. Однако в отличие от лавин эти явления обычно сопровождаются генерацией сильных сейсмических волн. Комплексное применение сейсмической и инфразвуковой регистрации позволит получить дополнительную информацию для дискриминации нецелевых событий по наличию, ассоциируемого с инфразвуковым, сейсмического сигнала.

выводы

Опыт проведённых экспериментов и эксплуатации стационарного инфразвукового комплекса лавинного мониторинга в Хибинском горном массиве на протяжении пяти зимних сезонов показал высокую применимость данного метода регистрации сходов лавин. На собранных данных показана возможность регистрировать лавины среднего объёма (более 5 тыс. м³) на удалениях до 7 км, а малые лавины (более 0.5 тыс. м³) на удалениях до 2.5 км. Однако разрешающая способность метода во многом зависит от рельефа местности на трассе распространения сигнала: для уверенной регистрации необходимы условия прямой видимости. Также на

ЛЁДИСНЕГ том 65 № 1 2025

собранных данных пока невозможно сделать вывод о доле пропуска цели, для этого необходимо накопление базы данных визуально подтверждённых лавин, сошедших в радиусе зоны потенциально уверенной регистрации комплекса. Эмпирически такой радиус для условий размещения комплекса РАВG оценивается авторами в 5 км.

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность сотрудникам отдела лавинной безопасности КФ АО "Апатит" и службы лавинной безопасности МКУ "Управление по делам гражданской обороны и чрезвычайным ситуациям города Кировска" за плодотворную совместную работу, консультации и информацию о фактах схода лавин и их объёмах, на основе которой авторы верифицировали данные инфразвуковых измерений.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-27-20007, https:// rscf.ru/project/24-27-20007

Acknowledgements. The authors would like to express their profound gratitude to the staff of the Avalanche Safety Department of Apatit and the avalanche safety service of the Kirovsk Civil Defence and Emergency Management Department for their invaluable joint work, consultations and information on avalanche occurrences and avalanche volumes. This information was used by the authors to verify the infrasound measurements.

The research was funded by a grant from the Russian Science Foundation (grant No. 24-27-20007; https://rscf.ru/project/24-27-20007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Асминг В.Э., Федоров А.В., Виноградов Ю.А., Чебров Д.В., Баранов С.В., Федоров И.С. Быстрый детектор инфразвуковых событий и его применение // Геофизические исследования. 2021. Т. 22. № 1. С. 54–67. https://doi.org/10.21455/gr2021.1-4
- Викулина М.А. Оценка лавинного риска в Хибинах // ИнтерКарто/ИнтерГИС. 2019. Т. 25. № 2. С. 66–76.
- *Мягков С.М.* География лавин / Ред. С.М. Мягкова, Л.А. Канаева. М.: Изд-во МГУ, 1992. 331 с.
- Пильгаев С.В., Черноус П.А., Филатов М.В., Ларченко А.В., Федоренко Ю.В. Комплекс лавинно-обвальной сигнализации // Тр. Кольского науч. центра РАН. 2016. № 4-2 (38). С. 98-101.
- *Тимофеев В.Г.* Снежно-метеорологическая служба Хибин / Ред. В.Г. Тимофеев. М.: Изд-во АИРО-XXI, 2017. 352 с.
- Федоров А.В., Федоров И.С., Воронин А.И., Асминг В.Э. Мобильный комплекс инфразвуковой регистрации снежных лавин: общий принцип построения и результаты применения // Сейсмические приборы. 2021. Т. 57. № 1. С. 5–15. https://doi.org/10.21455/si2021.1-1
- Фирстов П.П., Суханов А.А., Пергамент В.Х. Радионовский М.В. Акустические и сейсмические сигналы от снежных лавин // Докл. АН СССР. 1990. Т. 312. № 1. С. 67–71.
- Шмелев В.А. Система безопасности движения на горных участках // Путь и путевое хозяйство. Москва: Российские железные дороги, 2011. № 1. С. 17–18.
- *Bedard A*. Detection of Avalanches Using Atmospheric Infrasound // Proc. Western Snow Conference. Fort Collins, 1989. P. 52–58.
- Biescas B., Dufour F., Furdada G., Khazaradze G., Suriñach E. Frequency content evolution of snow avalanche seismic signals // Surveys in Geophysics. 2003. V. 24. P. 447–464.
- Comey R., Mendenhall T. Recent Studies Using Infrasound Sensors to Remotely Monitor Avalanche Activity // Proceedings, International Snow Science Workshop. Wyoming, 2004. P. 640–646.
- Gauer P., Kern M., Kristensen K., Lied K., Rammer L., Schreiber H. On pulsed Doppler radar measurements of avalanches and their implication to avalanche dynamics // Cold Regions Science and Technology. 2007. V. 50. P. 55–71.

https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2007.03.009

Heck H., Hobiger M., van Herwijnen A., Schweizer J., Fah D. Localization of seismic events produced by avalanches using multiple signal classification // Geophys. Journ. International. 2017. V. 216 (1). P. 201–217. https://doi.org/10.1093/gji/ggy394

- Lacroix P., Grasso J.-R., Roulle J., Giraud G., Goetz D., Morin S., Helmstetter A. Monitoring of snow avalanches using a seismic array: Location, speed estimation, and relationships to meteorological variables // Journ. of Geophys. Research. 2012. V. 117. F01034. https://doi.org/10.1029/2011JF002106
- Marchetti E., Ripepe M., Ulivieri 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. V. 15. P. 2709–2737. https://doi.org/10.5194/nhess-15-2545-2015
- Marchetti E., van Herwijnen A., Christen M., Silengo M.C., Barfucci G. Seismo-acoustic energy partitioning of a powder snow avalanche // Earth Surface Dynamics. 2020. V. 8. P. 399–411. https://doi.org/10.5194/esurf-8-399-2020
- Mayer S., Van Herwijnen A., Ulivieri G., Schweizer J. Evaluating the performance of an operational infrasound avalanche detection system at three locations in the Swiss Alps during two winter seasons // Cold Regions Science and Technology. 2020. V. 173. 102962. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.102962
- *McClung D., Schaerer P.* The Avalanche Handbook. Washington, U.S.A.: The Mountaineers Books, 2006. 342 p.
- Michael A., Hedlin H., Alcoverro B., D'Spain G. Evaluation of rosette infrasonic noise-reducing spatial filters // Journ. of Acoustic Society Amer. 2003. V. 114 (4). P. 1807–1820. https://doi.org/10.1121/1.1603763
- Pérez-Guillén C., Sovilla B., E. Suriñach E., Tapia M., Köhler A. Deducing avalanche size and flow regimes from seismic measurements // Cold Regions Science and Technology. 2016. V. 121. P. 25–41.
- Prokop A., Schön P., Wirbel A., Jungmayr M. Monitoring avalanche activity using distributed acoustic fiber optic sensing // Proc., International Snow Science Workshop. Banff, 2014. P. 129–133.
- Schimmel A., Hubl J., Koschuch R., Reiweger I. Automatic detection of avalanches: evaluation of three different approaches // Natural Hazards. 2017. V. 87. P. 83–102. https://doi.org/10.1007/s11069-017-2754-1
- Scott E.D, Hayward C.T, Kubicheck R., Hammon J., Pierre J., Comey B., Mendenhall T. Single and Multiple Sensor Identification of Avalanche Generated Infrasound // Cold Regions Science and Technology. 2007. V. 47. P. 159–170.

https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2006.08.005

Steinkogler W., Ulivieri G., Vezzosi S., Hendrikx J., van Herwijnen A., Humstad T. Infrasound Detection of

ЛЁД И СНЕГ том 65 № 1 2025

Avalanches: operational experience from 28 combined winter seasons and future developments // Proc. of the 2018 International Snow Science Workshop. Austria, 2018. P. 621–626.

https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.10.004

van Herwijnen A., Schweizer J. Monitoring avalanche activity using a seismic sensor // Cold Regions Science and Technology. 2011. V. 69. P. 165–176. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.06.008

Vilajosana I., Khazaradze G., Surinach E., Lied E., Kristensen K. Snow avalanche speed determination using seismic methods // Cold Regions Science and Technology. 2007. V. 49. P. 2–10. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2006.09.007

Citation: *Fedorov A.V., Fedorov I.S., Asming V.E., Motorin A.Yu.* Experiments on the application of the infrasound method of remote monitoring of snow avalanches in the Khibiny Mountains. *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2025, 65 (1): 81–92. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673425010064

Experiments on the application of the infrasound method of remote monitoring of snow avalanches in the Khibiny Mountains

© 2025 A. V. Fedorov, I. S. Fedorov[#], V. E. Asming, A. Yu. Motorin

Kola Branch of Geophysical Survey of RAS, Apatity, Russia [#]e-mail: ifedorov@krsc.ru

Received August 27, 2024; revised October 29, 2024; accepted December 25, 2024

Visual slope observations are still the main method of avalanche detection. As a result, avalanche statistics, especially in remote mountain areas, remain incomplete. Like earthquake forecasting, the avalanche prognosis is a complex task that requires a complete set of data on avalanche activity in the region and meteorological observations. To begin this process, it is necessary to create a remote all-weather automated avalanche monitoring system. The Kola Branch of the Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences initiated developing a hardware and software package for the avalanche monitoring. The main function of this complex is the registration of seismic and infrasound signals. Over the last five years, a series of experiments have been conducted in the Khibiny Mountains aimed at registration of forced avalanche releases carried out by the avalanche safety service. During the experiments, signals produced by avalanches were recorded using a broadband seismometer and an array of three low-frequency microphones installed at varying distances from an avalanche source. The results obtained demonstrated the high recording capability of the infrasound method, but also revealed problems associated with the use of the seismic method. Technical solutions have been found and prototypes of software for automated detection of target signals have been created. Thus, the experimental complex to monitor avalanche activity in the Khibiny Mountains has been established. The operation of the complex has shown that infrasound signals generated by the movement of snow mass on the mountain slope allow detecting avalanches with a volume of about 5 thousand m³ at a distance of 7 km. The smallest recorded avalanche had a volume of 0.5 thousand m³ and was located in 2.5 km away from the station.

Keywords: snow avalanches, infrasound, monitoring, Khibiny Mountains

REFERENCES

- Asming V.E., Fedorov A.V., Vinogradov Yu.A., Chebrov D.V., Baranov S.V., Fedorov I.S. Fast detector of infrasound events and its application. Geofizicheskie issledovaniya. Geophysical Research. 2021, 22 (1): 54–67 [In Russian].
- Vikulina M.A. Avalanche risk assessment in the Khibiny. InterKarto/InterGIS. InterKarto/InterGIS. 2019, 25 (2): 66–76 [In Russian].
- *Myagkov S.M. Geografiya lavin.* Geography of avalanches. Moscow: Moscow University Press, 1992: 331 p. [In Russian].
- Pilgaev S.V., Chernous P.A., Filatov M.V., Larchenko A.V., Fedorenko Y.V. Avalanche-rockfall signalling complex. Trudy Kolskogo nauchnogo centra RAN. Proc. of the Kola Scientific Centre of RAS. 2016, 4–2 (38): 98–101 [In Russian].
- *Timofeev V.G. Snezhno-meteorologicheskaya sluzhba Hibin.* Snow and meteorological service of the Khibiny Mountains. Moscow: AIRO-XXI, 2017: 352 p. [In Russian].
- Fedorov A.V., Fedorov I.S., Voronin A.I., Asming V.E. Mobile complex of infrasound registration of snow

ЛЁДИСНЕГ том 65 №1 2025

avalanches: general principle of construction and results of application. *Sejsmicheskie pribory*. Seismic Devices. 2021, 57 (1): 5–15 [In Russian].

- Firstov P.P., Sukhanov A.A., Pergament V.H. Radionovsky M.V. Acoustic and seismic signals from snow avalanches. Doklady Akademii Nauk SSSR. Report of the USSR Academy of Sciences. 1990, 312 (1): 67–71 [In Russian].
- Shmelev V.A. Traffic safety system on mountainous areas. Put i putevoe hozyajstvo. Track and track facilities. Moscow: Russian Railways, 2011, 1: 17–18 [In Russian].
- *Bedard A*. Detection of Avalanches Using Atmospheric Infrasound. Proceedings Western Snow Conference. Fort Collins, 1989: 52–58.
- Biescas B., Dufour F., Furdada G., Khazaradze G., Suriñach E. Frequency content evolution of snow avalanche seismic signals. Surveys in Geophysics. 2003, 24: 447–464.
- Comey R., Mendenhall T. Recent Studies Using Infrasound Sensors to Remotely Monitor Avalanche Activity. Proceedings, International Snow Science Workshop. Wyoming, 2004: 640–646.
- Gauer P., Kern M., Kristensen K., Lied K., Rammer L., Schreiber H. On pulsed Doppler radar measurements of avalanches and their implication to avalanche dynamics. Cold Regions Science and Technology. 2007, 50: 55–71.

https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2007.03.009

- Heck H., Hobiger M., van Herwijnen A., Schweizer J., Fah D. Localization of seismic events produced by avalanches using multiple signal classification. Geophysical Journal International. 2017, 216 (1): 201–217. https://doi.org/10.1093/gji/ggy394
- Lacroix P., Grasso J.-R., Roulle J., Giraud G., Goetz D., Morin S., Helmstetter A. Monitoring of snow avalanches using a seismic array: Location, speed estimation, and relationships to meteorological variables. Journ. of Geophys. Research. 2010, 117: F01034. https://doi.org/10.1029/2011JF002106
- Marchetti E., Ripepe M., Ulivieri 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, 15: 2709–2737. https://doi.org/10.5194/nhess-15-2545-2015
- Marchetti E., van Herwijnen A., Christen M., Silengo M.C., Barfucci G. Seismo-acoustic energy partitioning of a powder snow avalanche. Earth Surface Dynamics.

2020, 8: 399–411.

https://doi.org/10.5194/esurf-8-399-2020

- Mayer S., Van Herwijnen A., Ulivieri G., Schweizer J. Evaluating the performance of an operational infrasound avalanche detection system at three locations in the Swiss Alps during two winter seasons. Cold Regions Science and Technology. 2020, 173: 102962. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.102962
- McClung D., Schaerer P. The Avalanche Handbook / The Mountaineers Books, Washington, U.S.A. 2006: 342 p.
- Michael A., Hedlin H., Alcoverro B., D'Spain G. Evaluation of rosette infrasonic noise-reducing spatial filters. Journ. Acoustic Society Amer. 2003, 114 (4): 1807–1820. https://doi.org/10.1121/1.1603763
- Pérez-Guillén C., Sovilla B., E. Suriñach E., Tapia M., Köhler A. Deducing avalanche size and flow regimes from seismic measurements. Cold Regions Science and Technology. 2016, 121: 25–41.
- Prokop A., Schön P., Wirbel A., Jungmayr M. Monitoring avalanche activity using distributed acoustic fiber optic sensing. Proceedings, International Snow Science Workshop. Banff, 2014: 129–133.
- Schimmel A., Hubl J., Koschuch R., Reiweger I. Automatic detection of avalanches: evaluation of three different approaches. Natural Hazards. 2017, 87: 83–102. https://doi.org/10.1007/s11069-017-2754-1
- Scott E.D, Hayward C.T, Kubicheck R., Hammon J., Pierre J., Comey B., Mendenhall T. Single and Multiple Sensor Identification of Avalanche Generated Infrasound. Cold Regions Science and Technology. 2007, 47: 159–170.

https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2006.08.005

Steinkogler W., Ulivieri G., Vezzosi S., Hendrikx J., van Herwijnen A., Humstad T. Infrasound Detection of Avalanches: operational experience from 28 combined winter seasons and future developments. Proc. of the 2018 International Snow Science Workshop. Austria, 2018: 621–626.

https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.10.004

van Herwijnen A., Schweizer J. Monitoring avalanche activity using a seismic sensor. Cold Reg. Sci. Technol. 2021, 69: 165–176.

https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.06.008

Vilajosana I., Khazaradze G., Surinach E., Lied E., Kristensen K. Snow avalanche speed determination using seismic methods. Cold Regions Science and Technology. 2007, 49: 2–10. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2006.09.007