

УДК 551.578.48

## Система автоматизированного геофизического мониторинга лавинной активности в Хибинском горном массиве

© 2026 г. А.В. Федоров, И.С. Федоров, В.Э. Асминг, А.Ю. Моторин

КоФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Апатиты, Россия

Поступила в редакцию 09.02.2026 г.

**Аннотация.** В работе описана система автоматического мониторинга лавинной активности, построенная на аппаратных решениях и программных средствах, разрабатываемых в Кольском филиале ФИЦ ЕГС РАН с 2018 года. По состоянию на зимний сезон 2025–2026 гг. система включает в себя три инфразвуковых мини-группы апертурой 150–200 м, оборудованных низкочастотными микрофонами, расположенными в пределах Хибинского горного массива. Одна из групп дополнительно укомплектована сейсмической станцией. Для автоматического обнаружения инфразвуковых и сейсмических сигналов на записях групп применяется специальное программное обеспечение, разработанное в организации. В работе описаны состав и основные характеристики аппаратной части созданной системы, а также реализованные алгоритмы анализа собираемых данных в части распознавания целевых сигналов. Распознавание целевых сигналов основано на анализе временных и частотных характеристик сигналов, сопоставлении азимутальных оценок с базой характеристик известных лавиносборов, а также анализе информации о региональной сейсмичности. Приведена статистика регистрации снежных лавин за предыдущие сезоны экспериментальной эксплуатации системы. На основе анализа накопленных данных делается вывод о характеристиках зоны уверенной регистрации лавинной активности и объёмах потенциально контролируемых лавин, без учёта рельефа местности. Проведённые испытания системы автоматического обнаружения и распознавания целевых сигналов показали хороший результат. Работы по накоплению статистических данных о точности и надёжности работы системы будут продолжены.

**Ключевые слова:** снежная лавина, лавинная опасность, мониторинг, геофизические методы, инфразвуковая волна, сейсмическая станция.

**Для цитирования:** Федоров А.В., Федоров И.С., Асминг В.Э., Моторин Ю.А. Система автоматизированного геофизического мониторинга лавинной активности в Хибинском горном массиве // Российский сейсмологический журнал. – 2026. – Т. 8, № 2. – С. 52–62. – DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2026.2.04>. – EDN: KREXCU.

### Введение

Проблема обеспечения лавинной безопасности остро стоит во многих горных регионах России, где проложены транспортные пути, расположены горнодобывающие предприятия либо размещена туристическая инфраструктура [Викулина, 2019; Селиверстов и др., 2010]. Несмотря на многолетний опыт специализированных служб в этой области, снежные лавины ежегодно становятся причиной возникновения чрезвычайных ситуаций, опасных для жизни и деятельности человека. Одной из основных задач в вопросе изучения снежных лавин является автоматизация процесса мониторинга их активности. Основным способом наблюдения за снежными

лавинами до сегодняшнего дня остаётся визуальный контроль склонов. При этом лавины часто сходят в труднодоступных или малонаселённых местах, в тёмное время суток, в плохих метеорологических условиях, когда визуальное наблюдение их невозможно [География ..., 1992]. Перечисленные факторы приводят к тому, что статистические данные о частоте схода лавин в различных регионах неполны. Опыт человечества в противостоянии другим опасным природным явлениям показывает, что любые достижения в вопросах прогноза и предупреждения строятся на полных и длительных рядах наблюдений того или иного феномена и особенностей его проявлений.

Для решения проблемы недостатка наблюдений за лавинными проявлениями

в труднодоступных горных районах с 2018 г. специалистами Кольского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (КоФ ФИЦ ЕГС РАН) в инициативном порядке разрабатывается инфразвуковой аппаратно-программный комплекс мониторинга лавинной активности. С 2020 г. первый в России стационарный экспериментальный комплекс мониторинга лавинной активности функционирует вблизи г. Кировска в Хибинском горном массиве. Работы последних двух лет в рамках гранта Российского научного фонда были направлены на развитие методов и программных средств автоматического мониторинга лавинной активности, где главной задачей было решение вопросов обнаружения целевых сигналов и их достоверной дискриминации от сигналов иной природы.

Принципиальная возможность применения регистрации инфразвука для фиксации лавинной активности впервые была продемонстрирована в конце 80-х – начале 90-х гг. прошлого столетия [Bedard, 1989; Фурстов и др., 1990]. Развитие подобных работ активно продолжается в последнее десятилетие в разных регионах мира [Marchetti et al., 2015; Watson et al., 2026].

Ряд экспериментов, проведённых авторами в Хибинском горном массиве на принудительно спускаемых лавинах, показал, что в случае схода даже небольших лавин объёмом порядка  $500 \text{ м}^3$  движущаяся по склону снежная масса генерирует инфразвуковой сигнал, который может быть записан системой низкочастотных микрофонов на удалении в несколько километров [Федоров и др., 2025]. Расстояние уверенной регистрации сильно зависит от объёма лавины, рельефа местности и ветровой обстановки на трассе источник–приёмник. Одновременно было показано, что на записях широкополосной сейсмической станции не обнаруживаются явные сигналы от схода лавин объёмом до 20 тыс.  $\text{м}^3$  на удалениях уже первых сотен метров от источника. Таким образом, была определена принципиальная возможность регистрации инфразвуковых сигналов в условиях Хибин, генерируемых сходом снежных лавин, и определены их основные амплитудно-частотные характеристики.

В 2020 г. на основе полученных в результате полевых экспериментов данных был создан первый в России стационарный инфразвуковой комплекс мониторинга лавинной активности. Этот комплекс (код станции РАВГ) был расположен на территории Полярно-альпийского ботанического сада-института им. Н.А. Авро-

рина КНЦ РАН (ПАБСИ), где функционирует и на момент написания данной статьи. Таким образом, по этому пункту наблюдений сформирована база записей инфразвуковых сигналов, покрывающая период в пять зимних сезонов.

В октябре 2024 г. в рамках реализации регионального проекта РНФ, софинансируемого правительством Мурманской области, по теме изучения возможности применения сейсмоинфразвукового комплекса лавинного мониторинга для оперативного реагирования на сходы снежных лавин в зонах основных туристических маршрутов Хибинского горного массива был создан второй постоянно действующий пункт мониторинга. Он расположен на территории базы поисково-спасательной станции МЧС России «Куэльпорр» в центральной части Хибин. Код станции KLPR [Федоров и др., 2024].

В феврале 2025 г. был развёрнут третий инфразвуковой комплекс лавинного мониторинга в Хибинах – на территории базы географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова у подножия горы Юкспорр (код YUKS2).

Таким образом, к моменту написания данной статьи в Хибинах была сформирована сеть геофизических пунктов мониторинга лавинной активности. Их расположение приведено на рис. 1.

## Оборудование

Все три геофизических комплекса мониторинга лавинной активности построены на схожей аппаратной части, включающей в себя низкочастотные микрофоны МРА-201 фирмы ZetLab и регистраторы геофизических сигналов «Ермак-5». Однако есть и различия, отражающие как специфику места расположения комплекса, так и решаемые задачи. Рассмотрим оборудование каждого комплекса отдельно.

### *Инфразвуковая группа ПАБСИ (РАВГ)*

Инфразвуковая группа РАВГ, как было сказано ранее, функционирует в непрерывном режиме с 2020 года. Группа состоит из четырёх низкочастотных микрофонов МРА-201, расположенных в форме ромба и разнесённых друг относительно друга на расстояние 150–200 м. Запись сигналов ведётся регистратором геофизических сигналов «Ермак-5» [Бутырин, 2021], подключённым через 4G-роутер к сети интернет. Регистратор «Ермак-5» имеет встроенный SeedLink-сервер, что позволяет организовать прямой канал передачи данных непосредственно на сервер сбора и обработки данных Кольского филиала ФИЦ ЕГС РАН.



Рис. 1. Карта расположения геофизических комплексов лавинного мониторинга в Хибинском горном массиве

Данная инфразвуковая группа содержит четыре датчика, в то время как на остальных используется схема с тремя микрофонами. Установка четвёртого микрофона была обоснована попыткой повысить точность определения азимутальных параметров инфразвуковых сигналов, близких к монохромным, так как в случае прихода на группу из трёх микрофонов монохромного сигнала алгоритмы анализа данных могут генерировать несколько неразличимых решений о направлении на источник сигнала. В случае же применения конфигурации из четырёх микрофонов решения становятся более устойчивыми.

#### **Сейсмоинфразвуковая группа Куэльпорт (KLPR)**

Из названия данного комплекса можно сделать вывод о том, что он объединяет два вида геофизических наблюдений — сейсмический и инфразвуковой. Группа включает в себя три низкочастотных микрофона МРА-201, расположенных в форме треугольника, близкого к равностороннему, с длиной стороны около 150 м, и трёхкомпонентную сейсмическую станцию. Взаимное расположение элементов комплекса показано на рис. 2. Каждый низкочастотный микрофон оборудован площадным фильтром низких частот для снижения негативного воздействия ветровой помехи [Hedlin et al., 2003], генерирующей фоновый шум в целевом диапазоне частот (рис. 3). Площадной фильтр в нашем

случае представляет из себя набор трубок длиной три метра, соединённых одним концом с интегрирующим объёмом (рис. 3). Принцип работы такого фильтра заключается в сложении акустического сигнала, поступающего на вход каждой трубки в интегрирующем объёме. В случае некогерентного сигнала (шума) при сложении его амплитуда снижается, в случае когерентного (полезного) сигнала его амплитуда возрастает. Корпус интегрирующего объёма соединён с корпусом размещения низкочастотного микрофона также пластиковой трубкой.

Включение сейсмической станции в состав комплекса KLPR мотивировано попыткой решения проблемы ложной ассоциации инфразвуковых сигналов, порождённых массовыми промышленными взрывами, с лавинной активностью. За время наблюдений в Хибинах неоднократно регистрировались сигналы, по ряду параметров схожие с сигналами, генерируемыми при сходе снежных лавин, однако при углублённой проверке оказывающиеся вызванными массовыми взрывами на карьерах горнодобывающих предприятий региона [Провоторов и др., 2013]. Для решения этой задачи было предложено одновременно анализировать записи инфразвуковых датчиков и сейсмической станции для отборки сигналов, ассоциируемых в пространстве и времени с сейсмической активностью.



**Рис. 2.** Схема расположения элементов сейсмоинфразвукового комплекса «Куэльпорр» (KLPR).

Красные круги – места установки низкочастотных микрофонов, треугольник – сейсмическая станция



**Рис. 3.** Монтаж пространственного фильтра низких частот на одном из микрофонов сейсмоинфразвукового комплекса KLPR

На комплексе KLPR впервые была протестирована система обеспечения электропитания оборудования от независимых источников. Также протестирован канал передачи данных по спутниковому соединению. Для решения задачи обеспечения оборудования электричеством в арктических условиях,

осложнённых полярной ночью и длительным периодом слабой освещённости, был реализован комплекс независимых источников энергообеспечения на базе компактного ветрогенератора Rutland 914 мощностью 150 Вт и двух солнечных панелей суммарной мощностью 300 Вт.

Передача потоковых данных была осуществлена посредством подключения регистратора геофизических сигналов «Ермак-5» к сетевому маршрутизатору TP-Link, который, в свою очередь, устанавливает Wi-Fi-соединение с точкой доступа спутникового терминала. Последний использует спутниковую сеть «Триколор» для доступа в интернет, что обеспечивает надёжное соединение в условиях, где GSM-связь отсутствует. Для обеспечения безопасности передачи данных и обеспечения соединения между регистраторами и сервером обработки данных применялась технология WireGuard. Организация VPN-туннеля через WireGuard позволяет избежать необходимости в использовании выделенного IP-адреса или установки ПК для передачи данных. Таким образом упрощается процесс получения необходимых данных для анализа, при этом обеспечивается высокий уровень защиты информации.

### **Инфразвуковая группа Юкспорр (YUKS2)**

Инфразвуковая группа у подножия горы Юкспорр была создана в феврале 2025 г. для отладки алгоритмов совместного анализа инфразвуковых записей нескольких групп в рамках создания программного обеспечения автоматической дискриминации и локации мест сходов снежных лавин. Место размещения комплекса выбиралось таким образом, чтобы обеспечить возможность одновременной регистрации общих источников с другим комплексом мониторинга, в этом случае с группой PABG.

Комплекс YUKS2 состоит из трёх микрофонов, разнесённых в пространстве в форме треугольника. Регистрация осуществляется дигитайзером «Ермак-5», а передача данных — посредством 4G-роутера по каналам мобильного интернет-соединения.

### **Методы**

В основе детектирования акустических сигналов, зарегистрированных группами разнесённых датчиков, лежит представление инфразвукового сигнала в виде плоской волны.

Поскольку длина инфразвуковой волны (десятки метров) сопоставима с расстояниями между элементами инфразвуковой группы, сигнал, записанный на разных сенсорах, является идентичным, с точностью до временных задержек прихода волны на датчики группы [Le Pichon *et al.*, 2010]. В то же время фоновый шум в силу своей стохастической природы варьирует от датчика к датчику. Таким образом, детектирование инфразвуковых событий заключается в обнаружении фрагментов идентичных сигналов на запи-

сках разных микрофонов инфразвуковой группы. Детектирование полезных сигналов осуществляется на основе расчёта взаимной корреляции записей всех датчиков группы с учётом задержек прихода сигнала для каждого из них, зависящих от азимута прихода фронта волны и её кажущейся скорости. Одним из отличительных признаков сигнала, порождённого сходом снежной лавины, является изменение азимута на источник, связанное непосредственно с движением фронта лавины, генерирующего сигнал. Ранее для автоматизации процесса обнаружения движущихся источников инфразвуковых сигналов было создано специальное программное обеспечение — быстрый детектор акустических сигналов QACD (quick acoustic detector) [Асминг *и др.*, 2021].

Однако почти пятилетний опыт наблюдения за лавинами на комплексе PABG показал, что в вопросе автоматизации мониторинга лавинной активности основная сложность заключается не в обнаружении инфразвуковых сигналов, генерируемых сходом снежных лавин, а в их распознавании среди сигналов другой природы, в том числе от движущихся в атмосфере источников. Более того, как упоминалось ранее, даже массовые взрывы на открытых карьерах горнодобывающих предприятий генерируют инфразвуковые сигналы, трудноотличимые от целевых и по форме записи, и по признаку изменения азимута. Так, зачастую короткозамедленный взрыв блока с линейными размерами в несколько десятков метров симулирует смещающийся в пространстве источник.

Для разработки алгоритма распознавания целевых сигналов мы обобщили данные по нескольким десяткам зарегистрированных и подтверждённых фактов схода снежных лавин. Подход к решению этой задачи заключался в комплексном анализе параметров регистрируемых инфразвуковых сигналов: изменение азимутальных оценок, спектральный состав записи, её длительность. Азимутальные оценки (азимут на источник, направление и угол его смещения) сопоставлялись с данными о рельефе местности, а точнее с информацией об известных лавиносборах. Для каждого такого лавиносбора были определены возможные пути пробега снежных лавин и сформирована соответствующая база данных.

Также в учёт бралась информация о наличии сейсмических сигналов, которые могут быть ассоциированы с инфразвуковыми сигналами в пространственной и временной области.

Было создано специальное программное обеспечение, интегрированное в программный

комплекс геофизического мониторинга, рутинно используемый в КоФ ФИЦ ЕГС РАН — PSDL [Асминг и др., 2025]. В ходе работы программы детектирования лавинной активности для каждого обнаруженного инфразвукового сигнала выполняется ряд проверок.

Проверка 1 — длительность сигнала. Выполняется уточнение длительности обнаруженного сигнала. Для этого рассчитывается корреляционная диаграмма по всему фрагменту записи, характеризующая степень взаимной корреляции записей на всех каналах инфразвуковой группы в зависимости от азимута на источник в некотором диапазоне кажущихся скоростей. На рассчитанной таким образом корреляционной диаграмме определяются моменты первого и последнего превышения заданного порога (начала и конца сигнала). Более подробно алгоритм описан в [Асминг и др., 2021]. Если длительность такого фрагмента менее 10 с или более 40 с, событие отвергается. Данные о характерной длительности сигналов, вызванных сходом снежных лавин в Хибинах, подобраны эмпирически. Для других горных регионов эти длительности, возможно, будут иными.

Проверка 2 — частотный состав сигнала. Исходные данные фильтруются в трёх полосах частот: 1–4 Гц, 4–6 Гц, 6–8 Гц. Производится сравнение амплитуд в разных полосах. Если амплитуда сигнала во второй или третьей полосе больше, чем в первой, сигнал отвергается. Характерные частоты сигналов, порождённых снежными лавинами, также определены эмпирически.

Проверка 3 — сопоставление с картой лавиносборов. Производится проверка наличия пересечения обратного азимута, определённого по инфразвуковой станции, с возможными путями пробега лавин из известных лавиносборов. Данный параметр проверяется не абсолютно, а с допущением наличия ошибки определения обратного азимута ( $\pm 5^\circ$ ) в программе PSDL. Если на направлении на источник сигнала не найдено потенциальных путей схода лавин, такое событие отвергается. Для событий, прошедших проверку, формируются списки возможных лавинных очагов — источников.

Проверка 4 — диапазон азимутальных оценок. Проверяется соответствие диапазона азимутов на источник геометрии пересекаемых им потенциальных путей схода лавин. Если сектор значительно шире, чем максимально возможный путь пробега лавины, с учётом погрешности определения азимута, то событие отвергается.

Проверка 5 — ассоциация с сейсмическим сигналом. Инфразвуковое событие проверяется

на наличие в каталоге сейсмического события, ассоциируемого с ним в пространственной и временной области, т.е. потенциально имеющего общий источник. Подробнее алгоритм описан в [Асминг, Федоров, 2024]. Если таковые найдутся, событие считается сигналом от взрыва и отвергается.

Сигналы, прошедшие все проверки, считаются потенциально связанными с лавинной активностью. Информация о них заносится в специальный бюллетень, содержащий список потенциальных путей пробега лавины, на которых мог быть сгенерирован этот сигнал.

На последнем этапе проводится анализ списков событий, прошедших перечисленные выше проверки, и ассоциируемых с ними путей схода лавин, сформированных на этапе 3 для каждой одиночной станции. Если в списках находятся пересечения, значит, существуют треки, на которых могла сойти лавина, являющаяся общим источником сигналов, записанных разными станциями. В этом случае формируется WEB-бюллетень, содержащий информацию об ассоциированном событии.

Таким образом, результатом работы программы становится ряд одностанционных бюллетеней и бюллетень ассоциированных событий, содержащих информацию о событиях, вероятно, порождённых сходами лавин.

Для удобства анализа получаемых бюллетеней было разработано веб-приложение, отображающее основную информацию об обнаруженных событиях. Пример его рабочего окна представлен на рис. 4. Большую часть экрана занимает карта местности с нанесёнными контурами лавиносборов (голубые полигоны), справа расположен список событий из выбранных бюллетеней, под картой приводятся рисунки записи сигнала (слева) и кросскорреляционной диаграммы (справа) выбранного события. На карте красными отрезками показаны азимутальные сектора, указывающие на начальное и конечное положение источника сигнала, красными стрелками на секторах обозначено направление смещения азимута во времени.

## Результаты

В результате работы автоматизированной системы мониторинга лавинной активности формируются списки потенциальных событий схода лавин. Для получения статистических оценок о количестве пропусков цели и ложных срабатываниях системы необходимо визуальное подтверждение фактов схода снежных лавин.

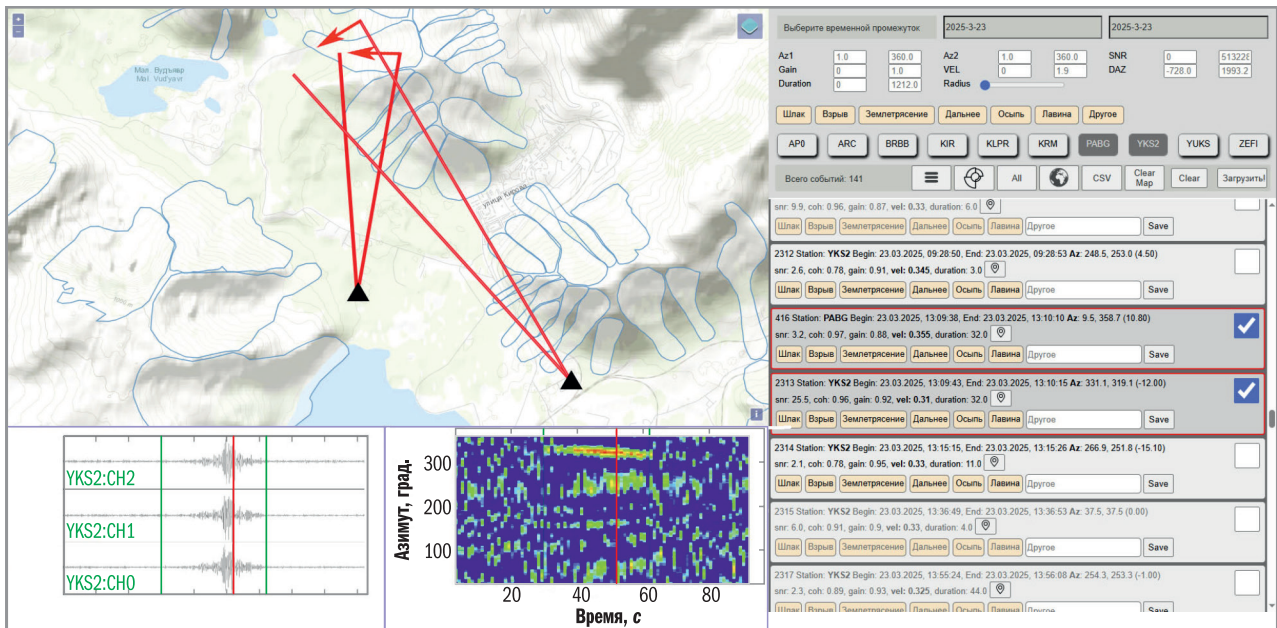


Рис. 4. Вид рабочего окна веб-приложения для анализа результатов работы программы обнаружения инфразвуковых сигналов

Такая информация далеко не всегда доступна по ряду объективных причин. Однако службы лавинной безопасности в Хибинах ведут учёт снежных лавин, сходящих в зоне их ответственности. На этих данных нами были выполнены оценки регистрирующей способности инфразвукового комплекса РАВГ. Данные противолавинных служб о зарегистрированных фактах схода снежных лавин были сопоставлены с каталогами, полученными по записям комплекса РАВГ за 2021–2024 гг. Всего была проанализирована информация о 113 подтверждённых лавинах объёмом более 1 тыс.  $m^3$ . 50 лавин были исключены из анализа, так как склоны, с которых они сошли, находились на удалении более 10 км и были ориентированы в противоположном от комплекса направлении. По оставшимся 63 лавинам был построен график, представленный на рис. 5. Анализ графика (рис. 5) позволяет определить удаления уверенной регистрации снежных лавин инфразвуковым комплексом РАВГ в зависимости от объёма сошедшей снежной массы. Под уверенной регистрацией подразумевается не только факт фиксации сигнала на инфразвуковом комплексе, но и согласованность автоматически определённых параметров схода лавины с её реальным местоположением, допуская погрешность определения обратного азимута на точку старта и финиша в пределах 5 градусов.

Таким образом, из графика на рис. 5 можем заключить, что для малых лавин объёмом 1–2 тыс.  $m^3$  расстояние уверенной регистра-

ции составляет порядка 2.5 км, при этом лавины объёмом 10 тыс.  $m^3$  должны регистрироваться комплексом с удалений 5.5 км, а большие для Хибинского массива лавины объёмом 50 тыс.  $m^3$  должны уверенно регистрироваться на удалении 7.5 км.

Разумеется, регистрационная способность каждого комплекса должна иметь выраженную азимутальную зависимость, обусловленную спецификой рельефа местности, однако накопленных на сегодняшний день данных для таких оценок недостаточно. По этой же причине нельзя распространять оценки регистрационной способности комплекса РАВГ на другие комплексы в Хибинах. Также важным фактором, влияющим на регистрационные способности инфразвуковых групп, является сила и направление ветра. К сожалению, изучение данного фактора влияния осталось за рамками данного исследования. Однако для получения оценочной функции регистрационной способности комплекса, по мнению авторов, собранной статистики достаточно.

Эти оценки могут быть использованы при проектировании мониторинговой сети инфразвуковых комплексов, с целью обеспечения перекрытия зон уверенной регистрации.

### Заключение

В результате многолетних экспериментов и опытной эксплуатации тестовых инфразвуковых групп в Хибинском горном массиве

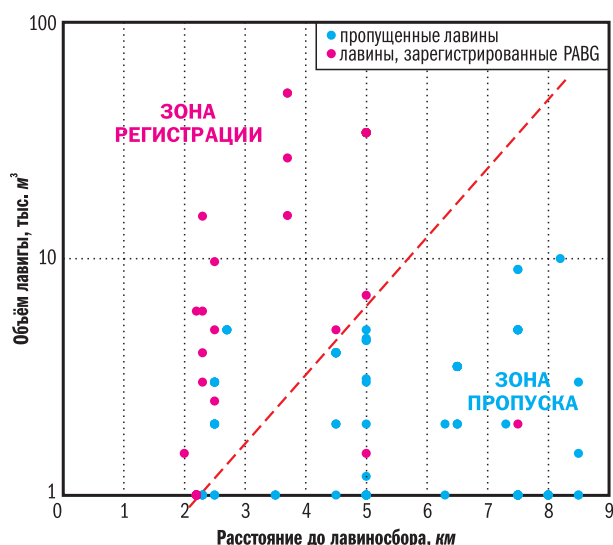


Рис. 5. График регистрационной возможности комплекса РАВГ.

Синие точки – подтвержденные лавины, не записанные комплексом, красные – зарегистрированные

к зимнему сезону 2025–2026 гг. была сформирована сеть из трёх комплексов геофизического мониторинга лавинной активности. Все комплексы построены на типовых базовых аппаратных решениях, однако включают различные элементы систем передачи данных и электропитания, что позволяет решать специфические задачи, связанные с обеспечением непрерывного функционирования оборудования в труднодоступной местности. Накопленный опыт регистрации сигналов, генерируемых сходом снежных лавин, позволил перейти к решению вопроса автоматизации процесса обнаружения и распознавания лавинных событий на фоне плотного потока нецелевых сигналов. Был создан программный комплекс, который в автоматическом режиме предоставляет информацию о фактах лавинной активности. Комплекс способен обнаруживать сигналы, ассоциируемые со сходом лавин, по данным записей одиночной инфразвуковой группы или сети таких групп. Также программно реализована задача ассоциации инфразвуковых сигналов с сейсмическими, для дискриминации записей от массовых промышленных взрывов. При регистрации факта схода снежной лавины минимум двумя инфразвуковыми комплексами система позволяет локализовать конкретный лавинный очаг (либо несколько смежных) и определить возможный путь схода лавины. При использовании сети таких групп достоверность получаемых результатов значительно увеличивается, возрас-

тает и точность определения координат места отрыва лавины и её финиша.

Для оперативного анализа результатов работы автоматизированной системы мониторинга лавинной активности разработано веб-приложение, представляющее пользователю основные параметры обнаруженных сигналов, их графическое представление, а также локализацию источника на картографической основе.

Проведённое сопоставление накопленного каталога верифицированных сигналов схода снежных лавин с базой данных службы лавинной безопасности администрации г. Кировска позволило получить оценки дальности уверенной регистрации одиночного инфразвукового комплекса в зависимости от объёма сошедшей лавины.

Комплекс введён в опытную эксплуатацию в лавиноопасном сезоне 2025–2026 гг. Анализ накопленных результатов работы программно-аппаратного комплекса на текущий момент не позволяет утверждать, что все обнаруживаемые на записях события порождены снежными лавинами. Для этого не хватает данных по визуальному обследованию склонов. Однако верификация результатов его работы будет продолжена во взаимодействии со службами лавинной безопасности.

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

### Литература

- Асминг В.Э., Федоров А.В. Алгоритмы автоматического детектирования и локации инфразвуковых событий в системе PSDL // *Russian Journal of Earth Sciences*. – 2024. – Т. 24, № 6. – С. ES6002. – DOI: 10.2205/2024es000944. – EDN: ZVUUJP
- Асминг В.Э., Федоров А.В., Виноградов Ю.А. Поточная система детектирования и локации сейсмических и инфразвуковых событий PSDL // *Геофизические исследования*. – 2025. – Т. 26, № 3. – С. 5–25. – DOI: 10.21455/gr2025.3-1. – EDN: OTTKFQ
- 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. – DOI: 10.21455/gr2021.1-4. – EDN: MSOZRN
- Бутырин П.Г. Цифровой сейсмический регистратор «Ермак-5». Пять лет развития // *Российский сейсмологический журнал*. – 2021. – Т. 3, № 3. – С. 84–94. – DOI: 10.35540/2686-7907.2021.3.06. – EDN: PUJCLI

- Викулина М.А.* Оценка лавинного риска в Хибинах // *ИнтерКарто. ИнтерГИС.* – 2019. – Т. 25, № 2. – С. 66–76. – DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-66-76. – EDN: FCRUYK
- География лавин* / Под ред. С.М. Мягкова, Л.А. Канаева. – М.: Издательство МГУ, 1992. – 332 с. – EDN: YLUUXL
- Провоторов Д.С., Соловьев А.В., Виноградов Ю.А.* Амплитудно-частотные характеристики инфразвуковых сигналов от наземных взрывов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2013. – Т. 322, № 2. – С. 87–90. – EDN: PXGYPB
- Селиверстов Ю.Г., Шныпарков А.Л., Глазовская Т.Г.* Оценка лавинного риска для населения горных районов России // *Лёд и снег.* – 2010. – № 4(112). – С. 41–44. – EDN: PIVOQZ
- Федоров А.В., Асминг В.Э., Федоров И.С.* Применение комплекса инфразвуковых и сейсмических методов регистрации для мониторинга снежных лавин в Хибинском горном массиве // *Триггерные эффекты в геосистемах. Тезисы докладов VII Международной конференции.* – Москва: ИДГ РАН, 2024. – С. 134. EDN: MVUDIY
- Федоров А.В., Федоров И.С., Асминг В.Э., Моторин А.Ю.* Эксперименты по применению инфразвукового метода дистанционного мониторинга снежных лавин в Хибинах // *Лёд и снег.* – 2025. – Т. 65, № 1. – С. 81–92. – DOI: 10.31857/S2076673425010064. – EDN: GZEVZS
- Фирстов П.П., Суханов А.А., Пергамент В.Х., Радионовский М.В.* Акустические и сейсмические сигналы от снежных лавин // *Доклады Академии наук.* – 1990. – Т. 312, № 1. – С. 67–71.
- Bedard A.* Detection of avalanches using atmospheric infrasound // *Proceedings of the Western Snow Conference* / Ed. B. Shafer. – Fort Collins, USA, 1989. – P. 52–58.
- Hedlin M.A.H., Alcoverro B., D'Spain G.* Evaluation of rosette infrasonic noise-reducing spatial filters // *The Journal of the Acoustical Society of America.* – 2003. – V. 114, N 4. – P. 1807–1820. – DOI: 10.1121/1.1603763
- Le Pichon A., Blanc E., Hauchecorne A. (Eds.)*. Infrasound monitoring for atmospheric studies. – Springer Science & Business Media, 2010. – 735 p. – DOI: 10.1007/978-1-4020-9508-5
- 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. – V. 3, N 4. – P. 2709–2737. – DOI: 10.5194/nhessd-3-2709-2015
- Watson L.W., Miller A., Anderson J.F., Toney L., Ardid A.* Detecting snow avalanche activity using infrasound: Hooker Valley, New Zealand // *New Zealand Journal of Geology and Geophysics.* – 2026. – V. 69, Iss. 1. – P. e70015. – DOI: 10.1002/jgo2.70015

### Сведения об авторах

**Федоров Андрей Викторович**, канд. физ.-мат. наук, директор Кольского филиала Федерального исследовательского центра «Единая Геофизическая служба Российской академии наук» (КоФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Апатиты, Россия. E-mail: Afedorov@krsc.ru

**Федоров Иван Сергеевич**, науч. сотр. КоФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Апатиты, Россия. E-mail: Fedorov@krsc.ru

**Асминг Владимир Эрнестович**, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. КоФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Апатиты, Россия. E-mail: AsmingVE@mail.ru

**Моторин Александр Юрьевич**, науч. сотр. КоФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Апатиты, Россия. E-mail: MotorinAYu@krsc.ru

## Automated geophysical monitoring system for avalanche activity in the Khibiny mountain range

© 2026 A.V. Fedorov, I.S. Fedorov, V.E. Asming, A.Yu. Motorin

KoB GS RAS, Apatity, Russia

Received February 09, 2026

**Abstract** This paper describes an automatic avalanche monitoring system built on hardware and software solutions developed at the Kola Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences since 2018. As of the 2025–2026 winter season, the system comprises three infrasound mini-arrays with an aperture of 150–200 meters, equipped with low-frequency microphones, located within the Khibiny mountain range. One of the arrays is additionally equipped with a seismic station. Special software developed in-house is used to automatically detect infrasound and seismic signals in array recordings. The paper describes the composition and main characteristics of the hardware of the developed system, as well as the implemented algorithms for analyzing the collected data for target signal recognition. Target signal recognition is based on the analysis of the temporal and frequency characteristics of the signals, the comparison of azimuthal estimates with a database of known avalanche catchments, and the analysis of information on regional seismicity. Statistics on snow avalanche detection for previous seasons of the system's experimental operation are presented. Based on the analysis of the accumulated data, a conclusion is drawn regarding the zone of reliable avalanche activity detection and the volume of potentially monitored avalanches, regardless of terrain. The main limitations for transitioning to routine monitoring using infrasound control methods are the insufficient statistics on confirmed avalanche events. Therefore, at the current stage of research, it is impossible to confirm that all signals recognized by the system as avalanche-related are the result of avalanche activity. Work to accumulate statistical data on the quality of target signal recognition will continue.

**Keywords** snow avalanche, avalanche hazard, monitoring, geophysical methods, infrasound wave, seismic station.

**For citation** Fedorov, A.V., Fedorov, I.S., Asming, V.E., & Motorin, A.Yu. (2026). [Automated geophysical monitoring system for avalanche activity in the Khibiny mountain range]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 8(2), 52–62. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2026.2.04>. EDN: KREXCU.

### References

- Asming, V.E., & Fedorov, A.V. (2024). [Algorithms for automatic detection and location of infrasound events in the PSDL system]. *Russian Journal of Earth Sciences* [Russian Journal of Earth Sciences], 24(6), ES6002. (In Russ.). DOI: [10.2205/2024es000944](https://doi.org/10.2205/2024es000944). EDN: ZVUUJP
- Asming, V.E., Fedorov, A.V., & Vinogradov, Yu.A. (2025). [Streaming system for detection and location of seismic and infrasound events PSDL]. *Geofizicheskie issledovaniia* [Geophysical Research], 26(3), 5–25. (In Russ.). DOI: [10.21455/gr2025.3-1](https://doi.org/10.21455/gr2025.3-1). EDN: OTTKFQ
- Asming, V.E., Fedorov, A.V., Vinogradov, Yu.A., Chebrov, D.V., Baranov, S.V., & Fedorov, I.S. (2021). [Fast infrasonic event detector and its application]. *Geofizicheskie issledovaniia* [Geophysical Research], 22(1), 54–67. (In Russ.). DOI: [10.21455/gr2021.1-4](https://doi.org/10.21455/gr2021.1-4). EDN: MSOZRN
- Bedard, A. (1989). Detection of avalanches using atmospheric infrasound. In *Proceedings of the Western Snow Conference*, ed. B. Shafer, (pp. 52–58). Fort Collins, USA.
- Butyrin, P.G. (2021). [Digital seismic logger “Ermak-5”. Five years of development]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian journal of seismology], 3(3), 84–94. (In Russ.). DOI: [10.35540/2686-7907.2021.3.06](https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.3.06). EDN: PUJCLI
- Fedorov, A.V., Asming, V.E., & Fedorov, I.S. (2024). [Application of a complex of infrasound and seismic registration methods for monitoring snow avalanches in the Khibiny mountain range] In *Triggernye efekty v geosistemakh. Tezisy dokladov VII Mezhdunarodnoi konferentsii* [Trigger effects in geosystems. Abstracts of the VII International Conference] (pp. 134). Moscow, Russia: IDG RAS Publ. (In Russ.). EDN: MVUDIY
- Fedorov, A.V., Fedorov, I.S., Asming, V.E., & Motorin, A.Yu. (2025). [Experiments on the application of the infrasound method of remote monitoring of snow avalanches in the Khibiny mountains]. *Led i sneg* [Ice and Snow], 65(1), 81–92. (In Russ.). DOI: [10.31857/S2076673425010064](https://doi.org/10.31857/S2076673425010064). EDN: GZEZVS
- Firstov, P.P., Suhanov, A.A., Pergament, V.X., & Radionovskij, M.V. (1990). [Acoustic and seismic signals from

- snow avalanches]. *Doklady Akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences], 312(1), 67-71. (In Russ.).
- Hedlin, M.A.H., Alcoverro, B., & D'Spain, G. (2003). Evaluation of rosette infrasonic noise-reducing spatial filters. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 114(4), 1807-1820. DOI: 10.1121/1.1603763
- Le Pichon, A., Blanc, E., & Hauchecorne, A. (Eds.). (2010). *Infrasound monitoring for atmospheric studies*. Springer Science & Business Media, 735 p. DOI: 10.1007/978-1-4020-9508-5
- 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*, 3(4), 2709-2737. DOI: 10.5194/nhessd-3-2709-2015
- Myagkov, S.M., & Kanaev, L.A. (Eds.). (1992). *Geografiia lavin* [Geography of avalanches]. Moscow, Russia: MSU Publ., 332 p. (In Russ.). EDN: YLUUXL
- Provotorov, D.S., Solov'ev, A.V., & Vinogradov, Yu.A. (2013). [Amplitude-frequency characteristics of infrasound signals from ground explosions]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering], 322(2), 87-90. (In Russ.). EDN: PXGYPB
- Seliverstov, Yu.G., Shnyparkov, A.L., & Glazovskaya, T.G. (2010). [Avalanche risk assessment for the population of mountainous regions of Russia]. *Led i sneg* [Ice and Snow], 4(112), 41-44. (In Russ.). EDN: PIVOQZ
- Vikulina, M.A. (2019). [Estimation of avalanche risk in Khibiny]. *InterKarto. InterGIS* [Intercarto. Intergis], 25(2), 66-76. (In Russ.). DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-66-76. EDN: FCPUYK
- Watson, L.W., Miller, A., Anderson, J.F., Toney, L. & Ardid, A. (2026). Detecting snow avalanche activity using infrasound: Hooker Valley, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 69(1), e70015. DOI: 10.1002/jgo2.70015

#### Information about authors

**Fedorov Andrey Viktorovich**, PhD, Director of the Kola Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (KoB GS RAS), Apatity, Russia. E-mail: Afedorov@krsc.ru

**Fedorov Ivan Sergeevich**, Research of the KoB GS RAS, Apatity, Russia. E-mail: Fedorov@krsc.ru

**Asming Vladimir Ernestovich**, PhD, Leading Researcher of the KoB GS RAS, Apatity, Russia. E-mail: AsmingVE@mail.ru

**Motorin Alexander Yuryevich**, Research of the KoB GS RAS, Apatity, Russia. E-mail: MotorinAYu@krsc.ru