

# Результаты регистрации звуковых волн сейсмическими станциями на территории Карелии

*А.А. Лебедев<sup>1</sup>, Н.В. Шаров<sup>1,2</sup>, 2021*

<sup>1</sup>Институт геологии Карельского научно-исследовательского центра Российской академии наук, Петрозаводск, Россия

<sup>2</sup>Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия

Поступила 1 апреля 2021 г.

Несмотря на относительно низкий уровень сейсмической активности, детальное изучение территории Карелии не только представляет теоретический, научный интерес, но и имеет практическое значение, заметно возросшее в связи с наличием в регионе крупных промышленных комплексов, газопроводов и гидротехнических сооружений. В работе приведены результаты регистрации звуковых волн различной природы стационарными и мобильными сейсмическими станциями. За период наблюдений 2000—2020 гг. накоплен массив сейсмических данных. Чтобы правильно понять природу рассматриваемых сигналов, необходимо отметить, что, как известно, Северная Карелия относится к сейсмическим областям, где ранее отмечались 5-балльные землетрясения. Выделены землетрясения, порожденные морозным растрескиванием горных пород, причем не только визуально, но и по инструментальным данным. Такие землетрясения известны на всей территории Фенноскандии. К этой группе принадлежат сотрясения при морозном растрескивании как грунта, прежде всего при резкой смене температур, так и льда во внутренних водоемах. При решении вопроса о природе сотрясений необходимо обращать внимание на такие признаки, как ограниченная площадь колебаний и характер волновой записи. В результате сейсмического мониторинга территории Карелии также зарегистрированы: прохождение болида, взлет самолета, взрывные работы при утилизации боеприпасов и добычи полезных ископаемых в непосредственной близости от жилых и промышленных объектов. Показан широкий спектр возможных источников, примеры волновых форм записи звуковой волны. Полученные данные демонстрируют возможность некоторых сотрясений с силой до 4—5 баллов в непосредственной близости от места регистрации, с чем необходимо считаться при рутинной обработке сейсмических событий и оценке сейсмической опасности в юго-восточной части Фенноскандинавского щита.

**Ключевые слова:** Фенноскандинавский щит, сейсмичность Карелии, землетрясения, морозобойные удары, звуковые волны.

**Введение.** Сейсмическая опасность Карелии, как принято в работе [Шаров и др., 2007], определяется сейсмической активностью в пределах палеорифта Кандалакша—Двина и Ладожско-Ботнической шовной зоны. В сейсмических разрезах эти зоны отличаются повышенной расслоенностью, перестройкой раздела М, увеличением мощности (до 10—15 км) переходного слоя в ни-

зах коры и глубины до границы М (50—60 км). Антропогенная деятельность ускоряет динамические процессы за счет возрастания слабых и очень слабых сейсмических событий.

За период наблюдений в Северной и Южной Карелии было выделено различное число сейсмических событий естественной и техногенной природы — от землетрясе-

ний, морозобойных или «ледовых» ударов в Лоухском районе с интенсивностью до 5 баллов [Шаров и др., 2005] до уникальной последовательности из 32 землетрясений наноуровня в районе о-ва Валаам с максимальной магнитудой –0,8 [Ассиновская и др., 2011].

В декабре 2003 г. и декабре 2004 г. локальные сотрясения со всеми признаками морозобойных зафиксированы в пос. Калевала на севере Карелии, а в январе и апреле 2005 г. — и на берегу Онежского залива Архангельской области [Шаров и др., 2005]. Отличительные признаки сотрясений в пос. Калевала 21 и 24 декабря 2003 г. с силой III—IV, до IV—V баллов — это осязательность только в полосе шириной 0,2 км и длиной 1 км вдоль берега прилежащего озера, сопровождение ударов звуковыми явлениями, точная приуроченность событий к периоду резкого падения  $t^\circ$  от  $-4^\circ$  до  $-22^\circ$ , возникновение в поздние вечерние и ранние утренние часы [Никонов, 2010].

Действующая карта ОСР-97, используемая при проектировании инженерных сооружений на возможные сейсмические воздействия, в основе которых до сих пор лежит шкала MSK-64, согласно [СНиП II-7-81\*], для северо-западных территорий не отражает современного уровня знаний по сейсмической ситуации. Вероятностный подход, который находится в основе при составлении карты, из-за малой информации и сейсмологической исследованности территории Карелии за время инструментальных наблюдений несет недостаточную информацию о сейсмических процессах региона.

Последние данные [Шаров, 2017] относят территорию Карелии к регионам с максимально возможным землетрясением магнитудой 4,8 и интенсивностью до 6—7 баллов.

Статья продолжает цикл работ авторов, посвященных изучению сейсмичности Европейского Севера России [Шаров и др., 2005; Шаров, 2006; Шаров и др., 2007]. Ее цель — анализ трехкомпонентных сейсмических записей природных и техногенных событий на территории Карелии. Задачами исследования являются волны, изучение их

связей с различными источниками возбуждения.

**Инструментальные сейсмические наблюдения** на территории Карелии ведутся с 2000 г. на станции «Петрозаводск». В дальнейшем с перерывами и последней модернизацией сейсмической сети (рис. 1) с 2013 года регистрация ведется 4-мя трехкомпонентными широкополосными станциями производства Guralp и переносной сейсмической станцией Cossack Ranger II. Подробные характеристики даны в работах [Климовский и др., 2016; Бекетова и др., 2017]. Непрерывные наблюдения ведутся сотрудниками ИГ КарНЦ РАН для дальнейшей обработки и составления сводных каталогов сейсмических событий [Баранов и др., 2020]. Некоторые результаты по запросу предоставляются ГУ МЧС РФ по РК, прокуратуре РК, ФИЦЕГС РАН, Костомукшскому ГОК, заинтересованным организациям.

**Морозобойные удары**, морозобойные сотрясения, ice quakes, cryoseisms, frost quakes [Kaminuma, Takahashi, 1975; Шаров и др., 2005; Никонов, 2010; Battaglia, Chagnon, 2016; Podolskiy, Walter, 2016; Ghofrani, Atkinson, 2018; Okkonen et al., 2020; Afonin et al., 2021] являются примером одной и той же группы сотрясений, вызываемых действием быстрого замораживания влагонасыщенных грунтов при резком падении зимних температур, что нередко встречается и в условиях Фенноскандинавского щита. Выделение и специальное рассмотрение морозобойных ударов при сейсмологических исследованиях представляется необходимым ввиду их нетектонической природы.

Морозобойный удар сопровождается очень сильной звуковой волной и может быть записан только ближайшими к месту событий сейсмическими станциями, так как воздушная волна быстро затухает в отличие от упругой волны землетрясения. Это — хорошо известное по историческим наблюдениям явление, при котором отмечаются все признаки, соответствующие силе в 3—4 балла.

Северная Карелия вообще и Калевальский район в частности относятся к сейсмическим областям, где 5-балльные землетрясения отмечались, например, в 1910 г.

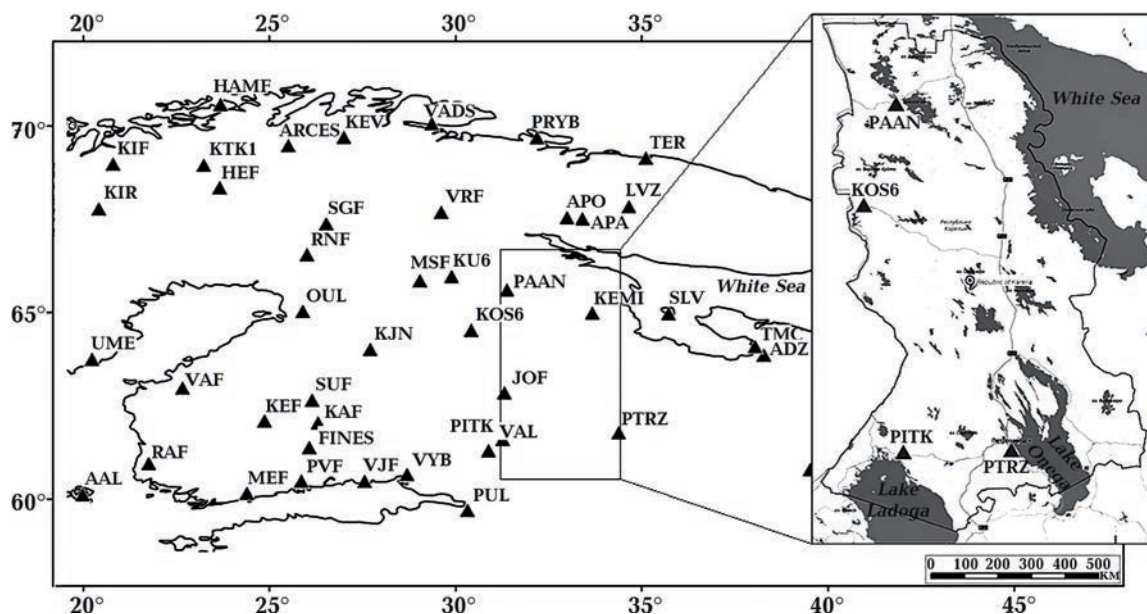


Рис. 1. Расположение Карельской сейсмической сети на схеме расположения сейсмических станций Фенноскандии.

Fig. 1. Location of the Karelian seismic network on the layout of seismic stations of Fennoscandia.

При решении вопроса о природе события необходимо в первую очередь учитывать площадь ощущаемых колебаний, начальное возмущение в виде взрыва, синоптическую ситуацию (перепад температур, давления и др.).

В июле 2004 г. сотрудники ИГ КарНЦ РАН совместно с геологами и геофизиками из ИФЗ РАН провели по заданию Управления МЧС Карелии экспедиционные исследования в районе пос. Калевала для выяснения природы сотрясений. По полученным данным от местных жителей и представителей администрации пгт. Калевала на севере республики Карелия неоднократно имели место сотрясения непонятного происхождения. В конце декабря 2003г. явления повторились несколько раз. Характерно, что сотрясения ощущались лишь в той части поселка, которая примыкает к озеру-водохранилищу Куйто. Речь идет о сотрясениях в полосе шириной не более 200 м, длиной 1000 м, в домах, расположенных вдоль улицы на берегу озера, тогда как на остальной части поселка не отмечались. Озеро Среднее Куйто прос-

тирается с запада на восток на 40 км и с юга на север на 10 км. Поселок Калевала находится на северной берегу озера и вытянут вдоль него на 2 км. При сотрясениях наблюдалось качание люстр, сдвигание бытовых предметов. В ночь на 21 декабря ощущалось несколько ударов, как будто деревянный дом встряхивали, был гул. Второй раз, вечером 24 декабря, в приемной гостиницы на первом этаже собралась в виде складки ковровая дорожка, слышался звук отдельного взрыва. На удалении 100 км сейсмической станцией МАФ было зарегистрировано высокочастотное событие (рис. 2), позднее идентифицированное как морозобойное.

Дополнительно проанализированы сейсмограммы подвижек льда в Онежском заливе Архангельской области, которые зарегистрированы с/с ТМС в 2—3 км от берега залива. Вид записей январских и апрельских событий различается по огибающей, она более пологая и длительная на апрельских записях, когда растрескивание льда и амплитуды его колебаний более интенсивны (рис. 3).

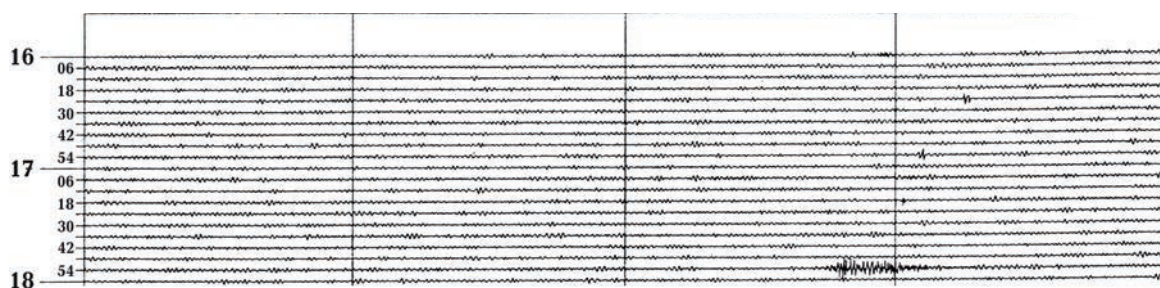


Рис. 2. Запись морозобойного удара в Северной Карелии от 24.12.2003.

Fig. 2. A record of a frost quake in North Karelia dated 24.12.2003.

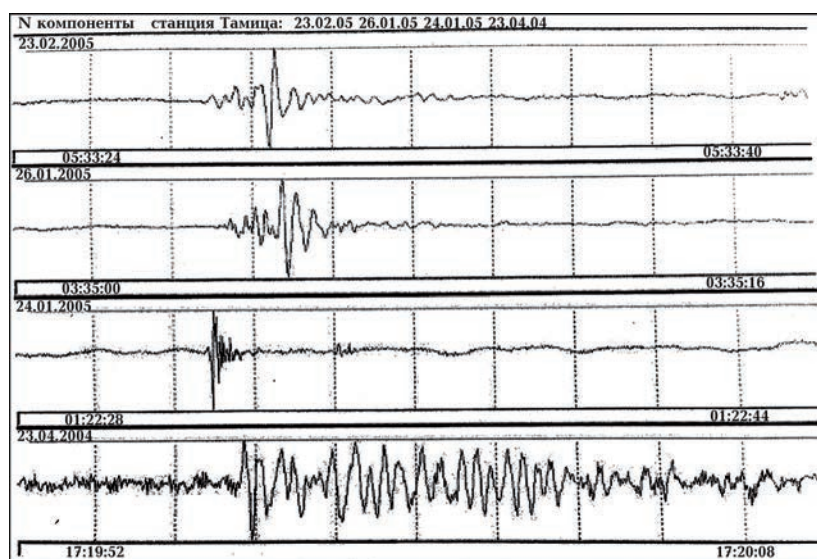


Рис. 3. Примеры сейсмических записей морозобойных ударов на компонентах NS сейсмической станции ТМС Архангельской сети.

Fig. 3. Examples of seismic records of frost shocks on NS components by seismic station TMC of the Arkhangelsk seismic network.

**Болид.** 20 февраля 2020 г. в 04:37:38 по московскому времени сейсмической станцией KOS6, расположенной в 10 км от г. Костомукша и входящей в Карельскую сейсмическую сеть, был зарегистрирован звуковой удар (рис. 4). По разным ответам очевидцев, яркое свечение в небе наблюдали на АО «Карельский окатыш», г. Костомукша, г. Сегежа и др.

Предположение о метеоре было подтверждено и финскими коллегами. Сейсмическая станция RMF, расположенная в

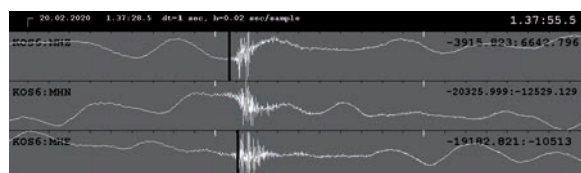


Рис. 4. Запись звукового удара от болида 20.02.2020 в 01:37:38 UTC сейсмической станцией KOS6.

Fig. 4. Sonic boom recording from the bolide event on 20.02.2020 at 01:37:38 UTC by seismic station KOS6.

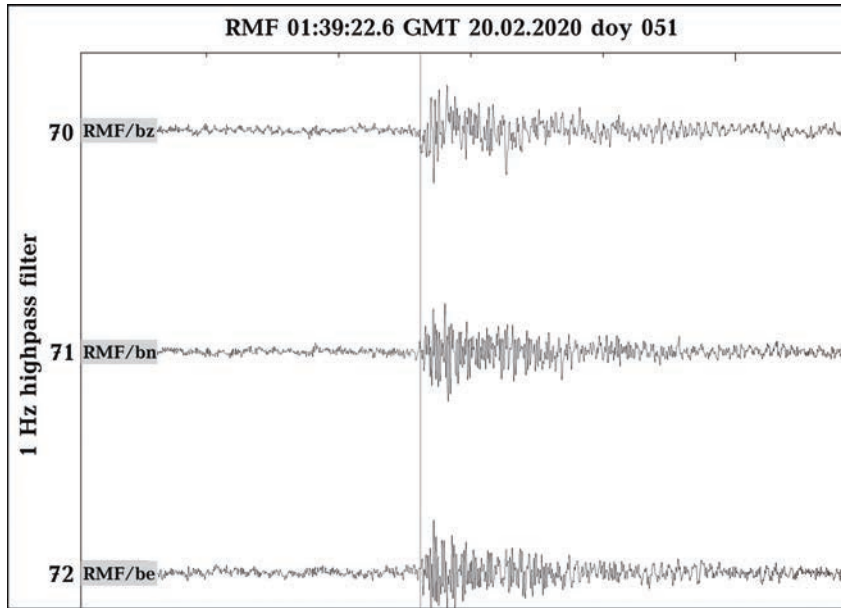


Рис. 5. Запись звукового удара от болида 20.02.2020 в 01:39:22 GMT сейсмической станцией RMF.  
 Fig. 5. Sonic boom recording from the bolide event on 20.02.2020 at 01:39:22 GMT by seismic station RMF.

50 км от г. Костомукша и принадлежащая национальной сейсмологической службе Финляндии, зарегистрировала похожее по продолжительности сейсмическое собы-

тие. Волновые формы данного и аналогичного по природе (рис. 5, 6) предоставлены проф. Marja Uski.

Подобного рода события не в первый и

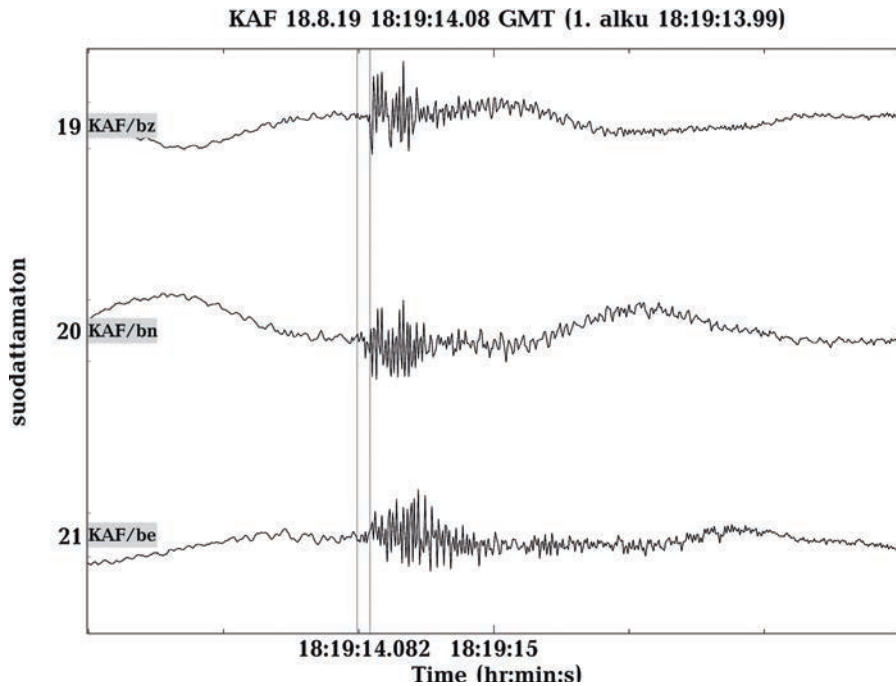


Рис. 6. Запись звукового удара от болида 18.08.2019 в 18:19:14 GMT сейсмической станцией KAF.  
 Fig. 6. Sonic boom recording from the bolide event on 18.08.2019 at 18:19:14 GMT by seismic station KAF.

не в последний раз встречаются на записях сейсмических станций.

**Утилизация боеприпасов и взлет самолета.** Зарекомендовав себя в качестве стационарной сейсмической станции, Cossack Ranger II на базе геофонов GS-11D был испытан на военном полигоне в качестве мобильной переносной станции. На военном полигоне недалеко от пос. Новая Вилга боеприпасы по окончании гарантийного срока службы снимаются с вооружения и утилизируются. Совместно с МЧС по Республике Карелия в ответ на жалобы жителей поселка на сотрясения зданий от взрывов сейсмологами ИГ РАН проведена регистрация сейсмических событий в июне 2010 г. передвижной сейсмической станцией Cossack Ranger II.

Анализ полученных результатов (рис. 7) позволил оценить интенсивность сейсмических воздействий, передающихся от грунтового основания на сооружения, выбрать оптимальное количество боеприпасов и рассчитать безопасные места взрывов. Благодаря проделанной работе в течение июня—сентября 2010 г. были уничтожены отработавшие свой срок боеприпасы без нанесения ущерба жителям пос. Новая Вилга.

Интерес представили волновые формы производимых взрывов в сравнении с записью звуковой ударной волны взлетающего самолета (рис. 8). Как мы видим, амплитуда последнего постепенно нарастает, достигая максимума, и убывает, а значит, не доставляет неудобства жителям близлежащего поселка, в отличие от проводимых ра-



Рис. 7. Запись звуковой ударной волны на удалении 5 км (масса ВВ 20 кг) и 10 км (масса ВВ 40 кг).

Fig. 7. Recording of a sound shock wave at a distance of 5 km (explosive mass 20 kg) and 10 km (explosive mass 40 kg).

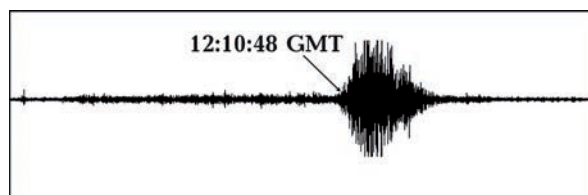


Рис. 8. Запись звуковой ударной волны взлетающего самолета с аэропорта Бесовец над поселком Новая Вилга.

Fig. 8. Recording of a sound shock wave of an aircraft taking off from the Besovets airport over the village of Novaya Vilga.

нее взрывов при утилизации боеприпасов. Этот факт был подтвержден и при разговоре с жителями.

**Акустическое воздействие взрывов в карьере.** Допустимые нормы как сейсмического, так и акустического воздействия отображены в нормативных документах. Однако зачастую требуется проводить специальные исследования, чтобы определить основной негативный фактор. Так, чаще всего им выступает сейсмическая волна, а ее критерием — векторная скорость колебаний грунта у основания зданий. Акустическое же воздействие на карьерах считается слабым (до 500 м), поскольку основная энергия взрыва расходуется на дробление породы и в какой-то мере определяет качество самого взрыва [Козырев, Фокин, 2014; Козырев и др., 2019]. Регистрация сейсмического и ударного воздействий от взрыва проводилась на мельнице ОАО «Кондопожский комбинат хлебопродуктов» на двух уровнях (рис. 9), на грунте (установка сейсмического датчика на асфальтовом покрытии, ориентированным по азимуту на пункт взрыва) и на 6-м этаже мельницы (сейсмический датчик ориентирован по тому же азимуту). Для измерений использовались два комплекта сейсмометров на базе геофонов GS-11D.

Карьер габбродиабазов «Суна» расположен в 2720 м от комбината. С регулярностью раз в две недели на нем проводят массовый короткозамедленный взрыв. Среднее количество скважин 230, интервал за-

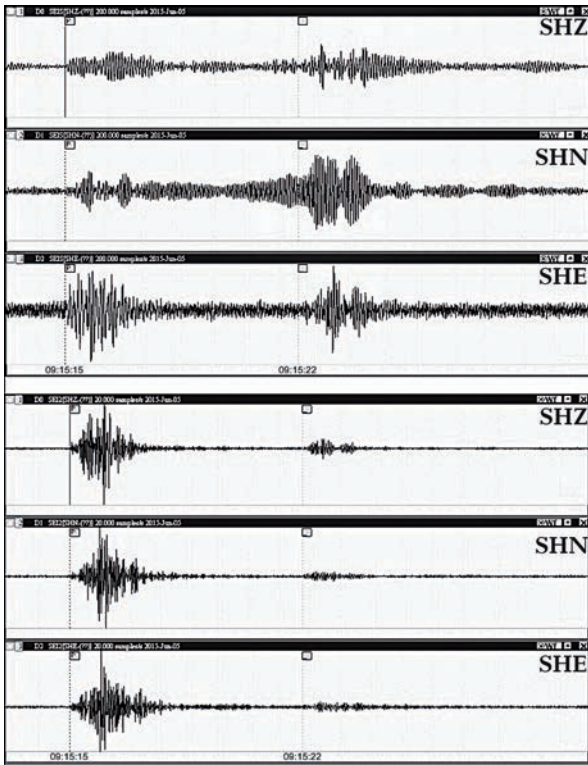


Рис. 9. Пример записи взрыва от 05.06.2015 г. на двух уровнях (масса ВВ 25272.4 кг).

Fig. 9. An example of an explosion recording from 05.06.2015 at two levels (explosive mass 25272.4 kg).

медления между рядами 42 мс, время короткозамедленного взрыва около 800 мс [Лебедев, Климовский, 2015]. Разделение и анализ различных сейсмических волн невозможно (продольные, поперечные, поверхностные), отчетливо выделяется лишь первое вступление сейсмической (продольной) и ударной (воздушной) волн с разницей во времени около 8 с. На записях взрывов видна наиболее характерная картина, когда акустическое воздействие является слабее, чем сейсмическое, однако на записи с 6-го этажа здания можно наблюдать совсем иную картину.

За рассматриваемый период было проведено 10 взрывов, в среднем от 10 до 25 т взрывчатого вещества (ВВ). Такой режим ведения мог сказаться на проявлении техногенной сейсмичности и работе мельницы. Однако, как можно судить по записи взрыва, большую опасность для мельницы пред-

ставляет воздушная волна, приходящая позже и хорошо выделяемая на N и E каналах. Мука становится взрывоопасной, если ее частички оказываются взвешены в воздухе, поэтому в первую очередь важно следить за чистотой рабочих площадей.

В сейсмологии сейсмический эффект землетрясения определяется в основном тремя параметрами: уровнем амплитуд, спектральным составом и продолжительностью колебаний. Последний фактор (при возникновении резонанса) может иметь решающее значение для разрушения сооружений, в то время как кратковременная нагрузка даже с весьма высоким пиковым значением ускорения может оказаться неопасной. Задача оценки сейсмической опасности, сейсмического риска и сейсмической защиты усложняется плохо прогнозируемыми эффектами резонансного усиления сейсмических колебаний приповерхностными грунтами. Исследования показали, что при совпадении максимальной частоты колебаний в сейсмическом воздействии (частот колебаний грунтов) с собственными частотами колебаний зданий и сооружений возникают резонансные явления, которые могут быть одной из причин повреждений и разрушений жилых зданий и промышленных сооружений. Были даны рекомендации компании, проводящей буровзрывные работы, по уменьшению количества ВВ.

**Утилизация заводской трубы.** Еще одним применением переносной сейсмической станции Cossack Ranger II стала регистрация взрыва в черте г. Петрозаводска. 24 октября 2015 г. была проведена утилизация заводской кирпичной трубы высотой 56 м с метровой толщиной стен на территории бывшего Онежского тракторного завода, вблизи жилых кварталов и новой застройки, с помощью направленного взрыва. Масса ВВ составила 4 кг.

По записям (рис. 10) видно, что на близ расположенной станции SEIS (~1,3 км) можно четко выделить вступления сейсмической и звуковой волны, когда как на расположенной на противоположном берегу Онежского озера станции PTRZ (~7 км) это



Рис. 10. Волновые формы взрыва трубы от 24.10.2015 по данным переносной станции SEIS и сейсмической станции PTRZ.

Fig. 10. Waveforms of pipe explosion from 24.10.2015 according to the portable station SEIS and seismic station PTRZ.

сделать практически нельзя. Сам подрыв трубы был проведен корректно и не вызвал никаких нарушений.

Данный пример в очередной раз подтверждает тот факт, что воздействие от звуковой волны превышает сейсмическое.

**Заключение.** На территории Республики Карелия регистрируются слабые сейсмические события с магнитудой до 3—4, которые способны спровоцировать в ослабленных зонах землетрясения с последующими разрушениями расположенных вблизи промышленных, транспортных и жилых

объектов. При оценке сейсмической опасности территории основное внимание должно уделяться выделению и изучению зон сейсмической активности. Опыт регистрации звуковых волн различной природы стационарными и мобильной трехкомпонентными сейсмическими станциями подтвердил необходимость их дальнейшего изучения при оценке сейсмической опасности.

*Работа выполнена в рамках темы НИР АААА-А18-118020290086-1 и госзадания Института лесных, горных и строительных наук ПетрГУ.*

### Список литературы

- Ассиновская Б.А., Карпинский В.В., Недошивин С.А. Необычное землетрясение 31 июля 2010 года на Ладожском озере. *Геориск*. 2011. № 1. С. 58—62.
- Баранов С.В., Карпинский В.В., Лебедев А.А., Мунирова Л.М., Петров С.И., Пойгина С.Г. Непрерывные наблюдения. Восточная часть Балтийского щита. В кн.: *Землетрясения России в 2018 году*. Обнинск: Изд. ФИЦ ЕГС РАН, 2020. С. 111—113.
- Бекетова Е.Б., Лебедев А.А., Шаров Н.В., Федоренко Ю.В. Переносная сейсмическая станция Cossack Ranger II и ее применение на территории Карелия. *Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: Тез. докл. VII Междунар. симпозиума, г. Бишкек, 19—24 июня 2017 г.* Бишкек: Изд. НС РАН, 2017. С. 276—279.
- Климовский А.В., Мещерякова В.А., Лебедев А.А. Динамические характеристики сейсмической станции «Петрозаводск». *Труды Карельского научного центра РАН. Сер. Геология докембрия*. 2016. № 2. С. 105—111.
- Козырев А.А., Савченко С.Н., Панин В.И., Семенова И.Э., Рыбин В.В., Федотова Ю.В., Козырев С.А. Геомеханические процессы



- в геологической среде горнотехнических систем и управление геодинамическими рисками. Апатиты: Изд. ФИЦ КНЦ РАН, 2019. 470 с. <https://doi.org/10.25702/KSC.978-5-91137-391-7>.
- Козырев С.А., Фокин В.А. Обеспечение сейсмической безопасности зданий и сооружений промплощадки при производстве массовых взрывов. *Горный журн.* 2014. №5. С. 48—55.
- Лебедев А.А., Климовский А.В. Оценка безопасности ведения взрывных (на примере воздействия карьерных взрывов на здания хлебокомбината). *Материалы 10-й Международной сейсмологической школы «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных»*. Обнинск: Изд. ГС РАН, 2015. С. 204—206.
- Никонов А.А. Морозобойные сотрясения как особый класс сейсмических явлений (по материалам Восточно-Европейской платформы). *Физика Земли.* 2010. № 3. С. 257—273. <https://doi.org/10.1134/S1069351310030079>.
- СНиП II-7-81\* Строительство в сейсмичных районах. Москва: ФГУП ЦПП, 2007. 44 с.
- Шаров Н.В. Литосфера Северной Европы по сейсмическим данным. Петрозаводск: Изд. КарНЦ РАН, 2017. 173 с.
- Шаров Н.В. Сейсмичность юго-восточной части Фенноскандинавского щита и ее мониторинг. *Геофиз. журн.* 2006. Т. 28. № 1. С. 110—116.
- Шаров Н.В., Маловичко А.А., Щукин Ю.К. Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы. Кн. 1: Землетрясения. Петрозаводск: Изд. КарНЦ РАН, 2007. 381 с.
- Шаров Н.В., Никонов А.А., Французова В.И., Щукин Ю.К., Сыстра Ю.И. Нетектонические землетрясения 2003—2004 годов в Северной Карелии и Онежской губе Архангельской области. *Строение, динамика и минерагенические процессы в литосфере: Материалы 11-й Международной научной конференции*. Сыктывкар: Геопринт, 2005. С. 390—392.
- Afonin, N., Kozlovskaya, E., & Okkonen, J. (2021). Frost quakes in northern Finland: possible source mechanisms and formation process. *Lithosphere 2021: eleventh symposium on structure, composition and evolution of the lithosphere: Programme and extended abstracts* (pp. 143—146). Institute of Seismology, University of Helsinki. No. S-71.
- Battaglia, S.M., & Changnon, D. (2016). Frost quakes: Forecasting the unanticipated clatter. *Weatherwise*, 69, 20—27. <https://doi.org/10.1080/00431672.2015.1109984>.
- Ghofrani, H., & Atkinson, G.M. (2018). Distinguishing cryoseisms from earthquakes in Alberta, Canada. *Journal of Earth Sciences*, 55, 1183—1195. <https://doi.org/10.1139/cjes-2018-0089>.
- Kaminuma, K., & Takahashi, M. (1975). Ice shock swarms observed at Mizuho Camp, Antarctica. *Nankyoku Shiryo: Antarctic Record*, 54, 75—83.
- Okkonen, J., Neupauer, R.M., Kozlovskaya, E., Afonin, N., Moisio, K., Taewook, K., & Muurinen, E. (2020). Frost quakes: Crack formation by thermal stress. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125, 1—14. <https://doi.org/10.1029/2020JF005616>.
- Podolskiy, E.A., & Walter F. (2016). Cryoseismology. *Reviews of Geophysics*, 54, 708—758. <https://doi.org/10.1002/2016RG000526>.

# Results of recording sonic waves by seismic stations in the territory of Karelia

A.A. Lebedev<sup>1</sup>, N.V. Sharov<sup>1,2</sup>, 2021

<sup>1</sup>Institute of Geology of Karelian Research Center of Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia

<sup>2</sup>Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia

In spite of a relatively low seismic activity level, the detailed study of Karelia is not only of theoretical, scientific interest, but is also of practical value which has increased markedly because there are big industrial complexes, gas pipelines and hydrotechnical facilities in the region. The results of recording sonic waves of various nature by stationary and mobile seismic stations are presented. For the observation period 2000—2020 an array of seismic data has been accumulated. In order to correctly understand the nature of the signals under consideration, it should be noted that North Karelia is known to belong to seismic regions, where 5-point earthquakes have taken place earlier. They were distinguished from earthquakes generated by frost cracking by both visual and instrumental data. They are known throughout Fennoscandia. This group comprises both tremors during frost cracking of the soil, primarily with a sharp change in temperature, and frost cracking of ice in inland water bodies. To decide on the nature of ground shaking, it is necessary to pay attention to such signs as the limited area of oscillations and the nature of the wave record. As a result of seismic monitoring of Karelia, the following frost quakes were also recorded: the passage of the bolidi, the take-off of an aircraft, blasting operations during the disposal of ammunition and mining in the immediate vicinity of residential areas and industrial facilities. A wide range of possible sources and examples of sound waveforms are shown. The data obtained indicate the possibility of some shocks with a force of up to 4—5 points in the immediate vicinity of the place of registration, what should be considered in the routine processing of seismic events and seismic hazard assessment in the southeastern Fennoscandian Shield.

**Key words:** Fennoscandian Shield, seismicity of Karelia, earthquakes, frost quakes, sonic waves.

## References

- Assinovskaya, B.A., Karpinskiy, V.V., & Nedoshivin, S.A. (2011). Unusual earthquake on July 31, 2010 on Lake Ladoga. *Georisk*, (1), 58—62 (in Russian).
- Baranov, S.V., Karpinskiy, V.V., Lebedev, A.A., Munirova, L.M., & Petrov, S.I. (2020). Continuous observation. Eastern part of the Baltic Shield. In *Earthquakes in Russia in 2018* (pp. 111—113). Obninsk: Publ. by the Federal Research Center «Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences» (in Russian).
- Beketova, E.B., Lebedev, A.A., Sharov, N.V., & Fedorenko, Yu. V. (2017). Portable seismic station Cossack Ranger II and its application in the territory of Karelia. *Problems of geodynamics and geoecology of inland orogens: Abstracts of the VII International Symposium, June 19—24, 2017* (pp. 276—279). Bishkek: Scientific station RAS (in Russian).
- Klimovskiy, A.V., Meshcheryakova, V.A., & Lebedev, A.A. (2016). Dynamic features of «Petrozavodsk» seismic station. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN*, (2), 105—111. <https://doi.org/10.17076/geo168> (in Russian).
- Kozyrev, A.A., Savchenko, S.N., Panin, V.I., Semenova, I.E., Rybin, V.V., Fedotova, Yu. V., Kozyrev, S.A. (2019). *Geomechanical processes in the geological environment of mining systems and geodynamic risk management*. Apatity: Publ. by the Federal Research Center «Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sci-

- ences», 470 p. <https://doi.org/10.25702/KSC.978-5-91137-391-7> (in Russian).
- Kozyrev, S.A., & Fokin, V.A. (2014). Ensuring seismic safety of buildings and structures of an industrial site during the production of massive explosions. *Gornyy Zhurnal*, (5), 48—55 (in Russian).
- Lebedev, A.A., & Klimovskiy, A.V. (2015). Evaluation of the safety of explosives (using the example of the impact of quarry explosions on the buildings of a bakery). *Proc. of the 10th International Seismological School «Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismic Data»* (pp. 204—206). Obninsk: Publ. by the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (in Russian).
- Nikonov, A.A. (2010). Frost quakes as a particular class of seismic events: Observations within the East-European platform. *Fizika Zemli*, (3), 257—273. <https://doi.org/10.1134/S1069351310030079> (in Russian).
- SNiP II-7-81. (2007). *Construction in seismic regions*. Moscow: Federal State Unitary Enterprise «Center for Design Products of Mass Use», 44 p. (in Russian).
- Sharov, N.V. (2017). *Lithosphere of Northern Europe, as shown by seismic data*. Petrozavodsk: Publ. of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 173 p. (in Russian).
- Sharov, N.V. (2006). Seismicity of the southeastern part of the Fennoscandinavian shield and its monitoring. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 28(1), 110—116 (in Russian).
- Sharov, N.V., Malovichko, A.A., & Shchukin, Yu.K. (2007). *Earthquakes and microseismicity in the problems of modern geodynamics of the East European platform. Book 1: Earthquakes*. Petrozavodsk: Publ. of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 381 p. (in Russian).
- Sharov, N.V., Nikonov, A.A., Francuzova, V.I., Shchukin, Yu.K., Systra, Yu.J. (2005). Non-tectonic earthquakes of 2003—2004 in North Karelia and Onega Bay of the Arkhangelsk Region. *Structure, dynamics and mineragenic processes in the lithosphere: Proc. of the 11th international scientific conference* (pp. 390—392). Syktyvkar: Geoprint (in Russian).
- Afonin, N., Kozlovskaya, E., & Okkonen, J. (2021). Frost quakes in northern Finland: possible source mechanisms and formation process. *Lithosphere 2021: eleventh symposium on structure, composition and evolution of the lithosphere: Programme and extended abstracts* (pp. 143—146). Institute of Seismology, University of Helsinki. No. S-71.
- Battaglia, S.M., & Changnon, D. (2016). Frost quakes: Forecasting the unanticipated clatter. *Weatherwise*, 69, 20—27. <https://doi.org/10.1080/00431672.2015.1109984>.
- Ghofrani, H., & Atkinson, G.M. (2018). Distinguishing cryoseisms from earthquakes in Alberta, Canada. *Journal of Earth Sciences*, 55, 1183—1195. <https://doi.org/10.1139/cjes-2018-0089>.
- Kaminuma, K., & Takahashi, M. (1975). Ice shock swarms observed at Mizuho Camp, Antarctica. *Nankyoku Shiryo: Antarctic Record*, 54, 75—83.
- Okkonen, J., Neupauer, R.M., Kozlovskaya, E., Afonin, N., Moisio, K., Taewook, K., & Muurinen, E. (2020). Frost quakes: Crack formation by thermal stress. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125, 1—14. <https://doi.org/10.1029/2020JF005616>.
- Podolskiy, E.A., & Walter F. (2016). Cryoseismology. *Reviews of Geophysics*, 54, 708—758. <https://doi.org/10.1002/2016RG000526>.

## Результати реєстрації звукових хвиль сейсмічними станціями на території Карелії

А.А. Лебедєв<sup>1</sup>, М.В. Шаров<sup>1,2</sup>, 2021

<sup>1</sup>Інститут геології Карельського науково-дослідного центру Російської академії наук, Петрозаводськ, Росія

<sup>2</sup>Петрозаводський державний університет, Петрозаводськ, Росія

Незважаючи на відносно низький рівень сейсмічної активності, детальне вивчення території Карелії не тільки становить теоретичний науковий інтерес, а й має практичне значення, яке помітно зросло через наявність у регіоні великих промислових комплексів, газопроводів і гідротехнічних споруд. У статті наведено результати реєстрації звукових хвиль різної природи стаціонарними і мобільними сейсмічними станціями. За період спостережень 2000—2020 рр. накопичено масив сейсмічних даних. Щоб правильно зрозуміти природу досліджуваних сигналів, необхідно зазначити, що, як відомо, Північна Карелія належить до сейсмічних районів, де раніше відбувались 5-бальні землетруси. Виділено землетруси, породжені морозним розтріскуванням гірських порід, причому не лише візуально, а й за інструментальними даними. Подібні землетруси відомі на всій території Фенноскандії. До цієї групи належать сейсмічні події при морозному розтріскуванні як ґрунту, передусім за різкої зміни температур, так і льоду у внутрішніх водоймах. При вирішенні питання щодо природи сейсмічних подій потрібно звертати увагу на такі ознаки, як обмежена площа коливань і характер хвильового запису. В результаті сейсмічного моніторингу території Карелії також зареєстровано: проходження боліда, зліт літака, вибухові роботи при утилізації боєприпасів і видобутку корисних копалин у безпосередній близькості від житлових і промислових об'єктів. Показано широкий спектр можливих джерел, наведено приклади хвильових форм запису звукової хвилі. Отримані дані демонструють можливість деяких зазначених подій із силою до 4—5 балів у безпосередній близькості від місця реєстрації, на що треба звертати увагу під час рутинної обробки сейсмічних подій і оцінювання сейсмічної небезпеки у південно-східній частині Фенноскандинавського щита.

**Ключові слова:** Фенноскандинавський щит, сейсмічність Карелії, землетруси, морозобійні удари, звукові хвилі.