

На правах рукописи

**ЗУЕВА ИРИНА АЛЕКСАНДРОВНА**

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ  
НА ТЕРРИТОРИИ КАРЕЛИИ**

Специальность 1.6.9 «Геофизика»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискании ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Петрозаводск 2024

**Работа выполнена** в Федеральном исследовательском центре «Карельском научном центре Российской академии наук» Институте геологии КарНЦ РАН (ИГ КарНЦ РАН)

**Научный руководитель**

доктор геолого-минералогических наук,  
заслуженный деятель науки РФ

**Шаров Николай Владимирович**

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

**Бурмин Валерий Юрьевич**

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

**Капустян Наталия Константиновна**

кандидат геолого-минералогических наук, доцент Федерального государственного бюджетного Образовательного учреждения высшего образования «Воронежского государственного университета»

**Дубянский Александр Игоревич**

**Ведущая организация:**

Геофизический институт – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального научного центра «Владикавказский научный центр Российской академии наук»

Защита диссертации состоится «25» января 2024 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета 24.1.059.01, созданном на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 38, к. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИДГ РАН и на сайте [idg.chph.ras.ru](http://idg.chph.ras.ru).

Автореферат разослан

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.1.059.01  
кандидат физико-математических наук

С.П. Соловьев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Распознавание природы сейсмических событий является одним из основных этапов интерпретации данных в каждом сейсмологическом центре, занимающимся мониторингом. Республика Карелия представляет собой платформенную территорию, которая характеризуется слабой сейсмической активностью. В тоже время на территории Карелии проводится большое количество промышленных взрывов. В связи с этим создание методики идентификации событий, вызванных взрывными работами, является актуальной задачей, так как последние часто попадают в каталог местных землетрясений и искажают картину местной сейсмичности. Вопросам определения природы сейсмических событий и методам их идентификации, посвящены работы многих ученых: W.Y. Kim, Y. Gitterman, V.I. Khalturin, M. Hedlin, F. Ringdal, R. Zhou, Н.Г. Гамбурцева, Р.А. Дягилев, А.Н. Морозов, А.А. Годзиковская, В.Э. Асминг, С.Б. Кишкина, Н.Н. Михайлова, В.В. Адушкин, А.А. Маловичко, К.Н. Cho, J. Kortstrom, D. Ghica, И.А. Санина, М. Kiszely, А.А. Добрынина, Н. Saadala и др.

Территория Карелии, согласно карте сейсмического районирования России ОСР97, относится к зонам вероятной интенсивности 5–7 баллов для периода повторяемости 5000 лет. Сейсмическая активность приурочена к палеорифту Кандалакша-Двина и Ладожско-Ботнической шовной зоне. Несмотря на относительно низкий уровень сейсмической активности, детальное изучение территории Карелии представляет не только научный интерес, но и имеет практическое значение, заметно возросшее в связи с наличием в регионе крупных промышленных комплексов, газопроводов и гидротехнических сооружений. В 2000 г. сотрудники Института геологии КарНЦ РАН под руководством д.г.-м.н. Шарова Н.В. основали региональную сейсмологическую сеть. На протяжении последних 23 лет проводятся работы по изучению глубинного строения и сейсмического режима территории Карелии.

Значительную долю сейсмических событий в слабоактивной в сейсмическом отношении территории Карелии составляют промышленные взрывы. Плотная сеть карьеров в республике потребляет взрывчатого вещества (ВВ) 50 тыс. т/год.

Таким образом, разработка основных критериев идентификации сейсмических событий, произошедших на территории Карелии, является первостепенной научной задачей при обнаружении и изучении землетрясений, а также имеющей существенное значение в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций.

Диссертационная работа посвящена идентификации локальных сейсмических событий, регистрируемых Карельской сейсмической сетью (КарСС), анализу региональных характеристик сейсмической обстановки, вызванной промышленными взрывами на территории Карелии.

**Цель работы** заключается в оценке регистрационных возможностей Карельской сейсмической сети и формулировке критериев идентификации природы сейсмических событий, зарегистрированных на территории Карелии.

### Научные задачи:

- Оценить эффективность Карельской сейсмологической сети.
- Подобрать скоростную модель для определения координат землетрясений на территории Карелии.
- Создать альбом волновых форм записей промышленных взрывов для территории Карелии.
- Разработать методику разделения взрывов и землетрясений, зарегистрированных на территории Карелии.
- Построить карту современной сейсмичности для территории Карелии.

### Основные положения, выносимые на защиту

1. Оценка эффективности Карельской сейсмологической сети. Необходимость использования различных региональных скоростных моделей для определения гипоцентров сейсмических событий на территории Карелии.
2. Критерии идентификации сейсмических событий, основанные на комплексе обрабатывающих программ, волновом и спектральном анализе сигналов, регистрации воздушной волны, оценке энергетических характеристик и координат очага, альбоме волновых форм промышленных взрывов для разных станций карельской сети, параметре дискриминации.
3. Пространственное расположение зон природной сейсмичности и промышленных взрывов региона. Каталог и карта современной сейсмичности на территории Карелии.

### Методы исследований

Для реализации целей работы и решения поставленных задач были применены различные

компьютерные методы анализа и обработки сейсмических данных (анализ волновых форм, спектральный анализ, метод засечек, метод Гейгера, минимизация функционала пространственных переменных для определения гипоцентров землетрясений), а также картирование результатов обработки экспериментальных данных.

Для анализа сейсмических событий были использованы данные многолетнего мониторинга сетью цифровых сейсмических станций, установленных в Карелии с 2000 г.

Определение основных параметров и изучение сейсмических сигналов осуществлялось с использованием компьютерных программ, таких как:

программа ELRESS (расчет основных параметров сейсмических событий);

программный комплекс WSG (уточнение параметров эпицентров сейсмических событий);

программы HYP\_BUR и HuroGlobal (определение координат гипоцентров землетрясений).

#### **Научные результаты работы**

1. Установлено, что при определении координат гипоцентров сейсмических событий в центральной части Карелии необходимо использовать скоростную модель KARELIA, в юго-западной части – BALTIC и на севере региона – BARENTS.

2. Для территории Республики Карелия для Карельской сейсмической сети и трех ближайших станций ФИЦ Единой Геофизической службы РАН рассчитаны минимальные магнитуды и максимальные ошибки в определении координат гипоцентров сейсмических событий.

3. Получены оценки погрешностей в определении положения эпицентров событий по станциям Карельской и Финской сейсмических сетей.

4. Разработана методика дискриминации для распознавания природы сейсмического события, зарегистрированного станциями сейсмической сети Карелии.

5. Сформулированы критерии идентификации сейсмических событий, зарегистрированных на территории Карелии.

6. Для зон взрывной сейсмичности региона для каждой сейсмической станции создан альбом волновых форм промышленных взрывов. На основе совместных работ, проводимых геологами и сейсмологами европейской части России по уточнению параметров гипоцентров сейсмических событий, а также по результатам, полученным сейсмической сетью Карелии в 2017-2020 гг, составлен каталог землетрясений за период с 2000 по 2020 годы и построена карта современной сейсмичности территории Карелии.

7. Для определения гипоцентров далёких землетрясений на языке программирования ФОРТРАН написана программа HuroGlobal, реализующая метод Бурмина В.Ю.

#### **Научная новизна работы**

Впервые для территории Карелии проведены исследования по оценке эффективности сейсмической сети Карелии, по выбору скоростной модели для определения параметров гипоцентров сейсмических событий, выделению особенностей промышленных взрывов и землетрясений. Разработана методика дискриминации сейсмических сигналов промышленных взрывов и землетрясений, построена карта сейсмичности Карельского региона.

С 2017 года данные станций Карельской сети, регистрирующих сейсмические события на территории республики и в приграничных районах, включены в каталоги ФИЦ Единой Геофизической службы РАН.

#### **Практическая значимость результатов и реализация работы**

Благодаря измененной методике обработки сейсмических данных, а также новой сейсмической аппаратуре, установленной в четырех районах, Карельская сеть сейсмических станций с 2017 года стала участвовать в едином процессе мониторинга сейсмических событий на территории Карелии, обмениваться данными с региональными сетями Ленинградской, Мурманской, Архангельской областей и ФИЦ Единой Геофизической службой РАН.

Работа выполнена в рамках тем НИР 218 № 1022040500826-4, 213 № АААА-А18-118020290086-1, при финансовой поддержке гранта РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-00003, гранта РНФ № 23-27-10002.

**Достоверность научных положений**, сформулированных в диссертации, подтверждается результатами исследований, полученными при полевых и лабораторных работах.

**Апробация.** Основные положения доложены на международных конференциях (8), всероссийских (6), а также на (3) молодежных конференциях и школах молодых ученых:

1. V, VI, XI, XII, XIV, XV, XVI, XVII Международные сейсмологические школы (2010, 2011, 2016, 2017, 2019, 2021, 2022, 2023).

2. XXI Научно-практическая Щукинская конференция с международным участием. г. Москва (2018).

3. Всероссийская конференция с международным участием II Юдахинские чтения (2019 г. Архангельск).

4. Ферсмановская научная сессия ГИ КНЦ РАН г. Апатиты (2018, 2019, 2021, 2022).
5. XXVI молодёжная научная школа-конференция, посвящённая памяти члена-корреспондента АН СССР К.О. Кратца и академика РАН Ф.П. Митрофанова. г. Петрозаводск (2015).
6. 69, 71 Всероссийские научные школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых г. Петрозаводск (2017, 2019).

#### **Публикации**

Всего соискателем опубликовано 30 печатных работ. Из них 4 статьи в журналах (WoS, Scopus), 7 статей в журналах из перечня, установленного ВАК, раздел в монографии и материалы конференций.

#### **Личный вклад**

Работы по установке сейсмических станций на территории Карелии выполнялись при активном участии автора диссертации. Автор принимал активное участие в сборе сейсмической информации, обработке сейсмических данных и контроле работы сейсмических станций; проведено большое количество полевых работ с целью изучения взрывной деятельности на крупных карьерах Карелии. Совместно с сотрудниками лаборатории геофизики Института Геологии КарНЦ РАН автор принимает участие в процессе анализа и интерпретации обширного сейсмического материала, работает над составлением ежегодных местных сейсмических каталогов.

#### **Структура и объем**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 166 наименований, приложений, изложена на 152 страницах машинописного текста, содержит 73 рисунка и 16 таблиц.

#### **Благодарности**

Автор безгранично благодарен своему научному руководителю д.г.-м.н. Николаю Владимировичу Шарову за совместную работу на протяжении многих лет, важные рекомендации, обсуждению полученных результатов и помощь в написании работы.

Особую признательность автор выражает своему научному руководителю д.ф.-м.н. Бурмину Валерию Юрьевичу за научное руководство, помощь в освоении методов и разработке программ.

Автор искренне благодарит д.т.н. Белашева Бориса Залмановича, к.ф.-м.н. Федоренко Юрия Валентиновича, к.г.н. Шелехову Татьяну Станиславовну, к.ф.-м.н. Асминга Владимира Эрнестовича за ценные советы.

Автор благодарит сотрудников лаборатории геофизики, каждый из которых своей выполняемой работой способствовал реализации проведенного исследования, а также Лебедева А.А., Мещерякову А.А., Бакунович Л.И., Герасимову А.А., Морозова А.Н., Конечную Я.В., соавторов нескольких работ по сейсмичности Карелии.

Автор выражает благодарность за полезные замечания в работе к.ф.-м.н. Кишкиной Светлане Борисовне.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### ***Введение***

Во **введении** обоснована актуальность работы, поставлены цель и задачи, описаны методы исследования. Сформулированы защищаемые научные результаты, показана их новизна и личный вклад соискателя, обоснована практическая значимость результатов.

### ***Глава 1. Геолого-геофизическая изученность территории Республики Карелия. Методы идентификации взрывов и землетрясений***

В **первой главе** приведен обзор географического положения и рассмотрена геолого-геофизическая, геоморфологическая изученность территории Республики Карелия. Кратко представлены проблемы сейсмического мониторинга и рассмотрены каталоги, несущие информацию о сейсмичности исследуемого региона. Приведен обзор методов идентификации взрывов и землетрясений.

Карелия расположена в юго-восточной части древнего докембрийского Фенноскандинавского щита, в которой выделяют три крупные структурные зоны общего северо-западного простирания. Центральную часть региона занимает Карельский кратон, с северо-востока к нему примыкает Беломорский складчатый пояс, с юго-запада Свекофеннская складчатая область. Основание Карельского кратона составляют раннеархейские гнейсы, гранитогнейсы и мигматиты. Они пересекаются узкими зеленокаменными поясами осадочно-вулканогенных пород позднего архея. Верхняя часть кратона представлена складчатым раннепротерозойским осадочно-вулканогенным чехлом, который сохранился от эрозии лишь в глубоких ядровых частях синклиналей. Беломорский складчатый пояс состоит из биотитовых, амфиболсодержащих и глиноземистых гнейсов. Свекофеннская складчатая область в Северном Приладожье представлена разнородными раннепротерозойскими осадочными и

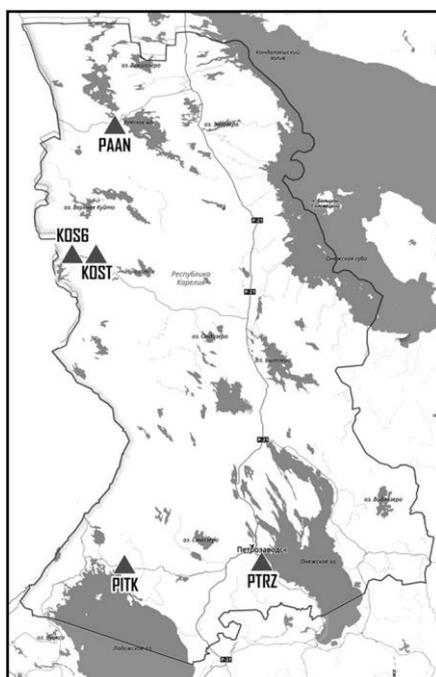
вулканическими породами.

Современный рельеф Карелии представляет собой сочетание форм доледникового денудационно-тектонического и форм ледникового и послеледникового эрозионного и аккумулятивного рельефов. Первый тип рельефа является результатом избирательной денудации древних кристаллических пород, второй сформировался под воздействием древних ледниковых покровов, талых ледниковых вод, приледниковых озерных и морских бассейнов.

Для изучения сейсмического режима территории Карелии необходимо, в первую очередь, создание сейсмического каталога и проведение его анализа. При составлении сейсмических каталогов встает задача изучения типовых черт сейсмических сигналов от карьерных взрывов, так как они затрудняют выявлять слабые местные землетрясения на сейсмических записях. Существуют два основных направления дискриминации событий: экспериментальные аналитические и математические методы на основе статистически-вероятностных характеристик. Для идентификации сейсмических событий, зарегистрированных на территории Карелии, использовались экспериментально аналитические методы (метод локации события, метод отношения максимальных амплитуд продольных и поперечных волн, метод построения спектрограмм, выделение на записи ударно-акустической воны).

## **Глава 2. Аппаратурное обеспечение сейсмической сети Карелии**

**Вторая глава** посвящена аппаратурному обеспечению сейсмической сети Карелии. Стационарные сейсмологические пункты наблюдений располагаются в разных районах Карелии (рисунок 1).



*Рисунок 1 – Сейсмические станции, расположенные на территории Карелии*

Первая стационарная сейсмическая станция PTRZ была открыта в Петрозаводске в 2000 г. В настоящее время две станции KOST и KOS6 расположены в районе г. Костомукша для того, чтобы изучать не только природную сейсмичность Карелии, но и регистрировать сейсмические события (взрывы, обрушения бортов карьеров) в районе города. Станция PITK находится в поселке Леппясилта Питкярантского района. Последняя станция PAAN установлена на территории Лоухского района в 2016 г. Сейсмическая сеть Карелии оснащена современной цифровой широкополосной аппаратурой и позволяет проводить мониторинг обширной сейсмической зоны (рисунок 2 а). Сейсмостанции обеспечивают регистрацию сейсмических событий в широком диапазоне частот от 0,033 до 50 Гц, который позволяет при применении полосовой фильтрации частот выделять на записи не только события регионального и локального масштаба, но и далёкие землетрясения.

Для решения задач локального характера применяется переносная станция SEIS, созданная Федоренко Ю.В. Переносная станция SEIS используется в труднодоступных местностях, для работ в горных выработках, карьерах, а так же при исследованиях сейсмического воздействия взрывов на здания и сооружения (рисунок 2 б).

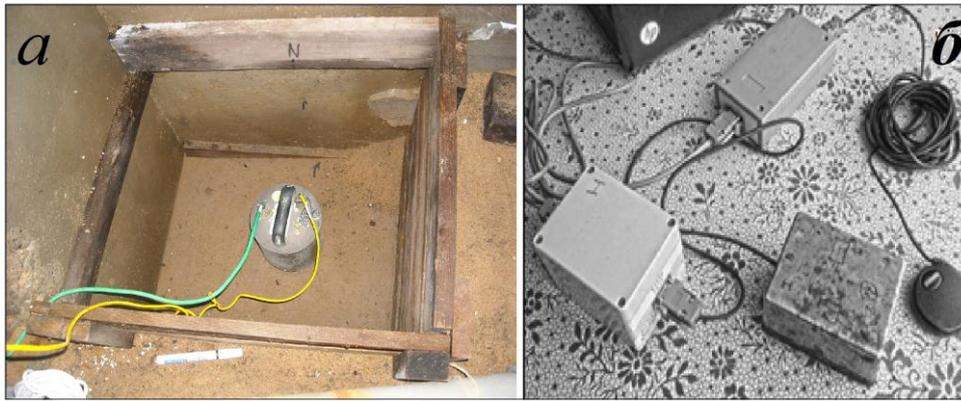


Рисунок 2 – сейсмические станции, действующие на территории Карелии.  
(а) стационарная сейсмическая станция KOS6 и (б) переносная сейсмическая станция SEIS

### Глава 3. Методика обработки сейсмических событий, зарегистрированных на территории Карелии

В главе 3 рассматривается методика обработки сейсмических данных. Чтобы повысить точность получаемых результатов, в обработке сейсмических событий задействован комплекс различных методов.

В процессе обработки сейсмических данных группа сейсмологов Института геологии выполняет следующие основные процедуры:

- преобразование поступивших со станций сейсмических данных из формата GCF в формат CSS;
- просмотр записей и обработка сейсмических событий (выделение вступлений *P*- и *S*- волн, определение времени в очаге, координат эпицентров сейсмических событий и локальной магнитуды);
- формирование каталога местных землетрясений и промышленных взрывов;
- создание карт сейсмичности региона.

Просмотр записей осуществляется для каждой сейсмической станции и формируется промежуточный бюллетень, в котором отражаются все зарегистрированные события на станциях Карельской сети. Определение координат эпицентров сейсмических событий происходит с привлечением записей волновых форм соседних сейсмических служб (Кольского филиала ФИЦ ЕГС РАН и Пулковской сейсмической сети ФИЦ ЕГС РАН). Для совместной обработки используются данные российских станций «Валаам» (VAL), «Выборг» (VYB) и по запросу из сейсмической группы «Апатитский ARRAY» (APA). Расчет локальной магнитуды проводится только на станциях сейсмической сети Карелии.

Для обнаружения и определения параметров сейсмических событий применяются программный комплекс ELRESS, созданный сотрудником Кольского научного центра Асмингом В.Э. и многофункциональный программный пакет WSG, разработанный сотрудниками ФИЦ Единой Геофизической службы РАН Акимовым А.П., Красиловым С.А. Программы работают с данными, преобразованными во внутренний формат CSS. Приведение в нужный формат осуществляется с помощью специально разработанного конвертора. Для определения координат эпицентров в ELRESS и WSG реализован метод засечек. Для идентификации местных землетрясений используется программа Бурмина В.Ю. NYP\_BUR. Она позволяет рассчитать координаты гипоцентров землетрясений и время в очаге по временам прихода продольных и поперечных волн.

**Программа ELRESS.** Для обработки сейсмических событий регионального масштаба применяется программа ELRESS. Она выполняет основные процедуры обработки сейсмических сигналов и включает в себя подсистему ручной локации, которая используется в работе КарСС. Подсистема ручной локации объединена с картографической подсистемой и выводит на карту замеренные пользователем времена вступлений сейсмических волн.

**WSG** представляет собой программный комплекс, включающий основной программный модуль WSG и набор сервисных программ-утилит, работающих под управлением операционной системы Windows. Данный комплекс позволяет определять времена вступления различных фаз сейсмических волн (продольных, поперечных, поверхностных) и основные параметры гипоцентра различного рода землетрясений.

Определение координат гипоцентров землетрясений в программе WSG проводится по методу Гейгера и сводится к минимизации функционала:

$$S_i = \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t}_i)^2,$$

где  $t_i$  - теоретические времена пробега сейсмических волн, а  $\bar{t}_i$  - время пробега сейсмической волны, соответствующее наблюдаемому времени прихода волны на  $i$ -ю станцию.

При идентификации сейсмических событий на записях КарСС часто используются дополнительные возможности WSG, а именно процессор обработки сигналов. Он позволяет применять отдельные математические функции с целью преобразования сигналов для их детального исследования и коррекции, например, спектрального исследования с помощью быстрого преобразования Фурье и сравнительного анализа, как записей сейсмических волн, так и их спектров.

**Программа НУР\_BUR.** Для идентификации местных землетрясений, разделения событий, имеющих техногенный генезис, от естественных, а также региональных от телесеизмических по глубине сейсмических источников используется программа НУР\_BUR, реализующая метод предложенный Бурминым В.Ю.

Согласно этому методу задача определения координат гипоцентров близких землетрясений ставится как задача минимизации функционала:

$$S = \sum_{i=1}^n \rho_i (D_i - d_i)^2 + Y(H - h)^2,$$

где  $D_i$  и  $H$  определяются из решения системы нелинейных уравнений,

$$(X - x_i)^2 + (Y - y_i)^2 + (H)^2 = v_i^2 (t_i - t_0)^2$$

Величины  $h$  задаются на одномерной сетке  $\Delta_h$  в интервале  $[0, h_M]$ , а  $h_M$  вычисляется из условия

$$\tau_{\min} = \int_0^{h_M} \frac{dz}{v(z)}, \text{ где } \tau_{\min} - \text{ время пробега сейсмической волны до ближайшей от очага сейсмической}$$

станции.

**Региональные скоростные модели BARENTS, BALTIC и KARELIA.** Определение координат эпицентров региональных сейсмических событий с 2015г. проводится с использованием скоростной модели BARENTS (Таблица 1). По собственным результатам обработки и по оценкам научных сотрудников Архангельской области, Кольского научного центра установлено, что скоростная модель BARENTS дает достаточно точные параметры эпицентров для Северо-Западных регионов. Карельской сейсмической группой обработано более 2000 региональных событий за 2017-2020 гг. На рисунке 3 приведен пример локации события в Лахденпохском районе с помощью программы ELRESS.

**Таблица 1.** Скоростная модель BARENTS для Северо-Западного региона

Глубина слоя (км)	Vp (км/с)	Vs (км/с)
0	6.2	3.58
16	6.7	3.87
40	8.1	4.6
55	8.23	4.68
290	Как в АК-135	

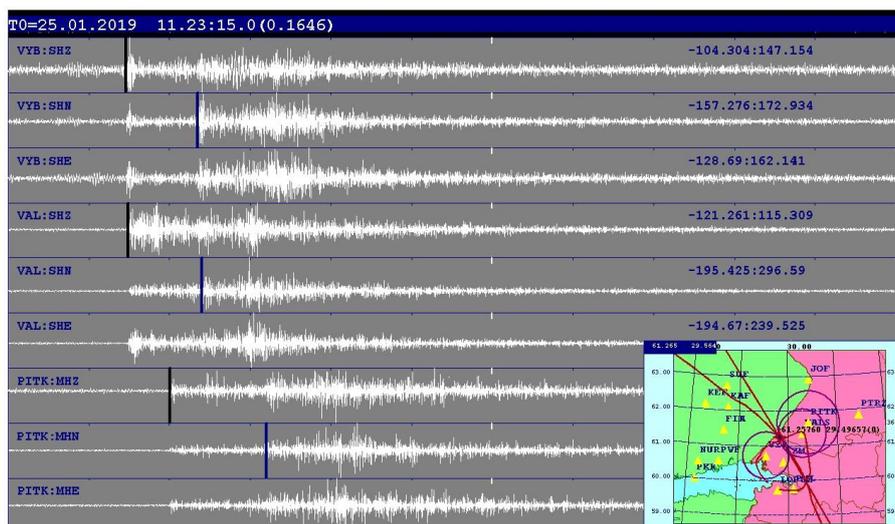


Рисунок 3 – Взрыв на карьере «Ильмениоки». Запись получена по данным станций PITK, VAL, VYB 25 января 2019 года (полосовой фильтр 2-20)

На записи представлен взрыв на карьере «Ильмениоки», который был произведен 25 января 2019 года, время в очаге по результатам сейсмической сети Карелии  $t_0=11:23:14.8$  (UTC). Обработка события происходила по данным трех станций: PITK, VAL, VYB. Магнитуда события равна  $M_L=1.2$ . На рисунке 4 показано расположение эпицентра события по данным Карельской и Финской сейсмических сетей (University of Helsinki), а в Таблице 2 представлены численные значения и время в очаге.

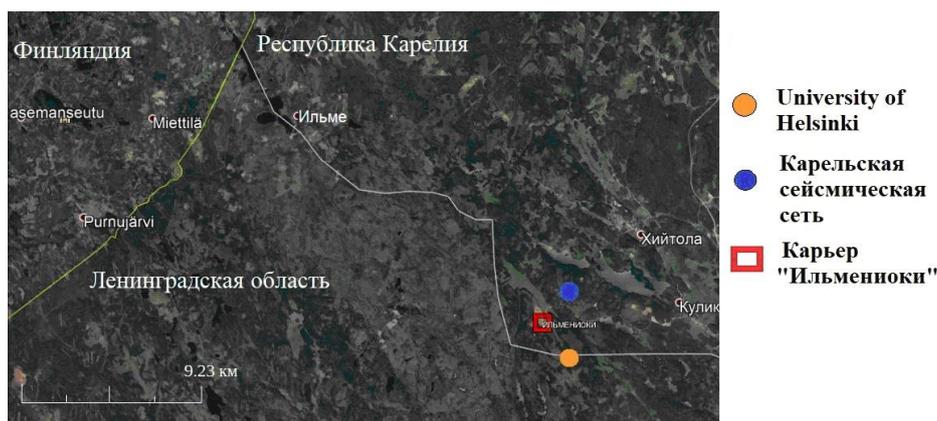


Рисунок 4 – Расположение эпицентра взрыва на карьере «Ильмениоки» по данным КарСС и University of Helsinki

Таблица 2. Время в очаге и координаты эпицентра взрыва, произведенного на карьере «Ильмениоки» 25 января 2019 года. Лахденпохский район, Карелия

Название сейсмологической сети	Время в очаге, Час:мин:сек	Координаты эпицентра		Расстояние от места взрыва до эпицентра (км)
		Широта, °	Долгота, °	
КарСС	11:23:14.8	61.209	29.576	2.0
University of Helsinki	11:23:15.29	61.175	29.624	2.5

Значения времени в очаге по данным Карельской и Финской сейсмических сетей отличаются на 0,79 сек., координаты эпицентра на 0,05°.

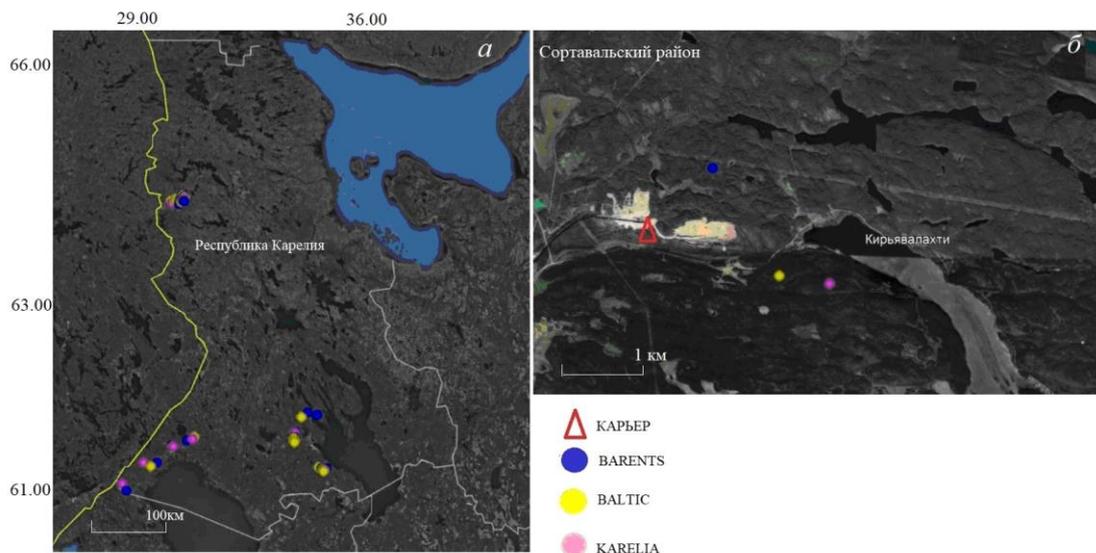
Несмотря на то, что BARENTS дает хорошую точность при определении эпицентров землетрясений, зарегистрированных на территории Карелии, были проверены несколько скоростных

моделей (Таблица 3). Представлены одномерная скоростная модель по профилю BALTIC длиной 430км, который проходит на юго-востоке Финляндии, а также скоростная модель, полученная на основе работ Литвиненко И.В.. Они были дополнены скоростной моделью АК-135 на глубинах более 50км. Скоростная модель территории Карелии названа «KARELIA».

**Таблица 3.** Одномерные скоростные модели BALTIC и KARELIA

B A L T I C	Глубина границы (км)	Vp (км/с)	Vs (км/с)	K A R E L I A	Глубина границы (км)	Vp (км/с)	Vs (км/с)
	0	6.2	3.58		0	6.0	3.52
10	6.3	3.64	5	6.2	3.64		
20	6.6	3.81	10	6.4	3.76		
33	7.0	4.05	20	6.6	3.88		
43	8.1	4.68	30	6.8	4		
54	8.2	4.74	40	8.0	4.71		
54-640	AK-135		50	8.1	4.76		
			50-640	AK-135			

На рисунке 5 показаны рассчитанные эпицентры известных взрывов, которые были произведены в январе 2019г. Координаты эпицентров взрывов, полученные с использованием скоростных моделей BALTIC и KARELIA, отличаются незначительно от координат эпицентров этих же событий с применением модели BARENTS. Погрешность в определении эпицентров в среднем не превышает 9км. Модель BALTIC оказалась наилучшей при определении координат событий в юго-западной части Карелии (Лахденпохский, Сортавальский, Питкярантский районы), а также в Прионежском районе. Это превосходство связано со схожим геологическим строением участка, по которому проходит профиль BALTIC и перечисленных районов. Для определения координат эпицентров сейсмических событий на севере региона и взрывов в Костомукшском районе лучше использовать модель BARENTS, а скоростную модель KARELIA в центральных районах Карелии.



*Рисунок 5 – Эпицентры взрывов, полученные с использованием различных скоростных моделей (январь 2019 г.) – а; эпицентры взрыва в Сортавальском районе (карьер Кирьявалахти) - б*

**Определение координат гипоцентра местного землетрясения 03.01.2017 в Лоухском районе (программа НУР\_BUR)**

3 января 2017 года карельской сейсмической станцией РААН и Финской сейсмологической сетью было зарегистрировано землетрясение в 13:05:06,36 часов по Гринвичу в Лоухском районе (рисунок 6).

Программа HYP\_BUR позволяет вычислить координаты гипоцентра данного землетрясения по известным временам прихода *P*- и *S*-волн на станции, записавшие событие (Таблица 4).

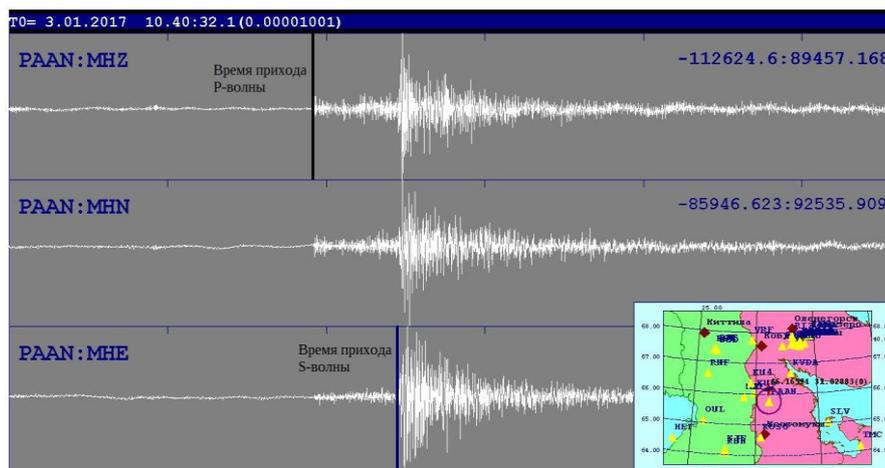


Рисунок 6 – Землетрясение в Лоухском районе 3 января 2017 года.  
Запись станции PAAN в программе ELRESS

Землетрясение, зарегистрированное станцией PAAN произошло в Лоухском районе в земной коре на глубине 4.6 км, координаты эпицентра: 66.112° с.ш., 31.121° в.д. (Таблица 5). Результаты, полученные Финской сейсмической сетью, представлены в Таблице 6. Как показывают полученные данные, координаты эпицентра отличаются друг от друга незначительно. Значение глубины по данным Финской сейсмической сети отличается от полученной глубины, рассчитанной по программе HYP\_BUR на 7.2 км. На результат влияет используемая методика, скоростная модель и количество станций, задействованных в расчетах.

Таблица 4. Исходные данные, используемые для нахождения координат гипоцентра с помощью программы HYP\_BUR

Название станций	Координаты станций		Время прихода волны на сейсмическую станцию	
	Широта, °	Долгота, °	tпр. <i>P</i> -волны (ч:мин:сек)	tпр. <i>S</i> -волны (ч:мин:сек)
PAAN	65.760	31.07	10:40:39.58	10:40:44.66
KU6	66.025	29.890	10:40:40.36	10:40:46.09
MSF	65.911	29.040	10:40:46.62	10:40:56.92
VRF	67.748	29.609	10:41:01.44	10:41:22.67
RMF	64.217	29.931	10:41:04.19	10:41:28.74
RNF	66.609	26.013	10:41:06.89	10:41:32.06
SGF	67.442	26.526	10:41:09.15	10:41:35.74
TOF	66.077	24.332	10:41:15.09	10:41:47.29
NIF	63.39	27.810	10:41:20.04	10:41:55.57

**Таблица 5.** Результаты расчета координат гипоцентра землетрясения 03.01.2017 в Лоухском районе, полученные с помощью программы NYP\_BUR

Дата события	03.01.2017
Время в очаге (ч:мин:сек)	10:40:31.6
Широта, °	66.112
Долгота, °	31.121
Глубина, км	4.6

**Таблица 6.** Координаты гипоцентра землетрясения 3.01.2017, полученные Финской сейсмической сетью

Название геофизической службы	Координаты гипоцентра		
	Широта, °	Долгота, °	Глубина гипоцентра, км
University of Helsinki	66.131	31.001	11.8

### Эффективность системы сейсмологических наблюдений на территории Карелии

Для оценки качества полученных результатов важной является оценка эффективности сейсмической сети, развернутой в Карелии. Под эффективностью сейсмологической сети, прежде всего, понимаются минимальные магнитуды или энергетические классы землетрясений, которые регистрируются сейсмическими станциями сети, а также точность определения координат гипоцентров землетрясений. Ниже приведены результаты расчета минимальных магнитуд и максимальных погрешностей в определении координат землетрясений (взрывов) по методике Бурмина В.Ю. Расчеты выполнены в созданных им же программах MinMag и EgoFild. Для графического изображения результатов использовалась программа Surfer. При этом предполагалось, что погрешности в задании времен прихода сейсмических волн составляет 0.1 с, а погрешность в задании скорости распространения сейсмически волн – 0.1 км/с.

На рисунке 7 в цилиндрической проекции показано распределение значений минимальной магнитуды для сейсмических станций Карелии (PAAN, KOS6, PTRZ, PITK) и станций Пулковской сейсмической сети (VAL, VYB), Кольского научного центра (APA). Видно, что сеть в областях сгущения сейсмических станций регистрирует землетрясения, начиная с магнитуды 1-2. На периферии же сеть регистрирует события магнитудой 3.4-4.0.

На рисунках 8-10 представлены распределения максимальных ошибок в определении широты, долготы и глубины для системы сейсмических станций Карелии.

Как следует из рисунков 8-10, значения ошибок в определении координат эпицентров землетрясений в центре сети по широте ( $\delta\varphi$ ) – 1.5 км и долготе ( $\delta\lambda$ ) около 2 км, а на периферии 6, 11 км соответственно. Значения ошибок определения глубин очагов землетрясения (H) в центре сети не превышают 5 км, а на всей территории Карелии не превышают 20 км.

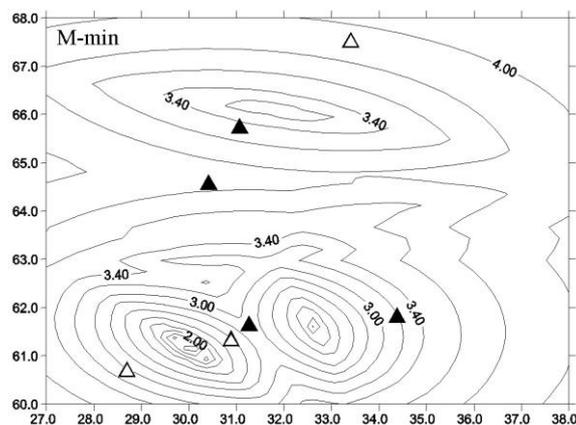
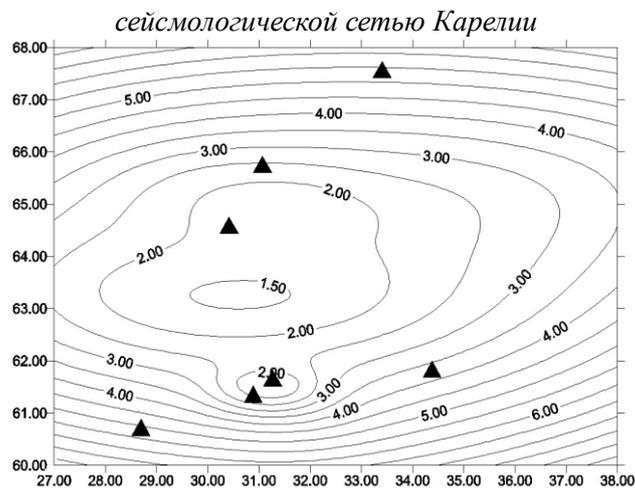
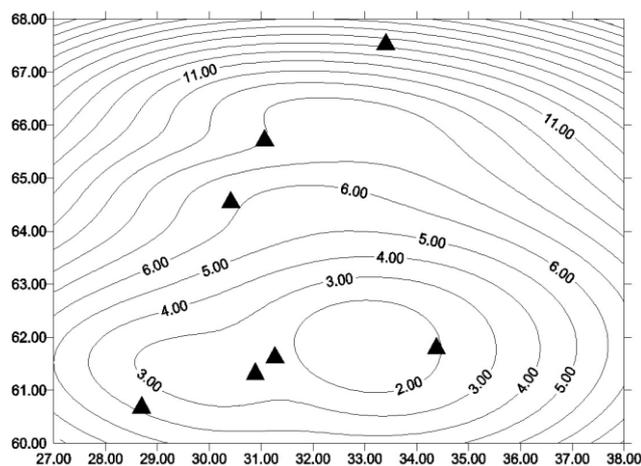


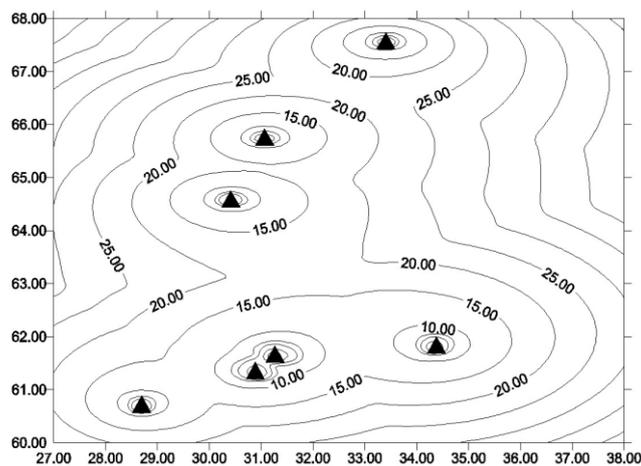
Рисунок 7 – Распределение минимальных значений магнитуды землетрясений, регистрируемых



*Рисунок 8 – Распределение максимальных ошибок (в км) в определении широты землетрясений, регистрируемых Карельской сейсмологической сетью*



*Рисунок 9 – Распределение максимальных ошибок (в км) в определении долготы землетрясений, регистрируемых Карельской сейсмологической сетью*



*Рисунок 10 – Распределение максимальных ошибок (в км) в определении глубин землетрясений, регистрируемых Карельской сейсмологической сетью*

**Погрешность в определении эпицентров сейсмических событий на территории Карелии Карельской и Финской сейсмологическими сетями**

На примере взрывов (рисунок 11), производимых на карьере «Чевжавара», определены средние

значения расстояний от места взрыва до эпицентра, полученного Карельской (PTRZ) и Финской сейсмическими сетями (HELS) (Таблица 7). Средняя величина этих расстояний представляет собой погрешность в определении эпицентров взрывов, произведенных на карьере «Чевжавара».

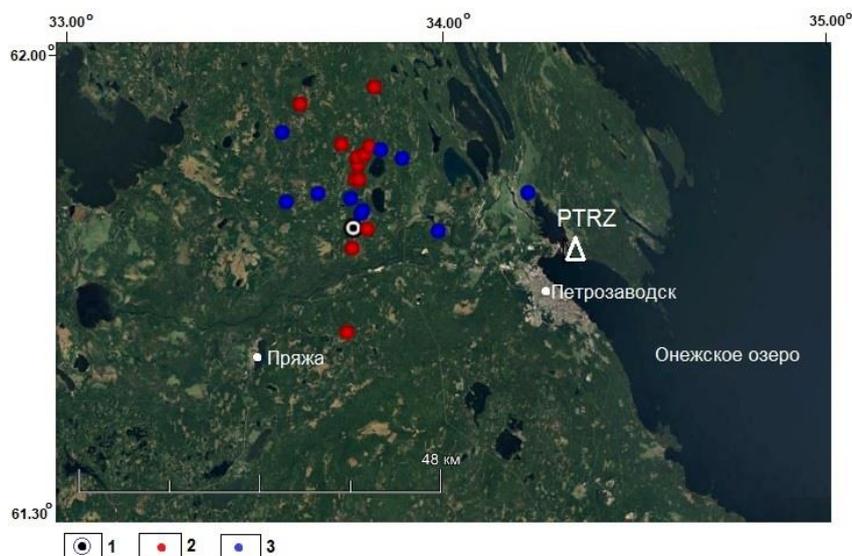


Рисунок 11 – Эпицентры взрывов, произведенных на карьере «Чевжавара» (Пряжинский район).  
1 -карьер «Чевжавара»; 2 - эпицентры взрывов, полученные КарСС, 3 - эпицентры взрывов, полученные HELS

Таблица 7. Средние значения расстояний от места взрыва до эпицентра

Дата события (время в очаге)	ML	PTRZ(км)	HELS(км)
25.04.2018 (13:24:44.6)	1.4	13	23
17.11.2018 (13:48:15.7)	1.6	18	9
24.11.2018 (10:07:26)	1.6	10	2.5
16.03.2019 (07:05:52.7)	1.8	9	15
06.04.2019 (07:05:52.7)	1.6	16	7
08.10.2019 (15:33:50.9)	1.7	6	10
16.10.2019 (11:59:5.8)	2.1	4	3
07.12.2019 (06:57:41.4)	1.7	10	11
30.11.2020 (07:23:54.6)	1.9	3	3.5
24.12.2020 (06:54:35.3)	2.1	2	11
Среднее значение		9.1	9.5

За период с 2018-2020 гг. станциями Карельской сейсмической сети в районе карьера «Чевжавара» было зарегистрировано 40 событий с магнитудами от 1.1 до 2.1. Финской сейсмической сетью 10 событий. Неодинаковое число событий зарегистрированных сейсмическими сетями объясняется малыми магнитудами значительного числа взрывов и расположением сетей относительно карьера. Погрешность при определении эпицентров промышленных взрывов на карьере «Чевжавара» составляет по данным сейсмической сети Карелии – 9.1 км, финской сети – 9.5 км.

В результате проведенной оценки значений погрешностей в определении координат эпицентра сейсмических событий по экспериментальным данным и рассчитанных теоретически видно, что в первом случаи, соответственно, погрешность равна 9.1 км, во втором 3-4 км. Такая разница в погрешностях говорит о том, что реальные ошибки в определении времён прихода сейсмических волн и в задании скоростной колонки больше, чем эти же значения при расчёте теоретических погрешностей.

Средние значения расстояний от места взрыва до эпицентров при регистрации промышленных

взрывов в карьерах г. Костомукша (январь-февраль 2020) равны по данным сейсмической сети Карелии – 1.7 км, Финляндии – 2.2 км.

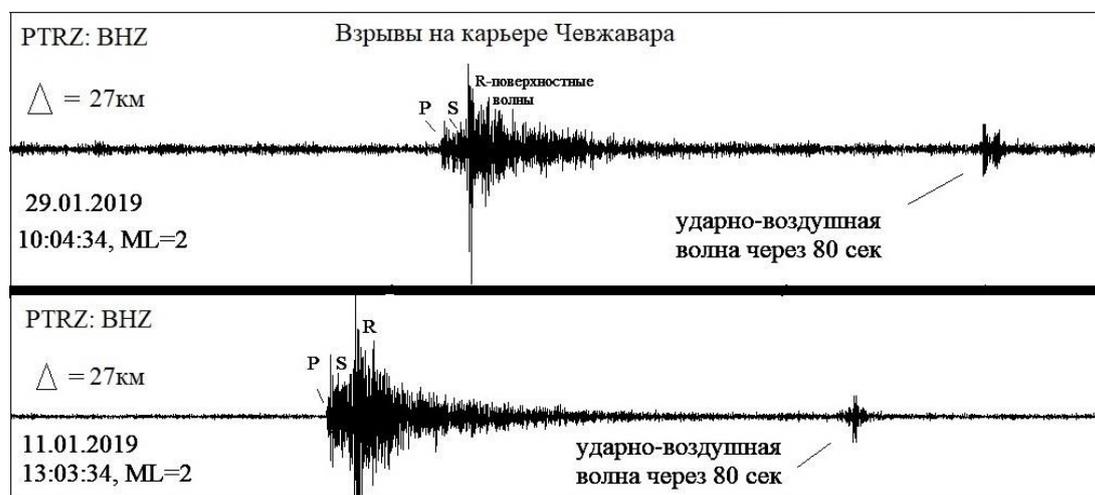
Расчеты показали, что Карельская сейсмическая сеть в среднем позволяет получать координаты эпицентров на территории Карелии с погрешностями менее 10.

#### **Глава 4. Идентификация сейсмических событий по данным Карельской сейсмической сети**

**Глава 4** посвящена идентификации сейсмических событий, зарегистрированных на территории Карелии станциями Карельской сейсмической сети.

Распознавание или идентификация взрывов, природных землетрясений и других сейсмических событий основано на анализе волновых форм и их спектрального состава. Здесь важно правильно провести обработку сейсмических данных, и среди множества методик и программ подобрать оптимальный вариант. Повысить точность результатов возможно путем привлечения сейсмических станций, функционирующих в соседних регионах, а также использования локальных скоростных моделей. Поскольку Карелия характеризуется повышенной сейсмичностью от промышленных взрывов, то важно изучать горнодобывающую активность в регионе.

С момента существования Карельской сейсмической сети совершенствовались методика обработки и хранения поступающей информации. На протяжении двух десятилетий применялись различные подходы для анализа сейсмического материала, что в итоге позволило сформулировать региональные критерии различия взрывов и землетрясений. Во многих случаях решающим фактором при установлении природы регионального события является точность определения его координат. Если координаты эпицентра события совпали с координатами карьера, то велика вероятность того, что это взрыв. Для событий, произошедших вне рудников, требуется более тщательный анализ, чтобы определить, является ли данное событие взрывом или землетрясением. Взрывы производятся вблизи дневной поверхности, обычно в наименее плотных для данного разреза породах, а землетрясения происходят на глубине от нескольких километров и глубже в плотных и прочных породах консолидированной коры. Учитывая природу возбуждения колебаний от взрывов и землетрясений, следует ожидать различия волновых форм для этих двух типов сейсмических событий. Приповерхностные взрывы должны возбуждать интенсивную группу поверхностных волн. Эти волны на записях более глубоких землетрясений могут отсутствовать. На сейсмограмме после записи взрыва может наблюдаться сейсмоакустическая (ударно-воздушная) волна (рисунок 12).



*Рисунок 12 – Запись акустической (ударно-воздушной) волны на сейсмической записи станции PTRZ после произведенных взрывов на карьере «Чевжавара» (полосовой фильтр 2-20 Гц)*

Для идентификации взрывов на сейсмической записи проведено зонирование территории. На рисунке 13 показаны координаты эпицентров произведенных промышленных взрывов по сейсмическим данным за 2017–2018 гг. Результаты подтверждены сотрудниками Костомукшского горно-обогатительного комбината (ГОК) и Ростехнадзора. Выбранные события приведены в соответствии с расположением их к ближайшей сейсмической станции Карелии, а разделение на зоны облегчает процесс обработки.

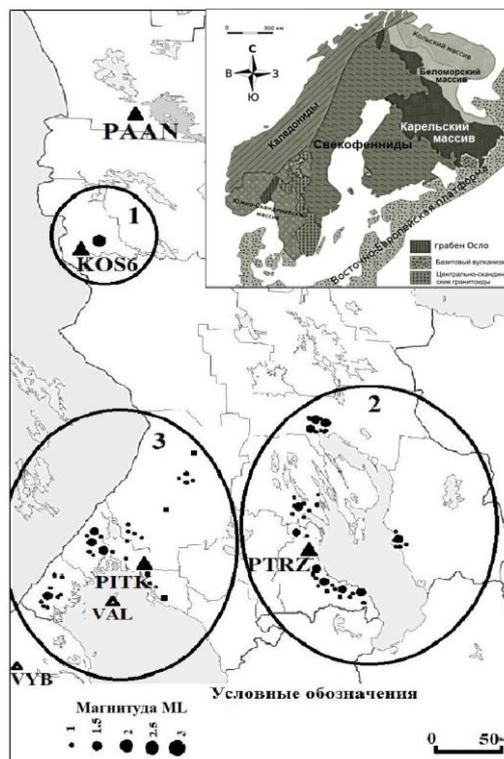


Рисунок 13 – Расположение эпицентров промышленных взрывов, сейсмических станций Карелии и зон взрывной сейсмичности: 1 – «район г. Костомукша»; 2 – «Пудожский, Прионежский, Пряжинский, Медвежьегорский, Кондопожский районы»; 3 – «Сортавальский, Суоярвский, Лахденпохский, Питкярантский районы»

В процессе выполнения диссертационной работы была изучена горнодобывающая активность в регионе, которая включает в себя режим работы действующих карьеров, их расположение и способы добычи сырья. Взрывная активность в Карелии проявляется с 4:00 – 18:00 (UTC). Причём большинство взрывных работ производят с 9:00 – 11:00 (UTC) (рисунок 14).

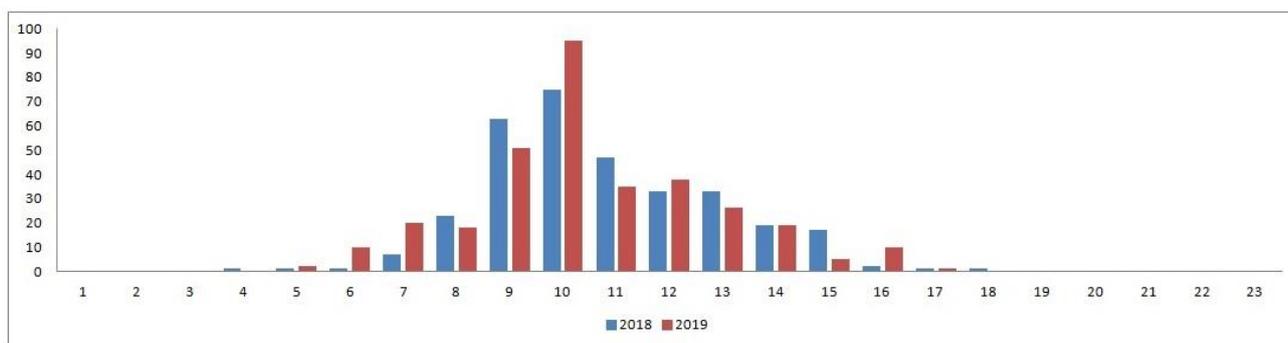


Рисунок 14 – Распределение количества взрывов за 2018-2019 гг. по времени суток (UTC)

Для распознавания различных типов сейсмических событий на записях Карельской сейсмической сети исследовались характерные формы сигналов и их спектральные свойства (рисунок 15), был создан альбом волновых форм промышленных взрывов. Результаты обработки сейсмических сигналов показали, что большинство записей взрывов на одной и той же станции из одного карьера похожи друг на друга (рисунок 15 а).

При исследовании волновых форм и спектров сейсмических сигналов от короткозамедленных взрывов в карьерах г. Костомукша «Северный» и «Центральный» отмечено, что эти события характеризуются небольшой длительностью, высокочастотным составом и увеличением амплитуды спектра на высоких частотах при уменьшении расстояния до станции. Максимальные амплитуды на спектрах взрывов наблюдаются на частотах от 10 – 20 Гц. Вследствие затухания с увеличением

расстояния от взрыва до станции амплитуда сейсмического сигнала ослабевает. С увеличением массы заряда увеличивается время задержки между сериями взрывов. Амплитуда сейсмического сигнала от промышленного взрыва при одинаковых зарядах в серии зависит от суперпозиции сейсмических сигналов, вызванных взрывом групп одновременно взрываваемых скважин (рисунок 15 а, б). Местные землетрясения также характеризуются небольшой длительностью и высокочастотным составом. На рисунке 15 в, г показано землетрясение, которое произошло 29.06.2015. Эпицентр находился на расстоянии 160км от сейсмической станции KOS6 (Лоухский район). Максимальные амплитуды на спектре землетрясения выделяются на частотах 7-8 Гц и 17-18 Гц. Землетрясение 29.12.2018 было зарегистрировано двумя станциями КарСС (Калевальский район) (рисунок 16). На записи ближайшей станции РААН большая часть энергии проявляется на частотах 4-10 Гц, также виден спектральный максимум на частоте 12-13 Гц, 17-18 Гц. Амплитудный спектр на записи станции KOS6 сглажен, но заметно увеличение амплитуды на частоте от 4 до 13 Гц.

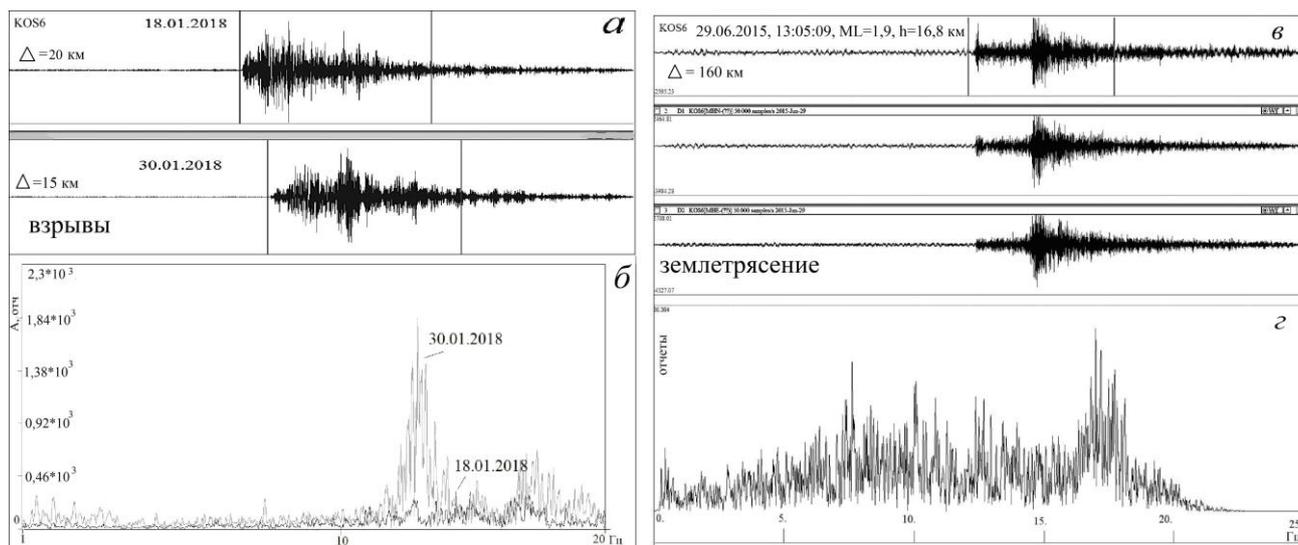


Рисунок 15 – Волновые формы вертикальной компоненты, полосовой фильтр 2–20 Гц (а) и амплитудные спектры сейсмической записи взрывов на карьерах «Северный» 18.01.2018, «Центральный» 30.01.2018 (район г. Костомукша) (б); волновые формы землетрясения от 29.06.2015 (в), полосовой фильтр 0,5-20 Гц; амплитудный спектр землетрясения 29.06.2015 (з) (данные станции KOS6)

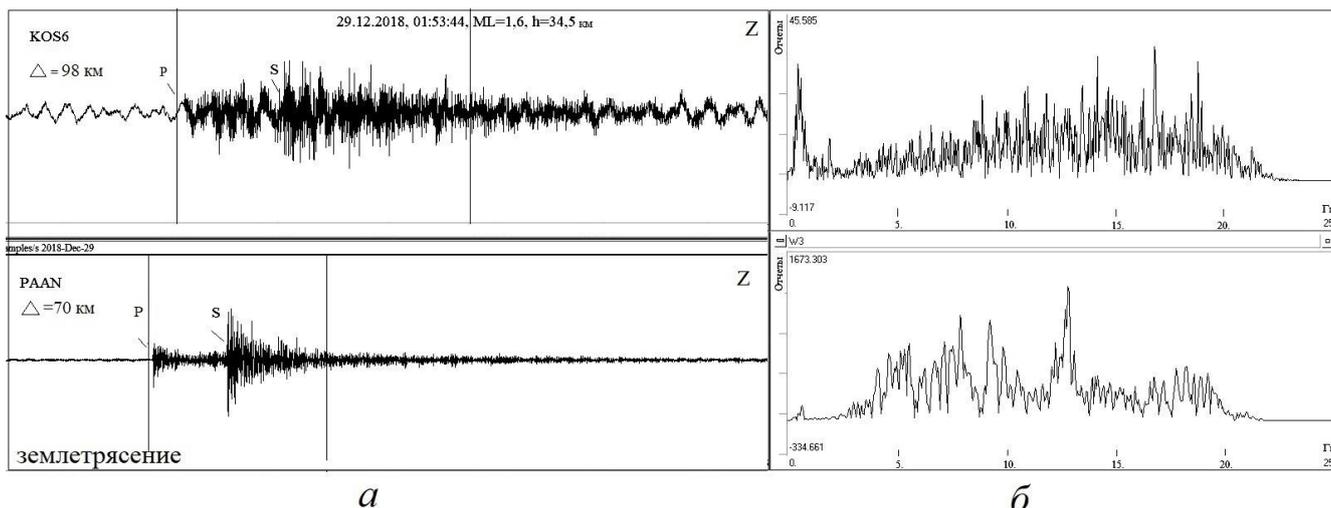


Рисунок 16 – Землетрясение 29.12.2018: а - волновые формы вертикальной компоненты, б - спектральный состав

На рисунке 17 показаны волновые формы вертикальной компоненты и спектры взрыва в логарифмическом масштабе, произведенного в карьере «Западный» 26.03.2015 в 09:59:10. (UTC) с магнитудой  $ML=2.1$  (район г. Костомукши). Спектры взрыва получены по данным всех станций Карельской сейсмической сети. Установлено, что они имеют схожую сложную форму на частотах от 10

Гц. Такой согласованности не наблюдается на моделях землетрясений (рисунок 18).

На рисунке 18 показано землетрясение, которое произошло в районе г. Костомукши 4 августа 2018 в 0:14 часов (UTC) с магнитудой  $M_L=1,5$ . Землетрясение зарегистрировано станциями KOS6 и PAAN.

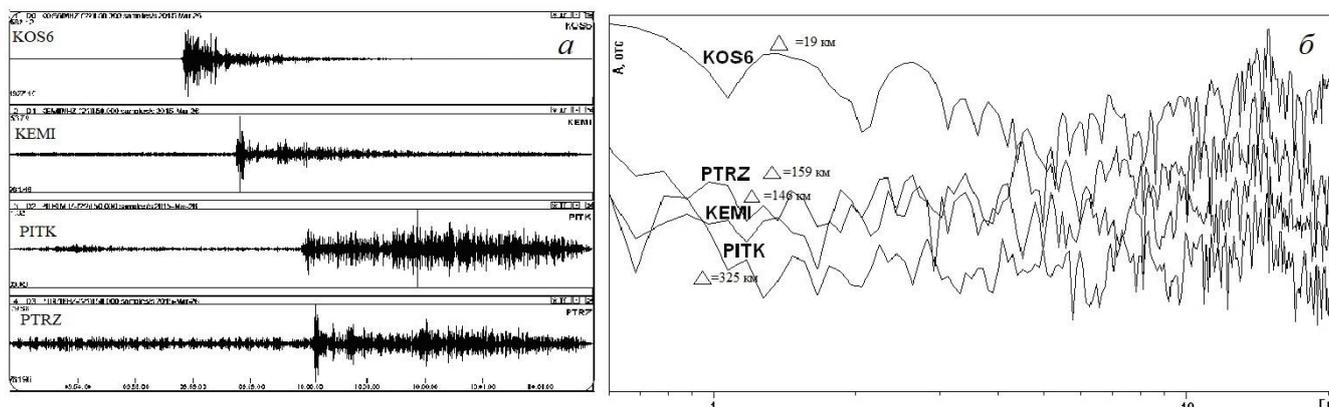


Рисунок 17 – Волновые формы (а), спектры взрыва 26.03.2015 (б). Карьер «Западный»

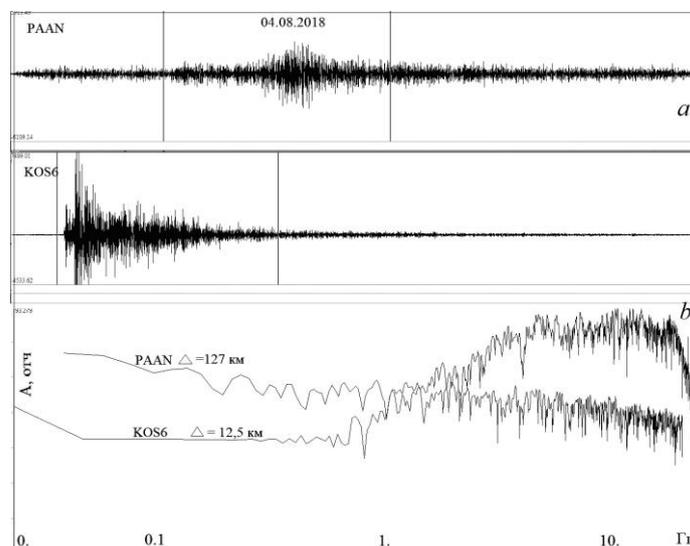


Рисунок 18 – Волновые формы (а), спектры (б) землетрясения 04.08.2018 в районе г. Костомукша

По инструментальным данным последних лет магнитуды промышленных взрывов, зарегистрированных на территории Карелии, не превосходили значение 2.5. На каждом руднике существует своя технология подрыва зарядов и ограничение на максимальную величину заряда. Однако технологии подрыва и максимальные величины зарядов могут меняться со временем. Как правило, местные землетрясения имеют также небольшую интенсивность, сравнимую с интенсивностью промышленных взрывов. Но если магнитуда сейсмического события превышает 2.5, то можно с большой долей вероятности говорить о том, что это землетрясение.

Для распознавания землетрясений и промышленных взрывов, зарегистрированных на территории Карелии, построен график логарифмов отношения максимальных амплитуд продольных Р- и поперечных S- волн относительно частоты максимума спектра Р- волны, и определен параметр дискриминации (рисунок 19). Данный метод применялся W.-Y. Kim и др., Морозовым А.Н. Для расчетов использованы данные станции KOS6, которая регистрирует землетрясения на севере Карелии. Северная станция PAAN-шумная станция, не позволяет четко выделять вступления Р- и S- волн промышленных взрывов. Станции PITK и PTRZ землетрясения на территории региона не зарегистрировали. Согласно распределению взрывов и землетрясений по критерию  $Lg(A_p/A_s)$  оптимальное разделение событий, зарегистрированных станцией KOS6, происходит при значении -0.4. Для других станций получили бы другое число. Метод опробован на записях 42 промышленных взрывов и 12 землетрясений Карелии. Среди 42 промышленных взрывов: 27 зарегистрированы в районе г. Костомукша (частоты 9 - 18 Гц), 4 - в Медвежьегорском районе (частота 9, 12 Гц); 4 - в Суоярвском районе (частота 9 Гц), 3 взрыва (частота 3 Гц) произведены в

карьерах г. Кировск (Мурманская область) и 4 взрыва (частоты 9, 12 Гц) на территории Финляндии. Сейсмические события удалены от станции KOS6 на расстояния 12 - 365 км. Показано, что короткозамедленные взрывы расположены выше значения  $-0.4$ , землетрясения ниже.

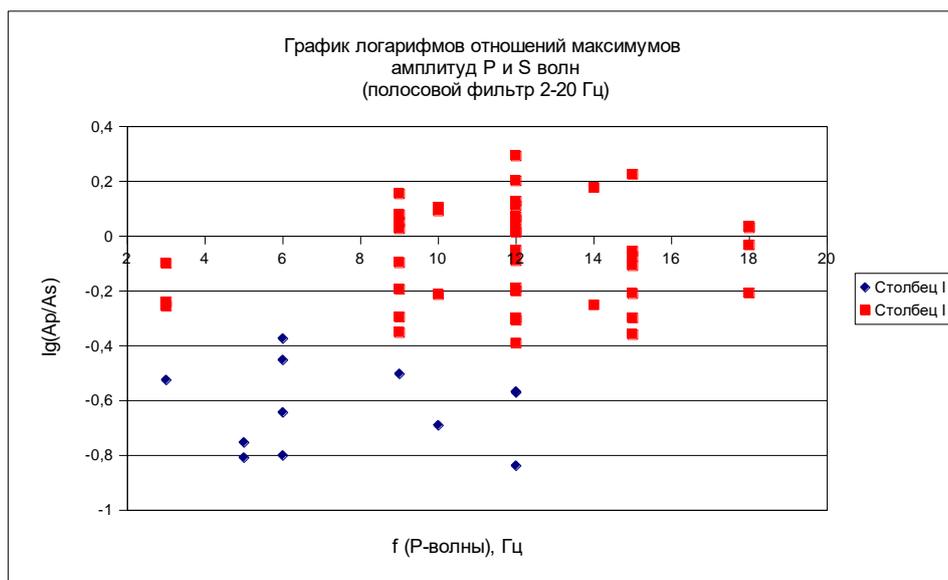


Рисунок 19 – График логарифмов отношений максимумов амплитуд P и S волн. Сейсмические данные станции KOS6, полосовой фильтр 2-20 Гц

Согласно рисунку 19 11 событий из 12 надежно идентифицированы как землетрясения. Вероятность их идентификации составляет 92%. 41 событие из 42 надежно идентифицированы как промышленные взрывы. Вероятность идентификации составляет 98%.

Ниже представлены основные критерии идентификации сейсмических событий, зарегистрированных на территории Карелии:

1. Взрывы возбуждают интенсивную поверхностную волну.
2. Если событие низкочастотное, то это телесеизмическое событие. Высокочастотный спектр характерен для региональных и локальных событий различной природы. По сейсмическим данным Карелии установлено, что амплитудный спектр местных взрывов имеет максимальное значение на диапазоне частот от 9 – 20 Гц, а спектр местных землетрясений имеет два максимума на частотах 3-13 Гц и около 17-18 Гц. Максимальные значения амплитуды далеких землетрясений определяются на низких частотах – менее 2 Гц.
3. Спектры промышленного взрыва на азимутально-распределенных станциях имеют схожие формы, чего не наблюдается на спектрах землетрясения.
4. Если координаты события находятся непосредственно в районе одного из действующих рудников, сейсмическая запись имеет схожие волновые формы с событием в альбоме волновых форм и время события соответствует наблюдаемому времени взрыва для данного карьера, то это событие – взрыв.
5. Если координаты события находятся вблизи от одного из действующих рудников и событие высокочастотное (диапазон 2-20 Гц), и произошло в дневное время (4-18 UTC), то в этом случае оно идентифицируется, как возможный взрыв.
6. События, которые происходят в Калевальском, Кемском или Лоухском районах нужно идентифицировать как землетрясения, так как действующих карьеров, на которых производят массовые взрывы, в этих районах нет.
7. Если магнитуда события больше, чем максимальная для промышленных взрывов Карелии – 2,5, то предполагается, что это землетрясение.
8. Если на сейсмической записи наблюдается наличие акустической (ударно-воздушной) волны после взрыва, то событие относят к карьерному взрыву.
9. Если логарифм  $Lg(Ap/As)$  отношения максимальных амплитуд P и S волн более  $-0.4$ , то зарегистрированное событие является взрывом. Если логарифм отношения максимальных амплитуд P и S волн менее  $-0.4$ , то зарегистрированное событие – землетрясение.

При идентификации слабых сейсмических событий на записях станций сейсмической сети Карелии все перечисленные критерии проверяются совместно.

## **Глава 5. Результаты инструментальных сейсмологических наблюдений на территории Карелии**

В главе 5 приведены результаты сейсмологических наблюдений на территории Карелии, которые были получены сейсмической сетью Карелии в 2017-2020 гг. и на основе совместных работ, проводимых геологами и сейсмологами европейской части России. Обработано более 2000 региональных событий за 4 года.

Основная информация о результатах многолетних наблюдений за сейсмичностью региона представлена как в текстовом виде (рисунок 20), так и в графическом - в виде карт эпицентров (рисунок 21). Сейсмические каталоги являются основным источником, показывающим изменения напряженно-деформированного состояния в структуре земной коры. Они позволяют устанавливать уровень сейсмической активности различных регионов. Развитие современных сейсмических процессов в земной коре происходит в условиях совместного воздействия естественных тектонических сил и антропогенной деятельности человека.

Сейсмический каталог Карелии содержит информацию о дате события, времени в очаге, погрешности определения времени возникновения, координатах эпицентра, погрешности определения эпицентра по широте и долготе, значении локальной магнитуды, природе события (взрыв или местное землетрясение). В табличные данные записываются названия станций, а также район, где произошло сейсмическое событие (рисунок 20). Станции Карельской сейсмической сети регистрируют различного рода землетрясения, в том числе и телесеismicкие, но в региональный каталог Карелии заносится информация только о локальных событиях (местные землетрясения или промышленные взрывы). Собранный и обработанный материал за прошедший год, в виде сводного каталога, с 2017 г. отправляется в ФИЦ ЕГС РАН на проверку и дальнейшей работы.

По полученным инструментальным данным регионального сейсмического мониторинга и совместным работам по уточнению параметров гипоцентров сейсмических событий проведенных с другими авторами показано, что сейсмичность исследуемой территории проявляется в виде землетрясений небольшой магнитуды (рисунок 21). За прошедшие два десятка лет на территории Карелии регистрируются от 1-10 землетрясения в год с магнитудой не более 3.2. На рисунке 22 представлен график повторяемости для землетрясений Карелии. Из рассмотрения рисунка видно, что график повторяемости не является представительным, что говорит о слабой сейсмичности изучаемого региона. Очаги возникают в основном на севере региона: в Лоухском и Калевальском районах. Единичные случаи зарегистрированы в Белом море и в районе г. Костомукша. Причинами природных событий на равнинных территориях, таких как Карелия, являются зоны активных разломов. Однако по историческим данным установлено, что в западной части Фенноскандинавского щита землетрясения происходили с интенсивностью 7 и даже 8 баллов. Самое сильное землетрясение за инструментальный период наблюдений в пределах региона, произошло в Лоухском районе в 2001 году и имело магнитуду 3.2. Землетрясения происходят в земной коре на глубине от 0-35 км.

Промышленные взрывы являются наиболее частыми и яркими сейсмическими событиями на записях Карельской сейсмической сети. Большая часть эпицентров взрывов располагается вблизи берегов Онежского и Ладожского озера, а также в районе г. Костомукша (рисунок 23). По сейсмическим наблюдениям последних 6 лет активные взрывные работы ведутся в Медвежьегорском, Суоярвском, Муезерском, Сортавальском, Лахденпохском, Питкярантском, Кондопожском, Прионежском, Пряжинском, Пудожском районах, а также в районе г. Костомукша. Все крупные взрывы рассредоточены и проводятся с коротким замедлением.

Excel Карелия\_2019\_Л\_2020-10-23 Упрощенная

Главная Вставка Формулы Данные Рецензирование Вид Справка Что вы хотите сделать? Просмотр

Каталог Карелии 2019, 331 событие исходи.

в.п.п.	месяц	лет	год	мес	день	час	мин	сек	бл.с	широта	дег.	долгота	дег.	глубина	признак фиксации овалом и глубиной	погрешность по глубине	магнитуды ML	магнитуды МлФин	кол-во станций	код сети	есть в Пилкоском	есть в Архангельском каталоге	есть в Архангельском каталоге	природа события	район
1	43475	2019	1	10	8	27	56,0	0,1	61,540	0,036	34,530	0,090				1,3		3	PTRZ				взрыв	Респ. Карелия, Прионежский р-н.	
2	43476	2019	1	11	9	59	50,6	0,1	64,714	0,067	30,700	0,068				2,1	2,1	4	PTRZ				взрыв	Респ. Карелия, Костомукшский г.о.	
3	43477	2019	1	11	13	3	34,6	0,3	61,910	0,169	33,840	0,063				2,0		3	PTRZ				взрыв	Респ. Карелия, Пряжинский р-н.	
4	43479	2019	1	14	10	19	14,3	0,5	64,791	0,025	30,740	0,130				1,8	2,0	4	PTRZ				взрыв	Респ. Карелия, Костомукшский г.о.	
5	43479	2019	1	14	11	28	28,2	0,0	64,785	0,011	30,754	0,066				1,8	1,9	4	PTRZ				взрыв	Респ. Карелия, Костомукшский г.о.	
6	43480	2019	1	15	9	59	52,7	0,1	64,767	0,016	30,712	0,086				1,7	1,8	3	PTRZ				взрыв	Респ. Карелия, Костомукшский г.о.	
7	43483	2019	1	17	12	2	50,4	0,2	61,539	0,030	34,645	0,120				1,4		3	PTRZ				взрыв	Респ. Карелия, Прионежский р-н.	
8	испр	43483	2019	1	18	8	38	27,5	0,3	62,202	0,022	34,203	0,084				1,4		3	PTRZ				взрыв	Респ. Карелия, Кондопожский р-н.
9	43483	2019	1	18	9	59	52,3	0,1	64,756	0,017	30,684	0,089				2,5	2,0	4	PTRZ				взрыв	Респ. Карелия, Костомукшский г.о.	
10	43483	2019	1	18	11	1	48,0	0,2	62,132	0,074	33,966	0,057				1,7		3	PTRZ				взрыв	Респ. Карелия, Кондопожский р-н.	
11	43486	2019	1	22	13	49	55,7	0,1	61,752	0,031	30,715	0,028				1,4	1,8	3	PTRZ	плк			взрыв	Респ. Карелия, Сорваловский р-н.	
12	43489	2019	1	23	13	1	37,1	0,4	61,851	0,056	31,107	0,066				1,1	1,4	3	PTRZ				возможно взрыв	Респ. Карелия, Питкярантский р-н.	
13	43490	2019	1	25	10	0	25,0	0,2	64,667	0,018	30,647	0,072				2,5	2,0	4	PTRZ				взрыв	Респ. Карелия, Костомукшский г.о.	
14	43490	2019	1	25	10	1	13,9	0,3	64,714	0,021	30,669	0,101				2,3	2,0	4	PTRZ				взрыв	Респ. Карелия, Костомукшский г.о.	
15	43490	2019	1	25	10	53	26,5	0,1	64,712	0,077	30,754	0,095				1,6	1,6	3	PTRZ				взрыв	Респ. Карелия, Костомукшский г.о.	
16	43490	2019	1	25	11	23	15,0	0,3	61,209	0,042	29,576	0,077				1,2	1,6	3	PTRZ	плк			взрыв	Респ. Карелия, Лахденпохский р-н.	
17	43490	2019	1	25	11	38	39,1	0,6	61,569	0,044	30,341	0,036				1,0	1,2	3	PTRZ				взрыв	Респ. Карелия, Лахденпохский р-н.	

авторы и статистика кат Карелия 19 карта

Рисунок 20 – Фрагмент сводного каталога сейсмических событий, зарегистрированных на территории Карелии

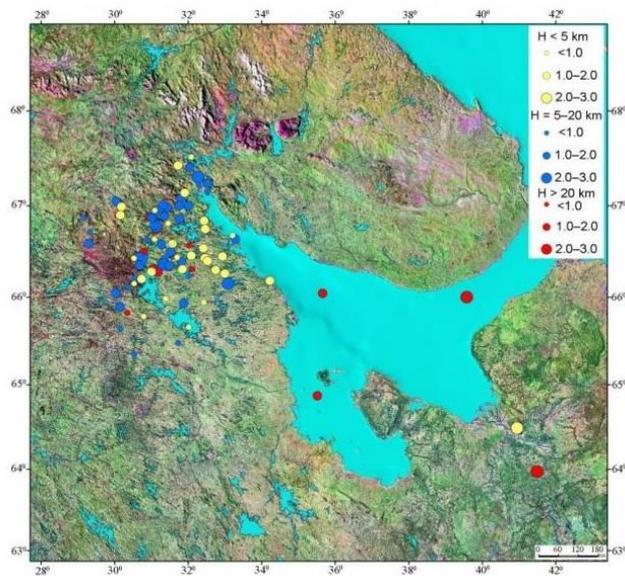


Рисунок 21 – Землетрясения в Карелии по инструментальным наблюдениям. Изображена северо-западная часть России (2005-2017 гг)

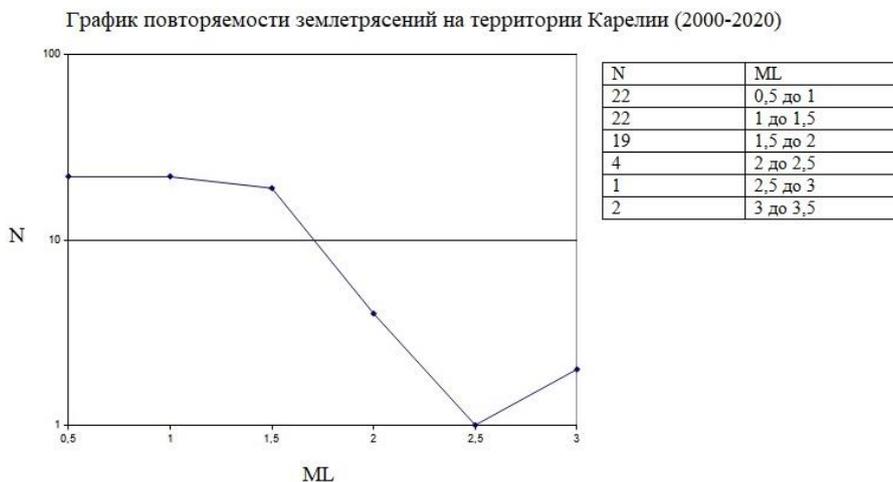


Рисунок 22 – График повторяемости землетрясений на территории Карелии. N-количество землетрясений, ML-локальная магнитуда

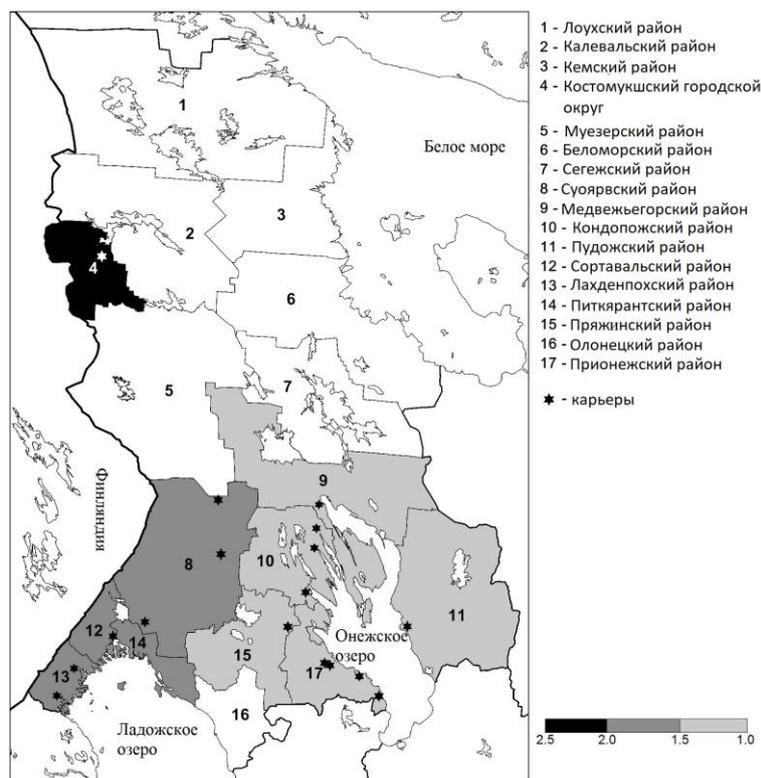


Рисунок 23 – Схема районов Карелии, где наблюдается проявление взрывной сейсмичности (по сейсмическим данным за 2017-2020 гг.)

### Заключение

Основой проведенного исследования в первую очередь являются наблюдения за природными землетрясениями и сейсмическими событиями от промышленных взрывов на территории Карелии стационарной сетью и переносной станцией SEIS. В данной работе автор для идентификации слабых сейсмических событий представляет комплекс методик определения параметров сейсмических событий: локализация землетрясений различными программными комплексами, оценка энергетических характеристик и глубины очага, построение амплитудного спектра сигнала, разбиение территории на зоны для обнаружения промышленных взрывов, расчет параметра дискриминации.

Основные научные результаты и выводы работы, полученные лично автором, заключаются в следующем:

- Получены оценки эффективности сейсмической сети Карелии со станциями из прилегающих территорий РФ.
- Показано, что Карельская сеть регистрирует сейсмические события на территории Карелии с магнитудой 1 и выше.
- Для юго-западной части Карелии при определении координат сейсмических событий более всего подходит скоростная модель BALTIC. Для определения координат эпицентров взрывов на севере региона и в Костомукшском районе лучше использовать модель BARENTS, а в центральных районах Карелии скоростную модель KARELIA.
- Создан альбом волновых форм записей промышленных взрывов на территории Карелии.
- Получен параметр дискриминации короткозамедленных взрывов и землетрясений, зарегистрированных на территории Карелии.
- Сформулирована совокупность критериев идентификации сейсмических событий для региона.
- Построена карта современной сейсмичности для исследуемого региона.
- Выделены районы природной и взрывной сейсмичности в Карелии.
- По сейсмическим наблюдениям в Карелии действующими являются 30 карьеров – в Костомукшском, Муезерском, Медвежьегорском, Кондопожском, Пудожском, Прионежском, Пряжинском, Лахденпохском, Сортавальском, Суоярвском и Питкярантском районах. В Лоухском районе взрывные работы прекращены с 2009 года. В районе г. Костомукша разрабатываются

шесть карьеров. Это самые крупные карьеры в Республике Карелия, масса используемого в них взрывчатого вещества достигает значений от 100-1250 т. В южных районах Карелии сейсмические события концентрируются вблизи Онежского и Ладожского озер. Большинство таких событий являются промышленные взрывы. Магнитуды событий 1-2. Слабая интенсивность этих событий обусловлена невысокими значениями массы взрывчатого вещества (10-50 т).

- Современная природная сейсмическая активность относится к северным Лоухскому и Калевальскому районам. Единичные случаи зарегистрированы в Белом море и в районе г. Костомукша. Землетрясения зафиксированы на глубинах 0-35 км. Максимальная магнитуда за инструментальный период наблюдений достигает значения 3.2. Сводный каталог землетрясений содержит информацию более 70 событий за период с 2000-2020 гг.
- Результаты непрерывного сейсмического мониторинга на территории Карелии включены в сеть системы глобального мониторинга - International Seismological Center (ISC).

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Главы в монографиях

1. Шаров Н.В и др. Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы / Н.В. Шаров, ..., **И.А. Екимова** // Сейсмичность Карелии / Под редакцией Н.В. Шарова, А.А. Маловичко, Ю.К. Щукина. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. Петрозаводск, 2007.– Книга 1. Землетрясения. – Разд. II.– С. 193-207.

### Статьи в рецензируемых журналах из Перечня ВАК

1. **Зуева И.А.**, Бакунович Л.И. Сейсмическая обстановка в северных районах Карельского кратона (Фенноскандинавский щит) // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2018. – № 11. – С. 116-120.
2. **Зуева И.А.**, Лебедев А.А. Сейсмический эффект промышленных взрывов Костомукшского ГОК // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2020. – Т. 23. – № 1. – С. 22-28.

### Научные статьи, опубликованные в журналах RSCI, Scopus, WoS.

1. **Зуева И.А.**, Лебедев А.А. Характерные черты сейсмических записей промышленных взрывов на Костомукшском железорудном месторождении по данным станции Карельской сети // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2017. – № 2. – С. 133-141.
2. **Зуева И.А.** Определение параметров далеких землетрясений по данным Карельской сейсмической сети // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2018. – № 1. – С. 127-131.
3. **Зуева И.А.** Особенности взрывной сейсмичности на территории Республики Карелия за 2017-2018гг. // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2019. – № 1. – С. 76-81.
4. Morozov A.N., Assinovskaya V.A., Panas N.M., Vaganova N.V., Konechnaya Y.V., **Zueva I.A.**, Sharov N.V., Asming V.E., Evstyugina Z.A., Noskova N.N. Recent in Northern European Russia // Journal of Seismology. – 2020. – Т. 24. – №1. – С. 37-53.
5. **Зуева И.А.**, Лебедев А.А. Сейсмичность взрывных работ на территории Карелии // Горный журнал. – 2022. – №9. – С. 35-39.
6. **Зуева И.А.** Современные возможности Карельской сейсмической сети для регистрации взрывной сейсмичности на территории Карелии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – №9. – С. 74-86.
7. Бурмин В.Ю., **Зуева И.А.** Эффективность сейсмологической сети Республики Карелия // Сейсмические приборы. – 2022. – Т.58. – №4. – С. 81-96.
8. **Зуева И.А.** Лебедев А.А. Одномерные скоростные модели земной коры для определения параметров сейсмических событий, зарегистрированных на территории Карелии // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2023. – № 3. – С. 100-108.
9. Lebedev, A., **Zueva, I.** The use of a portable seismic station on the territory of Karelia // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol.431. – № 03007.

### Прочие статьи в журналах и сборниках, материалы конференций

1. Лебедев А.А., **Зуева И.А.** Сейсмический эффект промышленных взрывов Костомукшского рудного района // Науки о Земле: задачи молодых. Материалы 71-й Всероссийской научной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Петрозаводск: КарНЦ РАН. – 2019. – С. 36-40.

2. Морозов А.Н., Ваганова Н.В., Конечная Я.В., **Зуева И.А.**, Носкова Н.Н., Шаров Н.В., Ассиновская Б.А., Панас Н.М. Современная сейсмичность севера Европейской части России // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XIV Международной сейсмологической школы. – Обнинск: ГС РАН. – 2019. – С. 67.
3. Асминг В.Э., Мещерякова В.А., Мунирова Л.М., Петров С.И., Алёничева А.О., Бакунович Л.И., Баранов С.В., Герасимова А.А., **Зуева И.А.**, Карпинская О.В., Коломиец О.А., Лебедев А.А., Панас Н.М. Восточная часть Балтийского щита // Землетрясения России в 2017 году. Ежегодник: сборник науч. материалов. – Обнинск: ГС РАН. – 2019. – С.184.
4. **Зуева И.А.** Определение параметров локальных событий по данным Карельской сейсмической сети // Труды Ферсмановской научной сессии. – Апатиты: ГИ КНЦ РАН.– 2019. – №16. – С. 208-210.
5. Конечная Я.В., Морозов А.Н., **Зуева И.А.** Уточненные данные о современной сейсмичности Белого моря, включая Карельский регион, за 2005-2016 гг // Проблемы обеспечения экологической безопасности и устойчивое развитие арктических территорий. Сборник материалов Всероссийской конференции с международным участием II Юдахинские чтения. – Архангельск: ОМ-медиа – 2019. – С. 87-91.
6. Konechnaya Ya.V., Morozov A.N., Vaganova N.V., **Zueva I.A.** Update data on the current seismicity of the White sea and the Karelian region during the period 2005-2006 // Arctic Environmental Research. – 2019. – Т. 19. – № 1. – С. 11-19.
7. **Зуева И.А.**, Бакунович Л.И., Лебедев А.А. Современная сейсмичность Карелии по данным за 2018 год // В сборнике: Результаты комплексного изучения сильнейшего Алтайского (Чуйского) землетрясения 2003 г., его место в ряду важнейших сейсмических событий XXI века на территории России. Материалы XXI Научно-практической Шукинской конференции с международным участием. – Москва: ИФЗ им. Шмидта РАН. – 2018. – С.151-153.
8. Мещерякова В.А., Герасимова А.А., **Зуева И.А.** Сейсмичность территории Республики Карелия в 2015 году // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XII Международной сейсмологической школы. – 2017. – С. 220-222.
9. **Зуева И.А.** Сейсмическая сеть Костомукшского района // Науки о Земле: задачи молодых. Материалы 69-й научной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 200-летию Российского минералогического общества. – Петрозаводск. –2017. – С. 48-49.
10. Кондаков А.А., Лебедев А.А., **Зуева И.А.** Мониторинговые сейсмологические наблюдения карьерных взрывов на АО «Карельский окатыш» // Науки о Земле: задачи молодых. Материалы 69-й научной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 200-летию Российского минералогического общества. – Петрозаводск. –2017. – С. 52-54.
11. **Зуева И.А.**, Лебедев А.А., Шаров Н.В. Анализ промышленных взрывов на Костомукшском железорудном месторождении за 2015 год // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XI Международной сейсмологической школы. – 2016. – С. 143-146.