

ХАРАКТЕРНЫЕ ЧЕРТЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ ЗАПИСЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВОВ НА КОСТОМУКШСКОМ ЖЕЛЕЗОРУДНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ ПО ДАННЫМ СТАНЦИЙ КАРЕЛЬСКОЙ СЕТИ

И. А. Зуева, А. А. Лебедев

Институт геологии Карельского научного центра РАН, г. Петрозаводск

Поступила в редакцию 20 февраля 2017 г.

Аннотация: изучены основные черты сейсмических записей промышленных взрывов, производимых на крупнейшем железорудном месторождении Республики Карелия по результатам регистрации сети сейсмических станций. Приводится геологическое описание месторождения. Рассматривается технология взрывных работ. Обработка велась по первым вступлениям объемных волн. Получены новые данные о времени в очаге. Расчет проведен при интервале удалений до 1,5 км. Показаны примеры волновых форм и построены амплитудные спектры. Выделен рабочий диапазон частот по результатам спектрального анализа карьерных взрывов.

Ключевые слова: промышленные взрывы, сейсмические станции, волновые формы, спектр, диапазон частот, время в очаге.

THE CHARACTERISTIC FEATURES OF THE SEISMIC RECORDS OF THE INDUSTRIAL EXPLOSIONS IN THE KOSTOMUKSHA IRON ORE DEPOSIT ACCORDING TO THE KARELIAN SEISMIC NETWORK

Abstract: the main features of the seismic records of the industrial explosions at the biggest iron ore deposit in Karelia by the seismic network have been studied. The geological description of the deposit is given. The technology of blasting is considered. Processing has been carried out on the first arrivals of the body waves. New data of the origin time of the hypocenter has been obtained. The calculation has been carried out at the distance up to 1,5 km. Examples of wave forms and amplitude spectras are constructed. The operating band has been selected according to the results of the spectral analysis of career explosions.

Keywords: industrial explosions, seismic stations, wave shapes, spectrum, operating band, origin time.

Введение

Костомукшский рудный район расположен на границе восточной Финляндии и западной Карелии, является уникальным по своему строению, рудности и геологическому развитию. Это крупнейший промышленный центр Карелии, который получил свое название благодаря открытию залежей магнетитовых кварцитов [1]. В Костомукшском районе разработаны самые крупные карьеры в Республике Карелия. Большое количество активно разрабатываемых месторождений в Карелии делает техногенную сейсмичность отдельных территорий довольно серьезной проблемой для жилых и промышленных зданий и сооружений, а также для населения. К таким районам относится и город Костомукша. Масса взрывчатых веществ (ВВ) достигает от 100 до 1000 тонн при короткозамедленном взрывании. Это один из районов, где происходят массовые взрывы на протяжении

нескольких десятков лет. Региональная сейсмическая сеть Карелии регулярно регистрирует здесь очаги с магнитудой 1,5-2,5. Сейсмические эффекты, возбуждаемые промышленными взрывами, по энергетическим характеристикам соответствуют сейсмическим событиям 3-12 энергетических классов. Проблема разбраковки событий является чрезвычайно важной, но и очень сложной [2]. Тоже самое касается и автоматической классификации [3]. Для интерпретации сейсмического события и обобщения накопленного материала, прежде всего, необходимо исследовать характерные особенности записей волновых форм промышленных взрывов. Они зависят от многих факторов, основными из которых являются: технология производства взрывов, свойства геологической среды на пути «взрыв-приемник» и особенности геологического строения в местах регистрации волнового поля [2].

Результаты исследований необходимы при обработке сейсмических событий на территории Карелии. Цель данной работы состояла в получении информации о точном моменте взрыва при интервале удалений 0,5-1,5 км, выделении рабочего диапазона и влияния условий взрывания на характер сейсмических записей.

Геологическое строение

Костомукшский рудный район сложен архейскими и протерозойскими комплексами пород, перекрытых маломощным чехлом четвертичных отложений. Здесь открыты крупные залежи магнетитовых кварцитов.

Территория Костомукшского рудного района занимает восточную часть Карельского кратона, охватывая западную и центральную части Республики Карелия и восточную часть Финляндии. Исследуемая приграничная зона в виде широкой полосы северо-северо-западного простирания, протягивающаяся более чем на 500 км в геологическом отношении, приурочена к Центрально- и Западно-Карельской, а также Восточно-Финляндской структурно-формационным зонам, отличается от других зон Карелии и Финляндии своеобразием геолого-тектонического развития и металлогенической специализацией.

В состав Костомукшского рудного района включены три месторождения Карельского кратона – Костомукшское, Корпангское и Межозерское железорудное месторождение. Костомукшский железорудный район находится в пределах Западно-Карельской структурно-фациальной зоны Карельского мегаблока, при сочленении ее с Восточно-Финляндским антиклинорным поднятием. В его геологическом строении принимают участие раннеархейские (саамский комплекс) и позднеархейские кристаллические образования (лопийский комплекс).

Рудная зона Костомукшского месторождения залегает среди метаморфизированных осадочно-вулканогенных образований верхнего архея и относится к костомукшской свите гимольской серии. Мощность костомукшской свиты в пределах месторождения от 70 до 1000 м. В плане месторождение имеет форму дуги, обращенной выпуклой стороной на юго-запад. На месторождении наблюдается интенсивно развитая разрывная тектоника, преимущественно сбросо-сдвигового характера, с амплитудами смещения до нескольких сотен метров.

Корпангское месторождение является комплексным. Корпангское месторождение входит в состав Костомукшского железорудного района, представляющего северо-западное окончание полосы развития железисто-кремнистых формаций Западно-Карельской структурно-фациальной зоны. Рудная зона Корпангского месторождения залегает среди метаморфизированных осадочно-вулканогенных образований верхнего архея и относится к костомукшской свите гимольской серии. Месторождение представляет собой узкую, шириной до 500 м и длиной до 7 км, дугообразную, изогнутую в северной части,

синклинальную структуру, состоящую из двух ветвей: Западной и Восточной (соответственно Западный и Восточный участки).

Характеристика карьеров и взрывов

Для изучения глубинного строения и сейсмического режима территории Карелии в 1999г. сотрудники Института геологии основали региональную сейсмологическую сеть [4]. Основными регистрируемыми событиями оказались карьерные взрывы, а постоянная модернизация сети привела к тому, что на 2015 год сейсмическая сеть Республики Карелия состояла из 4-х широкополосных сейсмических станции производства Guralp (Великобритания). Станции KOS6 и KOST располагаются в 10 км-15 км от г. Костомукша, КЕМ1 в п. Кривой порог Кемского района, РІТК в п. Леппясилта Питкярантского района, PTRZ в г. Петрозаводск. В 2016 году заработала станция РААН в Лоухском районе (рис. 1а). Синхронизация сейсмических данных по времени осуществляется с помощью GPS-приемников, данные автоматически записываются в память компьютера станции и передаются на сервер хранения. Технические характеристики и расположение сейсмодатчиков, используемых в Карельской сейсмологической сети, приведены в таблицах 1 [5] и 2. Сейсмоприемники регистрируют сейсмические события в широком диапазоне частот от 0,033 до 50 Гц. Он позволяет выделять в записи не только телесейсмические землетрясения, но и события регионального и локального масштаба при применении полосовой фильтрации определенных частот. При этом проблема разбраковки событий является чрезвычайно важной, но и очень сложной [6].

На территории АО «Карельский окатыш» действуют шесть карьеров: Центральный, Южный, Северный (Северный-2, Северный-3), Корпанга (Западный, Восточный). Карьерами отрабатывается основная рудная залежь, проектная глубина карьеров 700 м. Они вытянуты с юга на север, их общая протяженность на данный момент достигает 25 км.

Координаты карьеров: Южный 64°40'35" с.ш. и 30°43'05" в.д., Центральный 64°40'50" с.ш. и 30°39'04" в.д., Северный 64°44'20" с.ш. и 30°39'24" в.д., Корпанга 64°47'37" с.ш. и 30°41'13" в.д.

Взрывы в карьерах производятся открытым способом 1-2 раза в неделю по утвержденным в установленном порядке проектам Костомукшского ГОКа. Он включает в себя подготовку блока, разработку схемы расположения скважин и графического материала, таблицу параметров взрывных работ, распорядок проведения массового взрыва. Масса взрывчатого вещества достигает от 100 до 1000 т. Массовым взрывом на открытых горных работах считают взрыв, смонтированный в общую сеть двух и более зарядов, независимо от протяженности заряженной выработки.

На месторождении производятся короткозамедленные взрывы на 3-4 блоках одновременно.

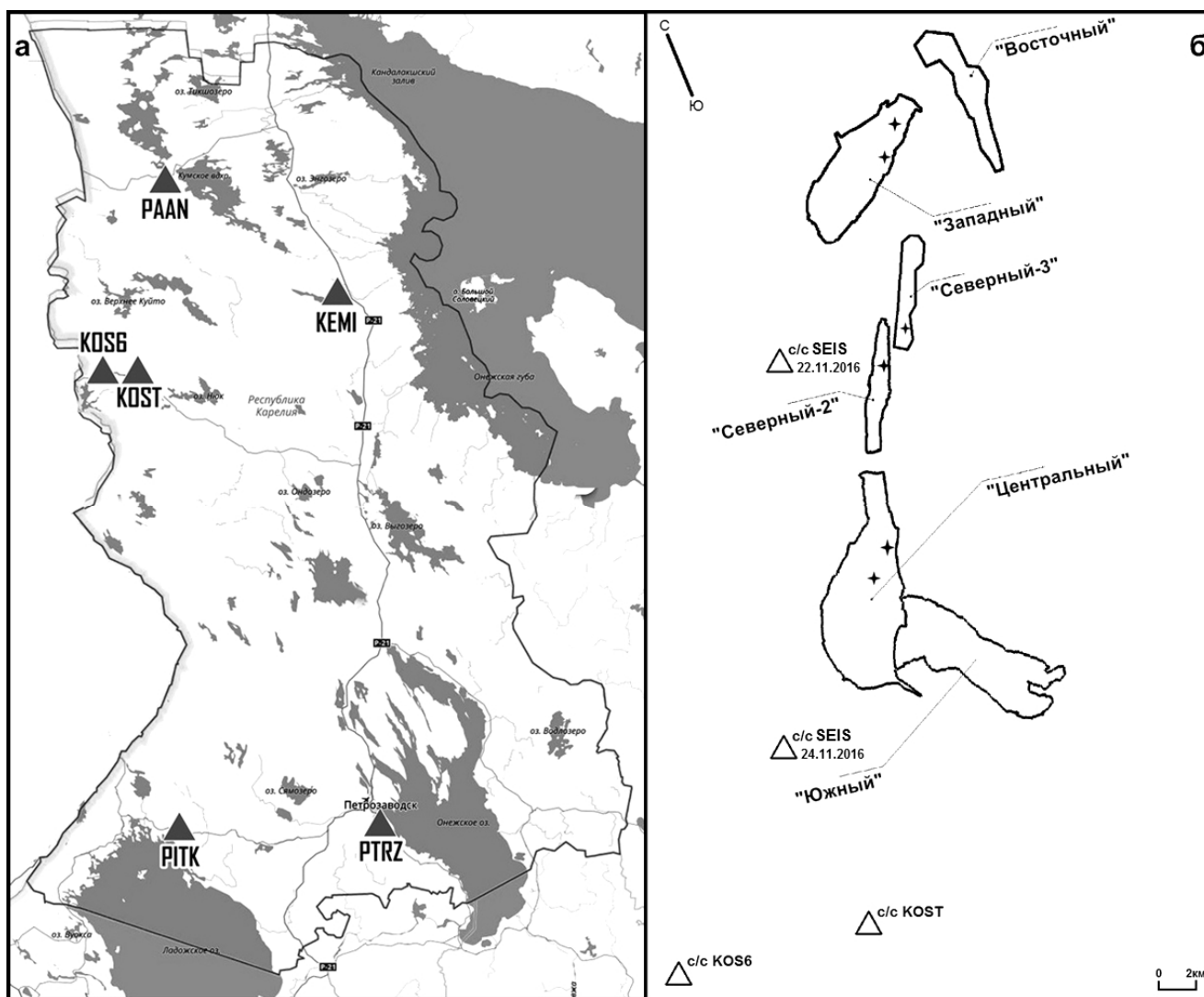


Рис. 1. а - расположение сейсмостанций на территории Карелии; б - схема расположения карьеров АО «Карельский окатыш».

Таблица 1

Характеристики сейсмоприемников Карельской сети и переносной станции

Характеристика	CMG-6TD	CMG-3ESP	CM3-KB	GS-11D
Диапазон рабочих частот (Гц)	0,033–50	0,033–20,6	0,5 – 40	1-10 ± 5 %
Диапазон рабочих температур (°С)	От –40 до +85	От –20 до +65	от -10 до 40	от -40 до +100
Чувствительность (в/м/с)	1200	1.05*106	200	27,5
Масса (кг)	2,7	9,3	8,2	0.086*3

Таблица 2

Координаты и тип датчика каждой сейсмической станции Карельской сети на 2015 год

Сейсмостанция	Координаты	Тип сейсмометра
KOS6	64°35'31.3" с. ш. 30°24'59.5" в. д.	Guralp CMG-6TD
KEMI	65°2'23.1" с. ш. 34°40'21.8" в. д.	Guralp CMG-6TD
PITK	61°40'13.7" с. ш. 31°15'57.6" в. д.	Guralp CMG-6TD
PTRZ	61°50'31" с. ш. 34°22'47" в. д.	Guralp CMG-3ESP
KOST	64°35'29.8" с.ш. 30°35'39.9" в.д.	CM3-KB
PAAN	65°45'39.1" с.ш. 31°04'11.8" в.д.	Guralp CMG-6TD

Использование переносной станции SEIS для расчета времени в очаге и анализа особенностей записей

В октябре 2016 года был произведен выезд в карьеры Костомукшского ГОК (рис. 1б). Цель поездки состояла в получении точной информации о моменте и технологии взрыва, которую можно будет использовать в обработке сейсмических событий. На специально отведенной площадке была установлена

переносная станция SEIS.

Переносная сейсмостанция (рис. 2а), созданная на базе геофонов GS-11D состоит из ноутбука, работающего под операционной системой Linux Opensuse 11.1, аналого-цифрового преобразователя (АЦП), синхронизатора, GPS приемника. На рисунке 2б представлена АЧХ геофона GS-11D.

В таблице 1 показаны основные технические характеристики геофона GS-11D.

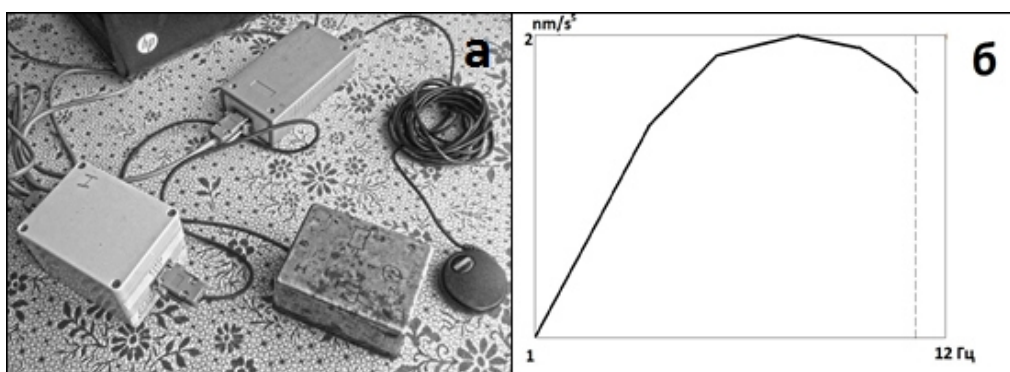


Рис. 2. а - переносная станция SEIS; б - амплитудно-частотная характеристика канала SHZ сейсмометра GS-11D.

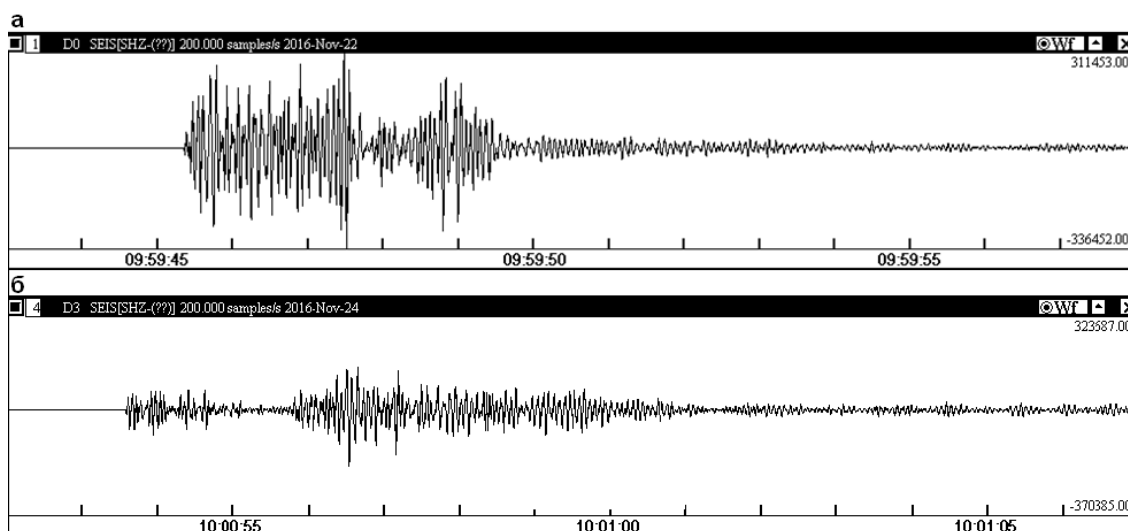


Рис. 3. а - сейсмическая запись станцией SEIS 22.11.2016; б - сейсмическая запись станцией SEIS 24.11.2016.

Сейсмические наблюдения проводились 22.11.2016 в карьере «Северный-2,3» (масса ВВ 252 тонн, 143 тонн) на удалении 800 м от места взрыва и 24.11.2016 в карьере «Центральный» (масса ВВ 759 тонн) на расстоянии 1200 м (рис. 3а, б). Для измерения точной отметки времени (t_0 -время в очаге) использовалось время прихода Р волны.

Время пробега волны, как известно, равно $t = tnp - t_0$; где t – время пробега, tnp – время прихода волны на сейсмограмме, t_0 - время в очаге.

$R = V * t$, где R – расстояние от пункта взрыва до сейсмостанции. V – кажущаяся скорость. По известным данным кажущаяся скорость в верхнем слое земной коры в Костомукшском районе равна 6 км/с [7].

Таблица 3

Расчет времени в очаге по записям станции SEIS, записанных взрывов 22.11.2016 и 24.11.2016

Дата	Расстояние от очага до пункта приема R, км	Кажущаяся скорость V, км/с	Время пробега t, с	Время прихода Р-волны, tnp., (ч:м:с)	Время в очаге (ч:м:с)
22.11.16	0,8	6	0,133333333	09:59:45,36	09:59:45,23
24.11.16	1,2	6	0,2	10:00:53,58	10:00:53,3

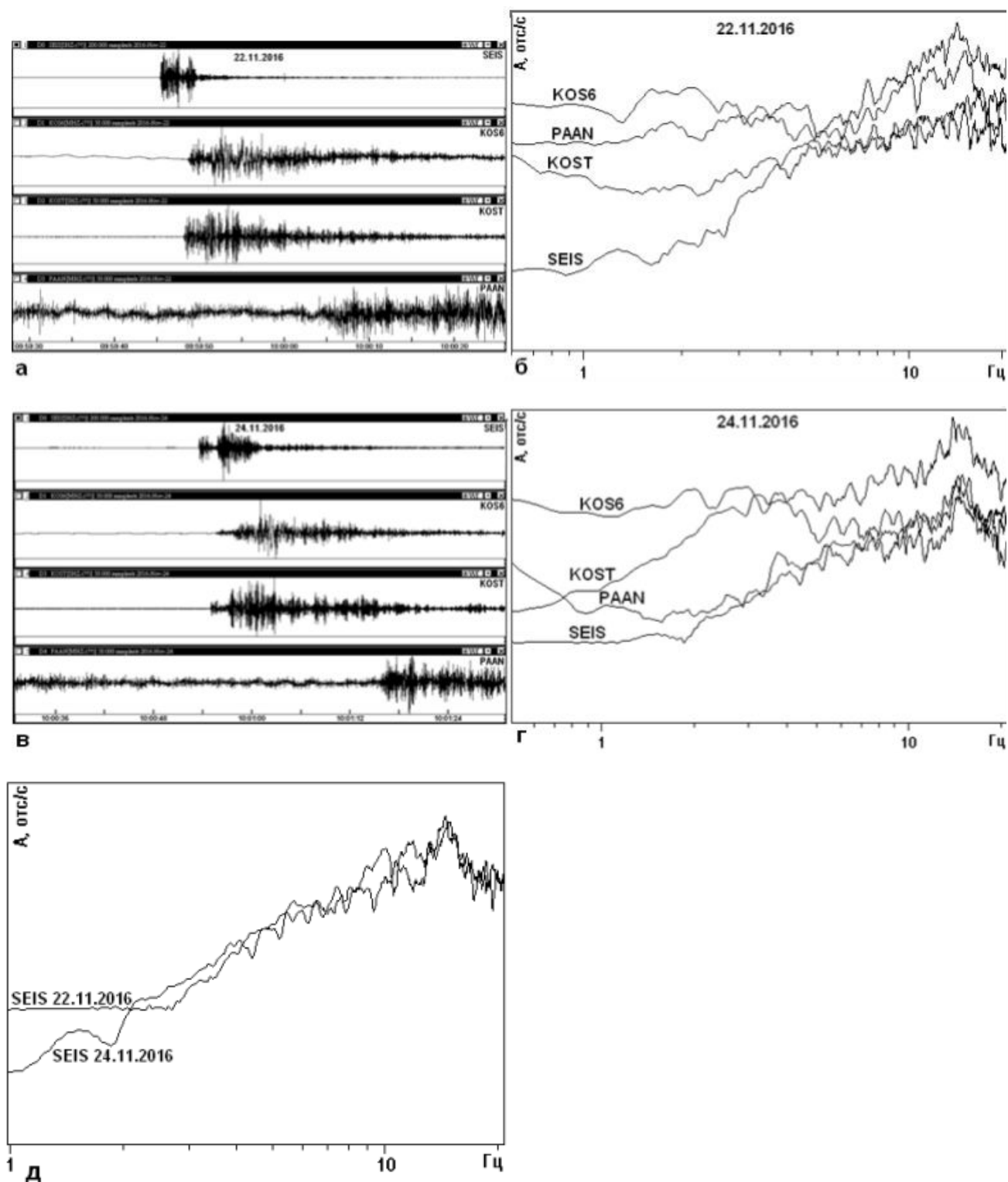
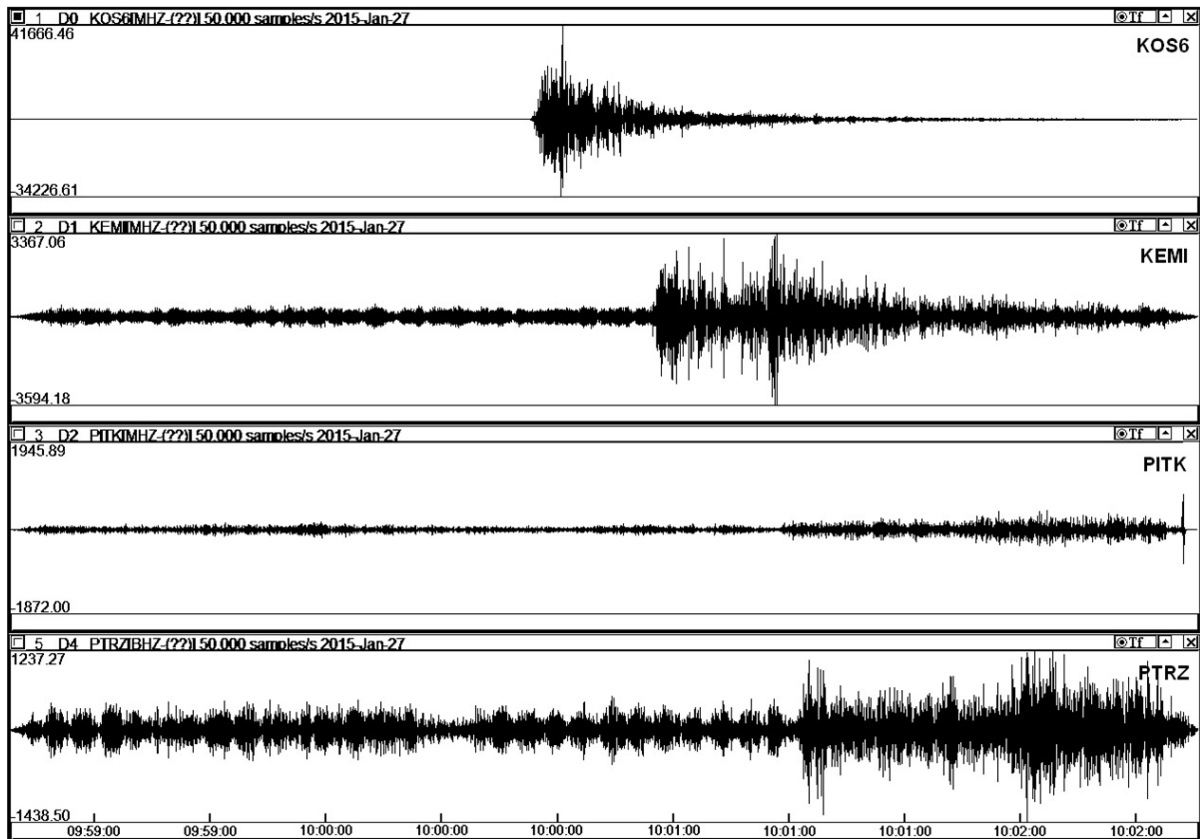
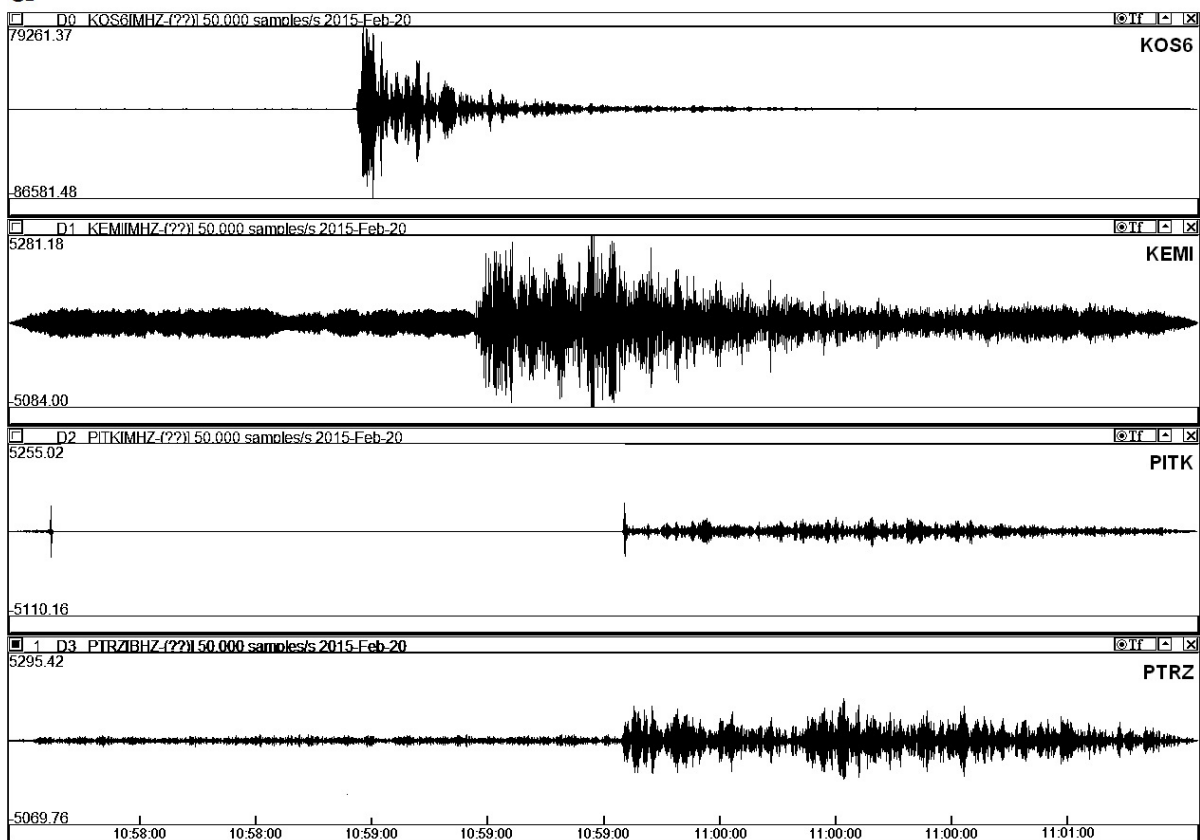


Рис. 4. Взрыв в карьере «Северный-2,3», записанный 22.11.2016 станциями SEIS, KOS6, KOST, PAAN. Масса ВВ 395 т., продолжительность взрыва 2295 мс (а); спектр события 22.11.2016 (б); взрыв в карьере «Центральный», записанный 24.11.2016 станциями SEIS, KOS6, KOST, PAAN. Масса ВВ 759т., продолжительность взрыва 2419 мс (в); спектр взрыва 24.11.2016 (г); сравнение спектров от двух взрывов, зарегистрированных станцией SEIS 22.11.2016 и 24.11.2016 (д).



a



б

Рис. 5-1. Волновые формы взрывов по данным станции Карельской сети в карьере «Центральный»: а – 27.01.2015, б – 20.02.2015.

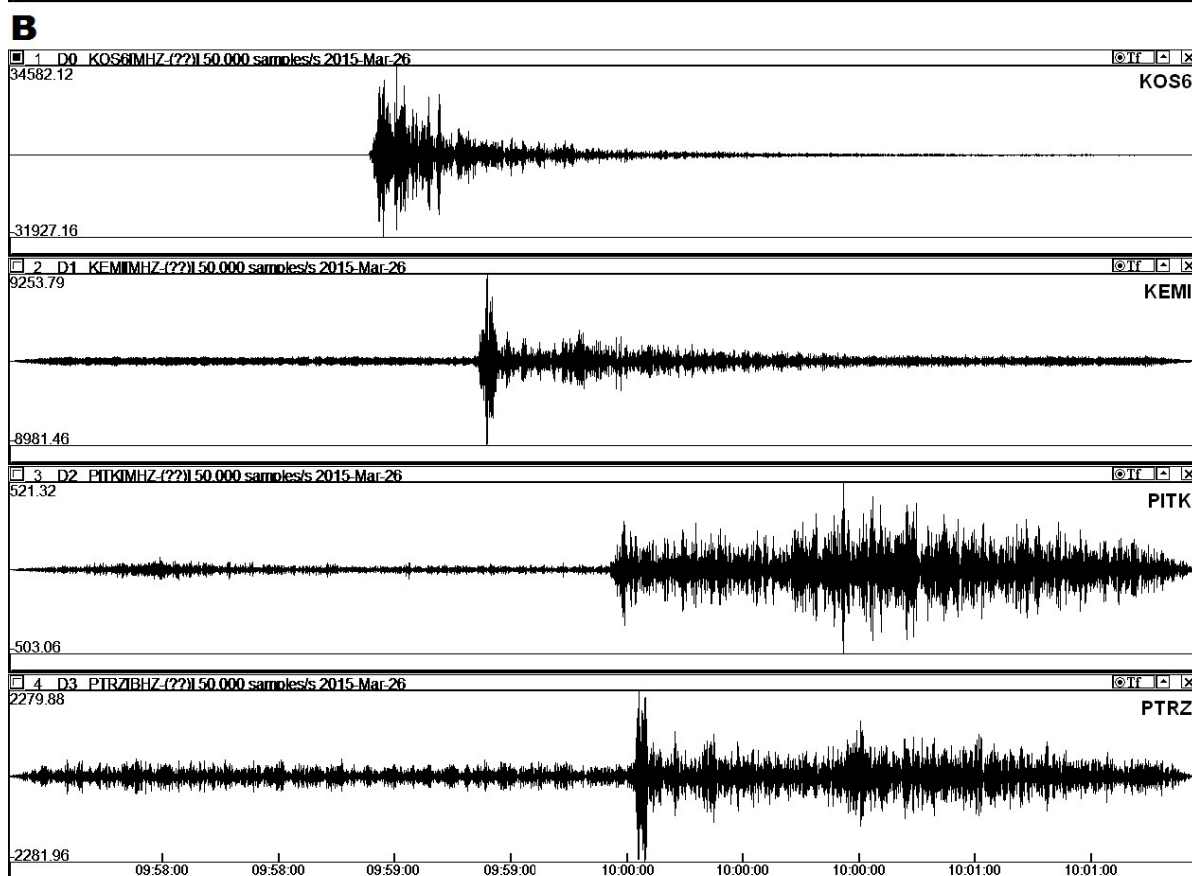
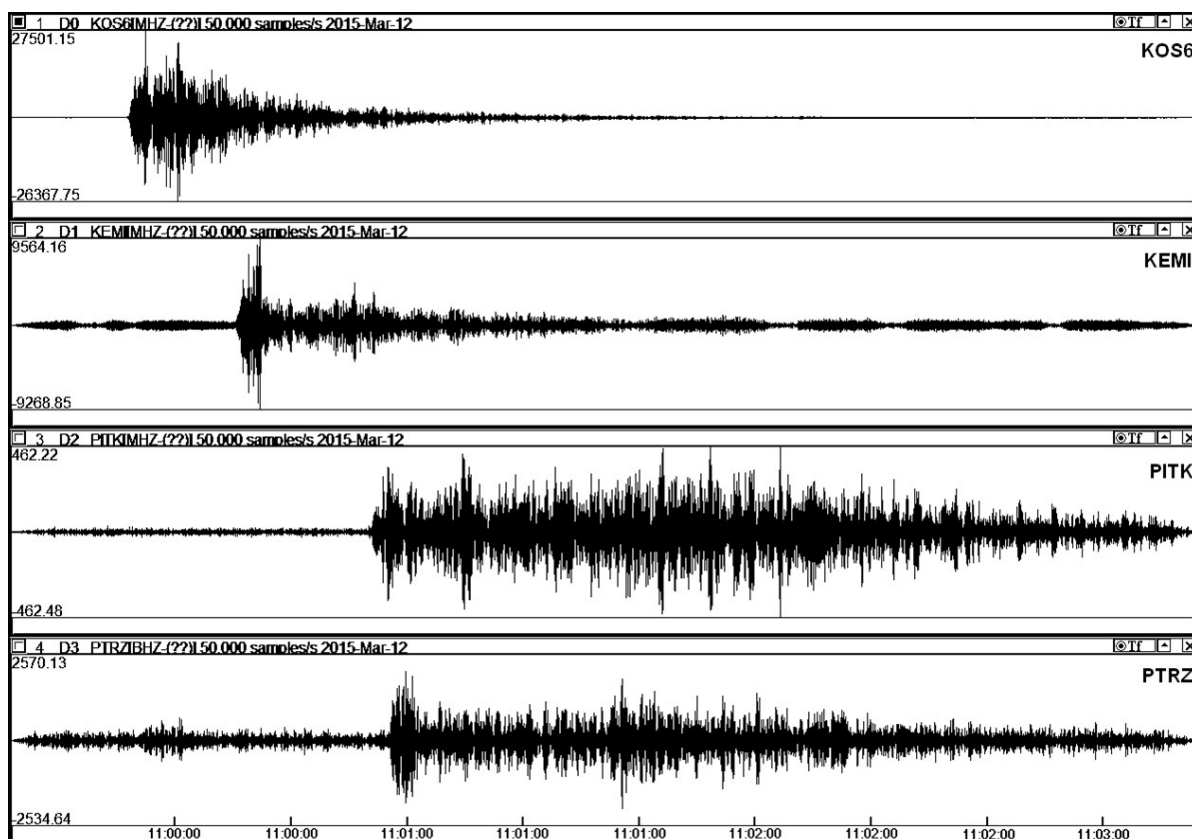


Рис. 5-2. Волновые формы взрывов по данным станции Карельской сети в карьере «Западный»: в – 12.02.2015, г – 26.03.2015.

Полученные результаты сравнили с данными национальных сейсмологических служб Финляндии и Норвегии [8, 9].

Станция SEIS, установленная в карьере ГОК, позволила получить новые данные о времени в очаге. Эти значения позволят нам рассчитать более точное значение времени пробега до других станций региона, которое можно будет использовать при обработке и распознавании костомукшских взрывов.

Таблица 4
Время в очаге по данным станции SEIS,
Карельской, Финской и Норвежской сети

Название станции	Время в очаге, то(ч:м:с)	Время в очаге, то(ч:м:с)
	22.11.16	24.11.16
SEIS	09:59:45,23	10:00:53,38
Карельская сеть	09:59:45,32	10:00:54,00
Финская сеть	09:59:44,70	10:00:55,50
Норвежская сеть	-	10:00:55

Взрывы хорошо записаны станциями SEIS, KOST, KOS6, а также станцией PAAN, удаленной от карьеров на расстоянии более 100 км. Самыми близкими к эпицентру оказались станции SEIS, KOST и KOS6. Для данных событий был проведен спектральный анализ записей. На рисунке 4 приведены фрагменты волновых форм и амплитудные спектры взрывов.

Взрыв 24.11.2016 более мощный, масса ВВ равна 759 т., поэтому он более высокоамплитудный. Масса ВВ 22.11.2016 равна 395 т. Продолжительность взрыва приблизительно одинаковое и равна 2419 мс (24.11.2016) и 2295 мс (22.11.2016). Спектры записей имеют схожую форму. Как видно в спектрах (рис. 5б, г, д) происходит усиление более высоких частот в диапазоне 2-15 Гц. На всех спектрах наблюдается максимум амплитуд на частотах 10-15 Гц.

Влияние массовых взрывов и времени замедления на характер записей

За 2015 год наиболее сильные взрывы в Костомукшском железорудном районе, с зарядами до 1000 т, были произведены в карьере «Центральный» и «Западный» [10]. С увеличением роста заряда и продолжительности взрывания возрастает относительная продолжительность сейсмических колебаний. На рисунках приведены наиболее характерные волновые формы и амплитудные спектры промышленных взрывов, первые два в карьере «Центральный», два последующих в карьере «Западный», зарегистрированные всеми сейсмическими станциями Карельской сети, при разных величинах зарядах (Q) и продолжительности взрыва (τ).

Таблица 5
Параметры исследуемых взрывов

Дата взрыва	Карьер	Q, кг	τ , мс
27.01.2015	Центральный	861750	2479
20.02.2015	Центральный	661650	2305
12.03.2015	Западный	708479	2389
26.03.2015	Западный	746360	2395

В спектрах короткозамедленных взрывов происходит усиление высоких частот. С расстоянием высокочастотная часть ослабляется вследствие поглощения энергии и фильтрации волн слоистой средой, т.е. в удаленную точку приходят волны от отдельных групп зарядов с подобными спектрами и небольшим разбросом амплитуд и фаз [7, 11-13]. Анализ волновых форм (рис. 5-1, 5-2) и спектров (рис. 6) показал, что произведенные взрывы в карьере «Центральный» и «Западный» имеют схожую сложную форму и максимумы в одинаковых диапазонах, это касается как частоты, так и амплитуды полученного сигнала. В спектрах короткозамедленных взрывов, а именно таковыми и являются зарегистрированные события, происходит усиление высоких частот 2-15 Гц. Спектры, полученные со станции KEMI, PITK, PTRZ, также напоминают общую картину, но показывают небольшой разброс амплитуд и фаз, т.е. находятся на большем (100 и более км) расстоянии от пунктов взрывов.

Заключение

В ходе проведенных исследований, выявлены основные черты сейсмических записей взрывов на Костомукшском железорудном месторождении по данным станций Карельской сети.

Станция SEIS, установленная на территории карьеров ГОК, позволила получить новые данные о времени в очаге при интервале удалений 0,5-1,5 км. Учитывалось то, что местоположение промышленных взрывов заранее определено. Обработка велась по первым вступлениям объемных волн. Был построен амплитудный спектр и выделен рабочий диапазон частот 2-15 Гц.

В результате проведенного спектрального анализа записей с различных станций Карельской сети можно сделать заключение, что при короткозамедленном взрывании в карьерах Костомукшского и Корпангского месторождения происходит усиление высоких частот. С увеличением массы заряда на сейсмической записи возрастает амплитуда. Ухудшение разрешенности волн на сейсмической записи происходит за счет малой массы заряда и удаленности станций от очага взрыва.

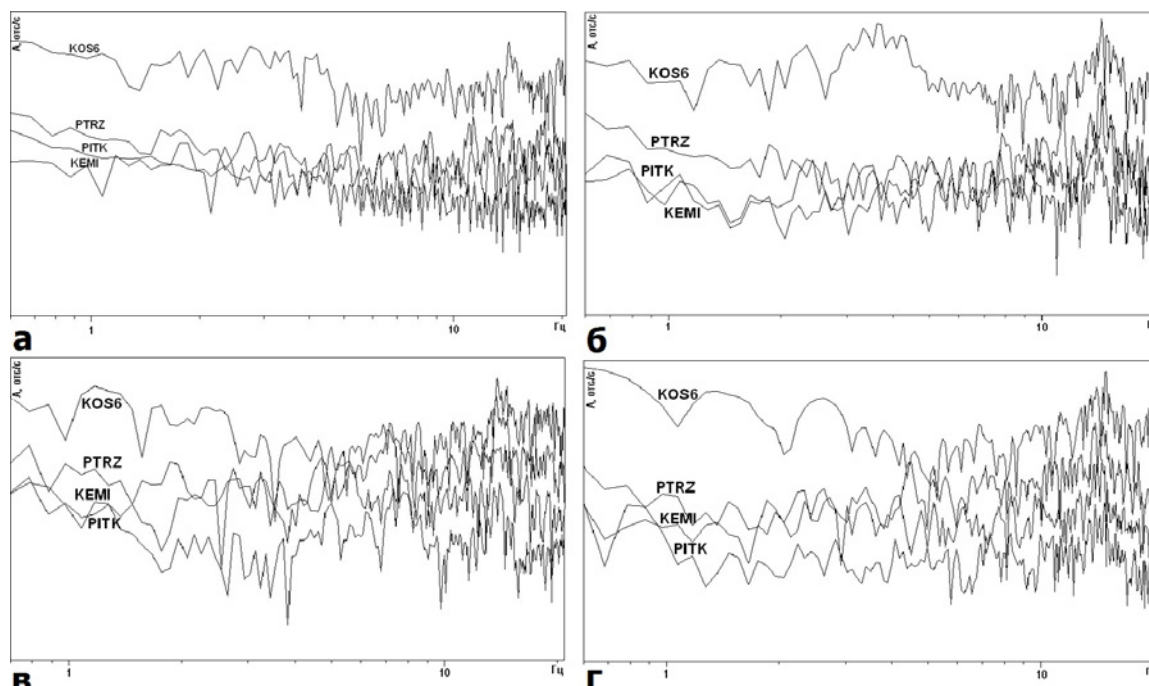


Рис. 6. Амплитудные спектры взрывов по данным станции Карельской сети. В карьере «Центральный»: а – 27.01.2015, б – 20.02.2015; в карьере «Западный»: в – 12.02.2015, г – 26.03.2015.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горьковец, В. Я. Костомукшский рудный район (геология, глубинное строение и минерагения) / В. Я. Горьковец, Н. В. Шаров – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. – 322 с.
2. Kortström J. Automatic classification of seismic events within a regional seismograph network / Kortström J., Uski M., Tiira T. // Computers and Geosciences — 2016. – V. 87. – P. 22–30.
3. Адушкин, В. В. Взрывы и землетрясения на территории Европейской части России / В. В. Адушкин, А. А. Маловичко. – М.: ГЕОС, 2013. – 384 с.
4. Шаров, Н. В. Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы / Н. В. Шаров, А. А. Маловичко, Ю. К. Шукин – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. – Кн. 1: Землетрясения. – 381 с.
5. Климовский, А. В. Динамические характеристики сейсмической станции "Петрозаводск" / А. В. Климовский, В. А. Мещерякова, А. А. Лебедев // Труды Карельского научного центра РАН. Сер.: Геология докембрия. – Петрозаводск. – 2016. – № 2. – С. 105-111.
6. Надежка, Л. И. Сеть сейсмических станций на территории Воронежского кристаллического массива / Л. И. Надежка, И. Н. Сафронич, С. П. Пивоваров, А. В. Савенков, А. Е. Семенов, С. И. Колесникова // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных.

7. Шаров, Н. В. Литосфера Балтийского щита по сейсмическим данным. / Н. В. Шаров. – Апатиты: КНЦ РАН, 1993. – 145 с.
8. The Institute of Seismology of the University of Helsinki Seismic Bulletins [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.seismo.helsinki.fi/english/bulletins/>
9. NORSAR Reviewed Regional Seismic Bulletin [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://norsardata.no/NDC/data/>
10. Зуева, И. А. Анализ промышленных взрывов на Костомукшском железорудном месторождении за 2015 год / И. А. Зуева, А. А. Лебедев, Н. В. Шаров // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Одиннадцатой Международной сейсмологической школы. – Обнинск: ГС РАН, 2016. – С. 143-146.
11. Еманов А. Ф. Влияние короткозамедленного взрывания на сейсмограммы глубинного сейсмического зондирования / А. Ф. Еманов // Геология и геофизика. – 1982. – № 9. – С. 81–89.
12. Smith A. T. High-frequency seismic observations and models of chemical explosions: implications for the discrimination of ripple-fri red mining blasts / A. T. Smith // Bull. Seismol. Soc. Am. – 1989. – V. 79, № 4. – P. 1089–1110.
13. Глазнев В. Н. Стохастическая модель короткозамедленного карьерного взрыва / В. Н. Глазнев, Д. О. Плаксин, Е. Ю. Дручек // Вестник ВГУ, сер. Геология. 2009, № 2. – С. 140–149.

Институт геологии Карельского научного центра РАН,
г. Петрозаводск

Зуева Ирина Александровна, старший лаборант
исследователь E-mail: ek92wa@mail.ru

Лебедев Артем Анатольевич, старший лаборант
исследователь, аспирант
E-mail: stayxalert@gmail.com; Тел.: +7(953) 525-16-35

Institute of Geology of the Karelian Research Centre of the
Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk

Zueva I. A., senior laboratory researcher
E-mail: ek92wa@mail.ru; Tel.: +7(921) 620-37-50

Lebedev A. A., senior laboratory researcher, graduate student
E-mail: stayxalert@gmail.com
Tel.: +7(953) 525-16-35