

УДК 550.348.436+550.342

ИЗУЧЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ
ИЗВЕРЖЕНИЯ ПИРОКЛАСТИЧЕСКИХ ПОТОКОВ НА ВУЛКАНЕ
КИЗИМЕН, С ЦЕЛЬЮ ВЫДЕЛЕНИЯ ИНФОРМАТИВНЫХ
ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ИХ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СЕЛЕКЦИИ

Арбугаева О.В.

Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга

Научный руководитель: д.ф.-м.н. П.П. Фирстов

С начала извержения вулкана Кизимен с декабря 2010 года наблюдаются извержения пирокластических потоков (ПП), характерные для всех извержений андезитовых вулканов (Безымянный, Шивелуч). С помощью архива суточных цифровых сейсмограмм и архива видеорегистрации за 2013 г. произведен ретроспективный анализ сейсмических сигналов от ПП. На основании изучения волновых форм и спектральной плотности мощности сейсмических сигналов от ПП выделены характерные параметры, позволяющие осуществлять из всего многообразия сейсмических сигналов на вулканах селекцию сигналов от ПП. Детализация и формализация выделенных признаков сейсмических сигналов от ПП позволит в дальнейшем перейти к выделению этих событий в реальном времени.

Ключевые слова: вулкан Кизимен, извержение, пирокластический поток, сейсмический сигнал, спектр.

ВВЕДЕНИЕ

Вулкан Кизимен – самый южный из действующих вулканов Центральной Камчатской депрессии, расположен на юго-восточном борту Щапинского грабена и приурочен к системе крупноамплитудных сбросов северо-восточного простирания зоны сочленения этого грабена с горстом хр. Тумрок (рис.1). Вулкан представляет собой одиночный конус [9]. Координаты вершины – 55°08.0 с.ш., 160°19.3 в.д., абсолютная высота 2376 м.

Новое извержение в. Кизимен началось в декабре 2010 г., спустя 82 года после предыдущего извержения. В ночь с 9 на 10 декабря произошло резкое усиление сейсмической и вулканической активности. В этот период наблюдались пепловые выбросы до 1 км в высоту [4]. При этом по данным

очевидцев, каждая эксплозия сопровождалась схождением пирокластических потоков (ПП).

Необычной особенностью данного извержения по сравнению с извержениями других вулканов Камчатки является то, что ПП образуются даже при слабых взрывах. Отложения ПП имели место преимущественно в юго-восточном секторе вулкана, и редко на западных склонах, которые к январю 2011 г. имели значительную мощность [4].

Извержения ПП характерны для андезитовых вулканов. На Камчатке такими вулканами являются Безымянный и Шивелуч. С одной стороны, отдельные выбросы на этом вулкане происходят при разрушении жесткого экструзивного купола, с другой стороны – извержения вулкана Безымянный сопровождаются образованием значительных по площади пирокластических потоков, порождающих сейсмические сигналы и мощные турбулентные, конвективные потоки в атмосфере, которые являются источниками инфразвуковых колебаний [6]. Изучение сейсмических и инфразвуковых сигналов от ПП вулкана Ундзен описано в работе Х. Ямасато в 1991 г. [12].

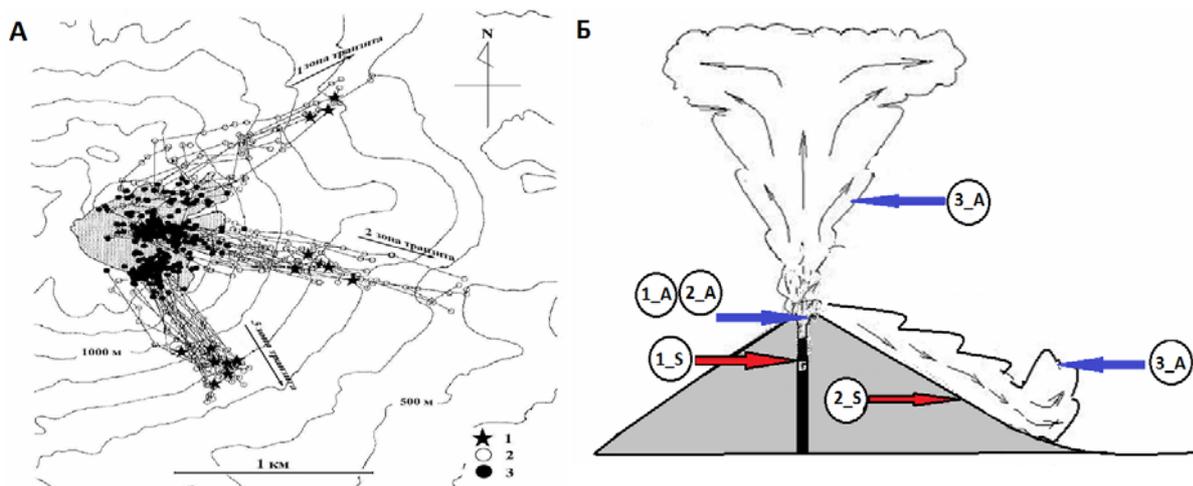


Рис. 1. Оценка мест источников инфразвуковых сигналов от ПП по [12] (А). 1 – места, где амплитуды поздних фаз сейсмических и инфразвуковых сигналов достигло пика; 2 – источники более поздних фаз, которые возникают от ПП; 3 – источники, связанные с обвалами с купола вулкана. На схеме указаны проявления форм вулканических извержений и возможные источники: А – источники акустических колебаний, S – источники сейсмических колебаний (Б).

На рисунке 1 указаны возможные источники инфразвуковых и сейсмических колебаний.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ

Выделение и изучение сейсмических сигналов от ПП при извержении вулкана Кизимен, стало возможным благодаря близко расположенным радиотелеметрическим сейсмическим станциям (РТСС) и базе данных, в которую входят цифровые сейсмограммы и видеонаблюдения за вулканом.

В районе вулкана Кизимен работают три РТСС: «Кизимен» (KZV), «Тумрок» (TUM) и «Тумрок D» (TUMD) – цифровая широкополосная станция, на которой установлена IP-видеокамера производящая съемку вулкана с частотой один кадр в минуту (рис. 2).



Рис. 2. Расположение вулкана Кизимен на Камчатке [6]. На врезке показаны сейсмические станции КФ ГС РАН в окрестностях вулкана. KZV – Кизимен, TUMD – Тумрок D, TUM – Тумрок.

Для изучения сейсмических сигналов, сопровождающих ПП, в основном, использовались сейсмические записи на KZV, находящейся на расстоянии 2.6 км к юго-западу от вершины вулкана Кизимен. В случаях ограничения сейсмического сигнала по амплитуде использовались сейсмограммы TUMD, находящейся в 6 км к северо-востоку.

Чувствительность короткопериодных сейсмометрических каналов на РТСС KZV (датчики СМ-3 ($T_s=1.2$ с, 0.8 – 20 Гц)) с цифровой регистрацией на приемных центрах РТСС составляет $2 \cdot 10^7$ отсчет/м/с [3]. Станция TUMD оснащена сейсмометром GURALP CMG-6TD, который относится к категории портативных широкополосных приборов с встроенной флэш-картой.

Основные характеристики встроенного сейсмометра CMG-6TD:

- частотный диапазон от 0.03 до 100 Гц;
- динамический диапазон 140 дБ;
- чувствительность $2 \cdot 1200$ В/м/с;
- частота оцифровки: 100 отсч/с;
- встроенная флэш-карта 2 Гб;
- потребление тока 12 А [11].

Для первичной обработки сейсмического сигнала использовалась интерактивная программа *DIMAS (Display, Interactive Manipulation and Analysis of Seismograms)*, которая предназначена для детальной обработки и визуального анализа цифровых сейсмических сигналов, программа снабжена простым и функциональным интерфейсом взаимодействия с пользователем и позволяет производить разнообразные операции с сейсмическими сигналами [2].

При построении спектра мощности плотности (СПМ) для каждого сигнала использовался программный продукт *WinПОС (Пакет Обработки Сигнала)* предприятия «MERA». Он предназначен для обработки измерительной информации с помощью стандартных алгоритмов, графического представления данных и документирования. Анализ и обработка сигнала

происходила в частотной области с помощью процедуры быстрого преобразования Фурье [10].

СЕЙСМИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ ПИРОКЛАСТИЧЕСКИХ ПОТОКОВ

Согласно обновленной классификации вулканических землетрясений П.И. Токарева [1], изучаемые сейсмические сигналы в работе были отнесены к типу вулканических землетрясений – *низкочастотные серии*. Как правило, продолжительность таких сигналов варьирует от 2 – 3 минут до 2 – 3 часов, с частотным диапазоном 0.5 – 2 Гц. Землетрясения этого типа всегда сопровождают определенные формы активности на вулкане: эксплозии из кратера, сход ПП, а так же сход лавин с экструзивного купола. Таким образом, этот тип вулканических землетрясений должен был регистрироваться при извержениях ПП на вулкане Кизимен.

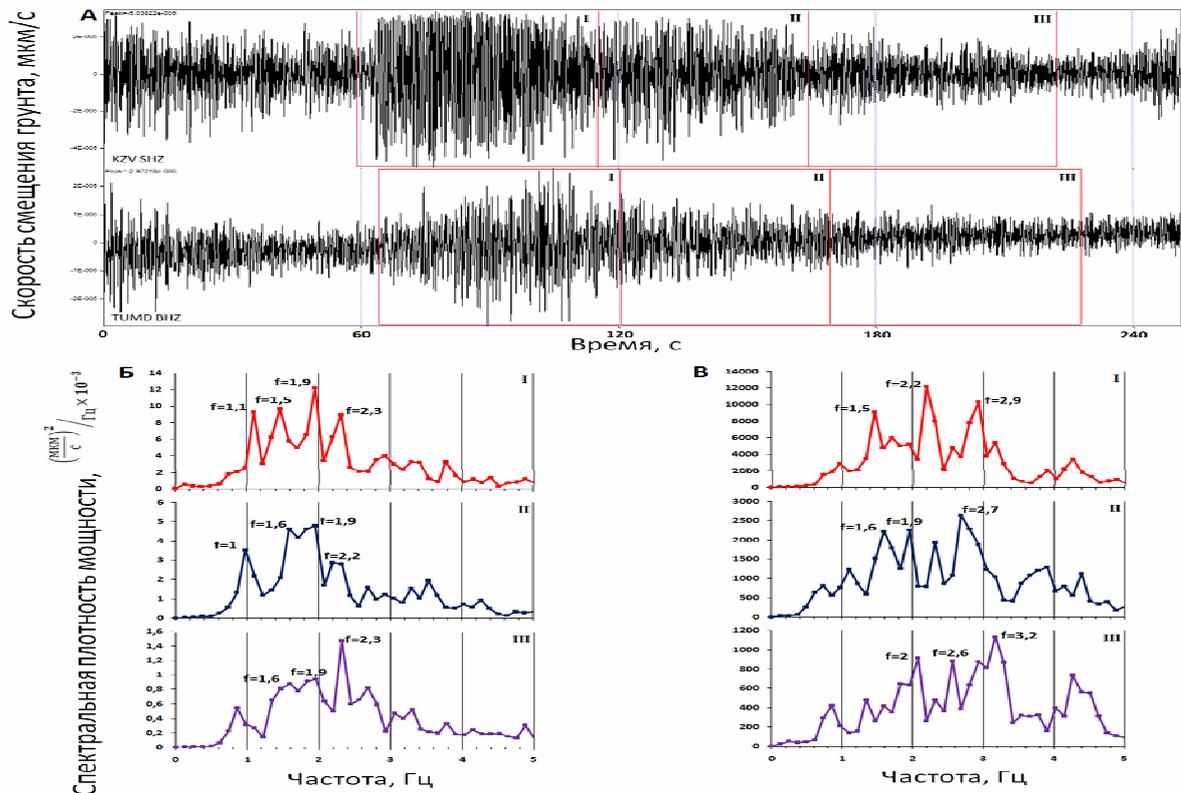


Рис. 3. Сейсмический сигнал на вертикальных составляющих KZV SHZ и TUMD BHZ от ПП 02/05/2011 в 19:16 (А), спектральная плотность мощности для различных участков записи для каналов SHZ (Б) и BHZ (В).

Рассматривались сигналы только на вертикальных каналах станций KZV и TUMD. Рассмотрим три землетрясения, сопровождавших ПП на вулкане Кизимен в 2011 году – 2 мая и 13 декабря.

Фрагменты записей сейсмических сигналов на обеих сейсмостанциях для ПП 2 мая 2011 г., приведены на рисунке 3. Сигнал продолжительностью ~160 секунд был разбит на три участка. Для каждого участка с помощью программы *WinПОС* строилась спектральная плотность мощности (СПМ).

Обращает на себя внимание смещение спектральных пиков в сторону высоких частот в процессе извержения. Если на первом и втором участках максимальный спектральный пик приходится на 1.9 Гц, на KZV, то на третьем участке максимум приходится на 2.4 Гц. Близкая картина наблюдается на TUMD.

Рассмотрим сейсмические сигналы, сопровождавшие события, произошедшие 13 декабря 2011 года, по данным видеонаблюдений с TUMD отнесенные к ПП. В течение почти 8 часов по абразивной впадине происходило многократное схождение ПП с интервалом между ними от 2 до 15 минут [6].

На рисунке 4 приведены фрагменты записей сейсмических сигналов ПП 13 декабря 2011 г. в 20:16. Сигнал продолжительностью ~130 секунд был разбит на четыре участка. Смещение максимальных спектральных пиков в сторону высоких частот также характерно и для этого сигнала. Особенно это выражено на TUMD: здесь максимальный пик приходится на первом участке на 2.7 Гц, а на последующих, на 3 Гц.

Фрагменты записей сейсмических сигналов на обеих сейсмостанциях для ПП 13 декабря 2011 г. в 20:28 приведены на рисунке 5. Сигнал имеет продолжительность ~150 секунд, он был разбит на четыре участка. На TUMD отчетливо прослеживается смещение максимальных спектральных пиков в сторону высоких частот от 0.9 Гц до ~3 Гц.

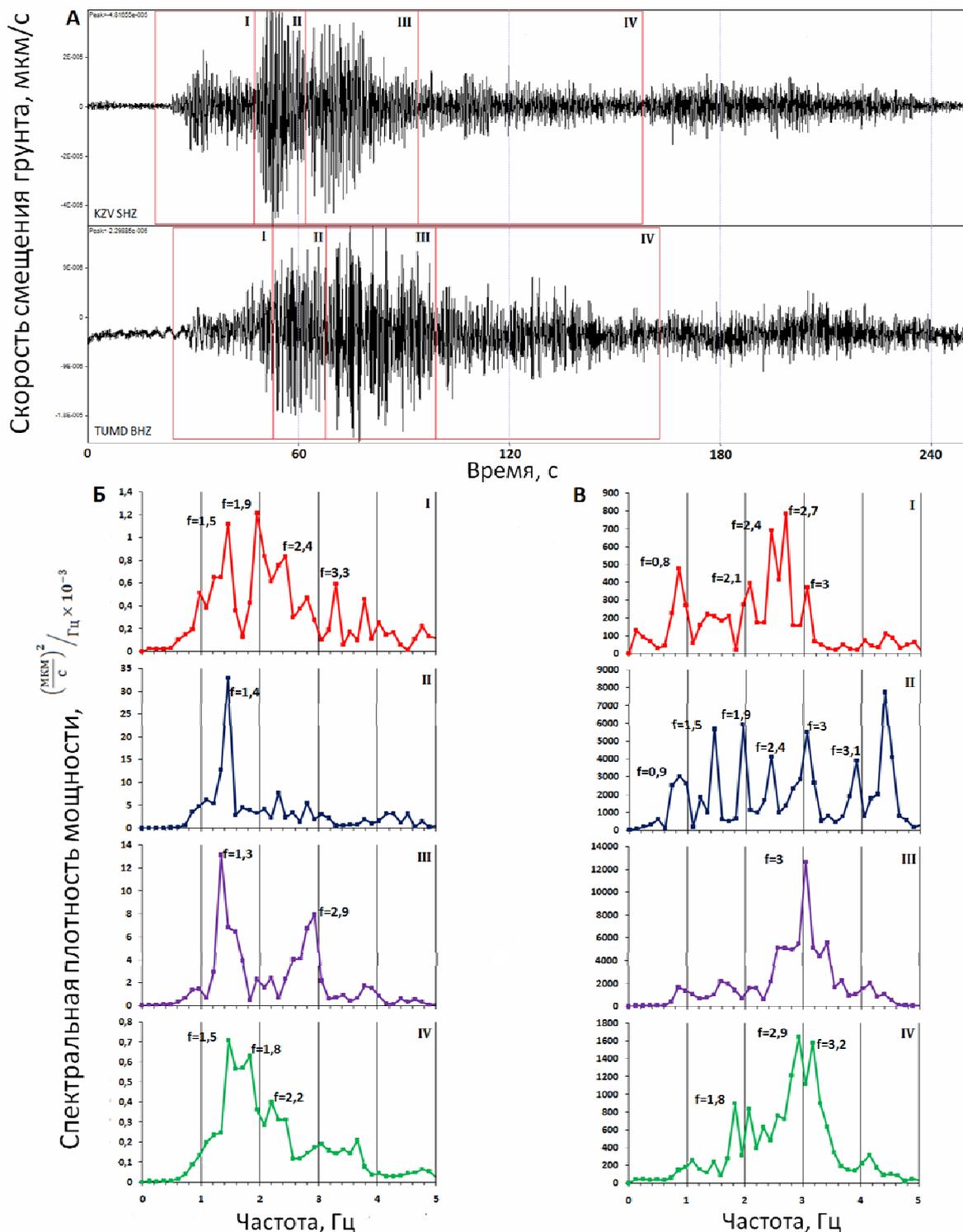


Рис. 4. Сейсмический сигнал на вертикальных составляющих KZV SHZ и TUMD BHZ от ПП 13/12/2011 в 20:16 (А), спектральная плотность мощности для различных участков записи для каналов SHZ (Б) и BHZ (В).

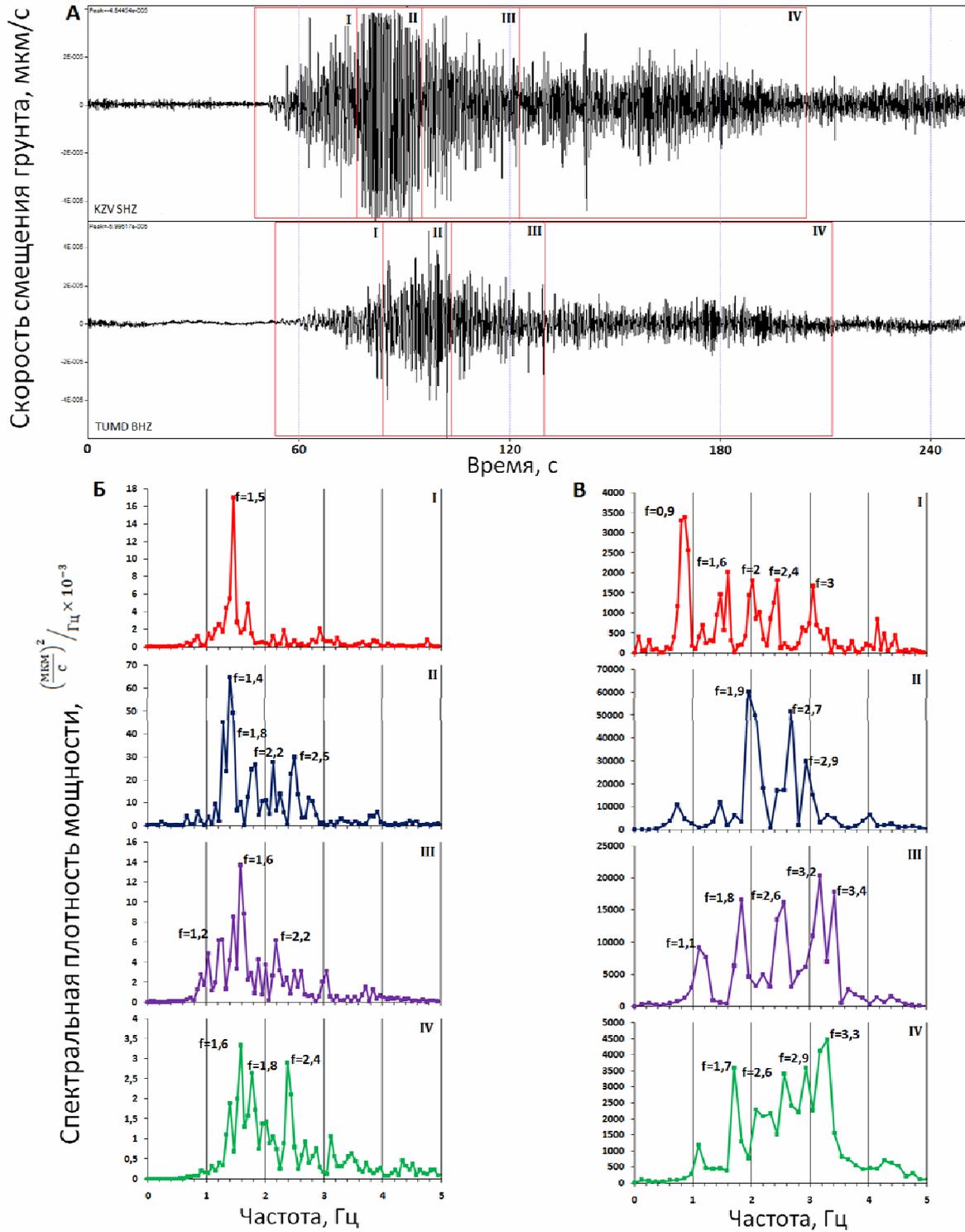


Рис. 5. Сейсмический сигнал на вертикальных составляющих KZV SHZ и TUMD BHZ от ПП 13/12/2011 в 20:28 (А), спектральная плотность мощности для различных участков записи для каналов SHZ (Б) и BHZ (В).

Далее рассмотрим пять событий, сопровождавших ПП или раскаленные лавины в 2013 году. Сейсмические сигналы визуально различаются по форме записи. К первой группе отнесем сигналы с медленно затухающей

амплитудой и длительностью 100 – 132 секунды (рис. 6), а ко второй группе отнесем сигналы, форма записи которых отличается достаточно быстрым уменьшением амплитуды (рис. 7).

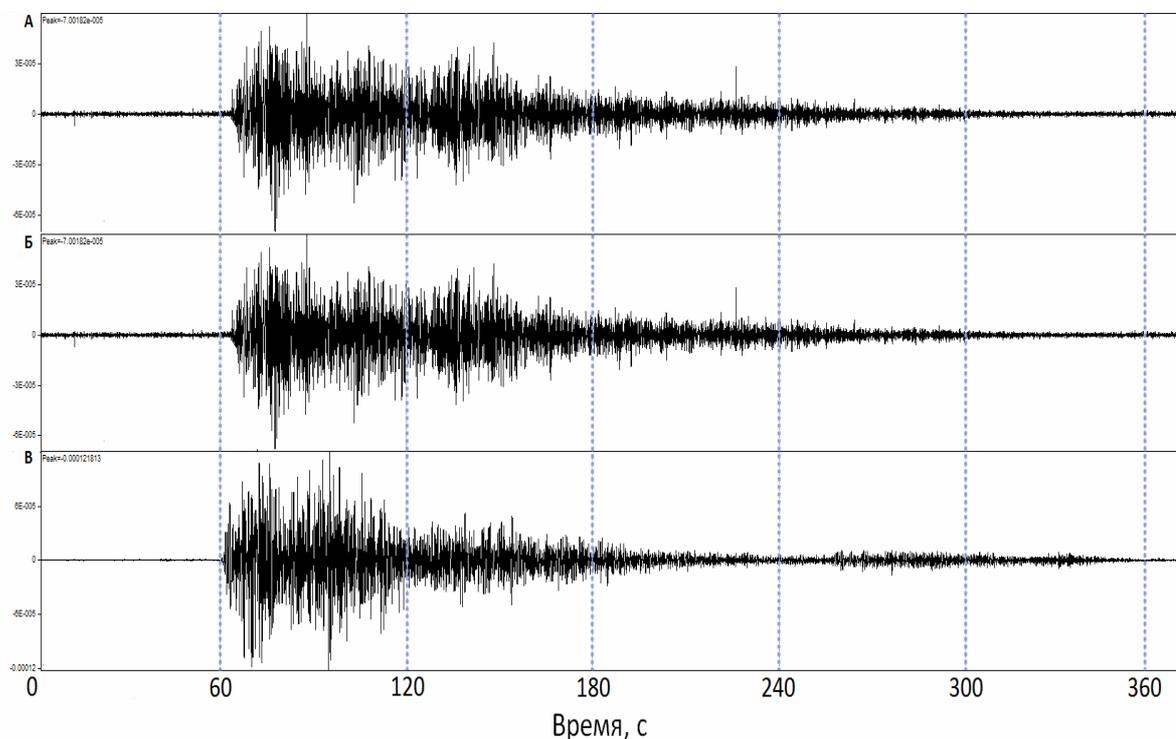


Рис. 6. Сейсмический сигнал от ПП 16/06/2013 02:18 (А), ПП 19/07/2013 03:40 (Б), ПП 21/07/2013 04:30 (В) с/ст. KZV SHZ.

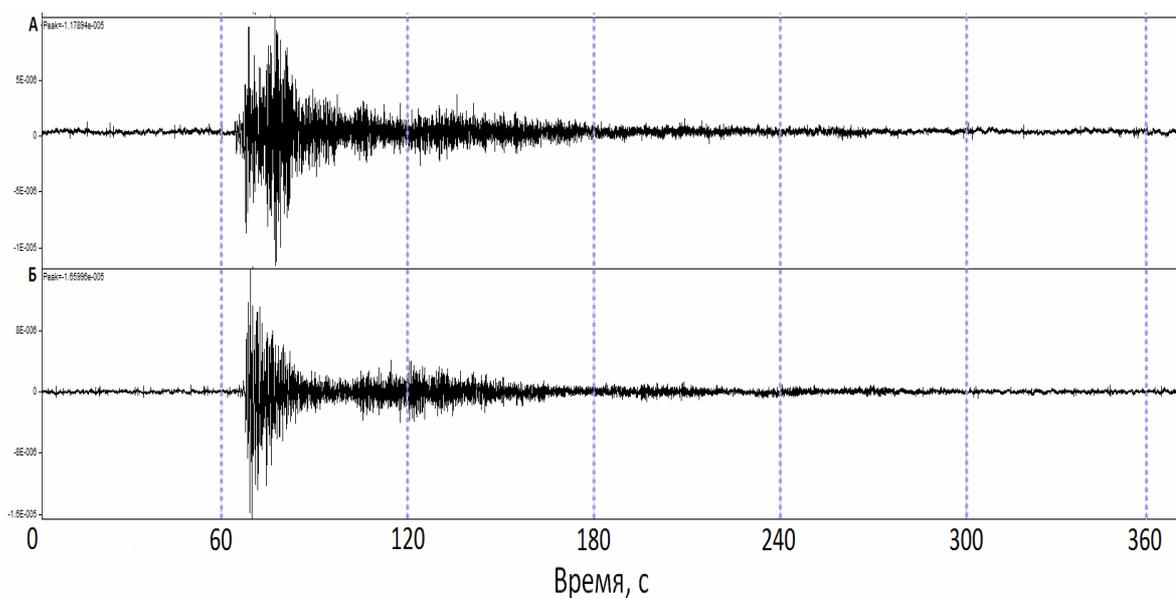


Рис. 7. Сейсмический сигнал от ПП 21/03/2013 06:42 (А), ПП 21/03/2013 04:45 (Б) с/ст. KZV SHZ.

Для сейсмического сигнала продолжительностью ~ 100 секунд от ПП 16 июня 2013 г. наблюдается характерная картина для вышерассмотренных сигналов. Максимальный спектральный пик на первом участке равен 0.9 Гц, на втором и третьем – 2 и 2.3 Гц соответственно (рис. 8).

Смещение максимальных спектральных пиков в сторону высоких частот для сигнала от ПП 19 июля 2013 г. выражено не так четко 1.8 – 1.9 – 1.8(2.2) Гц, для трех участков соответственно (рис. 9). Продолжительность сигнала – 120 секунд.

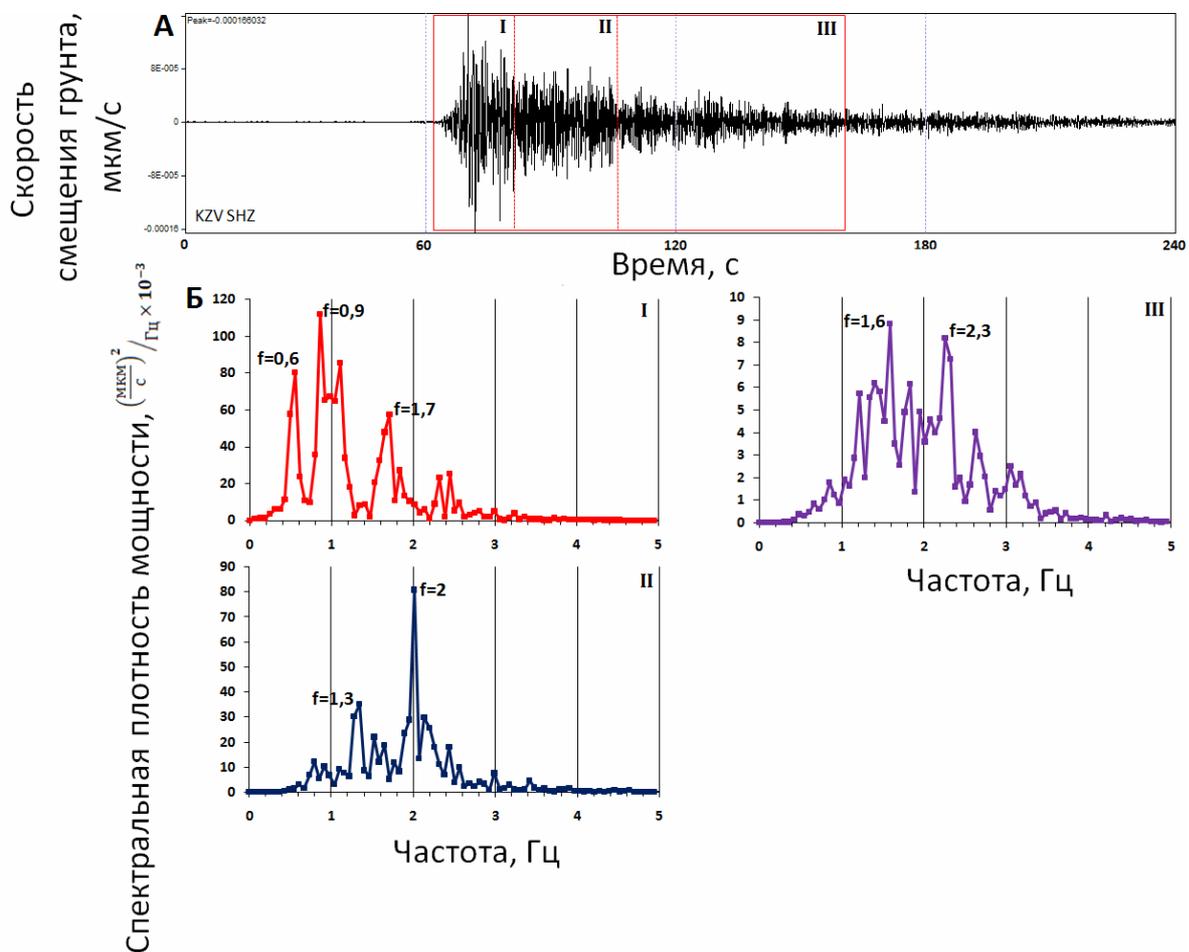


Рис. 8. Сейсмический сигнал на вертикальной составляющей KZV SHZ от ПП 16/06/2013 в 02:18 (А), спектральная плотность мощности для различных участков записи (Б).

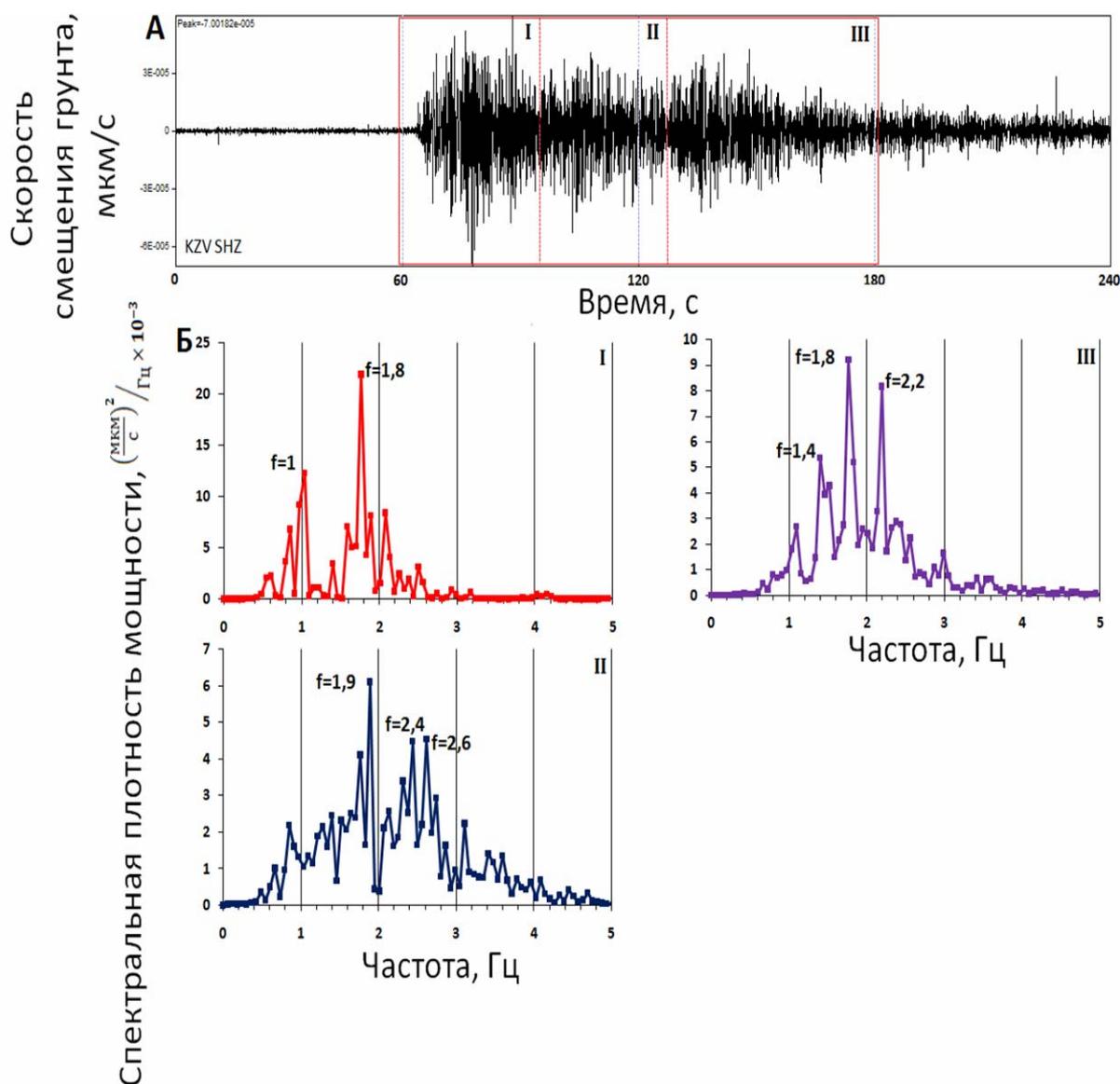


Рис. 9. Сейсмический сигнал на вертикальной составляющей KZV SHZ от ПП 19/07/2013 в 03:40 (А), спектральная плотность мощности для различных участков записи (Б).

Для сейсмического сигнала ПП 21 июля 2013 г. продолжительностью ~ 130 секунд прослеживается смещение максимального спектрального пика в сторону высоких частот. Максимум первого участка – 1.6 Гц, второго – 1,9 Гц, третьего – 2.2 Гц (рис. 10).

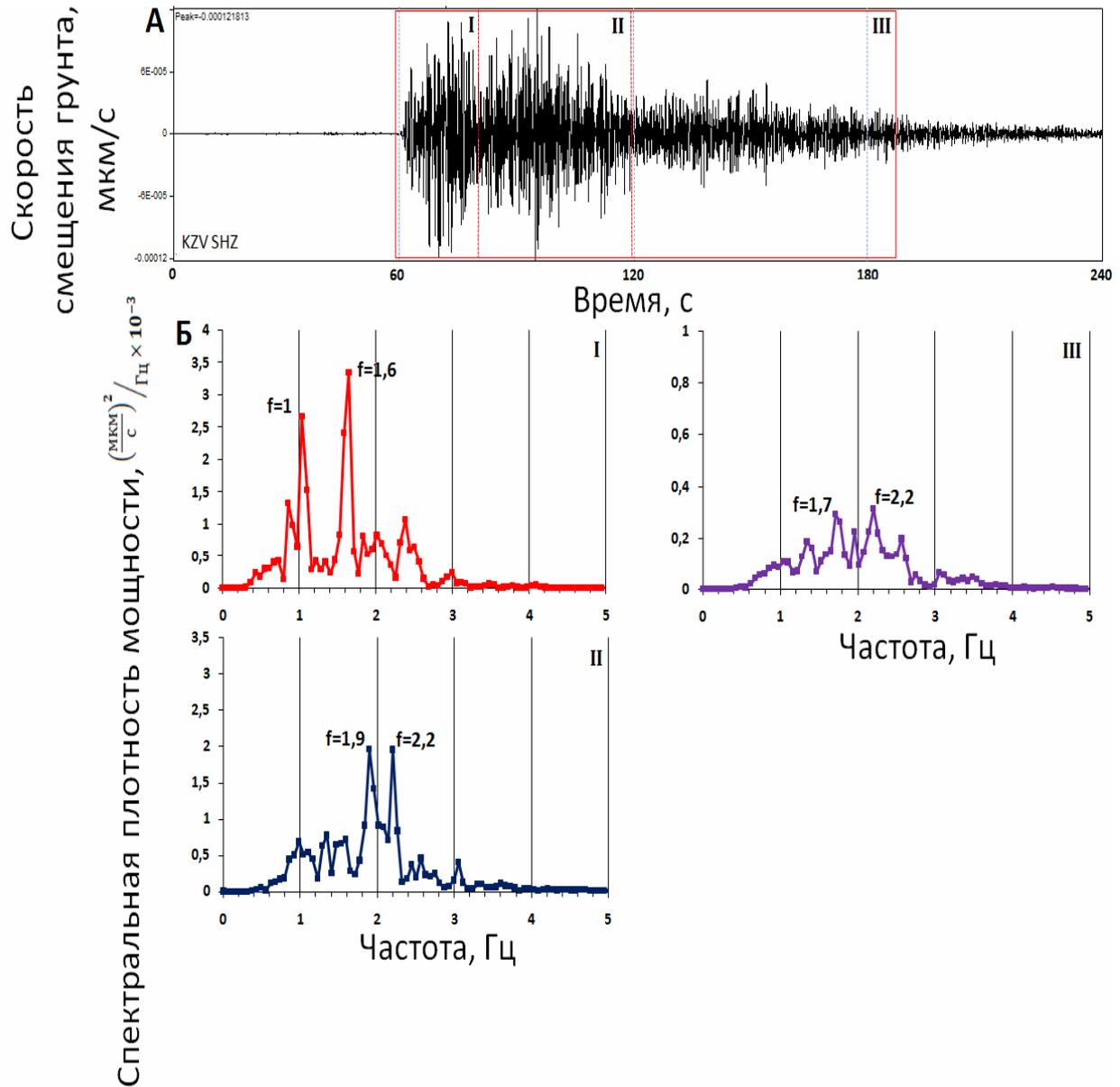


Рис. 10. Сейсмический сигнал на вертикальной составляющей KZV SHZ от ПП 21/07/2013 в 04:30 (А), спектральная плотность мощности для различных участков записи (Б).

Рассмотрим сейсмический сигнал 21 мая 2013 г. 06:42 продолжительностью ~ 120 секунд (рис. 11). На первом участке максимальный спектральный пик равен 3.2 Гц, на последующих двух участках максимальные пики равны ~ 4 Гц. Наблюдается высокая спектральная составляющая, не характерная для рассмотренных выше примеров. Это может говорить о том, что сейсмический сигнал данного события относится к раскаленной лавине.

Сейсмический сигнал события, произошедшего 21 мая 2013 г. 04:45 тоже следует отнести к раскаленной лавине. 90 секунд Максимальный спектральный пик первого участка этого сигнала равен 1.6 Гц, на втором участке максимальный пик приходится на 4 Гц. Продолжительность сигнала ~90 секунд.

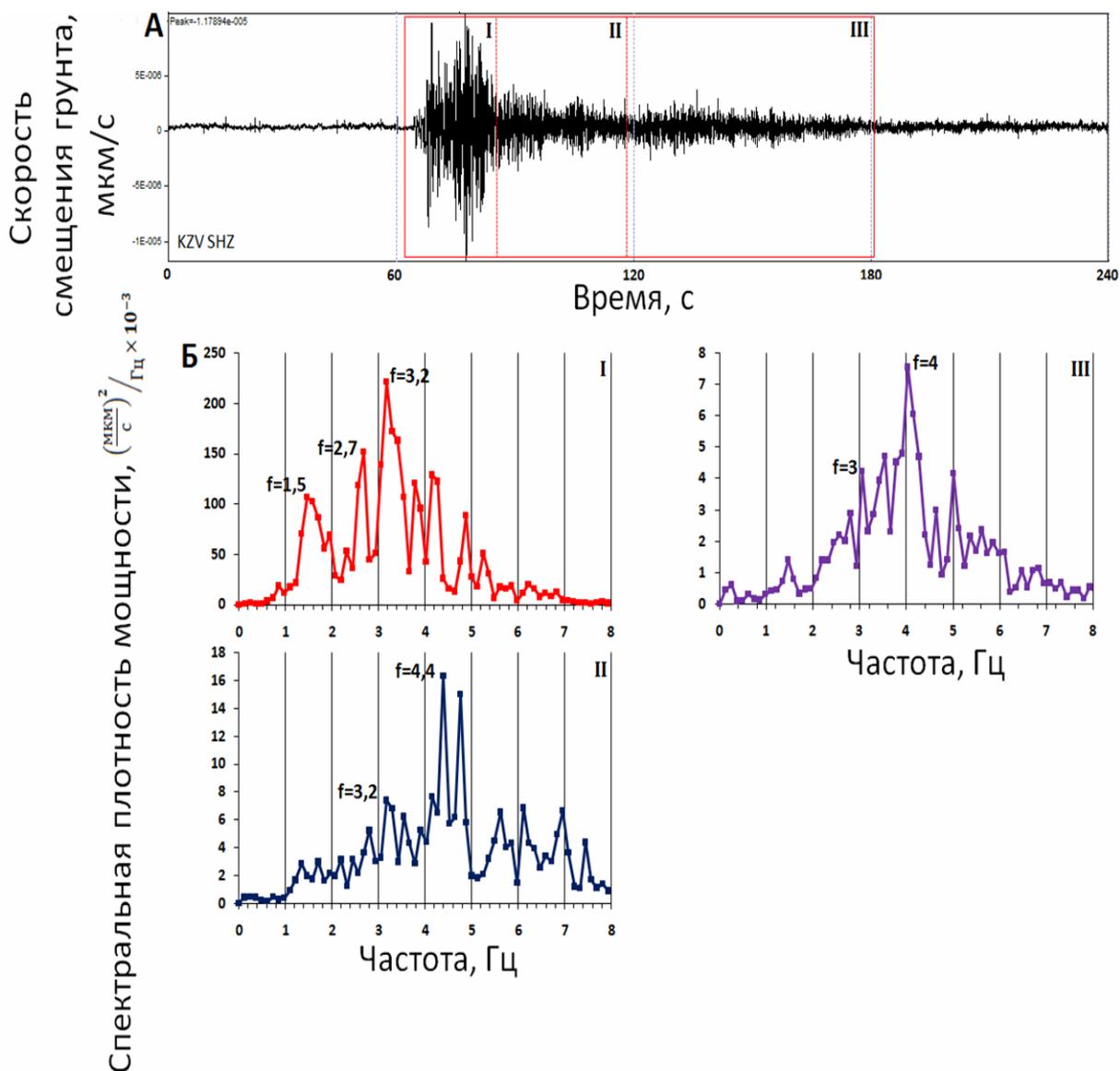


Рис. 11. Сейсмический сигнал на вертикальной составляющей KZV SHZ от ПП 21/03/2013 в 06:42 (А), спектральная плотность мощности для различных участков записи (Б).

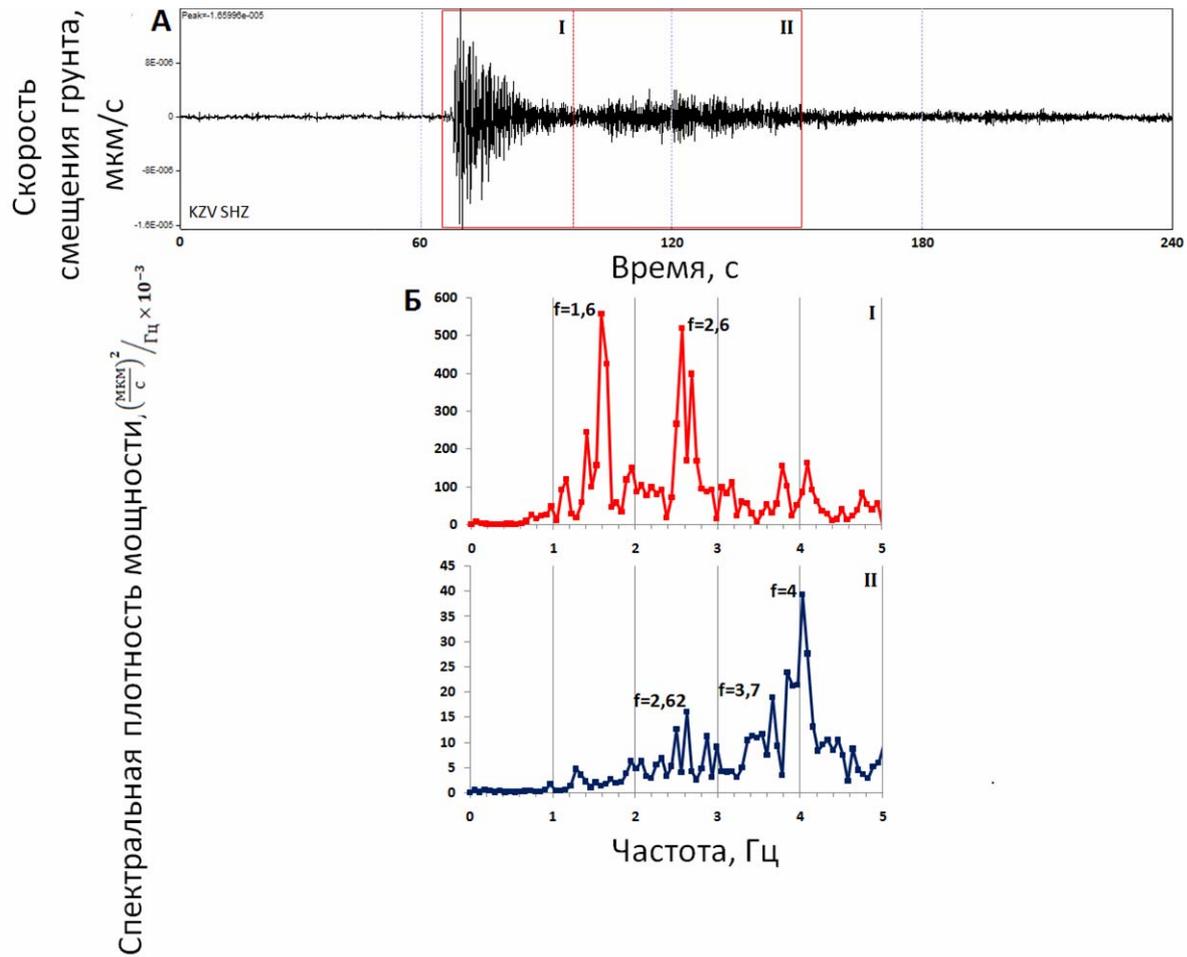


Рис. 12. Сейсмический сигнал на вертикальной составляющей KZV SHZ от ПП 21/03/2013 в 04:45 (А), спектральная плотность мощности для различных участков записи (Б).

ВЫВОДЫ

Исходя из полученных результатов, можно предположить, что сейсмические события, сопровождающие ПП и раскаленные лавины, которые формируются при обвалах экструзивного материала, отличаются длительностью и спектральным составом. В дальнейшем предполагается формализовать большее количество параметров с целью селекции формы сейсмических сигналов, сопровождающие различные формы активности вулкана Кизимен.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гарбузова В.Т., Соболевская О.В.* Обновленная классификация вулканических землетрясений П.И. Токарева // Проблемы комплексного геофизического мониторинга ДВ России. П.К., 2010. С.25-29.
2. *Дроздин Д.В., Дроздина С.Я.* Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 3 С.22 – 34.
3. *Камчатский филиал Геофизической службы РАН, 1979-2009.* Обнинск: ГС РАН, 2009.-73с.
4. *Малик Н.А., Овсянников А.А.* Извержение вулкана Кизимен в октябре 2010 г. – марте 2011 г. //Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 1. Вып. 17. С.7 – 10.
5. *Фирстов П.П.* Особенности акустических и сейсмических волн, сопровождавших извержение вулкана Безымянный в 1983-1985гг. // Вулканология и сейсмология. 1988. № 2. С. 81-97.
6. *Фирстов П.П., Шакирова А.А.* Динамика извержения вулкана Кизимен (Камчатка) в 2009 – 2012 гг. и ее проявление в сейсмических эффектах. 2012.
7. *Чубарова О.С., Горельчик В.И., Гарбузова В.Т.* Сейсмический режим вулкана Безымянный в 1975 – 1979 гг.// Вулканология и сейсмология. 1983. № 3. С.58 – 69.
8. *Шакирова А.А.* Движение лавового потока вулкана Кизимен как генератор режима «drumbeats»// Исследования в области наук о Земле. Матер. X региональной молодежной научной конференции 28 – 29 ноября. 2012. Петропавловск-Камчатский. С. 127-139.
9. *Шанцер А.Е., Кутыев Ф.Ш., Петров В.С., Зубин М.И.* Вулкан Кизимен // Действующие вулканы Камчатки. Т. 2. М.: Наука, 1991. С. 18-23.
10. *WinПОС: пакет обработки сигналов.* Руководство пользователя. Мытищи: «Мера», 2010.
11. www.guralp.com.
12. *Yamasato H.* Quantitative analysis of pyroclastic flows using infrasonic and seismic data at Unzen volcano, Japan // J. Phys. Earth. 1997. № 45. P. 397-416.

STUDY OF SEISMIC SIGNALS ACCOMPANYING VOLCANIC
PYROCLASTIC FLOWS ON VOLCANO KIZIMEN IN ORDER
ALLOCATE INFORMATIVE PARAMETERS FOR THEIR AUTO-
MATIC SELECTION

Arbugaeva O.V.

Kamchatka State University named Vitus Bering

Exploration eruptions of pyroclastic flows (PF), characteristic for all eruptions of andesitic volcanoes (Bezymianny, Shiveluch), have been observing since the beginning of volcano Kizimen eruption (December 2010). Retrospective analysis of seismic signals of PF was performed on the base of daily digital seismograms archive and video recording archive in 2013. Characteristic parameters allowing to carry PF signal selection from the diversity of seismic signals on volcanoes were allocated on the base of wave forms and power spectral density study. Detailing and formalization of selected features of PF seismic signals will allow to advance these events in real time.

Keywords: volcano Kizimen, eruption, pyroclastic flow, seismic signal, spectrum.