

Слабая сейсмическая активизация вулкана Авачинский в октябре-декабре 2019 г. А.А. Шакирова¹, Е.В. Черных², П.П. Фирстов¹, А.В. Кирюхин²

¹Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail: shaki@emsd.ru

²Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский

Введение

В октябре-декабре 2019 г. наблюдалось усиление сейсмической активности вулкана Авачинский. С 27 октября на инфракрасной камере Камчатского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН), установленной на радиотелеметрической сейсмической станции (РТСС) «Авача» (AVH) в 5 км от кратера вулкана, был зафиксирован интенсивный прогрев и свечение в западной кромке кратера (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>). Визуально в этот период наблюдалась повышенная фумарольная активность и сильная загазованность кратера. Эта сейсмическая активизация вызвала большой интерес у научной общественности, т.к. последнее эффузивное извержение вулкана Авачинский произошло 29 лет назад в январе 1991 г., в результате которого кратер вулкана заполнился лавой ($\sim 8 \cdot 10^6 \text{ м}^3$) и образовался лавовый поток объемом $\sim 4 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ [4]. Следующая активизация произошла 5 октября 2001 г., когда наблюдался единственный слабый парогазовый выброс [5]. Следует заметить, что в обоих случаях перед событиями регистрировались слабые землетрясения, происходящие вблизи конуса вулкана или непосредственно в нем.

Сейсмичность района вулкана Авачинский в конце 2019 г.

Исследование сейсмичности вулкана Авачинский в конце 2019 г. проводилось с использованием каталогов землетрясений КФ ФИЦ ЕГС РАН. Землетрясения обрабатывались с помощью интерактивной программы DIMAS [1].

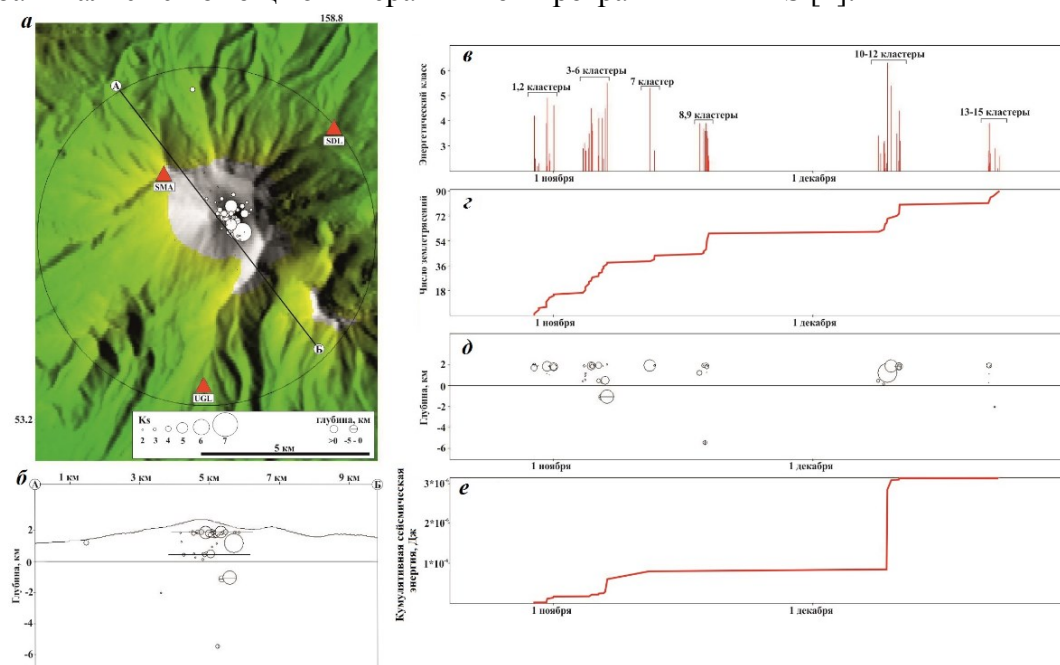


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений, произошедших в постройке вулкана Авачинский в октябре-декабре 2019 г. (а), проекция гипоцентров на вертикальную плоскость по линии А–Б (б), распределение во времени энергетического класса (*K*), кумулятивная кривая числа землетрясений (г), глубины гипоцентров землетрясений (д) и кумулятивная кривая сейсмической энергии землетрясений (е). Название РТСС: SMA – Сомма, SDL – Седловина, UGL – Угловая.

сейсмической энергии землетрясений (e). Название PTCC: SMA – Сомма, SDL – Седловина, UGL – Угловая.

Сейсмичность вулкана Авачинский в конце 2019 г. была представлена шестью роевыми последовательностями вулканических землетрясений (ВЗ), которые хорошо выделяются на кумулятивной кривой числа землетрясений (рис. 1г). Глубина основной массы очагов располагалась выше уровня моря ($0 < h < 2$ км) и тяготела к двум горизонтам ~ 0.5 и ~ 1.8 км н.у.м., а эпицентры были сосредоточены в северо-северо-восточном секторе конуса вулкана (рис. 1а,б). Энергетический класс ВЗ по S-волне ($K_S = \lg E$, Дж) был заключен в пределах $1.4 < K_S < 6.6$. Наибольшая энергия выделилась во время 5 роя, когда произошло самое сильное землетрясения с $K_S = 6.6$ (рис. 1е).

Плоско-ориентированные кластеры гипоцентров вулканических землетрясений, сопровождавших активизацию вулкана Авачинский

В работах [2, 3] показано, что в потоке землетрясений в районах действующих вулканов, к которым относятся ВЗ различных типов [7], выделяются плоско-ориентированные кластеры. В некоторых случаях их можно интерпретировать как зоны формирования силлов и даек.

В связи с активизацией сейсмичности вулкана Авачинский выделялись плоско-ориентированные кластеры вулканических землетрясений и оценивались характеристики соответствующих сейсмогенных площадок в интерактивной программе FracDigger (№ 2016616880). Критериями выделения кластеров являлись: 1 – временное ограничение событий менее суток; 2 – разброс гипоцентров землетрясений в горизонтальной плоскости ≤ 6 км; 3 – их удаление от плоскости сейсмогенной площадки ≤ 200 м; 4 – количество землетрясений в кластере ≥ 6 .

В период сейсмической активности вулкана Авачинский с октября по декабрь 2019 г. было выделено 15 плоско-ориентированных кластеров, центры которых располагались в диапазоне глубин от 302 до 1842 м в.у.м. (таблица, рис. 2). В начале активизации в роевых последовательностях выделялось по два кластера, на заключительной стадии – по три кластера. Кластеры, в основном, располагались квазивертикально с углом падения от 59° до 84° , но кластеры №№ 1, 8, 12 имели квазигоризонтальное расположение.

Таблица. Геометрия плоско-ориентированных кластеров вулканических землетрясений вулкана Авачинский в период с 29.10.2019 г. по 22.12.2019 г.

№№	Дата	Угол падения	Азимут падения	X, м	Y, м	Z, м	$K_{S_{max}}$	n	$S, \text{км}^2$	$\lambda, \%$
1	29.10.19	1.6	110.5	489188	5900238	1842	4.2	6	2.0	67
2	31.10.19	66.6	262.0	489265	5900604	1512	4.6	14	1.7	79
3	04.11.19	81.4	72.9	489515	5900534	1647	3.5	6	0.7	50
4	04.11.19	57.9	288.2	489328	5900775	1292	4.5	7	0.9	57
5	06.11.19	82.7	242.5	489291	5900574	1407	4.1	6	0.5	100
6	06.11.19	81.7	69.3	489262	5900434	811	5.5	7	2.9	86
7	12.11.19	73.6	257.9	489179	5900771	1635	5.3	6	1.2	100
8	17.11.19	10.9	20.0	489197	5901039	1814	3.9	14	2.9	50
9	18.11.19	83.9	104.9	488982	5900870	774	3.6	10	2.7	67
10	08.12.19	65.6	246.1	489146	5900960	997	3.4	8	2.1	50
11	09.12.19	81.6	251.8	489154	5900904	302	6.6	6	2.0	80
12	10.12.09	6.0	221.8	489353	5900585	1813	4.4	11	0.6	27
13	21.12.19	71.9	239.3	488828	5901139	1332	3.9	7	2.6	29
14	22.12.19	59.4	348.1	489092	5900708	503	2.9	6	5.2	17
15	22.12.19	59.9	203.5	489338	5900679	1039	3.1	6	3.8	0

Примечание. X, Y, Z – координаты центров кластеров (система координат UTM WGC-84); $K_{S_{max}}$ – максимальный энергетический класс в кластере; n, S – число землетрясений в кластере и его площадь; λ – процентное содержание ВЗ в кластере. Выделены горизонтальные кластеры.

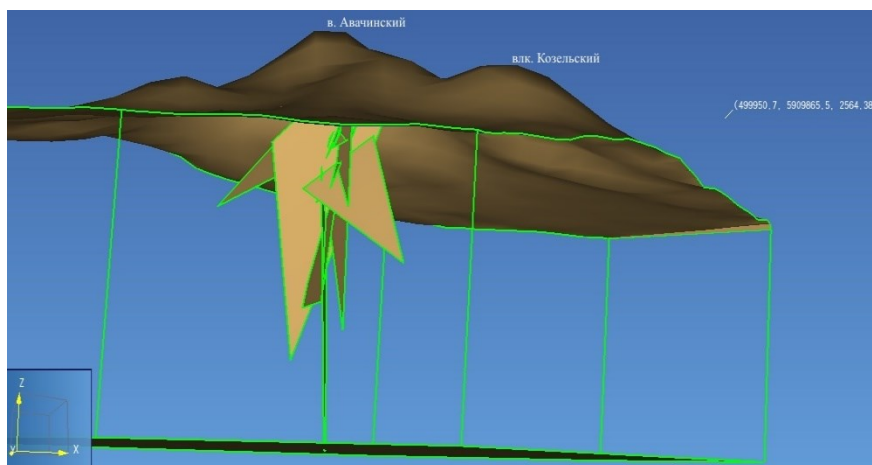


Рис. 2. 3D визуализация плоско-ориентированных кластеров ВЗ, выделенных в период октябрь – декабрь 2019 г. Верхний срез модели соответствует абс. отметкам в диапазоне 450-1300 м.

Особенности землетрясений и их спектральные характеристики

В последние четверть века применение в сейсмологии цифровой регистрации ВЗ дало возможность детального исследования их волновых форм, что привело к возникновению современной их типизации. На основании волновых форм ВЗ, зарегистрированных вблизи (≤ 10 км) некоторых извергающихся вулканов мира описание такой типизации дано в работе [7]: 1) вулcano-тектонические землетрясения (ВТЗ) с четкими вступлениями Р и S-волн и преобладающей частотой $f \approx 10$ Гц, механизм которых объясняется хрупким разрушением геосреды; 2) гибридные землетрясения (ГЗ) характеризуются тем, что после четких вступлений с $f \approx 3-10$ Гц наблюдается запись явно выраженных кода-волн. Такая форма записи обусловлена разрушением геосреды под воздействием давления магмы или флюида с образованием трещины и дальнейшего ее заполнения; 3) для длиннопериодных землетрясений (ДЗ), с очагами в непосредственной близости от дневной поверхности, характерны нечеткие вступления Р и S-волн и более низкая частота $f \approx 1-5$ Гц.

Волновые формы ВЗ изучались по сейсмограммам РТСС SMA, располагающейся в 1.8 км от кратера. Все три типа ВЗ регистрировались во время активизации вулкана, но преобладали ВТЗ. Наибольшее процентное содержание ВТЗ в кластерах (№ 5, 7 – 100%) пришлось на начальный период активизации (таблица). В четырех последних кластерах процент ВТЗ резко снизился.

Кроме того, выделился еще один тип ВЗ, который характеризовался резким вступлением Р-волны (рис. 3а) и преобладанием более низкой частоты (8 Гц) в начальной части записи, по сравнению с частотой кода-волн (рис. 3б). Причем первое вступление Р-волны имело как положительную полярность, так и отрицательную. Возможно, такие землетрясения связаны с «взрывными» процессами, происходящими в конусе вулкана. В пользу этого предположения говорит то, что при взрывах на выброс или вблизи границы с резким изменением свойств среды в ближней зоне возникает волновая картина, подобная рис. 3а [6]. Взрывоподобные процессы формируют ВЗ с положительной поляризацией Р-волны, а процессы, связанные с резкой разгрузкой, – с отрицательной поляризацией.

Заключение

По мнению авторов, сейсмическая активизация вулкана Авачинский в конце 2019 г. подтверждает вывод, сделанный в работе [4]. В связи с геометрией Молодого конуса вулкана и высокой проницаемостью его пород, значительная часть метеорной воды проникает вглубь и формирует обводненную толщу пород на глубинах от 0.5 до 1.5 км н.у.м. На этих двух уровнях и происходила основная масса ВЗ. При нарушении гидрологического режима может возникнуть ситуация, когда метеорные воды попадают на разогретый материал магматической колонны, что приводит к

возникновению паровых «взрывов» и дальнейшей активизации процесса с формированием плоско ориентированных кластеров ВЗ.

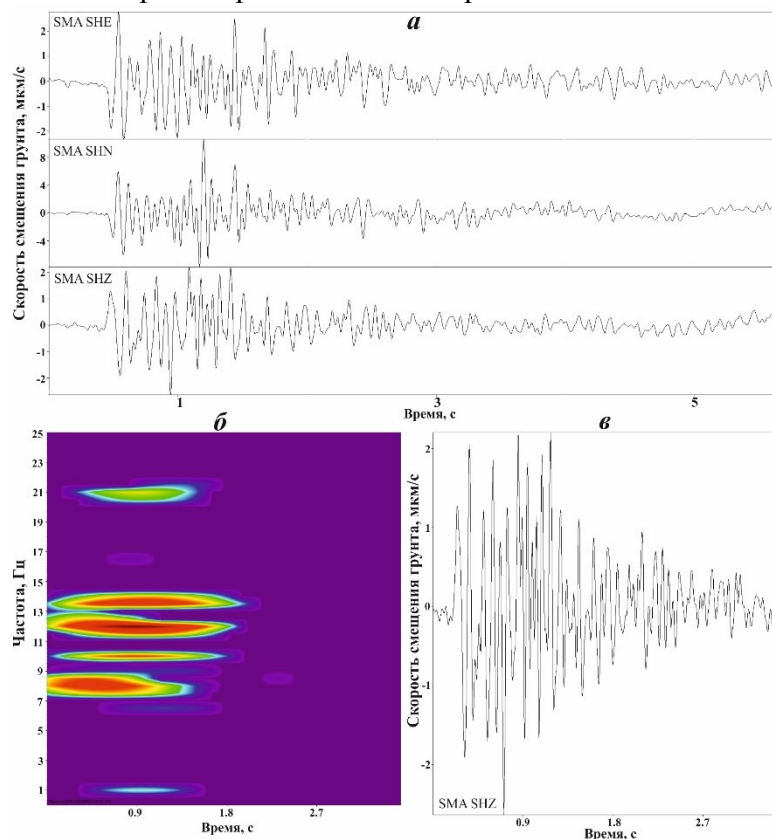


Рис. 3. Волновые формы «взрывного» землетрясения (а), спектрограмма (б) канала SHZ (в). Начало отсчета времени соответствует 5 ноября 2019 г. 02:39:52.

В заключении авторы выражают благодарность А.П. Максимову за обсуждения и конструктивные замечания.

Работа выполнялась в рамках государственного задания по проекту № АААА-А19-119031590060-3 и при поддержке гранта РФФИ № 18-05-00052.

Список литературы

1. Дроздин Д.В., Дроздина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 3. С. 22-34.
2. Кирюхин А.В., Федотов С.А., Кирюхин П.А. Геохимическая интерпретация локальной сейсмичности, связанной с извержениями и активизацией вулканов Толбачик, Корякский и Авачинский, Камчатка, в 2008-2012 гг. // Вулканология и сейсмология. 2016. № 5. С. 3-20.
3. Кирюхин А.В., Федотов С.А., Кирюхин П.А. и др. Магматические питающие системы Корякско-Авачинской группы вулканов по данным локальной сейсмичности и режима прилегающих термальных источников // Вулканология и сейсмология. 2017. № 5. С. 3-17.
4. Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Двигало В.Н. и др. Исторические извержения Авачинского вулкана на Камчатке (попытка современной интерпретации и классификации для долгосрочного прогноза типа параметров будущих извержений) Ч.II (1926-1991 гг.). // Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С. 3-23.
5. Мелекесцев И.В., Селиверстов Н.И., Сеников С.Л. Информационное сообщение об активизации в октябре 2001 г. вулкана Авачинский на Камчатке и проведенных исследованиях // Вулканология и сейсмология. 2002. № 2. С. 78-80.
6. Ромашев А.Н. Особенности действия крупных подземных взрывов. М.: Недра, 1980. 213 с.
7. Power J.A., Lahr J.C., Page R.A. et al. Seismic evolution of the 1989-1990 eruption sequence of Redoubt Volcano, Alaska // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1994. V. 62. P. 69-94.