# РАЗДЕЛ III. СЕЙСМИЧНОСТЬ В ГЕОФЛЮИДНЫХ СИСТЕМАХ, АКТИВНЫЕ И ПРОДУКТИВНЫЕ РАЗЛОМЫ

# CHAPTER III. SEISMICITY IN GEOFLUID SYSTEMS, ACTIVE AND PRODUCTIVE FAULTS

УДК 550. 344.43

## Механизмы очагов вулкано-тектонических землетрясений вулкана Кизимен (Камчатка)

М.В. Лемзиков

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия*
*lemzikov@kscnet.ru*

Во время извержения вулкана Кизимен в 2009–2013 гг., произошло несколько сильных с $K_{S1,2}^{Ф68}$ > 9.0 вулкано-тектонических землетрясений (ВТЗ). В работе выполнено решение механизмов очагов сильных ВТЗ вулкана Кизимен. Исходными данными были волновые формы сейсмических сигналов, зарегистрированные сетью из 20-ти радиотелеметрических сейсмических станций с глубиной очага в постройке вулкана и под фундаментом на глубинах от 3.8 до 7.5 км. Механизмы очагов определялись по полярностям первых вступлений ***P*** и ***S*** -волн с помощью готового алгоритма программы FPFIT. В результате получены 11 механизмов очагов в постойке вулкана Кизимен и 15 механизмов очагов под вулканом на глубине от 3.8 до 7.5 км. Механизмы очагов сильных ВТЗ коррелируют с геологическими разломами в этом районе.

## Focal Mechanisms of Volcanic-Tectonic Earthquakes of Kizimen Volcano

Michail V. Lemzikov

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

During the 2009–2013 eruption of Kizimen Volcano, several strong volcano-tectonic earthquakes (VTE) Ks> 9.0 occurred. This study describes the focal mechanisms of strong VTEs at Kizimen Volcano. The initial data were waveforms of seismic signals recorded by a network of 20 radio telemetry seismic stations with focal depths in the volcanic edifice and beneath the basement at depths ranging from 3.8 to 7.5 km. Focal mechanisms were determined from the polarities of the first arrivals of P and S waves using a pre-defined algorithm in the FPFIT program. This resulted in 11 focal mechanisms within the edifice of Kizimen Volcano and 15 focal mechanisms beneath the volcano at depths ranging from 3.8 to 7.5 km. The focal mechanisms of strong VTE correlate with geological faults in the area.

**Введение**

Вулкан Кизимен с абсолютной высотой 2485 м, расположен на юго-восточном борту Щапинского грабена на полуострове Камчатка. Вулкан является действующим, тип извержений – эффузивно-эксплозивный. Он имеет коническую форму с кратером в привершинной части. Первые научные исследования вулкана датируются летом 1943 г., но, по причине ограниченных возможностей в проведении полевых наблюдений, не обнаружили следов его предпоследнего извержения 1927–1928 гг., [1].

В декабре 2010 года после более 80 лет молчания началось очередное эксплозивно-эффузивное извержение вулкана, которому предшествовала слабая сейсмическая подготовка. Первые сейсмические сигналы, нового извержения, которые могли свидетельствовать о взрывах и обломочных лавинах на вулкане, появились 9 декабря 2010 г., а в ночь с 9 на 10

декабря по местному времени произошло резкое усиление сейсмической и вулканической активности [2].

В данной работе выполнено решение механизмов очагов сильных ВТЗ в 2009–2011 гг. вулкана Кизимен.

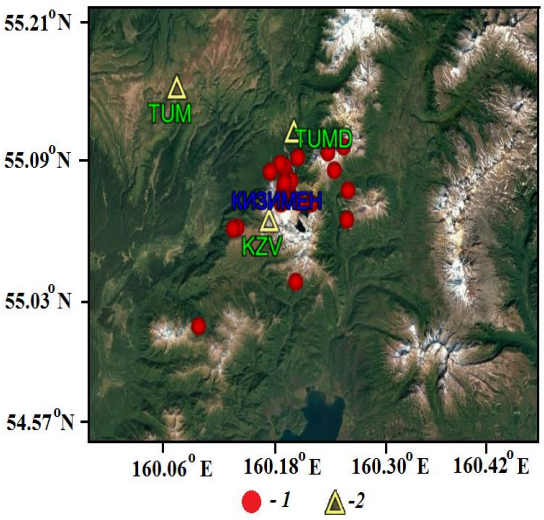



*Рисунок 1 – Карта района исследования. 1 – эпицентры сильных (ВТЗ); 2 – радиотелеметрические сейсмические станции*

**Исходные данные**

К первому типу относятся вулканические землетрясения похожие на тектонические, т.е. их очаг характеризуется как однократный толчок. Они так и называются «вулкано-тектонические» – ВТ по определению Г.С. Горшкова [3]. Вступления P и S волн четкие. Вулканические землетрясения других типов, очаг которых есть результат действия различных вулканических сил, не имеют четких вступлений S-волн.

В работе использовались сильные ВТЗ вулкана Кизимен (рис. 1). С $K_{S1,2}^{\Phi 68} > 9.0$ [4].

Из архива выбирались ВТЗ с очагами в постройке вулкана Кизимен и под ним на глубинах 3.8–7.5 км. Хотя ВТЗ с очагами в постройке вулкана Кизимен содержат рассеянные волны, все же они были использованы в обработке [5].

Регистрация сильных ВТЗ проводилась 20-ю радиотелеметрическими сейсмическими станциями Камчатского филиала ФГБУН Федерального исследовательского центра «Единой геофизической службы» РАН (КФ ФИЦ ЕГС РАН), установленными на склоне и вблизи вулканов Северной группы.

В работе для решения и построения механизмов очагов ВТЗ вулкана Кизимен использованы полярности первых вступлений *P* и *S*-волн на вертикальных каналах (SHZ) (рис. 2).

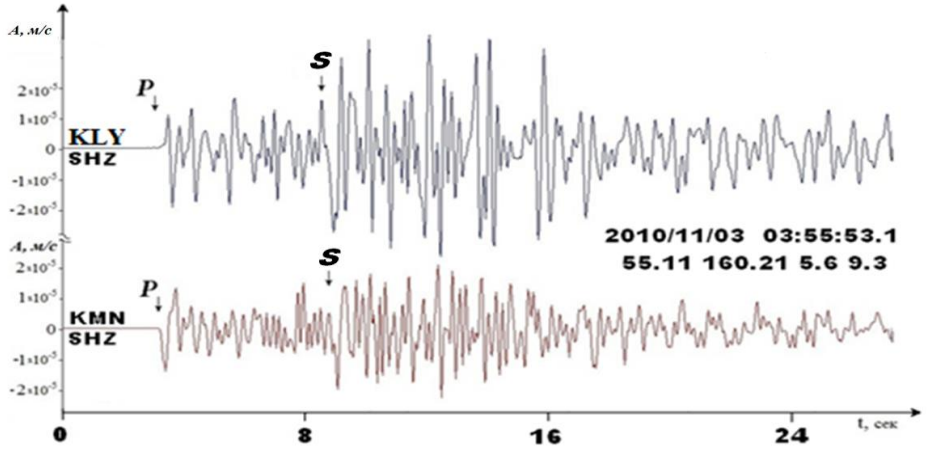



*Рисунок 2 – Пример сильного ВТЗ вулкана Кизимен*

**Метод решения механизма очага**

Метод решения механизма очага землетрясения по поляризации первых вступлений сейсмических волн широко известен [6]. Под механизмом очага землетрясения понимается ориентация в пространстве нодальных плоскостей и главных осей сжатия и растяжения. Для определения этих плоскостей используется сетка Вульфа. Со второй половины XX века для работы с ней применяются компьютерные программы. Широко известны программы: FPFIT, FPPLOT и др. [7], разработанные по идеям работ [6]. В настоящее время разработаны технологии, уточняющие процедуру решения механизма очага землетрясения с использованием первых

вступлений сейсмических волн, которые учитывают возможные ошибки в определении местоположения землетрясения, принятой модели скоростной среды, наблюдениях полярностей и углов выхода сейсмических волн. В работе использовался готовый алгоритм программы FPFIT для решения и построения механизмов очагов вулканических землетрясений вулкана Кизимен.

**Обсуждение результатов**

Параметры механизмов очагов сильных ВТЗ вулкана Кизимен с $K_{S1,2}^{\Phi 68} > 9.0$ в постройке вулкана Кизимен приведены в (табл.1). Параметры механизмов очагов сильных ВТЗ вулкана Кизимен с $K_{S1,2}^{\Phi 68} > 9.0$, на глубинах 3.8–7.5 км приведены в (табл. 2). В целом простирание первых нодальных плоскостей механизмов очагов сильных ВТЗ вулкана Кизимен определяется, как северо-восточное.

Район Щапинского грабена, где расположен вулкан Кизимен, разбит сетью разрывных тектонических нарушений. Наиболее четко выражена сложная по конфигурации система сбросов общего северо-восточного простирания. Вертикальная амплитуда сбросов колеблется здесь от 50–60 м в конце разломной зоны на северо-востоке до 170–200 метров в ее конце на юго-западе. Простирание средней части разлома около вулкана Кизимен соответствует примерно 240°. Среднее простирание нодальных плоскостей механизмов очагов в конусе 194°. Среднее простирание нодальных плоскостей механизмов очагов под вулканом Кизимен 102°.

*Таблица 1*. Сильные ВТЗ вулкана Кизимен с очагами в его постройке

| N | ДАТА | ВРЕМЯ | Координаты очагов | | | $K_{S1,2}^{\Phi 68}$ | Механизмы очагов | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Fi с.ш. | La в.д. | H, км | | STR1° | DIP1° | RAKE1° |
| 1 | 10.03.2010 | 14:28:40.8 | 55.11 | 160.40 | −1.9 | 10.0 | 294 | 64 | 108 |
| 2 | 28.03.2010 | 05:02:24.8 | 55.17 | 160.35 | −2.2 | 9.4 | 46 | 55 | −103 |
| 3 | 03.04.2010 | 01:12:25.1 | 55.15 | 160.35 | −1.0 | 9.3 | 124 | 56 | 94 |
| 4 | 23.04.2010 | 04:54:12.0 | 55.18 | 160.42 | −2.1 | 9.4 | 342 | 61 | 172 |
| 5 | 23.04.2010 | 10:43:15.7 | 55.16 | 160.46 | 0.3 | 10.3 | 23 | 51 | −151 |
| 6 | 30.04.2010 | 16:14:05.1 | 55.11 | 160.21 | −1.8 | 9.3 | 352 | 60 | 120 |
| 7 | 22.06.2010 | 07:53:19.1 | 55.13 | 160.35 | −0.1 | 10.2 | 45 | 71 | 158 |
| 8 | 17.07.2010 | 02:57:08.2 | 55.12 | 160.33 | 0.7 | 9.5 | 161 | 58 | −167 |
| 9 | 17.07.2010 | 02:32:03.7 | 55.14 | 160.34 | −1.6 | 9.8 | 264 | 59 | 164 |
| 10 | 20.07.2010 | 13:52:37.6 | 55.12 | 160.38 | 0.5 | 9.3 | 298 | 57 | −124 |
| 11 | 20.07.2010 | 13:54:14.7 | 55.11 | 160.41 | −2.2 | 10.3 | 189 | 65 | 108 |

*Примечание: STR – простирание нодальной плоскости, DIP – падение нодальной плоскости, RAKE – направление движение по плоскости разлома.*

*Таблица 2*. Сильные ВТЗ вулкана Кизимен с очагами под фундаментом

| N | ДАТА | ВРЕМЯ | Координаты очагов | | | $K_{S1,2}^{\Phi 68}$ | Механизмы очагов | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Fi, с.ш. | La, в.д. | H, км | | STR1° | DIP1° | RAKE1° |
| 1 | 17.08.2009 | 03:53:05.6 | 55.15 | 160.36 | 4.1 | 9.9 | 37 | 64 | −153 |
| 2 | 15.09.2009 | 19:04:05.9 | 55.13 | 160.49 | 4.1 | 10.3 | 17 | 64 | −158 |
| 3 | 03.10.2009 | 22:41:01.4 | 55.02 | 160.08 | 5.0 | 9.0 | 22 | 72 | −138 |
| 4 | 09.10.2009 | 16:45:19.7 | 55.16 | 160.32 | 5.0 | 8.9 | 187 | 55 | 172 |
| 5 | 09.10.2009 | 16:48:38.4 | 55.15 | 160.35 | 5.0 | 9.3 | 197 | 60 | −163 |
| 6 | 10.01.2010 | 08:50:04.7 | 55.17 | 160.39 | 6.1 | 9.8 | 34 | 64 | −168 |
| 7 | 19.01.2010 | 21:15:50.2 | 55.16 | 160.36 | 6.1 | 9.1 | 26 | 65 | −149 |
| 8 | 08.03.2010 | 08:27:31.1 | 55.14 | 160.47 | 6.0 | 9.2 | 39 | 65 | −157 |
| 9 | 25.09.2010 | 22:31:02.0 | 55.17 | 160.51 | 4.0 | 9.1 | 224 | 53 | 121 |
| 10 | 09.10.2010 | 10:06:07.3 | 55.15 | 160.34 | 3.8 | 11.2 | 28 | 58 | −163 |
| 11 | 03.11.2010 | 03:55:53.1 | 55.11 | 160.21 | 5.6 | 9.3 | 193 | 76 | 175 |
| 12 | 16.11.2010 | 23:14:06.6 | 55.15 | 160.35 | 3.9 | 10.7 | 77 | 53 | −151 |
| 13 | 27.11.2010 | 18:57:33.3 | 55.10 | 160.47 | 5.5 | 10.4 | 41 | 39 | −104 |
| 14 | 27.11.2010 | 19:29:36.0 | 55.15 | 160.36 | 7.5 | 11.9 | 303 | 69 | −159 |
| 15 | 20.03.2011 | 22:44:41.1 | 55.05 | 160.32 | 5.7 | 9.7 | 112 | 72 | 147 |

*Примечание: STR – простирание нодальной плоскости, DIP – падение нодальной плоскости, RAKE – направление движение по плоскости разлома.*

В работе [8] обнаружена трещина, проходящая через вершину вулкана Кизимен, простирание которой составляет 290° на северо-запад. Размер трещины всего около 300 м. Трещина предположительно определена по заснеженной поверхности северной стенки кратера, в интервале высот от 2317 до 2339 м, по четкому ряду отверстий, ориентированных в направлении восток-запад.

**Выводы**

В работе выполнено решение механизмов очага сильных ВТЗ с $K_{S1,2}^{\Phi 68} > 9.0$, которые произошли в период извержения вулкана Кизимен. Так же выполнено сопоставление нодальных плоскостей механизмов очагов сильных ВТЗ с простирание разломов в районе Щапинского грабена. В целом можно отметить, что простирание нодальных плоскостей механизмов очагов вулкана Кизимен коррелируются с геологическими разломами в этом районе.

*Исследование выполнено по теме FWME-2024-007 Института Вулканологии и Сейсмологии ДВО РАН.*

*Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».*

**Список литературы**

1. *Пийп Б.И.* Вулкан Кизимен / *Б.И. Пийп* // Бюллетень вулканологическойстанции на Камчатке. 1946. № 13. С. 22–32.

2. *Сенюков С.Л.* Сейсмичность вулкана Кизимен / *С.Л. Сенюков, И.Н. Нуждина, С.Я. Дрознина и др.* // Труды третьей научно – технической конференции Проблемы комплексного геофизического мониторинга. 2010. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН. С. 144–148.

3. *Горшков Г.С.* Вулканическое дрожание, связанное с прорывом кратера Былинкиной / *Г.С. Горшков* // Бюллетень вулканологической станции М.: Академия наук СССР. 1954. № 23. С. 33–37.

4. *Федотов С.А.* Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд / *С.А. Федотов*. М.: Наука. 1972. 116 с.

5. *Чеброва А.Ю.* Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции/ *А.Ю. Чеброва, А.С. Чемарев, Е.А. Матвеенко и др.* // Геофизические исследования. 2020. том 21. № 3. С. 66–91. DOI: 10.21455/gr2020.3-5

6. *Введенская А.В.* Определение полей смещений при землетрясениях с помощью теории дислокаций / *А.В. Введенская* // Известия АН СССР. Серия геофизическая. 1956. № 3. С. 34-47.

7. *Reasenberg P.* FPFIT, FPPLOT and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions / *P. Reasenberg, D. Oppenheine* // U.S. Geological SurveyOpen-File Report. 1985.

8. *Двигало В.Н.* Извержение 2010-2012 гг. вулкана Кизимен – самое продуктивное (по данным дистанционных наблюдений) на Камчатке в начале века. Часть I. Этап 11.11.2010. 11.12.2011. / *В.Н. Двигало, И.В. Мелекесцев, А.В. Шевченко и др.* // Вулканология и сейсмология. 2013. № 6. С. 3–21.