

РАЗДЕЛ III. АКТИВНЫЕ РАЗЛОМЫ И СЕЙСМИЧНОСТЬ В ГЕОФЛЮИДНЫХ СИСТЕМАХ

CHAPTER III. ACTIVE FAULTS AND SEISMICITY IN GEOFLUID SYSTEMS

УДК 550. 344.43

Сопоставление механизмов очагов вулкано-тектонических землетрясений вулканов Шивелуч и Ключевской

М.В. Лемзиков

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

В работе выполнено определение механизмов очагов сильных вулкано-тектонических землетрясений (ВТЗ) двух вулканов Камчатки Шивелуч и Ключевской и сопоставление полученных результатов. Исходными данными были цифровые сейсмограммы волновых форм не ниже седьмого энергетического класса с глубиной очага от нуля до 20 км. Механизмы очагов определялись по полярностям первых вступлений Р-волн с помощью разработанного пакета программ FPFIT. В результате получены различные механизмы очагов сильных ВТЗ вулканов Шивелуч и Ключевской, которые отражают режимы вулканической активности этих вулканов.

Ключевые слова: механизмы очагов, нодальные плоскости, сейсмические волны

Comparison of the Focal Mechanisms of the Volcano-Tectonic Earthquakes of the Volcanoes Shiveluch and Klyuchevskoy

Michail V. Lemzikov

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

The paper defines the focal mechanisms of strong volcano-tectonic earthquakes (VTEQs) of two Kamchatka volcanoes Shiveluch and Klyuchevskoy and compares the obtained results. The initial data were digital seismograms of wave forms not lower than the seventh energy class with a focal depth from zero to 20 km. Focal mechanisms were determined by the polarities of the first arrivals of P-waves using the developed FPFIT software package. As a result, various focal mechanisms of strong VTEQs of the Shiveluch and Klyuchevskoy volcanoes were obtained, which reflect the volcanic activity modes of these volcanoes.

Keywords: focal mechanisms, nodal planes, seismic waves

Введение

Самая Крупная на Камчатке Северная группа вулканов, площадь которой составляет 8500 м², расположена в Центральной Камчатской депрессии. Большая часть этой площади (около 6500 м²) занимает Ключевская группа вулканов. (*Мелекесцев и др., 1991*)

Шивелуч – одно из крупнейших вулканических сооружений Камчатки. Поперечник его основания, включая пояс аккумулятивных равнин подножий вулкана, равен 45-50 км, площадь не менее 1300 м². Абсолютная высота 3283 м (Главная вершина), высшая точка действующего аппарата (Молодой Шивелуч) около 2800 м. Это одно из крупнейших вулканических сооружений Камчатки. Современная постройка вулкана Шивелуч включает три главных элемента: Старый Шивелуч, древнюю кальдеру и активный Молодой Шивелуч (*Мелекесцев и др., 1991*).

Ключевской вулкан – типичный стратовулкан с конусом правильной формы и абсолютной высотой 4750 м., самый высокий из действующих вулканов Европы и Азии; сложен базальтовыми лавовыми потоками и пирокластическим материалом, преобладающим

в верхней части постройки (Хренов и др., 1991). Удачное расположение Ключевской и Козыревской радиотелеметрических сейсмических сетей вблизи на конусе и вокруг Северной группы вулканов позволит определить механизмы очагов сильных ВТЗ этих вулканов.

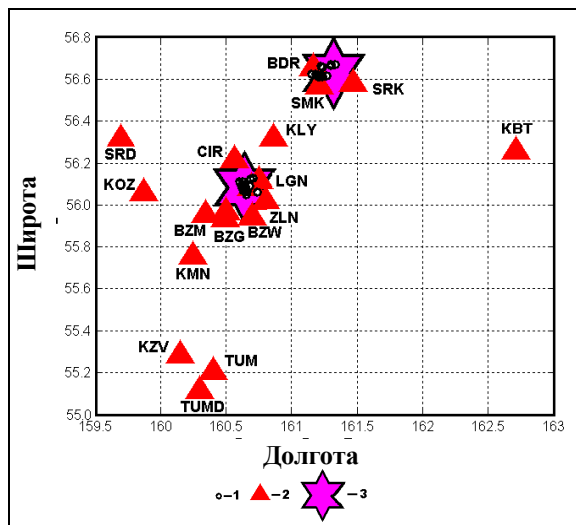


Рисунок 1 – Схема района исследования.
 1 – эпицентры сильных (ВТЗ);
 2 – радиотелеметрические сейсмические станции;
 3 – вулканы Шивелуч и Ключевской

(KLY), Безымянный (BZM), Безымянный Грива (BZG), Безымянный Запад (BZW), Срединный (SRD), Зеленая (ZLN), Киришева (KIR), Козыревск (KOZ), Каменистая (KMN), Крутоберегово (KBT), Кизимен (KZV), Тумрок (TUM), Тумрок-источники (TUMD) (рис. 1).

На всех радиотелеметрических сейсмических станциях установлен трехкомпонентный короткопериодный канал для регистрации скорости смещений грунта: один вертикальный (SHZ) и два горизонтальных (SHE, SHN).

Метод

Имеются разные методы для определения механизмов очагов землетрясений. Широко известен комплекс программ под названием FPFIT, FPLOT и др., разработанный во второй половине XX века (Введенская, 1956).

В работе использован готовый разработанный алгоритм программы FPFIT вместе с некоторыми новейшими алгоритмами (Reasenberg et. all, 1985), детализирующими и уточняющими нахождение параметров механизмов очагов землетрясений. Для такого рода событий можно применить только метод, основанный на определении полярностей первых вступлений *P*-волн.

Для определения механизма очага землетрясения необходимы: 1) полярности первых вступления *P*-волн; 2) географические координаты станций и очага; 3) эпицентральные расстояния и азимуты из очага на станции; 4) углы выхода сейсмических волн на станциях. Точность определения механизма очага зависит от количества станций. Чем больше станций, тем выше класс точности. Вычисления углов выхода сейсмических волн на станциях выполнялись с использованием скоростной модели среды (Сенюков, 2013), которая применяется на Камчатке для определения географических координат очагов землетрясений и включает слои выше уровня моря. Учет вертикальных и горизонтальных особенностей скоростной модели при конкретном положении очага землетрясения и станции выполнялся за счет разбиения среды на мелкие горизонтальные блоки с конкретными значениями скоростей сейсмических волн.

Исходные данные

В работе использовались волновые формы сейсмических сигналов сильных ВТЗ вулканов Шивелуч и Ключевской. Они выбирались из архива цифровых сейсмограмм (Чеброва, и др. 2020). Глубина очагов от 1 до 20 км. Энергетический класс не ниже $K_{S1,2}^{68} \geq 7.0$ (Федотов, 1972).

Термин ВТЗ впервые был введен Г.С. Горшковым (Горшков, 1954).

Регистрация ВТЗ вулканов Шивелуч и Ключевского осуществляется Ключевской и Козыревской радиотелеметрическими сейсмическими сетями станций, принадлежащих КФ ФИЦ ЕГС РАН. Данные станции расположены на конусе, вблизи и в окрестностях вулканов Северной группы: Байдарная (BDR), Семкарок (SMK), Сорокина (SRK), Цирк (CIR), Логинов (LGN), Крестовский (KRS), Ключи (KLY), Безымянный (BZM), Безымянный Грива (BZG), Безымянный Запад (BZW), Срединный (SRD), Зеленая (ZLN), Киришева (KIR), Козыревск (KOZ), Каменистая (KMN), Крутоберегово (KBT), Кизимен (KZV), Тумрок (TUM), Тумрок-источники (TUMD) (рис. 1).

Механизмы очагов ВТЗ вулканов Шивелуч и Ключевской

В результате использования пакета программ FPFIT были получены 15 механизмов очагов ВТЗ вулкана Шивелуч (табл. 1) и 22 механизма очага ВТЗ вулкана Ключевской (табл. 2). Механизмы очагов соответствуют различным типам сдвиговых разломов: сбросам и взбросам. Механизмы очагов строились на стереографической сетке Вульфа (нижняя полусфера). Следует отметить, что не все сейсмические сигналы вулканов Шивелуч и Ключевской подходят для определения механизма очага. На некоторых волновых формах сейсмические сигналы были едва видны на фоне шума. Для определения механизма очага ВТЗ использовались только такие волновые формы, у которых сейсмические сигналы представляют четкие вступления *P*-волн на фоне шума.

Таблица 1. Механизмы очагов ВТЗ вулкана Шивелуч

№	ДАТА	TIME(UTC)	КООРДИНАТЫ ОЧАГА			К	МЕХАНИЗМЫ ОЧАГОВ		
			φ с.ш.	λ в.д.	Н км		STR	DIP	RAKE
1	2008/04/24	07:57:40.34	56.618	161.271	3.1	7.0	213.58	54.83	-123.50
2	2009/04/03	19:10:45.03	56.673	161.334	6.6	8.1	312.94	62.02	-153.04
3	2009/05/16	09:32:03.50	56.667	161.305	5.7	7.8	59.2	64.99	-142.39
4	2011/05/31	03:14:26.07	56.612	161.236	0.9	7.0	247.13	57.62	-175.91
5	2014/10/15	02:16:20.40	56.670	161.300	1.2	8.6	29.87	63.63	-144.70
6	2023/04/29	23:19:10.10	56.657	161.240	3.0	9.4	337.47	62.06	-149.39
7	2023/04/30	01:14:15.02	56.663	161.222	2.8	9.0	204.12	68.20	171.72
8	2023/04/30	06:16:56.82	56.619	161.214	2.3	8.1	359.85	66.02	160.43
9	2023/05/01	00:32:52.07	56.615	161.202	2.9	8.2	131.96	67.60	157.23
10	2023/05/01	02:32:51.04	56.626	161.183	20.2	7.8	16.02	58.00	-143.55
11	2023/05/02	00:48:12.01	56.615	161.218	20.8	8.4	233.20	65.83	-178.56
12	2023/05/03	03:45:10.20	56.616	161.230	21.9	8.6	239.32	63.21	-163.51
13	2023/05/08	18:38:54.01	56.620	161.221	22.8	8.5	297.98	55.15	-146.89
14	2023/08/16	06:03:05.48	56.625	161.156	20.2	8.6	0.32	59.12	-159.62
15	2023/08/25	11:41:42.60	56.622	161.183	21.8	8.2	21.46	64.30	-160.63

Таблица 2. Механизмы очагов ВТЗ вулкана Ключевской

№	ДАТА	TIME(UTC)	КООРДИНАТЫ ОЧАГА			К	МЕХАНИЗМЫ ОЧАГОВ		
			φ с.ш.	λ в.д.	Н км		STR	DIP	RAKE
1	2008/04/19	11:29:07.34	56.061	160.736	2.2	6.8	52.75	73.03	136.10
2	2008/05/08	23:39:52.03	56.051	160.655	8.5	7.0	61.67	67.42	128.79
3	2008/07/04	06:02:16.50	56.093	160.643	16.2	6.9	73.68	73.25	-108.52
4	2008/07/30	20:15:29.10	56.066	160.650	5.6	7.1	31.66	62.63	-115.23
5	2008/08/10	22:37:29.02	56.067	160.645	10.8	8.2	333.88	48.40	-134.25
6	2008/08/29	06:27:07.82	56.061	160.648	11.6	8.3	264.56	61.22	-143.27
7	2009/11/30	12:43:29.07	56.112	160.599	11.4	7.2	10.13	57.74	-166.73
8	2011/02/22	00:37:23.04	56.085	160.644	15.4	8.4	336.50	53.45	-172.26
9	2012/08/04	14:46:32.01	56.127	160.708	19.7	6.8	60.10	62.68	-153.82
10	2012/12/03	04:08:21.20	56.111	160.631	13.9	6.7	230.58	50.92	165.51
11	2012/12/06	17:32:02.01	56.072	160.629	3.8	7.1	290.22	56.84	-175.52
12	2013/02/27	19:31:58.48	56.073	160.635	5.3	6.8	84.62	55.40	176.29
13	2013/03/10	18:28:02.20	56.077	160.630	3.4	6.8	79.77	59.20	-169.64
14	2013/03/12	06:39:01.60	56.076	160.631	3.3	7.4	10.40	50.67	-178.91
15	2013/03/29	22:38:20.40	56.066	160.659	3.6	6.8	125.61	72.23	-118.23
16	2013/04/05	09:15:48.61	56.074	160.634	4.1	7.9	336.62	59.11	-150.30
17	2020/09/15	05:55:09.54	56.074	160.638	2.9	7.7	46.62	61.39	-116.64
18	2020/09/15	21:31:11.93	56.070	160.636	5.6	6.9	124.46	47.55	-107.84
19	2020/01/16	09:04:51.90	56.073	160.643	2.7	8.1	10.73	53.71	-124.68
20	2020/11/11	08:45:45.93	56.124	160.683	20.2	7.7	55.21	59.70	-135.93
21	2021/02/09	11:12:40.30	56.090	160.679	19.3	8.4	16.08	59.16	-179.45
22	2021/09/02	15:11:50.09	56.090	160.614	24.5	6.8	74.97	60.67	-140.55

Механизмы очагов ВТЗ вулкана Шивелуч отличаются от механизмов очагов ВТЗ вулкана Ключевской, в связи с различным режимом вулканической активности этих вулканов.

Механизм очага характеризуется тремя основными параметрами: а) азимут простирания главной нодальной плоскости (strike); б) угол падения плоскости (dip) и в) угол скольжения плоскости (rake). Оценки параметра (rake) определяют тип подвижка в очаге ВТЗ (сброс, взброс или сдвиг). Для выбора из двух механизмов ВТЗ наиболее вероятного, параметры механизмов очагов ВТЗ сопоставлялись с характеристиками даек, выявленными Frac-Digger методом (Kiryukhin et al, 2023).

Выводы

В работе выполнено определение механизмов очагов ВТЗ вулканов Шивелуч и Ключевской. Получены различные механизмы очагов, которые отражают режимы их вулканической активности.

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».

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00127, <https://rscf.ru/project/23-27-00127>.

Список литературы

1. 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.
2. 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.
3. Мелекесцев И.В. Вулкан Шивелуч / И.В. Мелекесцев, О.Н. Вольнец, В.А. Ермаков и др. // Действующие вулканы Камчатки: В 2-х т. Отв. ред. С.А. Федотов, Ю.П. Масуренков. М.: Наука. 1991. Т1. С.84-97.
4. Сеньюков С.Л. Прогноз извержений вулканов Ключевской и Безымянный на Камчатке / С.Л. Сеньюков // Lap Lambert Academic Publishing. 2013. 144 с.
5. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд / С.А. Федотов // М.: Наука. 1972. 116 с.
6. Хренов А.П. Вулкан Ключевской / А.П. Хренов, В.Н. Двигало, И.Т. Курсанов и др. // Действующие вулканы Камчатки: В 2-х т. Отв. ред. С.А. Федотов, Ю.П. Масуренков. М.: Наука. 1991. Т1 С. 106-145.
7. 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. Чемарёв, Е.А. Матвеев и др. // Геофизические исследования. 2020. том 21. № 3. С. 66–91. DOI: <https://doi.org/10.21455/gr2020.3-5>
8. Reasenber P. FPFIT, FPLOT and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions / P. Reasenber, D. Oppenheimer // U.S. Geological Survey Open-File Report. 1985. № 85–739. 109 p.
9. Kiryukhin A.V. Magmatic activity of Klyuchevskoy volcano triggering eruptions of Bezymianny volcano based on seismological and petrological data / A.V. Kiryukhin, O.V. Bergal-Kuvikas, M.V. Lemzikov // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2023. Vol. 442. P. 107892. – DOI 10.1016/j.jvolgeores.2023.107892.
10. Kiryukhin A.V. Magmatic system of the Klyuchevskoy volcano according to seismic data and their geomechanical interpretation / A.V. Kiryukhin, O.V. Bergal-Kuvikas, M.V. Lemzikov, N.B. Zhuravlev / Journal of Mining Institute. 2023. Vol. 263. 698-714 p.