

УДК 550.344.43

## МЕХАНИЗМЫ ОЧАГОВ ВУЛКАНО-ТЕКТОНИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ВУЛКАНА КЛЮЧЕВСКОЙ

*Лемзиков М.В.*

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

### **Введение**

Вулкан Ключевской самый высокий, активный мощный базальтовый вулкан с абсолютной высотой 4750 м является действующим, тип извержений - эффузивно-эксплозивный, расположен в Ключевской группе вулканов на полуострове Камчатка. Диаметр вершинного кратера, венчающего конус, составляет около 700 м.

Постройка вулкана Ключевской сложена из изверженного магматического вещества, преобразовавшегося на поверхности в пеплы, шлаки, лавовые потоки и вулканические бомбы. В постройке вулкана пепловые и шлаковые слои сложно перемежаются с интрузивными телами и погребенными лавовыми потоками. Кроме того, вблизи системы магматический очаг – выводной канал имеется масса неоднородностей связанных с поступлением из глубин свежих порций магмы, которые создают зоны с повышенной температурой, отличающиеся от окружающих пород вязко – упругими свойствами, что в значительной мере влияет на распространения сейсмических волн. Поэтому, в зависимости от активности вулкана геометрические размеры различных неоднородностей могут существенно изменяться, как во времени, так и в пространстве.

Современный конус самого активного вулкана Евразии – Ключевской, особенно его привершинная часть, изрезан барранкосами. В западном, северо-западном и юго-восточном секторах конус осложнен желобами, расширяющимися к вершине. Терминальные извержения происходят в кратере вулкана с максимальным диаметром 700 м, который в процессе извержений изменяет, как свою морфологию, так и размеры [6].

Сложная мозаичная структура фундамента образовалась в результате воздействия региональных тектонических сил, возникших благодаря расположению района вблизи стыка двух структур – Камчатской вулканической зоны и Алеутской дуги.

Средний расход магмы 60 млн. тонн в год составляет половину ювенильных продуктов извержений всего Курило-Камчатского региона. Для эруптивной деятельности вулкана характерны вершинные и побочные извержения. Вершинные извержения обычно более продолжительные и имеют главным образом эксплозивный или эксплозивно-эффузивный характер.

В течение 2000–2010 гг. на Ключевском произошло 5 продолжительных извержений в центральном кратере с мощными пепловыми выбросами и излияниями лавовых потоков, побочных прорывов при этом не зафиксировано.

В течение последнего извержения вулкана Ключевской произошло несколько десятков вулcano-тектонических землетрясений с  $M > 3.0$ , для определения механизмов очагов которых можно использовать почти 15 местных сейсмических станций.

Вулканические землетрясения являются результатами сил связанных с движением в вулканическом канале магмы, лавы, пепла, газа и пара. Есть вулканические землетрясения, которые являются результатом хрупкого разрушения горных пород в конусе или под вулканом. Они имеют четкие вступления продольных и поперечных сейсмических волн подобно тектоническим землетрясениям и называются «вулканотектоническими» (ВТ) [4].

Вулканические землетрясения вулкана Ключевской происходят роями и пространственно приурочены к строго определенным зонам. Взрывные вулканические землетрясения происходят главным образом в конусе, а вулcano-тектонические – под вулканом на глубинах 5 и 30 км.

Вокруг вулкана Ключевской и вблизи него удачно были установлены сейсмические станции, что позволяет определять механизмы очагов вулcano-тектонических землетрясений этого вулкана.

Механизмы очагов сильных землетрясений ( $M > 7.0$ ) могут дать два решения для простираения подвижки, которые сопоставляются с геодезическими и геологическими наблюдениями. Исследование механизмов очагов вулканических землетрясений позволяет сопоставить вулканический процесс с изменением напряжения в вулканической среде.

В данной работе поставлена цель определить механизмы очагов вулcano-тектонических землетрясений вулкана Ключевской, и сопоставить результаты с геологическими данными и особенностями расположения эпицентров землетрясений.

### Исходные данные

Использовались волновые формы вулcano-тектонических землетрясений вулкана Ключевской, с очагами под ним на глубинах до 20 км. Они выбирались из архива хранения цифровых сейсмограмм за период 2012-2013 гг. Не ниже седьмого энергетического класса  $K_{S1,2}^{\Phi 68} = 7.0$ . [4].

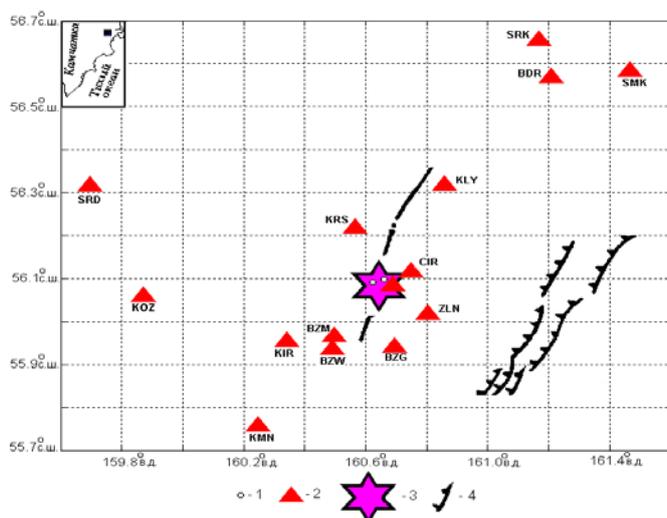


Рис. 1. Карта района исследования. На вкладке черным квадратом показано расположение исследуемого района на карте Камчатки. 1 – эпицентры вулcano-тектонических землетрясений вулкана Ключевской используемые в работе; 2 – радиотелеметрические сейсмические станции; 3 – вершина вулкана Ключевской; 4 – разломы [2].

конусе, вблизи и в окрестностях вулкана Ключевской: Байдарная (BDR), Семзарок (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), Козеревск (KOZ), Каменистая (KMN) (рис. 1).

В работе использованы вулcano-тектонические землетрясения вулкана Ключевской (они имеют четкие вступления Р и S сейсмических волн), которые относятся к I типу вулканических землетрясений по классификации П.И. Токарева [3]. (Рис.2).

На всех станциях установлен трехкомпонентный короткопериодный канал для регистрации скорости смещений грунта: один вертикальный (SHZ) и два горизонтальных (SHE, SHN), и дополнительно еще одна вертикальная компонента для регистрации скорости смещений грунта с повышенным уровнем чувствительности (EHZ).

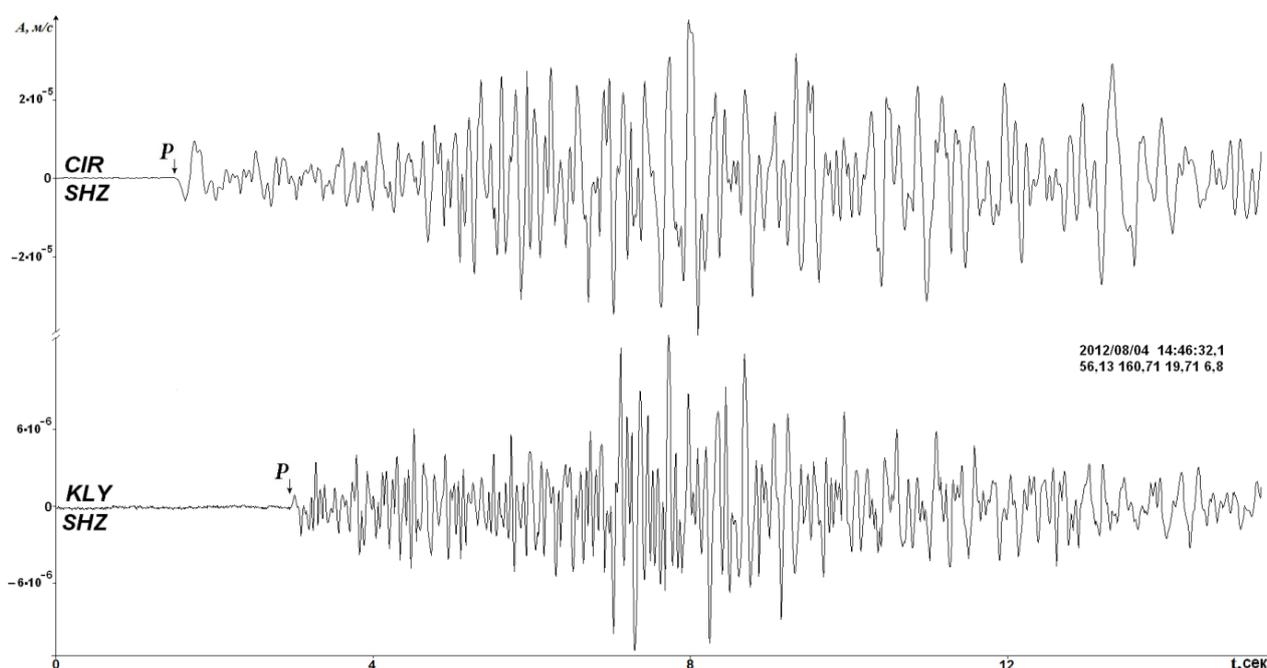


Рис. 2. Примеры волновых форм вулcano-тектонических землетрясений вулкана Ключевской, зарегистрированные вертикальными сейсмическими каналам станциями Цирк (CIR) и Ключи (KLY).

## Метод

Имеются разные методы для определения механизмов очагов землетрясений. Широко известен комплекс программ под названием FPFIT, FPLOT и др. [5], разработанный во второй половине XX века по идеям работы [1]. Алгоритмы, инструкции, описание и тексты этих программ доступны для специалистов на различных сайтах (например: <http://www.usgs.gov/>).

В работе использован алгоритм программы FPFIT вместе с некоторыми новейшими алгоритмами [6], детализирующими и уточняющими нахождение параметров механизмов очагов землетрясений. На этой основе создан комплекс программ для нахождения и построения механизмов очагов вулcano-тектонических землетрясений. Для такого рода событий можно применить только метод, основанный на определении знаков первых вступлений Р-волн (рис. 2).

Для определения механизма очага землетрясения необходимы: 1) знаки первых вступления Р-волн; 2) географические координаты станций и очага; 3) эпицентральные расстояния и азимуты из очага на станции; 4) углы выхода сейсмических волн на станциях. Все эти измерения влияют на точность определения механизма очага. Влияние их при количестве станций 15 и более может быть минимизировано. Вычисления углов выхода сейсмических волн на станциях выполнялись с использованием скоростной модели среды, 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.

## Результаты

Извержение вулкана начинается с момента подъема магмы, вызванного воздействием различных вулканических сил, а характер движения магмы к земной поверхности зависит, главным образом, от ее химического состава, вязкости и от степени насыщенности газами.

Использование ВТ землетрясений обосновано тем, что извержению вулкана иногда происходят сдвиговые подвижки горных пород. Теоретически для определения параметров механизма очага по методу поляризации, используя первые вступления сейсмических волн землетрясений, можно использовать кроме знаков первых вступлений Р-волн, еще и знаки вступлений и других типов волн. Однако, как видно на приведенном примере (рис. 5), первые вступления Р-волн ВТ землетрясений вулкана Кизимен выделяются уверенно на вертикальных сейсмических каналах, а остальные плохо выделяются на фоне вступлений предыдущих волн на сейсмограммах с короткими гипоцентрными расстояниями. Поэтому для построения механизмов очагов ВТ землетрясений вулкана Кизимен использованы только знаки первых вступлений Р-волн на вертикальных сейсмических каналах.

Квадрантное распределение знаков первых вступлений сейсмических волн наблюдается при подавляющем большинстве землетрясений и свидетельствует о том, что разрядка энергии в деформированной среде происходит, главным образом, за счет сдвиговых напряжений. Использование вулcano-тектонических землетрясений обосновано тем, что во время извержения вулкана иногда происходят сдвиговые подвижки горных пород. Теоретически для определения параметров механизма очага по методу поляризации, используя первые вступления сейсмических волн землетрясений, можно использовать кроме знаков первых вступлений Р-волн, еще и знаки вступлений и других типов волн. Однако, как видно на приведенном примере (рис. 2), первые вступления Р-волн вулcano-тектонических землетрясений вулкана Ключевской выделяются уверенно на вертикальных сейсмических каналах, а остальные плохо выделяются на фоне вступлений предыдущих волн на сейсмограммах с короткими гипоцентрными расстояниями. Поэтому для построения механизмов очагов вулcano-тектонических землетрясений вулкана Ключевской использованы только знаки первых вступлений Р-волн на вертикальных сейсмических каналах.

Необходимые для расчета механизмов очагов землетрясений эпицентральные расстояния, азимуты из очага на станции и углы выхода сейсмических волн на станциях вычислялись с использованием скоростной модели среды, которая применяется для определения координат очагов вулканических землетрясений северной группы Камчатских вулканов [3]. Этот этап определения механизмов очагов землетрясений самый сложный, так как скоростная модель среды и ее поглощающие свойства принимается, как указано, средняя по региону. Ее соответствие с истинной моделью среды, по которой необходимо произвести вычисления, не всегда совпадает. Ошибки определения эпицентральных расстояний, азимутов и углов выхода сейсмических волн на станциях, которые неизбежны при использовании средней скоростной модели среды и ее поглощающих

свойств, представляют основные проблемы при определении механизмов очагов. Они влияют при использовании любого метода для вычисления механизмов очагов землетрясений. Определение нескольких механизмов очагов по данным роя землетрясений, а это почти всегда возможно в случае извержения вулкана, позволит определить истинный механизм очага.

Параметры главных нодальных плоскостей механизмов очагов вулкано-тектонических землетрясений вулкана Ключевской, получены по данным более 15 региональных сейсмических станций (рис. 3б). Азимуты простираний главных нодальных плоскостей механизмов очагов этих землетрясений приведены на рис. 6.

Но эти оба направления характеризуют азимуты простирания эпицентров не только ВТ, но и всех вулканических землетрясений вулкана Кизимен. Имеются и другие простирания главных нодальных плоскостей механизмов очагов относительно сильных ВТ землетрясений, но они в отличие от указанных средних направлений единичны (рис. 6). Простирания главных нодальных плоскостей механизмов очагов ВТ землетрясений поддерживает результат, полученный в о выжимании дайки северо-восточного направления длиной 12 км, рассчитанного интерферометрическим методом по спутниковым снимкам.

Удачное расположение сейсмических станций на конусе, вблизи и в окрестностях вулкана Ключевской, позволило определить механизмы очагов вулкано-тектонических землетрясений этого вулкана. Следует отметить, что не все волновые формы вулкано-тектонические землетрясения вулкана Ключевской подходят для определения механизма очага. На некоторых записях вулкано-тектонических землетрясений волновые формы едва видны на фоне помех. Поэтому использовались только такие записи вулкано-тектонических землетрясений, у которых волновые формы имеют четкие вступления Р-волн на фоне помех. В результате были получены параметры механизмов очагов вулкано-тектонических землетрясений вулкана Ключевской: а) азимут простирания плоскости (strike); б) угол падения плоскости (dip); в) угол скольжения плоскости (rake). Вторую нодальную плоскость, которая получается в результате вычислений, можно то же принять за главную нодальную плоскость.

Теоретический расчет механизма очага можно проверить сравнением его с геологическими исследованиями разлома на местности. Возможно также сравнение результата с известными картами разломов и с картами расположения эпицентров землетрясений. Такие же контрольные проверки возможны и для вулканических землетрясений.

Особенности пространственного положения эпицентров землетрясений и разломов, так или иначе, характеризует механизмы их очагов. Этот факт также относится к пространственному положению разломов и эпицентров вулканических землетрясений.

Параметры механизмов очагов вулкано-тектонических землетрясений вулкана Ключевской, полученные в данной работе, сравнивались с особенностями расположения разломов и эпицентров в районе Северной группы вулканов. На рис. 3 показана карта расположения эпицентров вулканических землетрясений в районе Северной группы вулканов за период 2000-2016 гг. и расположение разломов в этом районе [2].

Характерные примеры механизмов очагов вулкано-тектонических землетрясений вулкана Ключевской, полученные в данной работе показаны на рис. 3.

На рис. 3 видно, что азимут простирания главных нодальных плоскостей очагов вулкано-тектонических землетрясений совпадает с пространственным расположением эпицентров вулканических землетрясений и разломов в этой районе. И представляет собой северо-западное простирание.

Геофизические наблюдения на вулканах являются дорогостоящими и трудоемкими. Для определения механизмов очагов вулканических землетрясений необходимо не менее десятка точек регистрации, что возможно только в редких случаях. В то же время имеются группы практически одинаковых вулканических землетрясений: по местоположению очагов, по частотному составу колебаний, по времени вступления волн и т.д., которые все вместе могут предоставить надежную информацию.

Землетрясения чаще всего происходят на разломах. Геологический разлом характеризуется тремя основными компонентами: а) азимутом простиранием плоскости (strike); б) углом падением (dip), и в) углом скольжения плоскости (rake). Последнее определяется углом относительно простирания. Параметры механизмов очагов землетрясений ассоциируются с соответствующими компонентами разломов.

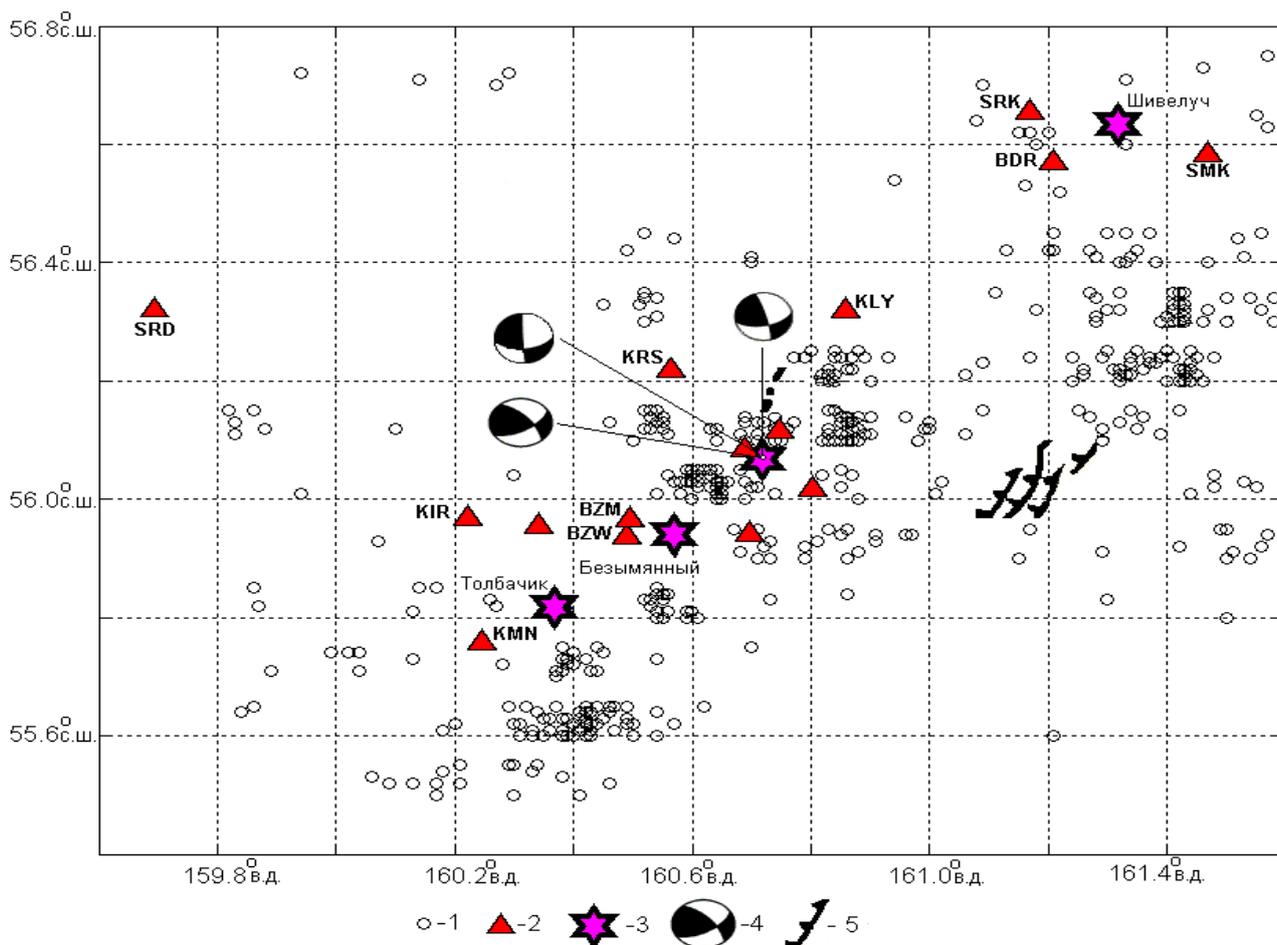


Рис. 3. Карта-схема расположения эпицентров вулканических землетрясений района Северной группы вулканов и разломов. 1 – эпицентры вулканических землетрясений; 2 – сейсмические станции; 3 – вершины вулканов; 4 – механизмы очагов вулкано-тектонических землетрясений вулкана Ключевской, 5 – разломы согласно [2].

### Выводы

На примере вулкана Ключевской опробован метод определения механизмов очагов с использованием поляризации первых вступлений Р-волн.

Получены параметры механизмов очагов вулкано-тектонических землетрясений вулкана Ключевской.

Азимут простирания главных нодальных плоскостей очагов вулкано-тектонических землетрясений в пространстве совпадает с расположением эпицентров и разломов в этом районе.

### Список литературы

1. Введенская А.В. Определение полей смещений при землетрясениях с помощью теории дислокаций. // Известия АН СССР Серия геофизическая. 1956. № 3. С. 34–47.
2. Иванов Б.В., Балеста С.Т. Глубинное строение сейсмичность и современная деятельность Ключевской группы вулканов. Владивосток, 1976. 149 с.
3. Сеньков С.Л. Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдения // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. К 25-летию Камчатской опытно-методической сейсмологической партии ГС РАН. Петропавловск-Камчатский, 2004. С. 279–291.
4. Токарев П.И. Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. 164 с.
5. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатский землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
6. Хренов А.П., Двигало В.Н., Курсанов И.Т., и др. Ключевской вулкан // Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука, 1991. № 1. С. 106–153.
7. Reasenberg P., Oppenheimer D. FPFIT, FPLOT and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions // U.S. Geological Survey Open-File Report. 1985. № 85–739. 109 p.