

## ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ СЛАБЫХ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ВУЛКАНА КИЗИМЕН

Лемзиков М.В., Лемзиков В.К.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, [lemzikov@kscnet.ru](mailto:lemzikov@kscnet.ru)

### Введение

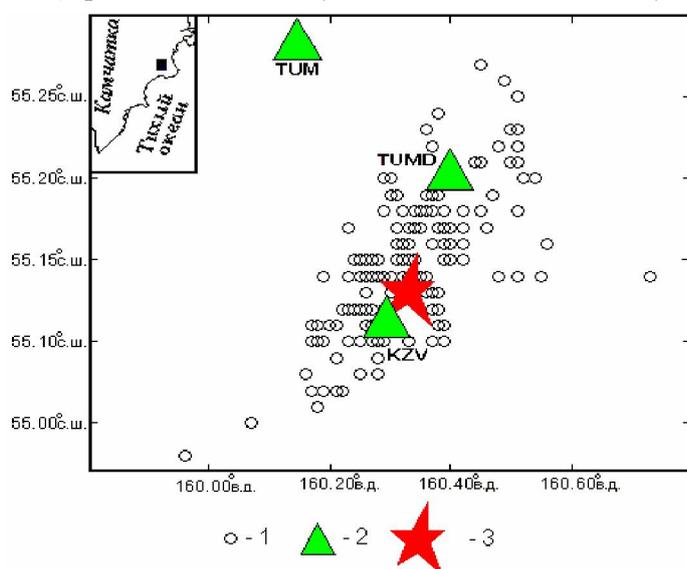
Вулкан Кизимен эффузивно-эксплозивного типа, расположен на юго-восточном борту Шапинского грабена и является действующим вулканом Центральной Камчатки депрессии. Коническая форма вулкана слабо выражена кратером в привершинной части. Склоны его покрыты чехлом пирокластических отложений, рыхлыми пирокластическими образованиями, изрезаны барранкосами, осложнены лавовыми потоками крупноглыбового характера, ледниками и рытвинами [4]. За период последних 200 лет он извергался около 10 раз. В декабре 2010 года началось очередное извержение вулкана Кизимен, которому предшествовала слабая сейсмическая подготовка [5, 8]. Только это последнее извержение вулкана было детально изучено геофизическими методами, в том числе, сейсмологическим, что позволило определить механизмы очагов слабых вулканических землетрясений района вулкана Кизимен.

Механизмы сильных землетрясений ( $M > 7.0$ ) дополнительно подтверждаются проекцией очага на дневную поверхность, а также геодезическими и геологическими наблюдениями. Однако, большое количество землетрясений, зарегистрированных местными и региональными сейсмическими сетями, являются энергетически слабыми, чтобы быть изученными с применением указанных технологий. Эти слабые землетрясения, из-за постоянного возникновения, особенно важны для характеристики регионального поля тектонических напряжений. Исследование механизмов очагов вулканических землетрясений позволяет изучить взаимодействие вулканического процесса с тектоникой региона.

Особое внимание в работе посвящено поиску возможностей повышающих точность определения механизмов очагов при использовании редкой сети сейсмических станций. С этой целью используются совместно данные нескольких слабых вулканических землетрясений для повторного определения механизмов очагов. Большинство вулканических землетрясений при извержении конкретного вулкана подобны по волновым формам и частотному составу сейсмических колебаний, так как они характеризуют один и тот же вулканический процесс. Признак подобия вулканических землетрясений является определяющим при делении их на типы.

### Исходные данные

Анализ механизмов очагов вулканических землетрясений вулкана Кизимен по календарному времени возможен только с марта 2011 года, так как с этого времени начала работать возле этого вулкана третья станция – Тумрок-источники (TUMD). Иногда использовалась станция Каменистая (KMN), расположенная на удалении около 40 км от вулкана Кизимен.

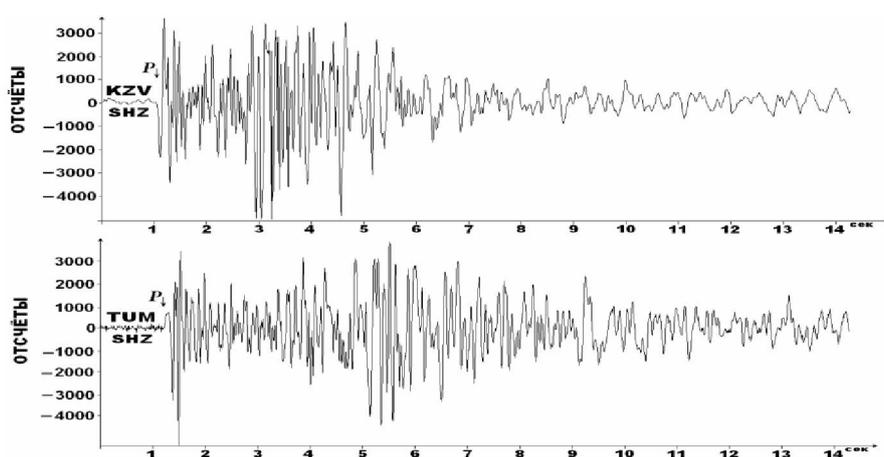


Всего было рассмотрено 197 вулканических землетрясений с энергетическим классом по С.А. Федотову [7] от  $K_{S1,2}^{\Phi 68} = 5.8$  до  $K_{S1,2}^{\Phi 68} = 6.3$  и глубиной очага 0 км за период 2011-2013 гг. Следует отметить, что рассмотренные землетрясения следует отнести к I типу (вулкано-тектонические) по классификации П.И. Токарева [6].

Рис. 1. Карта района исследования. На вкладке черным квадратом показано расположение исследуемого района на карте Камчатки. 1 – очаги слабых вулканических землетрясений вулкана Кизимен соответственно за 2011 – 2013 гг.; 2 – сейсмические станции; 3 – вершина вулкана Кизимен.

Вулканические землетрясения района вулкана Кизимен регистрировались радиотелеметрическими сейсмическими станциями Камчатского филиала Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН), установленными на склоне и вблизи вулкана Кизимен: Кизимен (KZV), Тумрок (TUM) и Тумрок-источники (TUMD) (рис. 1). На станциях KZV и TUM установлен трехкомпонентный компонент короткопериодных каналов для регистрации скорости смещений грунта: два горизонтальных (SHE, SHN) и один вертикальный (SHZ), и дополнительно установлена еще одна вертикальная компонента для регистрации скорости смещений грунта с повышенным уровнем чувствительности (EHZ). На станции TUMD установлен трехкомпонентный комплект широкополосных каналов для регистрации скорости смещений грунта: два горизонтальных (BHE, BHN) и один вертикальный (BHZ). Амплитудно-частотные характеристики каналов станции TUM имеют не только широкую частотную полосу пропускания сейсмических сигналов, но и более высокий динамический диапазон.

Согласно методике работы использовались только знаки первых вступлений *P*-волн на вертикальных каналах (SHZ и BHZ) (рис. 2). Теоретически для определения параметров механизма очага можно использовать кроме знаков первых вступлений *P*-волн, еще и *S*-, *SV*-, *SH*- и других волн. Однако, как видно на приведенном примере (см. рис. 2), уверенно выделяются только знаки первых

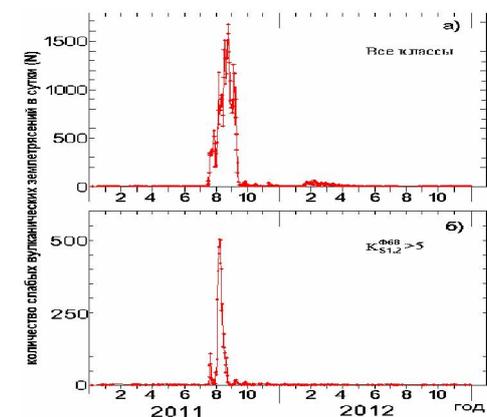


вступлений *P*-волн на вертикальных каналах всех станций.

Рис. 2. Примеры волновых форм слабых вулканических землетрясений вулкана Кизимен зарегистрированные станциями (KZV) и (TUM).

Сейсмическая активность вулкана Кизимен за период извержения изменялась достаточно интенсивно. Очень высокая сейсмическая интенсивность во время

извержения произошла в сентябре 2011 г. (рис. 3а,б). В этот период происходило в среднем более 1000 вулканических землетрясений в сутки (рис. 3а), при этом в выборке с  $K_{S1,2}^{\Phi 68} > 5$ , которая



использовались для определения механизмов очагов вулканических землетрясений, было около 200 - 400 в сутки (рис. 3б). Этот период сейсмической активности вулкана позволяет подобрать характерные для данного вулканического процесса одинаковые вулканические землетрясения.

Рис.3. Количество слабых вулканических землетрясений в сутки (N) в 2011 и 2012 годах: все классы (а);  $K_{S1,2}^{\Phi 68} > 5$  (б).

### Метод исследований

Весь опыт инструментальных сейсмологических наблюдений показывает, что независимо от глубины очага знаки первых вступлений *P*-волн проявляют квадрантное распределение возмущений сжатия и растяжения, распространяющихся из очага. Квадрантное распределение знаков первых вступлений сейсмических волн наблюдается при подавляющем большинстве тектонических землетрясений и свидетельствует о том, что разрядка энергии в деформированной среде происходит, главным образом, за счет сдвиговых напряжений [1]. Это также характерно и для вулканических землетрясений I типа [6]. В то же время вулканические землетрясения II - IV типов [6] не имеют четких вступлений *P*- и *S*-волн, что затрудняет их использование для определения механизмов очага. Метод определения механизма очага землетрясения по поляризации первых вступлений сейсмических волн широко известен и много раз описан, начиная с [2, 3].

Используемые вулканические землетрясения являются очень слабыми событиями с  $M \approx 1$ ,

поэтому для них можно применить только метод, основанный на определении поляризации первых вступлений *P*-волн (см. рис. 2). В настоящее время разработаны технологии, уточняющие процедуру определения механизмов очагов землетрясений 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 [9]. Нами использовался алгоритм известных программ FPFIT, FPLOT и др. [10], вместе с некоторыми новейшими алгоритмами, детализирующими и уточняющими нахождение параметров механизмов очагов землетрясений. На этой основе был создан комплекс программ для нахождения и построения механизмов очагов вулканических землетрясений.

Для определения механизма очага землетрясения необходимы: 1) знаки первых вступлений *P*-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. В нашем случае при количестве сейсмических станций 4-6 каждое измерение значимо, поэтому для уменьшения их влияния использовались измерения на многих подобных вулканических землетрясениях. 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 разделения среды на мелкие горизонтальные блоки с конкретными значениями скоростей сейсмических волн.

Следует отметить, что и вторую нодальную плоскость, которая получается в результате вычислений, можно принять в качестве истинного положения разлома в пространстве. Теоретический расчет механизма очага можно проверить только сравнением его с геодезическими и геологическими исследованиями разлома на местности. Возможно также сравнение результата с известными разломами и с картой эпицентров роя землетрясений. Такие же контрольные проверки возможны и для вулканических землетрясений, на основе распределения их эпицентров. Из-за слабой силы событий для получения достоверного результата лучше использовать серию вулканических землетрясений, которые содержат множество подобных событий, произошедших за короткий период времени.

Землетрясения чаще всего происходят на разломах. Геологический разлом характеризуется тремя основными компонентами: *a*) простиранием плоскости (strike), *b*) углом падения (dip), *c*) вектором подвижки при смещении (slip). Характер подвижки определяется её углом относительно простирания (rake). Если этот угол положительный, то это взброс; при отрицательном угле – сброс. Параметры механизмов очагов землетрясений ассоциируются с соответствующими компонентами разломов.

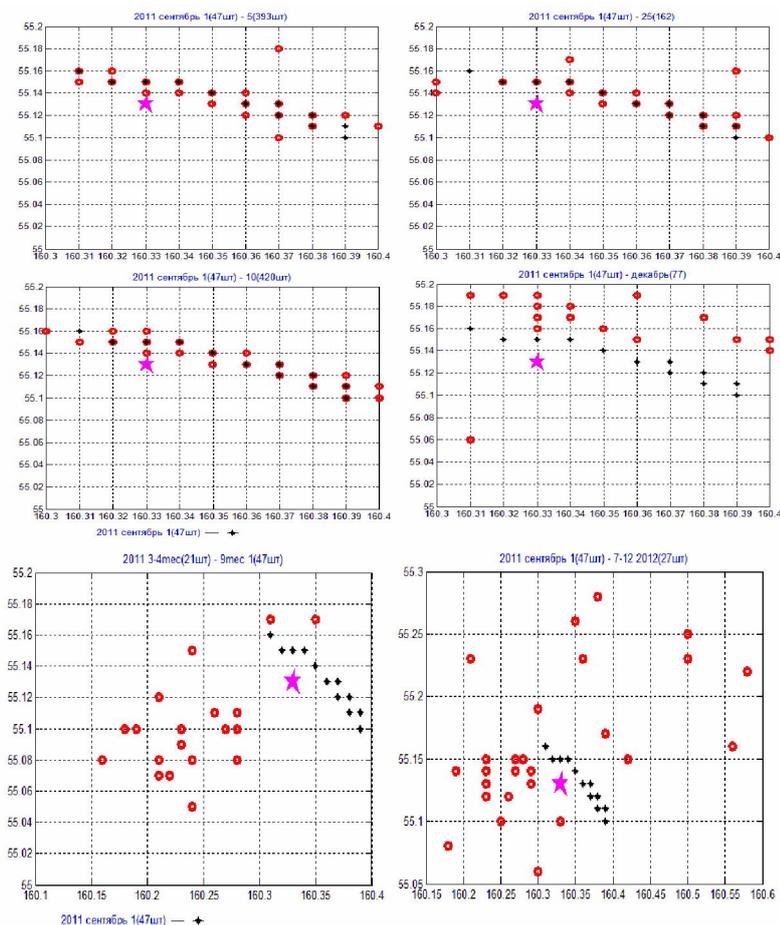
## Результаты

Пространственное положение очагов землетрясений, так или иначе, характеризует механизмы их очагов. Этот факт также относится к положению очагов вулканических землетрясений вулкана Кизимен. Ниже показаны характерные примеры пространственно-временного расположения очагов вулканических землетрясений. В качестве, так называемого «эталонного» пространственного расположения очагов выбрано их расположение в относительно наиболее интенсивном дне - 1 сентября 2011 г. С ним сравнивались расположение эпицентров по другим дням сентября 2011 г. и другим периодам за 2011 и 2012 годы.

На рис. 4а отмечается не случайное изменение в пространственно-временном расположении эпицентров вулканических землетрясений вулкана Кизимен. Оно может изменяться по азимуту примерно в  $280^{\circ}$  (субширотное направление) и примерно по азимуту в  $190^{\circ}$  (субмеридиональное направление). Эти направления могут характеризовать простирания механизмов очагов вулканических землетрясений вулкана Кизимен.

На рис. 4б эпицентры вулканических землетрясений по простиранию изменяются только по азимуту примерно в  $200^{\circ}$  (субмеридиональное направление). Таким образом, пространственное положение эпицентров вулканических землетрясений вулкана Кизимен может характеризовать механизмы очагов вулканических землетрясений.

Удачное расположение трех сейсмических станций (рис.1) позволяет определять механизмов очагов слабых вулканических землетрясений. В то же время использование данных только трех-



четырёх станций, даже, удачно расположенных вокруг очагов вулканических землетрясений – недостаточно для получения уверенных параметров очагов вулканических землетрясений.

Рис.4а. Сравнение пространственного положения эпицентров вулканических землетрясений вулкана Кизимен за 1 сентября и 5 сентября 2011 года (вверху слева) и за 1 сентября и 10 сентября 2011 года (внизу слева). То же за 1 сентября и 25 сентября 2011 года (вверху справа) и за 1 сентября и за декабрь 2011 года (внизу справа).

Рис.4б. Сравнение пространственного положения эпицентров вулканических землетрясений вулкана Кизимен за 1 сентября и за 3-4 месяца 2011 года (слева) и за 1 сентября и за 7-12 месяца 2012 года (справа).

Нет возможности для слабых вулканических землетрясений с  $M \sim 1$  прибавить

дополнительные данные, так как на расстоянии больше 30 км эти землетрясения не регистрируются Камчатской сетью сейсмических станций. Для повышения точности этих параметров используем свойство вулканических землетрясений. При извержении вулкана происходит большое количество близких по форме вулканических землетрясений. Это позволяет, используя записи нескольких однотипных вулканических землетрясений, произошедших за короткий временной период (1-3 часа), определять их механизмы по объединенным данным.

В период наибольшей сейсмической активности в сентябре 2011 г., в каждые сутки происходило более 1000 вулканических землетрясений, тех, которые использовались в работе было 200-300. Все они в основном относятся к вулканическим землетрясениям I-го типа. Но дополнительно из них выбирались, во-первых, наиболее похожие между собой, а, во-вторых, относительно в короткий промежуток времени (1-3 часа). Примеры таких записей вулканических землетрясений приведены на рис.5.

На рис. 5 в увеличенном виде показаны волновые формы *P*-волн. Приведенный пример показывает, что сейсмические сигналы вулканических землетрясений вулкана Кизимен очень похожи по волновым формам. Это свидетельствует, что они характеризуют один вулканический процесс - извержения вулкана, который не изменялся во времени. Возможно, что были изменения в вулканическом процессе извержения вулкана, но в короткие периоды времени (день и даже месяц) этот процесс был однообразным.

Данное обстоятельство, позволило в работе построить механизмы очагов вулканических землетрясений с использованием редкой сети сейсмических станций и обобщенные данные (рис. 6).

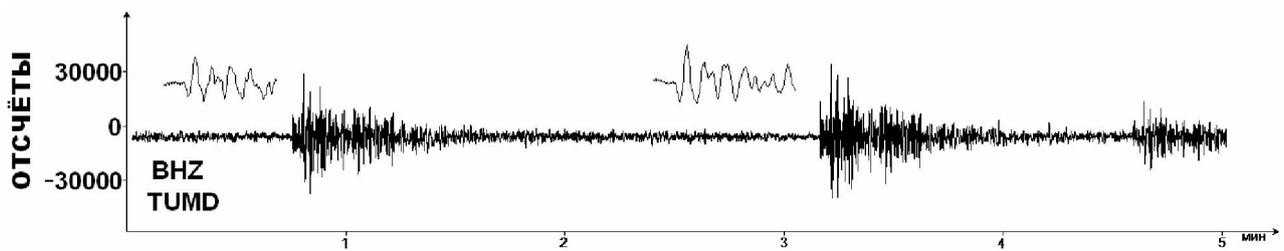


Рис.5. Примеры записей вулканических землетрясений на вертикальном BHZ сейсмическом канале станции TUMD. Приведены в увеличенном виде волновые формы *P*-волн.

Таким образом, можно получить механизмы очагов вулканических землетрясений по редкой сети сейсмических наблюдений, используя обобщенные данные. На рис. 6,7 приведены механизмы очагов.

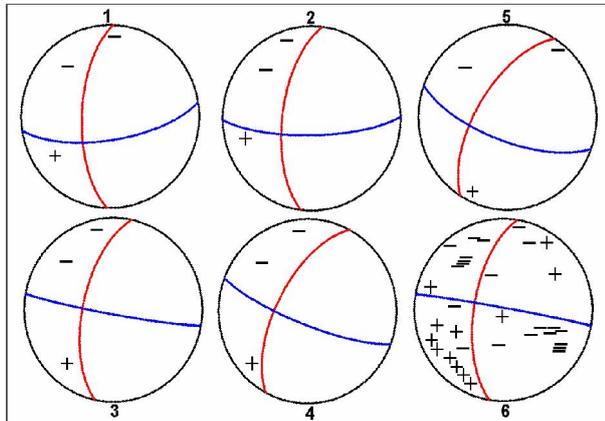


Рис. 6. 1-5 Индивидуальные механизмы очагов слабых вулканических землетрясений вулкана Кизимен, произошедших 2011.09.05: 1 – в 17 часов 56 минут 25.1 секунда; 2 – в 18 часов 31 минута 6.1 секунда; 3 – в 19 часов 11 минут 19.4 секунды; 4 – в 19 часов 51 минута 50.3 секунды; 5 – в 22 часа 11 минут 18.0 секунды; 6 – средний механизм очага, построенный по объединенным нескольким событиям, которые произошли 2011.09.05.

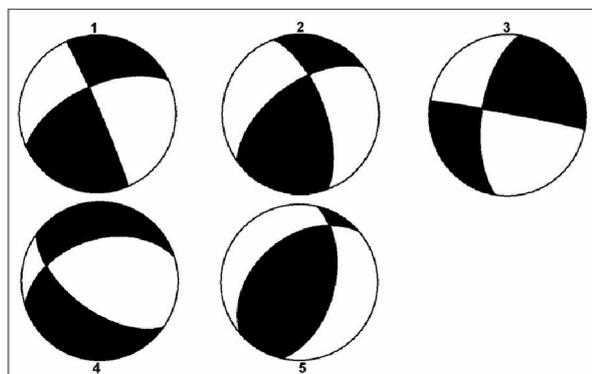


Рис.7 Средние механизмы очагов вулканических землетрясений вулкана Кизимен за 2011 год. 1 – 4 мес.  $N=1.1$  км; 2 – 6 мес.  $N=1.1$  км; 3 – 9 мес.  $N= -0.2$  км; 4 – 4 мес.  $N=5.8$  км; 5 – 6 мес.  $N=4.9$  км.

### Заключение

Для вулкана Кизимен анализировались слабые вулканические землетрясения за период 2011-2013 гг. Записи этих вулканических землетрясений были получены во время извержения вулкана Кизимен. Они подобны по волновым формам и частотному составу сейсмических колебаний, так как они

характеризуют один и тот же вулканический процесс. Использование подобных записей однотипных вулканических землетрясений в работе позволило построить механизмы очагов слабых вулканических землетрясений по объединенным данным с целью поиска возможностей повышающих точность определения механизмов очагов при использовании редкой сети сейсмических станций.

### Список литературы

1. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: теория и методы. Т.1. М.: Мир, 1983. 519 с.
2. Введенская А.В. Определение полей смещений при землетрясениях с помощью теории дислокаций // Изв. АН СССР. Сер. геофизическая. 1956. № 3. С. 34 – 47.
3. Введенская А.В. Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. М.: Наука, 1969. 130 с.
4. Пийп Б.И. Вулкан Кизимен // Бюлл. Вулканол. Станций на Камчатке. 1946. №13. С. 22 – 32.
5. Сеньюков С.Л. Нуждина И.Н., Дрознина С.Я. и др. Сейсмичность вулкана Кизимен // Труды третьей научно – технической конференции Проблемы комплексного геофизического мониторинга. 2010. П-К. стр. 144 –148.
6. Токарев П.И. Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. 164 с.
7. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
8. Фирстов П.П. Шакирова А.А. Сейсмические явления, сопровождавшие извержение вулкана Кизимен в 2011 году // Вестник КРАУНЦ Серия Науки о Земле. 2011 №2. Вып. 18. С. 7 – 13.
9. Hardebeck J.L., Shearer P.M. A new method for determining first-motion focal mechanisms // Bull. Seism. Soc. Am. 2002. V. 92. № 6. P. 2264 – 2276.
10. Reasenberг 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.