

УДК 550.344.43

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ СЛАБЫХ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО РЕДКОЙ СЕТИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

В.К. Лемзиков, М.В. Лемзиков

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский, 683006;
e-mail: lemzikov@kscnet.ru*

Механизмы очагов слабых вулканических землетрясений ($M \approx 1$) можно определить только с применением метода, основанного на полярностях первых вступлений *P*-волн. В работе показана возможность использования редкой сети сейсмических станций для определения механизмов очагов слабых вулканических землетрясений ($M \approx 1$). При этом допускается использования данных минимального количества сейсмических точек наблюдений не менее трех, которые по возможности располагаются вокруг активного вулкана. Для определения механизмов очагов слабых вулканических землетрясений ($M \approx 1$) вулканов учитываются два предположения: во-первых, тип извержения вулкана в течение его активного периода не изменяется, во-вторых, соблюдается однородность тензора напряжения среды в конусе вулкана и под ним в период извержения. Эти два предположения позволяют допустить определение механизмов очагов слабых вулканических землетрясений в период извержения вулканов по редкой сети сейсмических наблюдений, объединяя данные нескольких слабых вулканических землетрясений. Используя эти предположения, определены механизмы очагов слабых вулканических землетрясений ($M \approx 1$) вулканов Кизимен и Шивелуч, произошедших во время их извержений.

Введение

Вулкан Кизимен с абсолютной высотой 2485 м, расположен на юго-восточном борту Щапинского грабена. Вулкан является действующим с эффузивно-эксплозивным типом, имеет коническую форму с кратером в привершинной части. Район вулкана Кизимен с соседствующим хребтом Гамчен и долиной реки левой Щапиной имеет сложную тектонику. Постройка вулкана приурочена к системе крупноамплитудных сбросов северо-восточного простирания зоны сочленения Щапинского грабена с горстом хребта Тумрок.

За последние 200 лет вулкан Кизимен извергался около 10 раз. Предыдущее извержение вулкана, по-видимому, произошло в 1927-1928 гг. Последнее извержение вулкана после 80 лет молчания происходило в 2010-2013 гг. [4].

Первые сейсмические сигналы, нового извержения, которые могли свидетельствовать о взрывах и обломочных лавинах на вулкане Кизимен, появились 9 декабря 2010 г., а в ночь по местному времени с 9 на 10 декабря произошло резкое усиление сейсмической и вулканической активности.

Вулкан Шивелуч – самый северный действующий вулкан Камчатки с абсолютной высотой около 2800 м (Молодой Шивелуч). Постройка вулкан включает три главных элемента

Старый Шивелуч, древнюю кальдеру и активный Молодой Шивелуч. Вулкан расположен в зоне сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг.

За последние 200 лет вулкан Шивелуч извергался несколько раз. Иногда вулкан активизируется катастрофическим извержением. Предыдущее катастрофическое извержение вулкана, по-видимому, произошло в 1964 году.

В мае 2001 года началось очередное экструзивное извержение вулкана Шивелуч, которому предшествовала интенсивная сейсмическая подготовка в конце апреля. Главная эксплозивная фаза извержения началась 19 мая 2001. За несколько часов до ее начала отмечено резкое усиление вулканического дрожания и рост числа глубоких землетрясений. На вулкане наблюдались пепловые выбросы, следовавшие с интервалом 10-15 мин. На вулкане Шивелуч во время его извержения постоянно выдавливается «купол»... С тех пор до настоящего времени вулканическая активность вулкана Шивелуч не прекращается [7].

В данной работе поставлена цель, определить механизмы очагов слабых вулканических землетрясений, имевших место во время последних извержений вулканов Кизимен и Шивелуч. Особое внимание в работе посвящено поиску возможностей, повышающих точность определения механизмов очагов при использовании редкой сети сейсмических станций. Большинство вулканических землетрясений при извержении отдельного вулкана подобны по волновым формам и частотному составу сейсмических колебаний, так как тип извержения обоих вулканов не меняется во времени. Дополнительно учитывая, что соблюдается однородность тензора напряжения среды в конусе вулкана и под ним в период извержения, поэтому допустимо совместно использовать данные нескольких слабых вулканических землетрясений для определения механизмов очагов. Дополнительно для оценки точности определений механизмов применяется метод, разработанный в [8].

Исходные данные

В работе использовались вулкано-тектонические землетрясения вулканов Кизимен и Шивелуч. Всего было выбрано 196 событий вулкана Кизимен с очагами в конусе и под ними на глубинах 0 - 5 км за 2011-2013 гг. (рис.1а). Дополнительно было выбрано 53 события вулкана Шивелуч с очагами в его конусе за 2010 г. (рис.1б).

Диапазон энергетических классов землетрясений находится в пределах от $K_{S1,2}^{\Phi 68} = 5.8$ до $K_{S1,2}^{\Phi 68} = 6.3$, где $K_{S1,2}^{\Phi 68}$ - энергетические классы местных Камчатских землетрясений. $K_{S1,2}^{\Phi 68} = 6.1$ соответствует в шкале магнитуд $M = 1.0$ согласно соотношению $K_{S1,2}^{\Phi 68} = 1.5M + 4.6$ [6].

Использованные в работе вулкано-тектонические землетрясения вулканов Кизимен и Шивелуч относятся к I типу (они имеют четкие вступления продольных и поперечных сейсмических волн) по классификации П.И. Токарева [5].

Регистрация слабых вулканических землетрясений вулкана Кизимен выполнена радиотелеметрическими сейсмическими станциями Камчатского филиала Геофизической службы

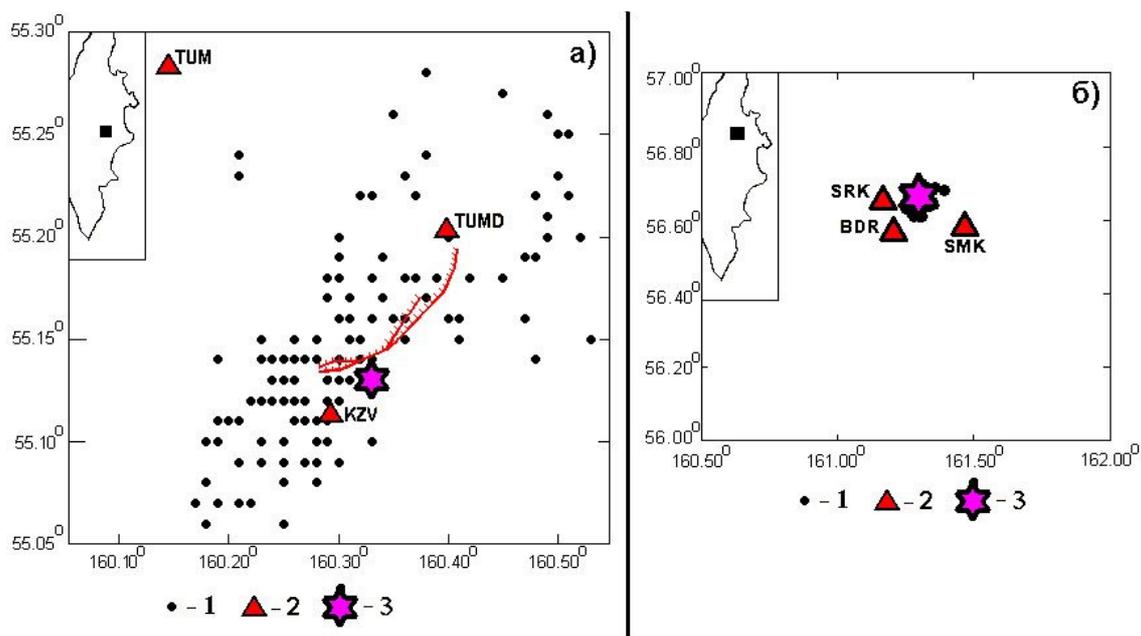


Рис. 1 а) Карта района исследования вулкана Кизимен. На вкладке черным квадратом показано расположение исследуемого района на карте Камчатки. 1– очаги слабых вулканических землетрясений вулкана Кизимен 2011 – 2012 гг.; 2– сейсмические станции; 3 – вершина вулкана Кизимен. б) Карта района исследования вулкана Шивелуч. На вкладке черным квадратом показано расположение исследуемого района на карте Камчатки. 1– очаги слабых вулканических землетрясений вулкана Шивелуч за 2010 г.; 2 – сейсмические станции; 3 – вершина вулкана Шивелуч.

РАН (КФ ГС РАН), установленными на склоне и вблизи этого вулкана: Кизимен (KZV), Тумрок (TUM) и Тумрок-источники (TUMD) (рис. 1а).

Регистрация слабых вулканических землетрясений вулкана Шивелуч, выполнена радиотелеметрическими сейсмическими станциями Камчатского филиала Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН), установленными на склоне и вблизи этого вулкана: Байдарная (BDR), Сорочкина (SRK) и Семкарок (SMK) (рис. 1б).

Первые вступления P -волн на вертикальных каналах всех станций можно выделить уверенно, остальные теряются на фоне вступления предыдущих волн. Поэтому в работе использованы только знаки первых вступлений P -волн на вертикальных каналах (SHZ и BHZ) (рис. 2а, б).

На рис. 2а,б отмечается абсолютная идентичность волновых P -волн вулканических землетрясений, которые происходили практически с интервалом в одну минуту в период высокой сейсмической активности извержения вулканов Кизимен и Шивелуч. Это подтверждает однородность (похожесть) механизмов очагов вулканических землетрясений для каждого вулкана.

Метод исследования

Квадрантное распределение знаков первых вступлений сейсмических волн наблюдается при подавляющем большинстве землетрясений и свидетельствует о том, что землетрясения взрывного типа редки и разрядка энергии в деформированной среде происходит, главным образом, за счет сдвиговых напряжений [3]. Это также характерно и для вулканических землетрясений I типа. В то же время вулканические землетрясения II - IV типов [5] не имеют четких вступлений *P*- и *S*-волн, что затрудняет их использование для определения механизмов очага.

Очаг тектонического землетрясения – это однократный толчок. При вулканических землетрясениях работают различные очаги, которые являются не только однократными толчками, но и силами вызванные движением лавы, пепла, газа и пара в жерле вулкана. Поэтому, вулканические землетрясения есть результат действия различных очагов, которые могут действовать отдельно или в комбинации. По этому признаку вулканические землетрясения разделяются на типы. К первому типу относятся вулканические землетрясения похожие на тектонические, т.е. их очаг характеризуется как однократный толчок. Они так и называются «вулcano-тектонические». Вулканические землетрясения других типов, очаг которых есть результат действия различных вулканических сил, не имеют четких вступлений *P*- и *S*-волн [5], что затрудняет их использование для определения механизмов очага.

Используемые нами вулканические землетрясения I типа являются слабыми событиями с $M \approx 1$, поэтому для них можно применить только метод, основанный на определении поляризации первых вступлений *P*-волн (см. рис. 2). Метод определения механизма очага землетря-

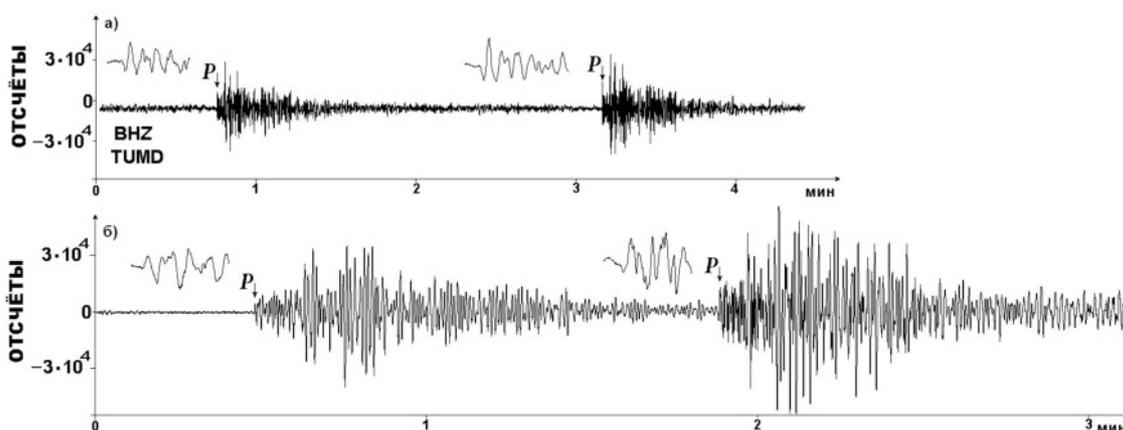


Рис. 2 а) Примеры волновых форм слабых вулканических землетрясений вулкана Кизи-мен, зарегистрированные - на вертикальном (BHZ) сейсмическом канале станции TUMD 5 сентября 2011 1 ч 54 мин 52.3 сек и 1 ч 57 мин 5.0 сек (UTC). В увеличенном виде показаны волновые формы *P*-волн. б) Примеры волновых форм слабых вулканических землетрясений вулкана Шивелуч, зарегистрированные - на вертикальном (SHZ) сейсмическом канале станции SMK 24 августа 2010 1 ч 51 мин 30.7 сек и 7 ч 49 мин 05.16 сек (UTC). В увеличенном виде показаны волновые формы *P*-волн.

сения по поляризации первых вступлений сейсмических волн широко известен и много раз описан, начиная с [1]. Под механизмом очага землетрясения понимается ориентация в пространстве нодальных плоскостей и главных осей сжатия и растяжения. Для определения этих плоскостей используется сетка Вульфа, и со второй половины XX столетия для работы с ней применяются компьютерные программы. Широко известен комплекс программ под названием FPFIT, FPLOT и др. [9], разработанный по идеям работ [1]. 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 поляристей и углов выхода сейсмических волн. Мы использовали алгоритм программы FPFIT вместе с некоторыми новейшими алгоритмами, детализирующими и уточняющими нахождение параметров механизмов очагов землетрясений. На этой основе нами 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 3-х сейсмических станций каждое измерение значимо, а при отсутствии данных хотя бы одной станции измерения и расчеты не выполнялись. 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.

Извержение вулкана - это процесс появления на поверхности планеты раскаленных или горячих твердых, жидких газообразных вулканических продуктов. Отдельные моменты непрерывного извержения Пийп называет фазами извержения, а серия извержений с любыми общими признаками стадиями или этапами внутри цикла.

Вулканы характеризуются разными типами вулканических извержений. Тип вулканического извержения обусловлен химическим составом магмы, её газонасыщенностью, температурой и вязкостью. Существует несколько типов вулканических извержений (гавайский, стромболианский, пленианский, пелейский, газовый и т.д.). Под экструзивной вулканической деятельностью понимается процесс выжимания очень вязкой магмы в твердопластичном и твердом состояниях. Эффузивная деятельность отличается разнообразием состава извергаемых пород, скоростью их выноса из глубины, масштабом, а также разнообразием физико-географических условий и геодинамических обстановок проявления [2].

Вулканический процесс начинается с момента подъема магмы, вызванного воздействием различных сил, а характер движения магмы к земной поверхности зависит, главным образом, от ее вязкости и от степени насыщенности газами. Физико-химический состав изверженной магмы определяет тип извержения вулкана [2].

Характерные особенности вулканического извержения, происходившего на вулкане Кизимен, отмечены в [11] по данным вертикального движения земной поверхности, рассчитанного интерферометрическим методом по спутниковым снимкам. В этой работе сделан вывод, что магма под вулканом в период извержения постоянно поднималась по дайке длиной 12 км с верхней кромкой на глубине 8 км.

Характерные особенности вулканического извержения, начавшегося на вулкана Шивелуч, отмечены в [7] по данным визуальных и сейсмологических наблюдений. В этой работе сделан вывод, сейсмическая активность под вулканом Шивелуч в период подготовки и в процессе данного извержения была значительно выше предыдущих извержений.

В связи с этим, вполне обосновано предположение о том, что тип извержения вулкана Кизимен в период его активной вулканической фазы (2010-2013 гг.) и с самого начала вулканической активизации вулкана Шивелуч (май 2001 года) был постоянный.

Можно предположить, что в конусе и в среде под вулканом Кизимен в период его извержения, а также в конусе и в среде под вулканом Шивелуч с момента начала его извержения тензор напряжения был однороден, поэтому вулканические землетрясения должны иметь практически подобные механизмы очагов. На основании этого, вполне обоснованного предположения, что механизмы очагов вулcano-тектонических землетрясений извергающихся вулканов Кизимен и Шивелуч можно определить по объединению данных нескольких вулканических землетрясений, сгруппированных по принципу малого пространственного и временного интервалов. Дополнительно следует отметить, что сейсмические станции расположены на конусе и близи этих вулканов способствуют возможности определения механизмов очагов этих землетрясений.

Предположение о неизменяемости тензора напряжения в некотором объеме среды использовано в компьютерной программе FMSI [8]. В этой программе применяется метод инвертирования, который минимизирует меру несоответствия R между полученными направлениями главных нодальных плоскостей механизмов очагов землетрясений и теоретическими направлениями сдвига в плоскости разлома. За теоретическое направление сдвига принимается любая геометрия разлома. Таких геометрий разлома может быть бесконечное количество, однако для практических целей она определяется пространственным положением ослабленной зоны среды, рядом с которой или непосредственно в ней были выбраны исходные данные. Несоответствие определяется при последовательном вращении осей полученного механизма очага землетрясения по сетке углов с заранее определенным шагом. В каждом случае составляется матрица преобразований между полученными и теоретическими направлениями сдвига в плоскости разлома и вычисляется значение несоответствия R . При любых геометриях направлений сдвига имеется минимальное значение R , обозначенное как

R_{\min} . Окончательная величина несоответствий вычисляется по сумме отдельных несоответствий по выборке главных нодальных плоскостей механизмов очагов землетрясений. Самый маленький угол вращения осей по выборке полученных механизмов, приводящий к совпадению полученной плоскости разлома с теоретическим сдвиговым напряжением, определяет решение механизма очага землетрясения.

За величину среднего несоответствия между теоретической моделью напряжения и всеми исходными данными, по которым определяется механизма очага, принимается малое значение угла поворота осей, например в [8] принято $F < 8^\circ$, а в [11] – $F < 6^\circ$.

Оба извержения вулканов Кизимен и Шивелуч были детально изучено геофизическими методами, в том числе, сейсмологическими. Удачное расположение сейсмических станций вокруг этих вулканов позволяет определять механизмы очагов слабых вулканических землетрясений.

Очаг тектонического землетрясения – это однократный толчок. При вулканических землетрясениях работают различные очаги, которые являются не только однократными толчками, но и силами вызванные движением лавы, пепла, газа и пара в жерле вулкана. Поэтому, вулканические землетрясения есть результат действия различных очагов, которые могут действовать отдельно или в комбинации. По этому признаку вулканические землетрясения разделяются на типы. К первому типу относятся вулканические землетрясения похожие на тектонические, т.е. их очаг характеризуется как однократный толчок. Они так и называются «вулкано-тектонические». Вулканические землетрясения других типов, очаг которых есть результат действия различных вулканических сил, не имеют четких вступлений *P*- и *S*-волн [5], что затрудняет их использование для определения механизмов очага.

Результаты

На вулкане Кизимен до его активизации в 2009 году была установлена всего одна станция. Расположение трех сейсмических станций вокруг вулкана Кизимен, позволило определить механизмы очагов слабых вулканических землетрясений за 2011 и 2012 гг. Точность каждого отдельного механизма землетрясения, сделанного по данным очень редкой сети сейсмических наблюдений, невысока.

На вулкане Шивелуч существовавшая сеть сейсмических станций в 2001 году была удаленной и односторонней по отношению к этому вулкану. Для определения механизмов очагов слабых вулканических землетрясений раньше использовались только станции Ключевского радиотелеметрического куста. Расположение трех сейсмических станций на вулкане Шивелуч в 2005 году, позволило определить механизмы очагов слабых вулканических землетрясений. Точность каждого отдельного механизма землетрясения, сделанного по данным очень редкой сети сейсмических наблюдений, невысока.

Для повышения точности параметров механизмов очагов слабых вулкано-тектонических землетрясений вулканов Кизимен и Шивелуч воспользуемся, как было отмечено выше, двумя

предположениями о постоянствах типа вулканического извержении этих вулканов и тензора напряжения в объеме среды под ними в период их извержений.

Для расчета параметров механизма очага слабых вулканических землетрясений вулкана Кизимен используем данные нескольких отдельных землетрясений за короткий временной период в сентябре 2011 г. Потому что в этот период извержения наблюдалась очень высокая сейсмическая интенсивность. Так как по параметру простирания, падения и углу движения главной нодальной плоскости механизма очага они практически одинаковы, то выборка землетрясений определяется только коротким временным интервалом. Из выборки вулкано-тектонических землетрясений, произошедших 5 сентября 2011 г. были отобраны 15 вулканических землетрясений, и путем сложения данных этих землетрясений построен средний механизм очага. Ниже приведены примеры индивидуальных механизмов очагов некоторых слабых вулканических землетрясений вулкана Кизимен, произошедших 5 сентября 2011 г. за период времени в шкале UTC с 17 часов 56 минут до 22 часов 11 минут и средний механизм очага. На приведенном примере (рис. 3) видно, что вероятность определения механизма очага по данным одного землетрясения, несмотря на удачное расположение точек регистрации, составляет около 0,5. По данным другой выборки из 57-ми событий путем простого математического осреднения получен средний механизм очага слабых вулканических землетрясений

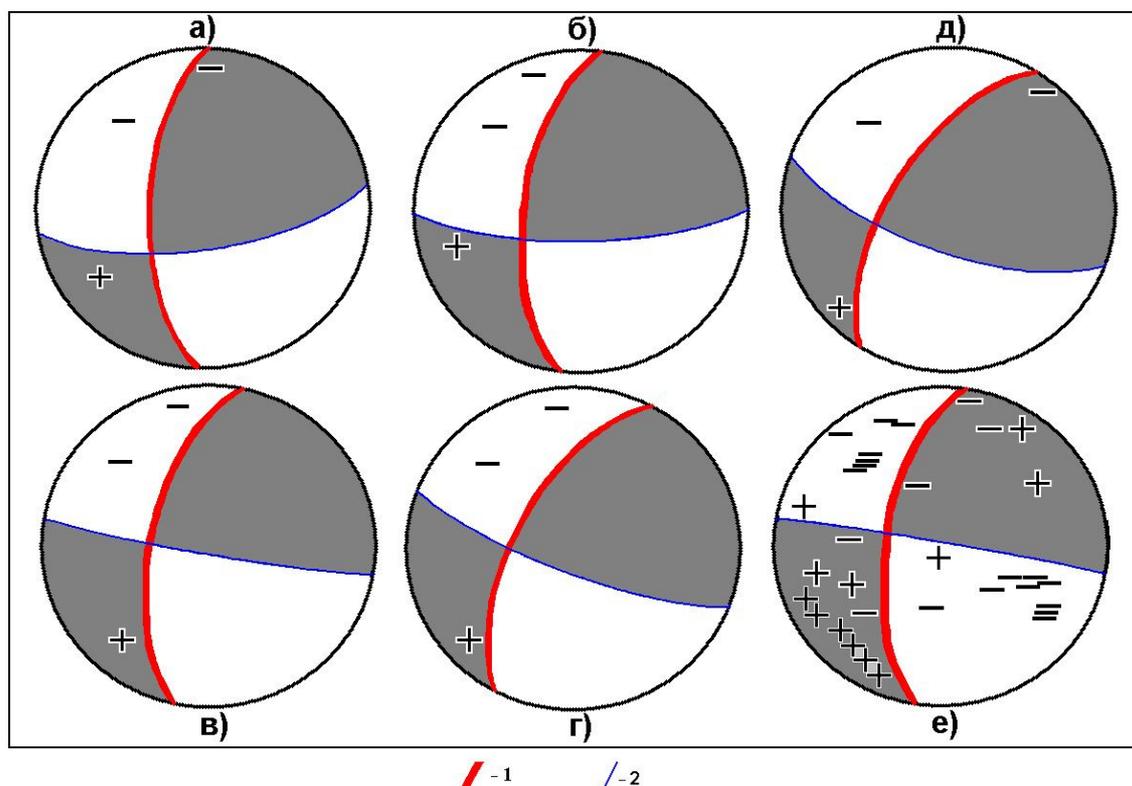


Рис. 3. Механизмы очагов слабых вулканических землетрясений вулкана Кизимен. *a) – c)* - примеры отдельных землетрясений; *e)* – по объединенным данным для 15 отдельных землетрясений. 1) главная нодальная плоскость; 2) вспомогательная нодальная плоскость.

Таблица 1. Статистические характеристики механизмов очагов вулканических землетрясений

вулкан Кизимен						
Выборка		параметр	STR ₁	DIP ₁	STR ₂	DIP ₂
№	Кол-во					
1	57	среднее	190 ± 10	62 ± 10	276 ± 9	76 ± 13
		медиана	189	62	278	79
		max	216	69	297	89
		min	158	59	252	27
вулкан Шивелуч						
Выборка		параметр	STR ₁	DIP ₁	STR ₂	DIP ₂
№	Кол-во					
1	18	среднее	24 ± 3	59 ± 1,5	132 ± 4	54 ± 4
		медиана	22,5	59	133	54
		max	26	62	140	59
		min	21	57	125	45

вулкана Кизимен, который определяется как правосторонний сдвиг по простиранию с простиранием 190^0 и плоскостью падения 62^0 на запад. (Табл.1).

Для расчета параметров механизма очага слабых вулканических землетрясений вулкана Шивелуч также используем данные нескольких отдельных землетрясений за временной период в апреле, августе, сентябре и октябре 2010 г. Потому что в этот период извержения наблюдалась очень высокая сейсмическая интенсивность. Так как по параметру простирания, падения и углу движения главной нодальной плоскости механизма очага они практически одинаковы, то выборка землетрясений определяется только этим временным интервалом. Из выборки вулcano-тектонических землетрясений, произошедших в апреле, августе, сентябре и октябре 2010 г. были отобраны 18 событий и путем сложения данных этих землетрясений был построен средний механизм очага. Ниже приведены примеры индивидуальных механизмов очагов некоторых слабых вулканических землетрясений вулкана Шивелуч, произошедших в апреле, августе, сентябре и октябре 2010 г. и средний механизм. На приведенном примере (рис. 4) видно, что вероятность определения механизма очага по данным одного землетрясения, несмотря на удачное расположение точек регистрации, составляет около 0.5. В то же время эта вероятность значительно повышается при использовании данных нескольких вулканических землетрясений. По данным 18-ти событий путем простого математического осреднения был получен средний механизм очага слабых вулканических землетрясений вулкана Шивелуч, который определяется как правосторонний взброс со сдвигом по простиранию главной нодальной плоскости 24^0 и плоскостью падения 59^0 на запад. (табл.1).

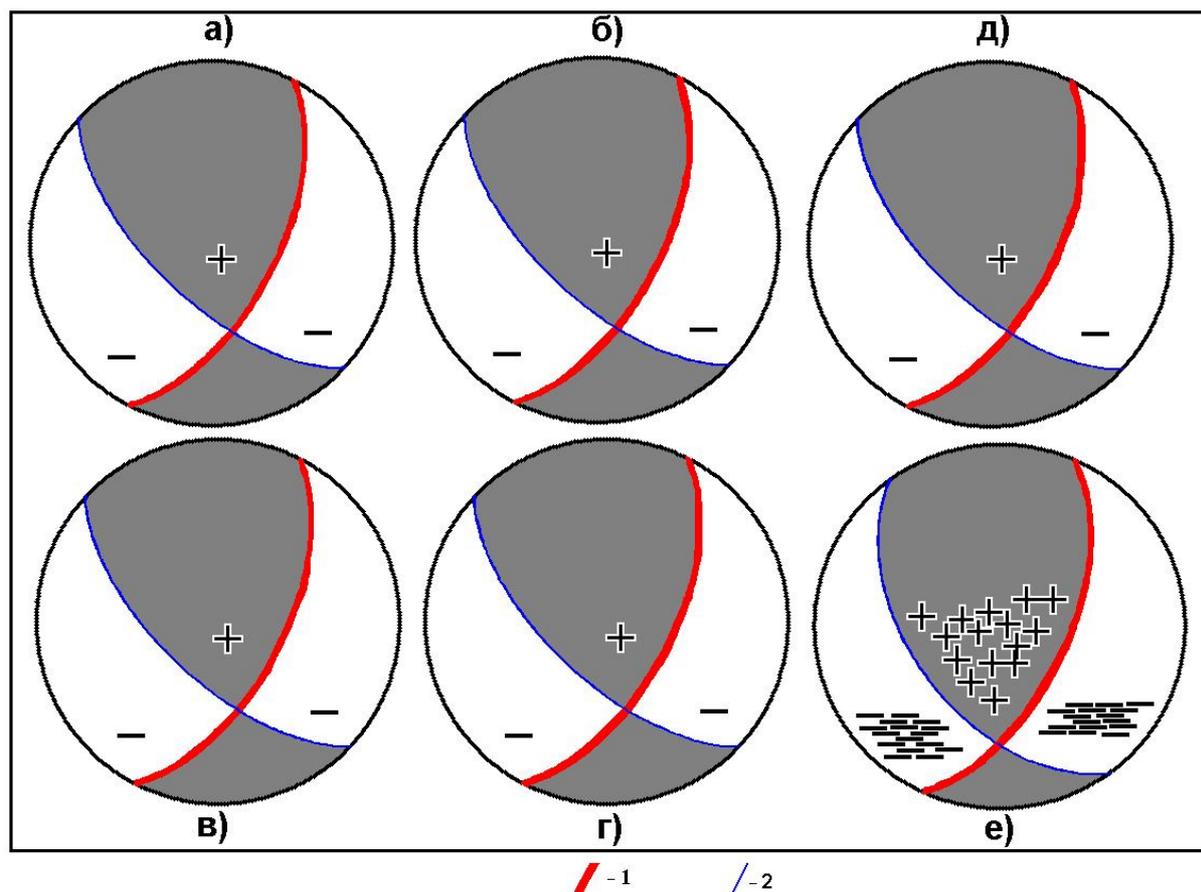


Рис. 4. Механизмы очагов слабых вулканических землетрясений вулкана Шивелуч. *a) – c)* - примеры отдельных землетрясений; *e)* – по объединенным данным для 18 отдельных землетрясений. 1) главная нодальная плоскость; 2) вспомогательная нодальная плоскость.

По программе FMSI [8] вычислялись возможные ориентации теоретических геометрий разломов, совпадающие по простиранию с главными нодальными плоскостями полученных средних механизмов очагов слабых вулканических землетрясений вулканов Кизимен и Шивелуч. Ниже приведены результаты этих расчетов. (табл. 2). Результаты расчета по простиранию главной нодальной плоскости полученных механизмов очагов вулкана Кизимен, совпадающих с теоретической геометрии разлома, оказались очень маленькими по величине угла поворота полученных механизмов. Результаты расчета по простиранию главной нодальной плоскости полученных механизмов очагов вулкана Шивелуч, совпадающих с теоретической геометрии разлома, также оказались очень маленькими по величине угла поворота полученных механизмов.

Таблица 2. Результаты расчета по теоретической геометрии разлома

вулкан	простирание	выборка	количество	F	R_{\min}
Кизимен	190^0	1	57	1,7	1,046
Шивелуч	24^0	1	18	4,0	0,045

Выводы

Для вулканов Кизимен и Шивелуч определены параметры механизмов очагов слабых вулканических землетрясений в период их извержений. Предложен метод определения механизма очага вулканического землетрясения в условиях извержения вулканов по редкой сети сейсмических наблюдений. Метод основан: во-первых, что оба типа извержения вулканов в период его наиболее активной фазы не меняется; во-вторых, что тензора напряжения в объеме среды под вулканом в период извержения не менялся. Эти два предположения были использованы для расчета параметров механизмов очагов слабых вулканических землетрясений вулканов Кизимен и Шивелуч по редкой сети сейсмологических наблюдений. Простирающие главных нодальных плоскостей механизмов очагов вулкано-тектонических землетрясений вулкана Кизимен определяется как правосторонний сдвиг по простираанию, которое примерно равно 190° , и плоскостью падения примерно 62° на запад. Вулкана Шивелуч как правосторонний взбрососдвиг по простираанию, которое примерно равно 24° , и плоскостью падения примерно 59° на запад.

Список литературы

1. *Введенская А.В.* Определение полей смещений при землетрясениях с помощью теории дислокаций // Изв. АН СССР. Сер. геофизическая. 1956. № 3. С. 34 – 47.
2. *Влодавец В.И.* Справочник по вулканологии. М.: Наука, 1984. 338 с.
3. *Костров Б. В.* Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. 176 с.
4. *Сенюков С.Л., Нуждина И.Н., Дроздина С.Я. и др.* Сейсмичность вулкана Кизимен // Труды третьей научно – технической конференции Проблемы комплексного геофизического мониторинга. 2010. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН. С. 144 – 148.
5. *Токарев П.И.* Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. 164 с.
6. *Федотов С.А.* Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
7. *Федотов С.А., Двигало В.Н., Жаринов Н.А. и др.* Извержение вулкана Шивелуч в мае – июле 2001 г. // Вулканология и Сейсмология. 2001. №6. С. 3 – 15.
8. *Gephart, J. W.*, FMSI: A FORTRAN program for inverting fault/slickenside and earthquake focal mechanism data to obtain the original stress tensor // Comput. Geosci. 1990. V.16. №7. P. 953 – 989.

9. *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.
10. *Ji L., Lu Z. , Dzurisin D., Senyukov S.* Pre-eruption deformation caused by dike intrusion beneath Kizimen volcano, Kamchatka, Russia, observed by InSAR // *J. Geophys. Res.* 2013. V.256. P. 87– 95.
11. *Wyss M., Lu Z.* Plate Boundary Segmentation by Stress Directions: Southern San Andreas fault, California// *Geophysical research letters.* 1995. V. 22. № 5. P. 547 – 550.