

УДК 551.21

ЗОБИН В. М.

## О СООТНОШЕНИИ ОЧАГОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПРИ ЦЕНТРАЛЬНЫХ И ЛАТЕРАЛЬНЫХ ИЗВЕРЖЕНИЯХ ВУЛКАНОВ

### Введение

Детальный анализ очаговых параметров вулканических землетрясений впервые был предпринят в монографии [3]. Удалось показать, что очаг вулканического землетрясения представляет собой разрыв типа сдвига, характеризующийся более высоким содержанием длиннопериодной компоненты излучения по сравнению с тектоническими землетрясениями того же энергетического класса. Были намечены определенные различия между роями вулканических землетрясений при латеральных и центральных извержениях вулканов. Высказано предположение, что в случае центрального извержения обычно происходит «оживление» уже существовавшей трещины в земной коре, а в случае латерального извержения — заложение новой. В настоящей статье на основе накопленных материалов проводится детализация различий очагового излучения сейсмических волн вулканических землетрясений при центральных и латеральных извержениях вулканов.

### Исходные материалы и методика исследования

Дополнительные материалы о специфике вулканических землетрясений при двух типах извержений были получены в результате изучения очаговых параметров (сейсмического момента, размеров очага, сброшенного напряжения) вулканических землетрясений, связанных с центральным и латеральным извержениями вулкана Алаид (Курильские острова) и центральным извержением (направленным взрывом) вулкана Сент-Хеленс (США). Кроме того, было проведено переопределение оценок сейсмических моментов по поверхностным волнам Рэлея для ряда сильных вулканических землетрясений разных вулканов мира по унифицированной методике [4].

Вулкан Алаид (о-в Атласова) является самым северным, наиболее активно действующим базальтовым вулканом Курильских островов. В последние годы произошло два сильных извержения вулкана: латеральное (прорыв Олимпийский) в июне 1972 г. [1] и извержение центрального кратера в апреле 1981 г. [7]. Оба извержения предварялись и сопровождались роями слабых вулканических землетрясений, что позволяет провести сопоставление очаговых параметров вулканических землетрясений, связанных с двумя типами вулканической активности.

Вулканические землетрясения вулкана Алаид регистрировались в основном двумя относительно близко расположенными с/ст.: Северо-Курильск на о-ве Парамушир (эпицентральное расстояние 45 км) и Паужетка на юге Камчатки (эпицентральное расстояние 110 км) (рис. 1). Более качественные записи были получены на с/ст. Паужетка (РАУ),

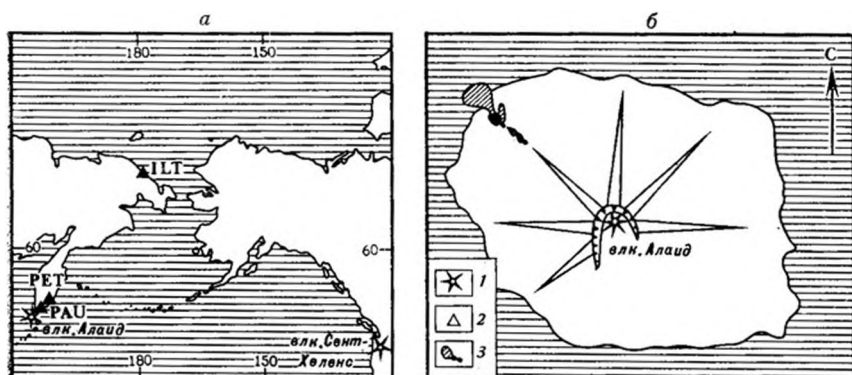


Рис. 1. Схема расположения вулканов и сейсмических станций, рассматриваемых нами (а) и схема конусов вулкана Алаид (б) (по [1]). 1 — активные вулканы; 2 — сеймостанции; 3 — латеральные конусы и лавовые потоки 1972 г.

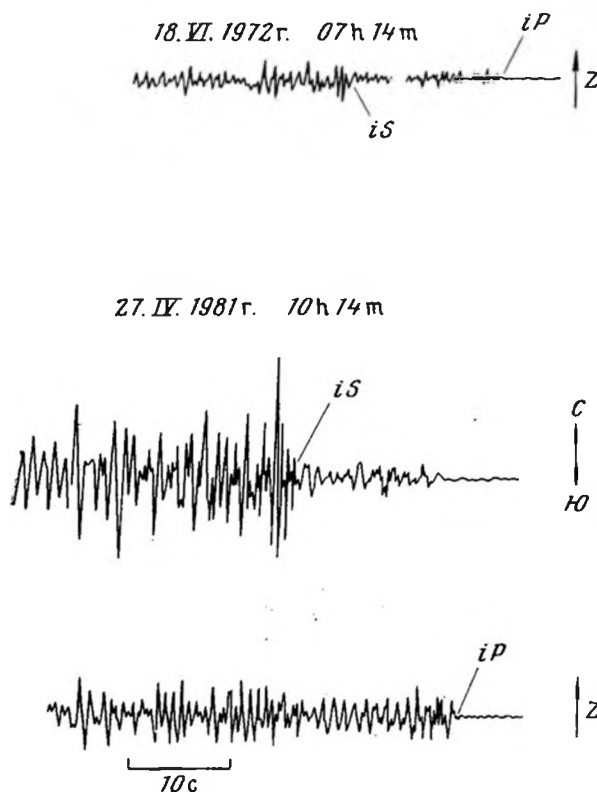


Рис. 2. Образцы сейсмограмм вулканических землетрясений вулкана Алаид, записанных на станции PAU (эпицентральное расстояние 110 км)

которая была опорной при детальных построениях. Точное положение гипоцентров для вулканических землетрясений получить не удалось, поэтому (по аналогии с хорошо изученными вулканическими землетрясениями различных вулканов мира [3]) полагаем, что эпицентры серии 1972 г. приурочены к зоне латеральных конусов прорыва Олимпийский, а эпицентры серии 1981 г. — к центральному конусу вулкана Алаид. Энергетические классы по  $P$ - и  $S$ -волнам по классификации С. А. Федотова [6] рассчитаны по записям ст. Паужетка. Образцы сейсмограмм приведены на рис. 2.

Таблица 1

**Сводка очаговых параметров вулканических землетрясений вулкана Алаид  
(по данным РАУ)**

Дата	Время * в очаге ч., мин	$K_S$	$K_P$	$\theta$	$\lg M_0^P$ , дин-см	$f_0$ , Гц	$\Delta\sigma$ , бар
18.VI.1972	06.57	10,4	8,6	1,8	21,16	2,8	5,1
	07.14	11,3	8,7	2,6	21,02	2,3	2,0
	07.32	9,1	7,9	1,2	21,29	2,2	3,3
	07.50	9,0	7,7	1,4	20,93	2,2	1,4
	08.20	10,5	7,6	2,9	21,28	2,2	3,2
	08.54	11,2	8,9	2,3	21,36	2,5	5,7
27.IV.1981	06.12	9,3	8,6	0,7	21,07	1,9	1,5
	06.41	10,7	9,6	1,1	21,44	2,5	6,9
	10.06	9,1	8,5	0,6	21,10	2,2	2,2
	10.14	10,7	8,7	2,0	21,85	0,9	0,9
	11.29	10,1	8,5	1,6	21,53	1,1	0,7
	12.32	10,2	9,6	0,6	21,53	2,1	5,0
	14.04	8,9	8,6	0,3	20,97	2,9	3,6
	14.09	8,9	8,4	0,5	21,00	2,8	3,5
	14.29	9,5	8,7	0,8	21,01	2,8	3,6
	15.45	8,8	8,6	0,2	21,13	2,6	3,8

\* Здесь и далее время по Гринвичу.

Таблица 2

**Сводка очаговых параметров сильных вулканических землетрясений**

Дата	Время в очаге, ч., мин	$M_S (M_{LH})$	$\lg M_0^R$ , дин см	$\lg M_0^P$ , дин см	$\Delta\sigma$ , бар
Вулкан Шивелуч, Камчатка, направленный взрыв					
11.XI.1964	13—17	(5,3)	23,90		
»	19—07	(5,5)	23,91		
Вулкан Фернандина, Галапагосские острова, обрушение кальдеры					
14.VI.1968	07—34	5,2	24,22	24,76	0,9
15.VI.1968	17—40	4,9	24,12	24,72	0,9
»	21—25	4,8	23,96	24,53	0,3
16.VI.1968	00—31	4,8	24,04	24,56	0,7
»	03—47	4,9	24,12	24,64	0,9
»	07—13	4,9	24,10		
»	10—12	4,8	24,05	24,52	0,4
17.VI.1968	22—06	4,7	24,16		
Вулкан Бсеренберг, о-в Ян-Майен, латеральное извержение					
18.IX.1970	02—06	5,3	23,21	23,63	3,0
Новые Толбачинские вулканы, Камчатка, трещинное извержение					
2.VII.1975	07—10	(5,0)	23,54	23,30	1,2
»	07—34	(5,0)	23,40	23,30	1,3
Вулкан Сент-Хеленс, США, направленный взрыв					
18.V.1980	15—32	5,2	24,21	24,30	2,7

Примечание.  $M_{LH} = M_S \pm 0,4$  (для Камчатки).

Землетрясения серии 1972 г. характеризуются наличием четкого вступления  $P$ -волн. Запись  $P$ -волн не имеет резких максимумов, а характеризуется плавным нарастанием и спадом в отдельных цугах.  $S$ -волны имеют достаточно четкие вступления, с постепенным нарастанием амплитуды записи. Поверхностные волны развиты слабо. На сейсмограм-

мах землетрясений серии 1981 г. также наблюдаются четкие вступления  $P$ -волн. После небольшой раскочки следует резкий импульс относительно большой амплитуды, который постепенно спадает. Вступления  $S$ -волн четкие, амплитуда постепенно нарастает до максимума с последующим плавным спадом. Поверхностные волны по амплитуде в 1,5—2 раза меньше максимальной амплитуды  $S$ -волн. Судя по форме записи, очаги землетрясений обеих серий имеют близкую глубину очага, по-видимому, в интервале 0—10 км.

В статье анализируются очаговые параметры семи землетрясений серии 1972 г. и десяти землетрясений серии 1981 г.

Вулкан Сент-Хеленс расположен в гряде Каскадных гор на юге штата Вашингтон (США) (см. рис. 1). 18 мая 1980 г. после длительной и интенсивной сейсмической подготовки, начавшейся в марте 1980 г., произошел грандиозный направленный взрыв этого вулкана, полностью разрушивший его северный склон и открывший кратер на протяжении 1,5 км. Краткое описание эффектов, связанных с этим извержением, приведено в [5, 9].

Взрыву вулкана предшествовало вулканическое землетрясение с магнитудой  $M_s=5,2$ , очаг которого располагается на расстоянии 1,6 км к северу от вершины. Примерно через 5—10 с после того, как землетрясение ощутилось, началось обрушение массива северного склона вулкана, перешедшее в громадный оползень, захвативший участок склона площадью около 3 км<sup>2</sup>. Как полагают американские ученые [5, 9], изменение литостатического давления, вызванное оползнем, стимулировало возникновение гигантского направленного взрыва вулкана, происшедшего через 20—30 с после землетрясения [9]. В статье анализируются очаговые параметры землетрясения 18 мая 1980 г.

Оценки очаговых параметров вулканических землетрясений проводились по методике, описанной в [4]. При анализе алаидских серий землетрясений рассчитывались спектры  $P$ -волн, записанных короткопериодной аппаратурой ВЭГИК на сейсмостанции PAU. Образцы построений спектров показаны на рис. 3. При оценке очаговых параметров вулканического землетрясения вулкана Сент-Хеленс использовались сейсмограммы среднeperиодных сейсмических станций Петропавловск (PET) и Иультин (ILT), причем анализировались спектры как  $P$ -волн, так и поверхностных волн Рэлея. Образцы построений спектров  $P$ -волн показаны на рис. 3. Расположение станций PAU, PET и ILT относительно исследуемых вулканов показано на рис. 1. Сводки определений очаговых параметров даны в табл. 1 и 2. При оценке очаговых параметров механизм очага вулканических землетрясений считался неизвестным.

### **Сравнительный анализ очаговых параметров вулканических землетрясений при центральных и латеральных извержениях**

Рассмотрим слабые вулканические землетрясения вулкана Алаид, для которых имеются оценки энергетических классов (короткопериодный интервал, 0,5—10 Гц), и более сильные землетрясения вулкана Сент-Хеленс и ряда вулканов мира, для которых имеются магнитудные оценки (среднeperиодный интервал, 0,03—0,5 Гц).

**Слабые землетрясения вулкана Алаид.** На рис. 4 показана зависимость энергетических классов  $K_s$  и  $K_p$ , величины  $\theta=K_s-K_p$ , размеров очага и сброшенных напряжений от сейсмического момента землетрясений вулкана Алаид.

Рассмотрим последовательно эти зависимости. Энергетические классы  $K_s$  и  $K_p$  представляют собой оценку энергии землетрясения по короткопериодному излучению, сейсмический момент суть оценка интенсивности длиннопериодной компоненты излучения. Поэтому рис. 4, а, б можно рассматривать как иллюстрацию соотношения интенсивности длинно- и

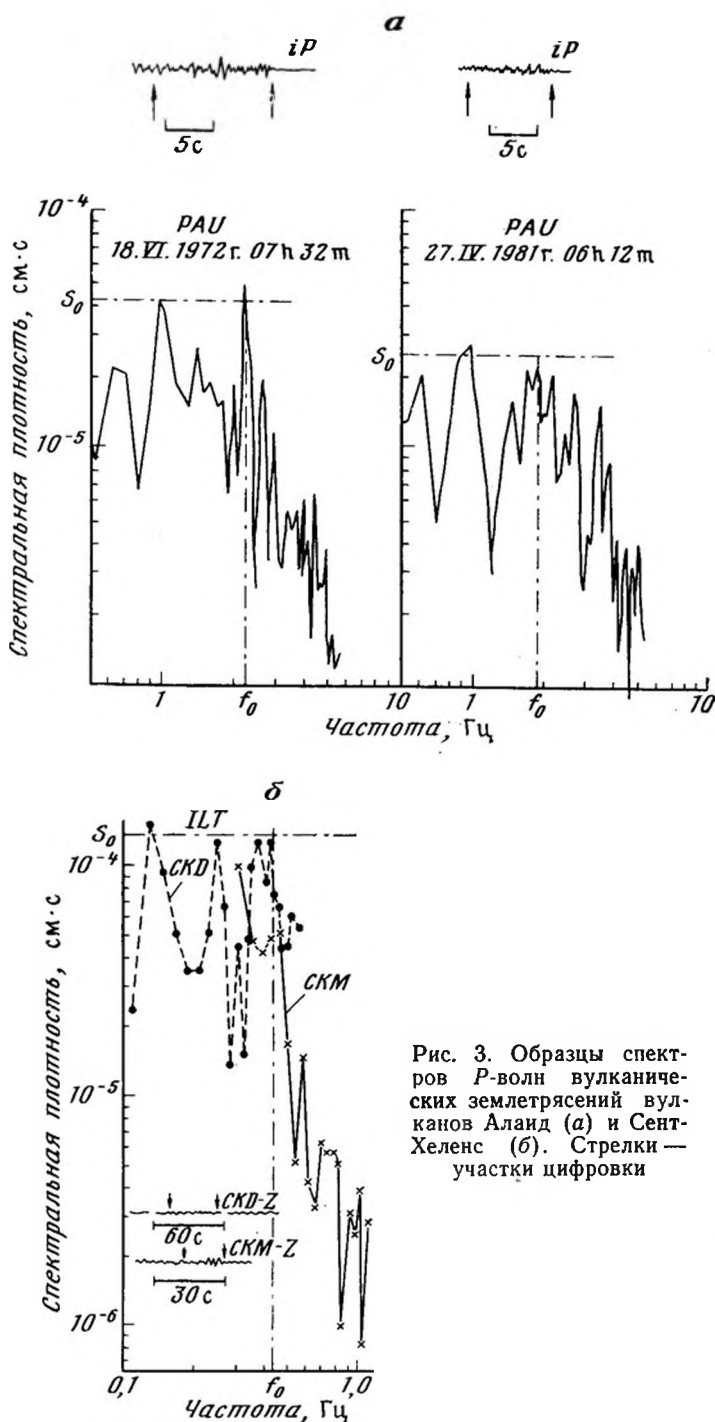


Рис. 3. Образцы спектров  $P$ -волн вулканических землетрясений вулканов Алайд (а) и Сент-Хеленс (б). Стрелки — участки цифровки

короткопериодного излучения. Основная доля энергии близких землетрясений переносится короткопериодными поперечными волнами, поэтому рис. 4, а следует считать опорным при рассмотрении подобных соотношений. Как следует из рис. 4, а, очаги вулканических землетрясений, связанных с извержением центрального кратера вулкана, характеризуются относительно повышенными значениями сейсмического момента при фиксированном энергетическом классе  $K_s$ . Поле точек  $K_p = f(M_0)$  (см.

рис. 4, б) достаточно перемешано, что не позволяет проводить какие-либо заключения.

На рис. 5 анализируется параметр  $\theta = K_s - K_p$ . Этот параметр был введен С. А. Федотовым [6] для изучения сравнительной интенсивности излучения продольных и поперечных волн. Как было показано в [6], параметр  $\theta$  может служить оценкой свойств вещества непосредственно в области очага землетрясения. В монографии [6] отмечается наличие сильной зависимости параметра  $\theta$  от энергетического класса  $K_s$ . Изучение зависимости параметра  $\theta$  от энергетического класса  $K_s$  для вулканических землетрясений (рис. 5) показало, что поля точек, соответствующие

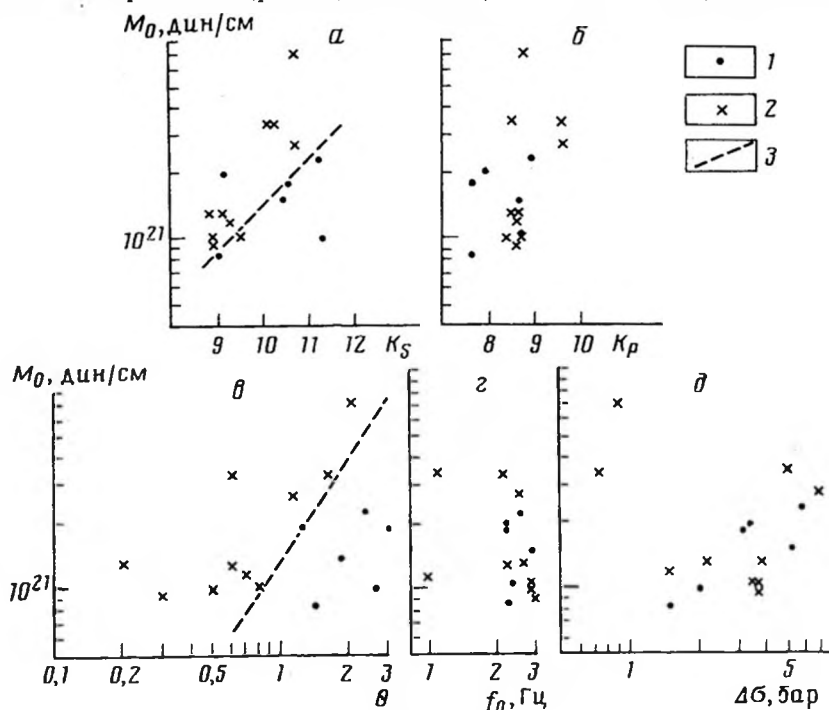


Рис. 4. Соотношение сейсмического момента и энергетических классов  $K_s$  (а),  $K_p$  (б), параметры  $\theta = K_s - K_p$  (в), характерных частот  $f_0$  (г), сброшенного напряжения  $\Delta\sigma$  (д) для вулканических землетрясений вулкана Алаид. 1 — латеральное извержение 1972 г.; 2 — извержение центрального кратера 1981 г.; 3 — линия разграничения (проведена ориентировочно)

щих вулканическим землетрясениям вулкана Алаид при центральном и латеральном извержениях достаточно хорошо разделяются, причем линия, разделяющая эти два поля точек, проходит параллельно линии регрессии, полученной в [6] для тектонических землетрясений Камчатки. Из рис. 5 следует наличие относительно низких величин параметра  $\theta$  для очагов вулканических землетрясений при центральном извержении вулкана.

Оценки параметров  $\theta$  вулканических землетрясений при центральном извержении (направленном взрыве) вулкана Шивелуч (Камчатка) в 1964 г. [6] хорошо укладываются в поле точек вулканических землетрясений при центральном извержении вулкана Алаид (средняя оценка  $\theta$  при  $K_s = 10$  равна 1,1).

На рис. 4, в показано поле точек зависимости параметра  $\theta$  от сейсмического момента, где отмеченное разделение точек, соответствующих очагам землетрясений при центральном и латеральном извержении прослеживается еще более четко. Рис. 4, г демонстрирует отсутствие различий

характерных частот спектра  $P$  волн для обеих серий вулканических землетрясений. Следовательно, различие излучения очагов вулканических землетрясений двух типов сказывается на интенсивности излучения, но не отражается на спектральном составе.

Зависимости величин сброшенного напряжения от сейсмического момента для двух групп очагов имеют некоторые различия (рис. 4, д), возможно, обусловленные малым количеством данных. Очаги вулканических землетрясений, связанных с латеральным извержением вулкана, проявляют тенденцию к прямой зависимости  $\lg \Delta \sigma = f(M_0)$ ; очаги вулканических землетрясений, связанных с центральным извержением вулкана, определенной тенденции не имеют.

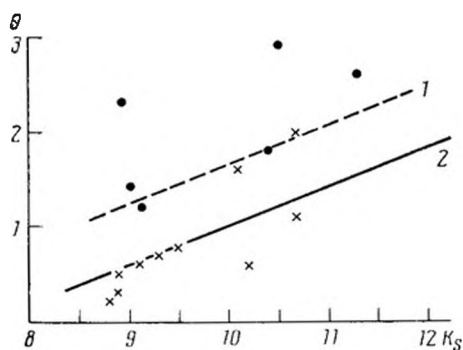


Рис. 5

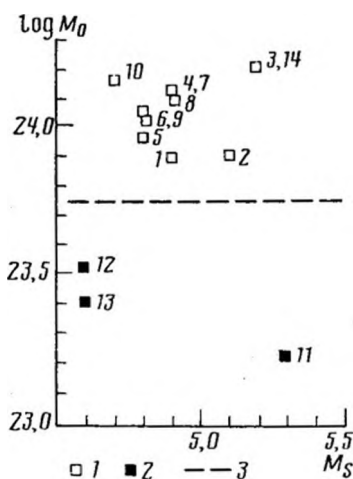


Рис. 6

Рис. 5. Зависимость параметра  $\theta$  от энергетического класса  $K_s$  для вулканических землетрясений вулкана Алайд. 1 — линия разграничения параметров вулканических землетрясений 1972 и 1981 гг.; 2 — корреляционная зависимость, полученная в [6] для тектонических землетрясений

Рис. 6. Соотношение сейсмического момента (дин·см) и магнитуды для сильных вулканических землетрясений при центральных (1) и латеральных (2) извержениях вулканов; 3 — линия разграничения (проведена ориентировочно). Цифры на рисунке соответствуют нумерации в табл. 2

Таким образом, на примере вулканических землетрясений вулкана Алайд можно наметить черты различия между двумя типами вулканических землетрясений. Очаги вулканических землетрясений, связанных с центральным извержением вулкана, характеризуются более интенсивным длиннопериодным излучением. Для них отмсчается относительное преобладание интенсивности излучения продольных волн по сравнению с поперечными.

**Сильные вулканические землетрясения вулкана Сент-Хеленс и ряда вулканов мира.** Оценки сейсмического момента землетрясения 18 мая 1980 г. на вулкане Сент-Хеленс, проведенные по продольным и поверхностным волнам, близки и находятся в интервале 24,21—24,30 лог. ед. дин см (см. табл. 2). На рис. 6 проводится сопоставление очаговых параметров вулканического землетрясения в Сент-Хеленс и ряда сильных вулканических землетрясений, связанных с извержениями вулканов Шивелуч, Камчатка, 1964 г. (направленный взрыв), Фернандина, Галапагосские острова, 1968 г. (обрушение кальдеры), Бееренберг, о-в Ян Майен, 1970 г. (латеральное извержение) и с Большим Трещинным Толбачинским извержением на Камчатке 1975 г. Значения сейсмического момента по поверхностным волнам Рэлея нанесены на рис. 6 на основе

табл. 2 в функции магнитуды. На рис. 6 выделяются две группы точек: первая включает характеристики землетрясений, связанных с латеральным и трещинным извержениями; вторая — характеристики землетрясений, связанных с центральными извержениями вулканов. Значения сейсмического момента землетрясения 18 мая 1980 г. находятся в группе значений сейсмических моментов землетрясений, связанных с направленным взрывом вулкана Шивелуч и обрушением кальдеры вулкана Фернандина.

Как видно из рис. 6, очаговые параметры вулканических землетрясений при центральных извержениях вулканов имеют при фиксированной магнитуде большие величины сейсмических моментов, чем вулканические землетрясения при латеральных извержениях.

Остановимся на оценках других очаговых параметров вулканического землетрясения вулкана Сент-Хеленс. Величина сброшенного напряжения 18 мая 1980 г., по данным спектральных оценок  $P$ -волн, равна 27 бар. Характерная частота спектра  $P$ -волн равна 0,44 Гц. По сравнению с аналогичными оценками, сделанными для других сильных вулканических землетрясений (см. табл. 2), очаг вулканического землетрясения вулкана Сент-Хеленс имеет повышенное значение сброшенного напряжения.

### Обсуждение результатов

На основании проведенных исследований можно заключить, что очаговое излучение вулканических землетрясений при центральных и латеральных извержениях вулканов различается. При этом анализ в короткопериодном интервале (0,5—10 Гц) показал, что очаги вулканических землетрясений, связанных с центральным извержением вулкана, характеризуются более интенсивным длиннопериодным излучением, причем для них отмечается относительное преобладание интенсивности излучения продольных волн (или относительно слабое возбуждение поперечных волн). Анализ в среднепериодном диапазоне (0,03—0,5 Гц) подтвердил наличие повышенной интенсивности длиннопериодного излучения очагов вулканических землетрясений при центральных извержениях вулканов по сравнению с латеральными.

Оба класса вулканических землетрясений имеют близкую глубину очага, не различаются по механизму очага [3]. Следовательно, особенности излучения могут быть связаны со спецификой развития процессов в очагах этих двух классов землетрясений. Как показывают теоретические и экспериментальные исследования [2, 8], повышенное содержание длиннопериодного излучения характерно для «гладких» разрывов, и наоборот, появление «шероховатостей» и барьеров в процессе вспарывания разрыва в очаге землетрясения будет вызывать относительный рост интенсивности короткопериодного излучения. Следовательно, можно полагать, что подтверждается высказанное в [3] предположение о том, что в ходе сейсмической активности при центральных извержениях идет «оживление» уже существовавшей, относительно «гладкой» трещины (выводного канала).

Относительное преобладание интенсивности излучения продольных волн (или относительно слабое возбуждение поперечных волн) при вулканических землетрясениях, связанных с извержениями центрального типа, свидетельствует, согласно [6], об относительном понижении величин упругих параметров среды в области очагов вулканических землетрясений (в районе выводного канала вулкана).

Указанные различия излучения  $P$ - и  $S$ -волн, нашедшие отражение в величинах параметра  $\theta$ , значительно различающихся для вулканических землетрясений при центральных и латеральных извержениях, могут служить дополнительным критерием оценки типа приближающегося извержения при прогнозе извержений вулканов по сейсмическим данным.



## Выводы

1. Обнаружены различия в излучении сейсмических волн вулканических землетрясений при центральных и латеральных извержениях вулканов.

2. Выявленные различия излучения сейсмических волн двух типов вулканических землетрясений подтверждают высказанное ранее автором [3] предположение о разном характере разрывов, возникающих в процессе развития роев вулканических землетрясений при центральных и латеральных извержениях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Авдейко Г. П., Хренов А. П., Флеров Г. Б. и др. Извержение вулкана Алаид в 1972 г.//Бюл. вулканол. ст. 1974. № 50. С. 64—80.
2. Виноградов С. Д. Влияние неоднородности поверхности разрыва на излучение упругих волн/Изв. АН СССР. Сер. Физ. Земли. 1978. № 1. С. 18—24.
3. Зобин В. М. Динамика очага вулканических землетрясений. М.: Наука, 1979. 92 с.
4. Зобин В. М., Иванова Е. И., Чиркова В. Н. Очаговые параметры землетрясений Камчатки и Командорских островов//Вулканология и сейсмология. 1984. № 2. С. 83—103.
5. Токарев П. И. Извержение вулкана Сент-Хеленс в марте-августе 1980 г.//Вулканология и сейсмология. 1981. № 3. С. 104—106.
6. Федотов С. А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
7. Федотов С. А., Иванов Б. В., Флеров Г. Б. и др. Изучение извержения вулкана Алаид (Курильские острова) в 1981 г.//Вулканология и сейсмология. 1982. № 6. С. 9—27.
8. Das S., Aki K. Fault planes with barriers: a versatile earthquake model//J. Geophys. Res., 82, 1977, 5658—5670.
9. Eruption of Mt. St. Helens//Nature. 1980. V. 285, № 5766. P. 29—535.

Институт вулканологии  
ДВНЦ АН СССР

Поступила в редакцию  
2.IX.1985