

Г. С. ГОРШКОВ

О СВЯЗИ ВУЛКАНИЧЕСКИХ И СЕЙСМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ
ПРИ ИЗВЕРЖЕНИИ ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННОГО (1955—1956 гг.)

В ходе извержения вулкана Безымянного за девять месяцев с конца сентября 1955 г. до конца июня 1956 г.—в Ключах (43 км от вулкана) было зарегистрировано более 33 тыс. землетрясений, связанных с этим извержением. В дальнейшем с резким ослаблением напряженности извержения интенсивность и число землетрясений также уменьшились. Регистрация землетрясений велась при помощи трехкомпонентной установки сейсмографов Кириоса (увеличение 500 на периодах от 0,2 до 10,0 сек.) и Харина (увеличение 10 000 на периоде 0,2 сек.).

Полученный материал позволяет сопоставить изменение энергии и числа землетрясений с ходом извержения.

Определение энергии землетрясений является довольно сложной задачей. Для определения потока энергии поверхностных волн Б. Б. Голицын еще в 1915 г. предложил следующую формулу:

$$E \approx 2 \pi^2 \rho c \sum_{i=1}^n \left(\frac{A_N^2 + A_E^2 + A_Z^2}{T^2} \right)_i \Delta t_i, \quad [1]$$

где A —амплитуда, а T —период колебаний продолжительностью Δt_i ,
 ρ —плотность пород, а c —скорость распространения волны.

Джеффрис (1923) дает следующее выражение для энергии волн Рэлея:

$$E_R = 4,48 \pi^3 \rho R e^{k\Delta} \sin \Delta \sum_{i=1}^n \left(\frac{A_N^2 + A_E^2 + A_Z^2}{T} \right)_i c_i^2 \Delta t_i, \quad [2]$$

где R —радиус земли, k —коэффициент поглощения волн, Δ —эпицентральное расстояние.

Несколько иное выражение приводит Йокояма (1956):

$$E = 5 \pi^2 \rho \Delta \frac{c^2}{0,42^2} \sum_{i=1}^n \frac{A^2}{T} \Delta t_i. \quad [3]$$

Здесь A —горизонтальная компонента смещения.

Расчеты по приведенным формулам из-за трудности численного интегрирования и незнания точных значений скорости сейсмических волн в точке наблюдения и величины коэффициента поглощения проводятся редко. Для определения энергии многих тысяч землетрясений целесообразно применить упрощенные методы. Вообще говоря, энергия землетрясений из одного источника при записи одной и той же станции про-

порциональна $\Sigma \frac{A^2}{T} \Delta t_i$, что прямо следует из [2] и [3], или, при мало изменяющихся Δt_i пропорциональна просто $\frac{A^2}{T}$. Величину энергии можно было бы определять в условных единицах, как это сделано нами для роя землетрясений 1948 г. (Г. С. Горшков, 1953). Однако более желательно хотя бы приблизительно оценить абсолютную величину сейсмической энергии.

В настоящее время широкое распространение получил метод приближенного определения энергии землетрясений по «магнитуде» или инструментальной интенсивности M . Обычно этот метод применяется для тектонических землетрясений, но иногда и для землетрясений вулканических. Таким образом могут быть получены данные, сопоставимые как с тектоническими, так и с другими вулканическими землетрясениями.

В настоящее время принято, что

$$\lg E = 1,5 M + 11,8. \quad [4]$$

В свою очередь, величина M может быть определена по амплитуде смещения в поверхностных волнах. Имеется ряд исследований, посвященных методам определения величины M . В СССР этому вопросу много внимания уделили С. Л. Соловьев и Н. В. Шебалин (1957). Указанные авторы дают для определения M несколько формул. Мы воспользовались наиболее простой из них:

$$M = \lg A - \lg A^*, \quad [5]$$

где A —максимальное смещение в микронах, а величина $-\lg A^* = f(\Delta)$ определяется эмпирически. По записям ряда удаленных станций была определена магнитуда многих землетрясений, связанных с извержением вулкана Безымянного, а затем определена величина $-\lg A^*$ для эпицентрального расстояния, равного расстоянию от Ключей до вулкана. Эта величина оказалась равной +1,8.

Таким образом, эмпирическая формула интенсивности данного роя для Ключей имеет вид:

$$M = \lg A + 1,8, \quad [6]$$

откуда, принимая во внимание [4], получим:

$$\lg E = 1,5 \lg A + 14,5^1. \quad [7]$$

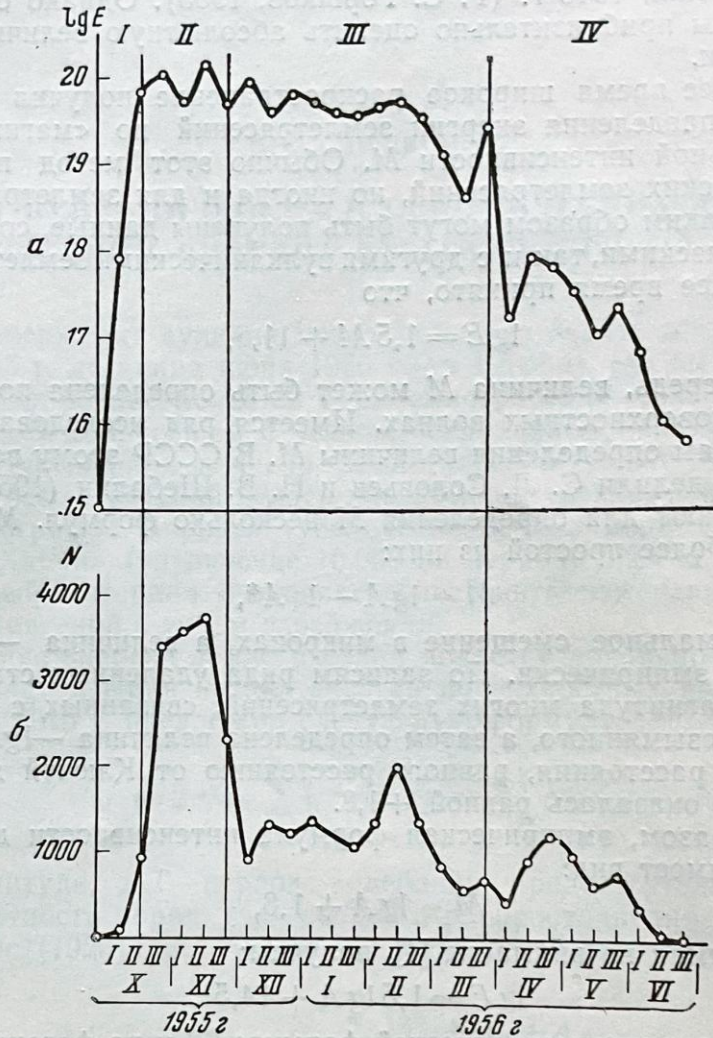
Расчет энергии по эмпирической формуле [7] и по формулам [2] и [3] дает (если считать, что $c=2000$ м/сек и $e^{\kappa \Delta}$ при малых Δ близко к единице) при амплитудах в сотни и тысячи микрон совпадающие результаты; при малых амплитудах результат формулы [7] оказывается примерно на порядок большим.

Период извержения вулкана Безымянного с конца сентября 1955 г. по июнь 1956 г. можно разделить на пять этапов:

- 1) доэруптивная стадия, со дня первого землетрясения до начала извержения—с 29 сентября до 22 октября 1955 г.;
- 2) стадия сильного пеплового извержения вулканического типа—с 22 октября до конца ноября 1955 г.;
- 3) стадия умеренной взрывной деятельности—с конца ноября 1955 г. до 30 марта 1956 г.;

¹ В докладе на XI Ассамблее МГГС автор применил другую эмпирическую формулу $\lg E = 2 \lg A + 13,45$, которая в настоящей статье уточнена с учетом новых данных (Соловьев, Шебалин, 1957). Конечный результат по обеим формулам довольно близок.

- 4) пароксизмальный взрыв 30 марта 1956 г.;
 5) непреывный рост купола в новом кратере—с апреля до начала июля 1956 г. С июля 1956 г. рост купола сильно замедлился и происходил не непрерывно, а как бы слабыми короткими «толчками», которые разделялись длительными промежутками покоя.



Фиг. 1. График изменения энергии (а) и числа землетрясений (б) в ходе извержения вулкана Безымянного (приведены суммарные значения по декадам). Римские цифры в верхней части графика соответствуют фазам извержения

На фиг. 1 показан график изменения числа и энергии землетрясений в ходе извержения. Нижняя кривая дает суммарное число толчков за каждую декаду по месяцам, верхняя—логарифм сейсмической энергии в эргах за те же отрезки времени. График показывает, что ход кривой числа землетрясений не совпадает с ходом кривой энергии. Число землетрясений от одной стадии извержения к другой резко менялось, а их энергия испытывала меньшие колебания.

В первую, доэруптивную стадию число землетрясений и их энергия быстро росли. С 29 сентября до 7 октября происходили сначала один-два, затем четыре-шесть толчков в сутки, а энергия их не превышала 10^{16} — 10^{17} эрг. С 8 по 15 октября землетрясения насчитывались уже де-

сятками, а энергия самых сильных из них повысилась до 10^{18} эрг. С 16 по 21 октября число землетрясений продолжало быстро увеличиваться и 20 октября перевалило за 200. Энергия максимальных землетрясений еще 18 октября достигла значений порядка 10^{19} эрг и в дальнейшем сохраняла этот порядок величин в течение нескольких месяцев, несмотря на резкое изменение числа толчков. Таким образом, в доэруптивный период рост энергии землетрясений обгонял рост числа толчков; к концу этого периода энергия достигла определенного порога (10^{19} эрг), число же землетрясений еще не достигло максимума и составляло в конце периода 200—220 за сутки.

Начало эруптивной стадии—22 октября 1955 г.—не ознаменовалось какими-либо заметными изменениями в сейсмическом режиме: число землетрясений продолжало быстро увеличиваться; 24 октября в течение суток было отмечено 350 толчков, затем в течение целого месяца, пока длилась пепловая стадия, это число толчков в сутки сохранялось на уровне 300—400 (максимум 10 ноября—470 толчков). Резкий рост числа землетрясений в этот период извержения происходил главным образом за счет очень слабых толчков, которые практически не отражались на энергетическом балансе. Несомненно, резкое увеличение количества землетрясений было обусловлено ростом напряженности взрывов. Облако пепла в это время поднималось на высоту до 7,5 км над вулканом, а в радиусе более 100 км проходили сильные пеплопады.

С окончанием пепловой фазы извержения число землетрясений резко упало. Так, 24 ноября зарегистрировано 303 толчка, а на следующий день только 100. В это же время наступил перелом и в эруптивной деятельности. Стадия мощных пепловых взрывов вулкана сменилась стадией умеренной. Число землетрясений в сутки до 14 февраля 1956 г. оставалось примерно на уровне 100—120. С 15 по 23 февраля отмечено увеличение числа толчков до 200—300 в сутки. Затем число толчков стало уменьшаться, к 4 марта оно упало до 40—50 в сутки и до конца марта уже редко увеличивалось до 100, оставаясь на уровне нескольких десятков. Одновременно с конца февраля наметилось ослабление энергии землетрясений, в марте максимальная энергия толчков не превышала порядок 10^{18} эрг.

На фоне этого общего уменьшения сейсмической активности произошел пероксизмальный взрыв 30 марта 1956 г. Этот взрыв сопровождался землетрясением с энергией 2×10^{19} эрг, что отразилось на графике (см. фиг. 1) резким «пиком» на ниспадающей кривой энергии.

После 30 марта вновь отмечается уменьшение числа толчков и их энергии. В первой половине апреля число толчков составляло 10—12 в сутки. Однако на общем фоне уменьшения сейсмической энергии в апреле и мае 1956 г. имело место увеличение числа толчков до 70—100 за сутки (максимум 20 апреля—298). Энергия максимальных по силе толчков имела порядок в апреле— 10^{17} эрг и в мае— 10^{16} эрг. С 9 июня отмечались только единичные толчки с энергией порядка 10^{14} эрг.

Новая небольшая вспышка сейсмической активности зафиксирована с 23 июля по 17 августа¹, когда в отдельные дни число толчков достигало 150. Вторая вспышка имела место с 4 по 26 октября 1956 г. Очень слабые и редкие толчки отмечены также в ноябре—декабре 1956 г. Слабые вспышки были и в 1957 г.

¹ Это усиление, возможно, частично связано с извержениями новых побочных кратеров Ключевского вулкана 28 июля—2 августа.

Как видно из приведенного материала, имеется вполне определенная связь между ходом извержения, с одной стороны, и сейсмической активностью—с другой. При этом число толчков изменялось в тесном соответствии с изменениями во внешних проявлениях извержения, а изменения в энергии землетрясений такого тесного соответствия не имели.

За период с 18 октября 1955 г. (т. е. за несколько дней до начала извержения) до конца февраля 1956 г. более или менее регулярно происходили землетрясения с энергией порядка 10^{19} эрг, создававшие неизменный «энергетический фон». Эти землетрясения не зависели от внешних проявлений извержения и наоборот, внешние явления извержения не влияли заметно на ритм этих землетрясений. На этот основной энергетический фон накладывались многочисленные слабые колебания, совершенно отчетливо связанные с внешними проявлениями извержения и явно имевшие поверхностное происхождение.

Резкое усиление числа землетрясений было вызвано фазой мощных вулканских взрывов в октябре-ноябре 1955 г., и с окончанием этой фазы число слабых толчков резко упало; следующий рост числа толчков в феврале 1956 г. объясняется активизацией роста древнего купола, сопровождавшегося взрывами и образованием горячих лавин. Вспышка сейсмической активности в апреле и мае 1956 г. связана с ростом нового купола. В дальнейшем каждое новое оживление роста купола сопровождалось роем мелких толчков.

Вместе с тем энергия землетрясений, пошедшая на убыль с начала марта, продолжала убывать, почти не отзываясь ни на изменении числа толчков, ни на изменения в ходе извержения (речь идет о толчках с энергией выше 10^{16} эрг). Интересно отметить, что кульминационный взрыв наступил во время спада сейсмической энергии. В этом факте можно видеть некоторое соответствие с теми многочисленными случаями на других вулканах, когда извержения начинались во время спада числа предварительных землетрясений.

Создается впечатление, что во время извержения сопки Безымянной имели место землетрясения двух «этажей». Одни из них—многочисленные слабые толчки—имели поверхностный гипоцентр и были тесно связаны с внешними проявлениями извержения, у других—более редких, но сильных—был более глубокий гипоцентр, и, не завися от внешних проявлений извержения, они имели связь с общим ходом извержения.

Оценку глубин гипоцентра этого рода толчков можно произвести по углу выхода сейсмических волн. Кажущийся угол выхода—около 60° . Следовательно, глубина гипоцентра равна 50—60 км. Глубину можно также оценить по эмпирической формуле (Шебалин, 1957):

$$I_0 = 1,5 M - 3,5 \lg h + 3,0, \quad [8]$$

где M —магнитуда, определенная по смещению в поверхностных волнах, h —глубина в километрах, I_0 —сила в эпицентре в баллах.

В октябре-ноябре 1955 г. был зарегистрирован ряд толчков с $M = 4,8—5,0$; в нашем экспедиционном лагере в 16 км от вулкана они ощущались с силой в III балла (лицами, находящимися в полном покое); в Ключах (43 км от вулкана)—с силой в II балла (только по покачиванию люстр). В эпицентре их сила, следовательно, вряд ли превышала 4—4,5 балла. Отсюда глубина очага оценивается в 40—60 км, т. е. совпадает с оценкой по углу выхода.

Исследования во многих вулканических странах показали ценность сейсмических данных для прогноза начала извержения. Нам пред-

ставляется справедливым, что анализ изменения энергии землетрясений может помочь в прогнозе общего течения уже начавшегося извержения¹.

ЛИТЕРАТУРА

- Голицын Б. Б. О землетрясении 18 февраля 1911 г. Изв. Росс. АН, серия 6, 1915.
- Горшков Г. С. Сейсмические наблюдения в селе Ключи (с 28 августа по 31 декабря 1948 г.).—Бюлл. Вулк. ст., № 19, 1953.
- Горшков Г. С. Извержение сопки Безымянной (предварительное сообщение).—Бюлл. Вулк. ст., № 26, 1957.
- Соловьев С. Л. О классификации землетрясений по величине их энергии.—Труды Геофиз. ин-та, № 30, 1955.
- Соловьев С. Л. и Шебалин Н. В. Определение интенсивности землетрясения по смещению почвы в поверхностных волнах.—Изв. АН СССР, серия геоф., № 7, 1957.
- Шебалин Н. В. О связи между энергией, бальностью и глубиной очага землетрясения.—Изв. АН СССР, серия геоф., № 4, 1955.
- Шебалин Н. В. Соотношение между бальностью и интенсивностью землетрясений в зависимости от глубины очага.—Бюлл. Совета по сейсмологии, № 6, 1957.
- G. S. Gorshkov. Gigantic eruption of the Volcano Bezymianny.—Bull. Volc., ser. II, t. XX. Napoli, 1959.
- H. Jeffreys. The Pamir earthquake of 1911, February 18, in relation to the depths of earthquake Soci. Monthly Notices R. A. S., Geoph. Suppl. v. I, N 2, 1923.
- I. Yokoyama. Energetics in active volcanoes. Ist Paper. (Activities of Volcano Mihara, Ooshima Island during the period 1953—54). Bull. Earthquake Res. Inst., v. 34, pt. 2.

¹ Так, например, в начале 1956 г., когда извержение вулкана Безымянного ослабло и, казалось, шло на убыль, автор, основываясь на сейсмических данных, дал письменное заключение в Усть-Камчатский Совет депутатов трудящихся о том, что, несмотря на кажущееся ослабление, извержение не закончилось и еще возможен мощный взрыв, а зона р. Хапицы является опасной. Дальнейшие события, как известно, подтвердили этот прогноз.