

Б. И. ПИИП

ОСОБЕННОСТИ ИЗВЕРЖЕНИЯ
КЛЮЧЕВСКОЙ СОПКИ

Из многочисленных вулканов Камчатки и Курильских островов бесспорно самым величественным и наиболее активным является Ключевской вулкан. Он входит в виде гигантского правильного конуса, 4850 м высотой, в состав скученной группы из 11 других вулканов, большей частью столь же больших размеров. Вулканы эти возникли из общего очага основной магмы батолитового типа в зоне пересечения Алеутской и Курило-Камчатской вулканических дуг, в тектонически ослабленном участке земной коры. Кроме Ключевской сопки, представляющей типичный базальтовый стратовулкан, в этой необыкновенной вулканической группе имеются еще два действующих вулкана: Толбачинский (приближающийся к Гавайскому типу) и Безымянный (экструзивный по особенностям своей главной массы).

Интересной особенностью Ключевского вулкана является то, что на склонах его чаще, чем на каком-либо другом вулкане, происходят побочные извержения, нередко очень сильные, сопровождаемые выбросами большого количества рыхлого материала и излияниями вязких потоков базальтовой лавы. Участки склонов, где возникают эти извержения, легко доступны и очень удобны для наблюдений вулканических процессов с близкого расстояния. Именно поэтому, когда в 1935 г. Академия наук СССР приступила к организации стационарных вулканологических исследований на Камчатке и встал вопрос о выборе объекта для систематических наблюдений, таким объектом была выбрана Ключевская сопка. Вулканологическая станция обосновалась у подножия Ключевской сопки, в 32 км от кратера, в поселке Ключи.

С момента организации Вулканологической станции прошло 20 лет. В течение этого времени Ключевская сопка извергалась шесть раз; в пяти случаях извержения сопровождались образованием побочных кратеров. Все эти извержения наблюдались и изучались сотрудниками Вулканологической станции, и данные о них были опубликованы в ряде статей и монографий. Таким образом, Ключевская сопка в отношении ее динамических явлений, в настоящее время представляет собой один из наиболее хорошо изученных вулканов Курило-Камчатской вулканической зоны.

Обобщающей сводки об особенностях извержений Ключевской сопки до сих пор не имеется. В предлагаемом очерке делается попытка дать такое обобщение. Используя накопленные материалы наблюдений, автор во многом основывается на своих собственных исследованиях, так как ему довелось наблюдать и изучать четыре из шести наблюдавшихся циклов извержений вулкана (Пийп, 1954_{1,2}, 1956_{1,2}).

Частота извержений. Ключевская сопка — наиболее часто извергающийся вулкан Камчатки. В этом отношении она похожа на другие базальтовые вулканы мира. Извержения ее происходят через интервалы от одного года до 5—9 лет. Такая частота деятельности была известна еще более 220 лет назад, когда со слов населения об этом сообщил С. П. Крашенинников (1949). Наблюдения более позднего времени подтвердили правильность указанного ритма деятельности вулкана.

Очень характерно, что в периоды оживления вулканической деятельности на Камчатке, когда один за другим или иногда одновременно начинают действовать многие удаленные вулканы, Ключевская сопка ча-



Фиг. 1. Сильная фумарольная деятельность в кратере Ключевской сопки. Справа — вырез шарра 1945 г. Деления горизонтальной и вертикальной шкалы примерно 30 м.

сто начинает извержения первая. Особенно ярко это проявилось, например, в 1737—1738, 1854—1855, 1904, 1925—1926 и в 1944—1945 гг.

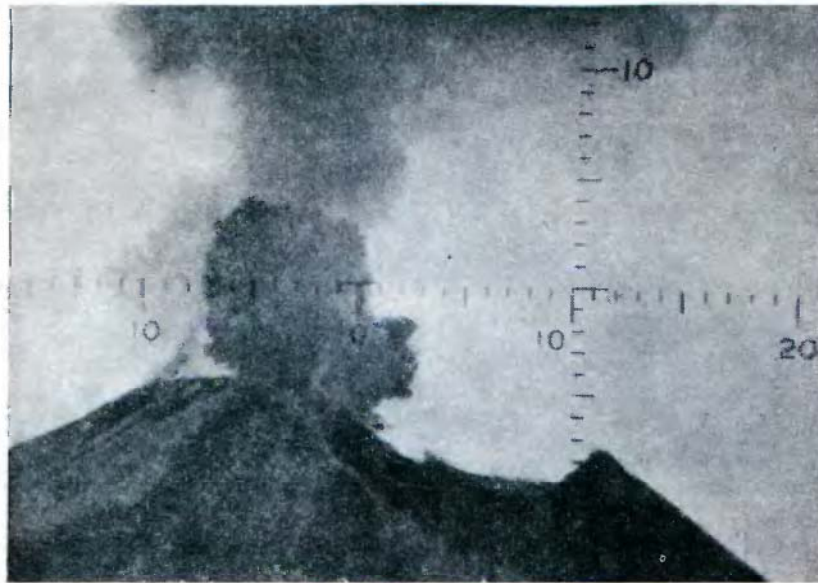
Состояние кратера. От извержения к извержению кратер изменяет свою форму и размеры, но в последние годы, по крайней мере с 1937 г., они остаются более или менее постоянными. Диаметр кратера обычно сохраняется около 600 м, а глубина — от 100 до 200 м. Дно кратера в периоды покоя завалено рыхлым материалом и нередко на большей части площади бывает покрыто многолетним слежавшимся снегом (Былинкина и др., 1954). Оно обнажено лишь в тех местах, где выбиваются фумаролы. Иногда на дне кратера сохраняется одна или несколько бокк, из которых происходят случайные, эпизодические выбросы лавы.

Периоды покоя. В спокойные периоды в кратере отмечается только фумарольная деятельность, то усиливающаяся, то ослабевающая вплоть до полного исчезновения. Фумаролы, проектирующиеся над гребнем кратера в форме тонких белых струек или неправильных по очертаниям парящих облаков газа, поднимаются на высоту от десятков до нескольких сотен метров, а иногда и до километра (фиг. 1). Постоянных фумарольных полей в кратере не замечалось; пункты фумарол меняются после каждого извержения. В 1951 г. было три устойчивых фумарольных поля, занимав-

ших незначительную часть заснеженного дна кратера (Былинкина и др., 1954).

Видимая интенсивность фумарольных выделений зависит от разных причин, но основными являются атмосферные условия. Иногда в эти периоды происходят и одиночные слабые выбросы темного несветящегося пепла, причем они тоже по-видимому обусловлены уменьшением атмосферного давления в периоды высокого стояния лавы в выводном канале вулкана (фиг. 2).

Примерами продолжительных периодов покоя можно назвать годы: 1731—1737, 1762—1767, 1821—1829, 1840—1848 и из более близких к нам 1939—1944 и 1946—1951.



Фиг. 2. Взрывы типа Вулкано из кратерной бочки Ключевской сопки.

Периоды активной деятельности. Различную продолжительность и интенсивность имеют также и периоды активной деятельности вулкана. Серии извержений, быстро следующие друг за другом и составляющие то, что мы называем эруптивным циклом, в одних случаях могут продолжаться долго: до двух или трех лет, а иногда и больше. Извержения в такие длительные периоды обычно или слабые, или, если и являются относительно сильными, то не достигают предельного напряжения (межпароксизмальные извержения). В других, реже наблюдающихся случаях, эруптивные циклы весьма короткие, извержения протекают бурно и с большим напряжением (пароксизмальные извержения). Такие два типа деятельности вулкана были уже давно известны местным жителям, и Крашенинников сообщил об этом еще 220 лет назад. Примерами эруптивных циклов первого рода можно назвать извержения 1727—1731, 1767—1770, 1788, 1812—1813 гг. и ряд других; из более близкого времени к таким относятся извержения 1937—1938, 1951, 1953 и 1954 гг. Названные извержения, будучи относительно слабыми и длительными, не производят на жителей особого впечатления и быстро забываются; записаны за историческое время, вероятно, далеко не все. Примерами деятельности другого рода являются извержения 1737, 1762, 1790 (?), 1821, 1853, 1878,

1904, 1926 и 1945 гг. Извержения этого типа из-за катастрофического характера своего проявления сохраняются в памяти жителей очень долго, слух о них распространяется по всей Камчатке, и поэтому можно предполагать, что за исторический период нам известны все такие извержения.

1) **Межпароксизмальные извержения.** Извержения эруптивных циклов того и другого типа по-разному проявляются в полости кратера. Эруптивные циклы умеренной силы, судя по материалам наблюдений Гауза в 1788 г. (Влодавец, 1940), Конради в 1909 г. (Пийп, 1956) и Меньяйлова в 1937—1938 гг. (Меньяйлов, 1947), характерны тем, что



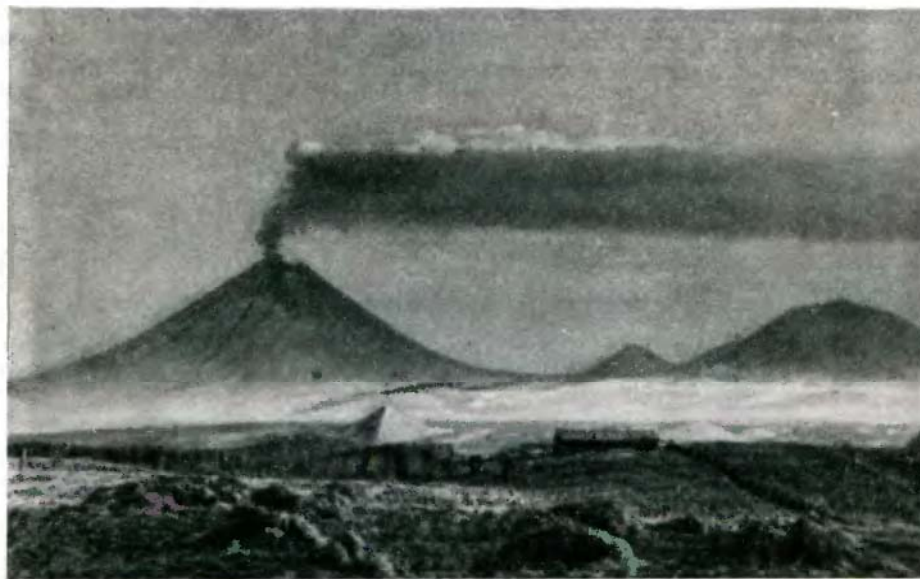
Фиг. 3. Заостренная вершина Ключевской сопки. Август 1909 г.

извержения происходят из отдельных пунктов дна кратера, из кратерных бочек, вокруг которых постепенно нагромождается вал или конус рыхлого вулканического материала. К концу цикла этих извержений внутренний конус шлаков и пепла может заполнить всю первоначальную полость кратера, вследствие чего вершина вулкана иногда становится необыкновенно острой и такой остается до следующего цикла извержений (фиг. 3). Подобное заострение вершины, по сообщению Гауза, имело место до сильного извержения 1762 г. и, по-видимому, аналогичная картина наблюдалась до извержения 1926 г. Можно предполагать, что такие извержения зарождаются на не особенно глубоких уровнях, так как при этом главное жерло полностью не открывается и извержения происходят через вертикальные ответвления последнего. Извержения этого типа происходят через интервалы в несколько лет.

2) **Пароксизмальные извержения.** Иная картина наблюдается во время циклов особо сильных извержений. При этих извержениях взламывается все дно кратера, уничтожается внутрикратерный конус, выросший во время предшествующих эруптивных циклов, и магматические продукты выступают на поверхность из полного отверстия главного жерла. Вершина вулкана после этих извержений заметно притупляется (фиг. 4). Кульминационная стадия такого цикла носит пароксизмальный характер, весь этот цикл поэтому может быть назван пароксизмальным.

Циклы пароксизмальных извержений происходят через большие промежутки времени. Начиная с 1737 г., они наблюдались через 25, 28, 31, 25, 22 и 19 лет или в среднем через 26 лет. Деятельность вулкана, таким образом, можно представить в виде чередующихся периодов умеренных извержений и периодов покоя, которые образуют отдельные этапы, заканчивающиеся каждый циклом пароксизмальных извержений.

Аналогия с Везувием. Интересно, что указанные выше проявления активности Ключевской сопки довольно близко напоминают деятельность



Фиг. 4. Притупленная вершина Ключевской сопки. Июнь 1954 г.

Везувия. Здесь также циклы относительно слабых извержений с периодами покоя или сильного ослабления активности между ними заканчиваются извержениями пароксизмального характера. В межпароксизмальные периоды извержения также происходят из кратерной бочки, благодаря чему создается и растет внутренний конус лавы и шлаков, постепенно заполняющий кратер. Ф. Перрет (1924 г.), которому мы обязаны превосходным описанием пароксизмального извержения Везувия в 1906 г., обращая внимание на существование ритма или цикличности в деятельности вулкана, полагает, что во время межпароксизмальных извержений происходит накопление энергии, которая при пароксизмальных извержениях освобождается вместе с вулканическим материалом. Такому накоплению энергии благоприятствует внутрикратерный конус, который служит как бы клапаном, закрывающим жерло. На Ключевской сопке, несмотря на внешнее сходство общего характера деятельности с Везувием, мы имеем, по-видимому, другие условия, и наблюдаемые здесь явления требуют много объяснения.

Образования шарра. Судя по ряду данных, для Ключевской сопки весьма характерно периодическое образование эруптивно-абразивных долин на склонах конуса, сохраняющихся в течение десятков лет. По ним, как по постоянным направляющим каналам, во время извержения стекает лава, но чаще, по-видимому, скатываются раскаленные рыхлые частицы, непрерывно абрадирующие склон и создающие в массе впечатлительные льющейся жидкой лавы. Неопытные наблюдатели скатывание

раскаленного рыхлого материала по этим долинам часто принимали за излияние жидкой лавы. Наблюдающееся во время отдельных циклов межпароксизмальных извержений обрушение вулканического материала по одной и той же долине обусловлено, по-видимому, близким расположением к истоку этой долины постоянной кратерной бочки. С такой точки зрения мы имеем здесь картину, очень похожую на Sciagga del Fuoco Стромболи, и соответственно этому упомянутые долины могут быть названы шарра. Однако в отличие от шарра Стромболи, долины шарра на Ключевской сопке не являются постоянными. Уничтожение кратерных бочек при пароксизмальных извержениях и образование новых бочек в другом месте при последующих циклах межпароксизмальных извержений вызывают образование новых шарра и отмирание и заполнение льдом старых.



Фиг. 5. Северо-западная шарра Ключевской сопки, образовавшаяся при извержении 6 января 1945 г.

В ряде случаев новые шарра образуются и при пароксизмальных извержениях. Этому явлению обычно способствует небольшой наклон столба извержения, вследствие чего выбрасываемая масса рыхлого материала (преимущественно огромных бомб) сосредоточенно падает с большой высоты на ограниченный участок гребня кратера и внешнего склона конуса, где выдалбливает выемку той или иной глубины; продолжение выемки вниз по склону прорезается громадными лавинами выброшенного каменного материала. Такой способ образования новой шарра отчетливо наблюдался при извержении 1 января 1945 г. (фиг. 5). В прошлом образование шарра отмечалось при пароксизмальных извержениях 1737, 1762 и 1878 гг.

Морфологические особенности шарра Ключевской сопки выражены в том, что они начинаются широкими чапами в истоке и постепенно суживаются книзу, тогда как сходные с ними эрозионные барранкосы обнаруживают обратные соотношения: они узкие наверху и постепенно расширяются книзу (фиг. 6).

Характер терминальных извержений. Судя по материалам изучения новейших извержений и по незначительному распространению на поверхности конуса свежих лавовых потоков, терминальные извержения Ключевской сопки, по крайней мере в течение исторического времени, были

существенно эксплозивными. При извержениях 1937—1938 гг. рыхлого материала было выброшено в 14 раз больше, чем было излито лавы (Набоко, 1947). Извержения 1944—1945 гг. доставили 0,6 куб. км рыхлых продуктов и только 0,01 куб. км жидкой лавы, т. е. в 60 раз больше выбросов, чем жидкой лавы. Терминальные извержения 1951, 1953 и 1954 гг. были часто эксплозивными, лавы из главного кратера не изливались.

Типы терминальных извержений. Извержения Ключевской сопки, как это наблюдается и для других вулканов, не отличаются однообразным характером, а слагаются из явлений, которые можно отнести к разным классификационным типам. Отдельные, обычно наиболее слабые, эруптивные циклы межпароксизмальных периодов характеризуются извер-



Фиг. 6. Юго-восточная шарра Ключевской сопки.

жениями типа Вулкано, т. е. совершаются без световых эффектов (без видимого зарева в кратере) и состоят только из выбросов больших масс темного несветящегося пепла и газов (фиг. 7). Нередко при этих извержениях наблюдаются выбросы дымовых колец, свидетельствующих о существовании отдельных бокк на дне кратера, отмечаются дуги видимых звуковых волн, возникающих при сильных взрывах и часто наблюдаются ливнейшие молнии. Такие явления были характерны при последних извержениях 1953 и 1954 гг. Извержения других эруптивных циклов, более интенсивных, которые происходят в форме выбросов светящихся частиц, а также излияния лавы и обрушения на склоны рыхлого материала относятся, с одной стороны, к явлениям типа Стромболи (непрерывная деятельность и появление светящейся лавы), с другой — к явлениям типа Вулкано (обилие рыхлого материала и выбросы его из других бокк кратера в темном состоянии). Такие формы деятельности наблюдались, например, при извержении 1954 г. (фиг. 8). Более сильную или пароксизмальную (по нашей терминологии) деятельность последнего типа можно отнести уже к разряду плинианских извержений, но чаще всего к их наиболее слабой форме.

Побочные извержения. Терминальные извержения Ключевской сопки часто сопровождаются побочными извержениями, происходящими обычно далеко внизу на склонах вулкана, ближе к зоне подножия. Такие извержения за последние 25 лет наблюдались почти при каждом

терминальном извержении; не произошло прорыва побочного кратера только при последнем извержении 1954 г.

В большом количестве такие извержения происходили и в прошлом. На восточных склонах Ключевской сопки по подсчету В. И. Влодавца (1940 г.) сохранился 41 побочный кратер, а вместе с новейшими — 49. В этот подсчет не попали многие кратеры, сильно разрушенные или глубоко засыпанные позднейшими выбросами и пролювиальными отложениями.



Фиг. 7. Пепловое извержение Ключевской сопки 7 июня 1953 г.

Совершенно отсутствуют сведения о побочных извержениях Ключевской сопки в XVII и XVIII веках. Это, однако, совсем не значит, что их в действительности не было. Ряд сравнительно свежих потоков лавы и шлаковых конусов среди преобладающей массы старых указывает, что такие извержения происходили и в исторический период, но они, по-видимому, были более редкими, и в скудных сообщениях прошлого понятие о них не отделялось от понятия терминального извержения.

Частое проявление деятельности вне главного кратера, далеко в стороне от него, характеризует Ключевскую сопку как вулкан с извержениями типа Этны.

Побочные извержения Ключевской сопки, следуя классификации Меркалли, можно подразделить на субтерминальные и эксцентрические.

1) **Субтерминальные извержения.** Извержения этого типа происходят одновременно с извержениями главного кратера, и место их находится недалеко от вершины. Такие извержения, существенно эксплозивные по форме и стромболианские по типу проявления, наблюдались в 1829 г. Эрманом (Erman, 1848) и в 1937 г. Меняйловым и Набоко (Меняйлов, 1947; Набоко, 1947).

По описанию Эрмана субтерминальное извержение 1829 г. происходило на внешнем склоне в 260 м ниже гребня кратера, откуда взрывами выбрасывались наклонные огненные струи (нормальные к склону, но

косые к оси вулкана) и изливалась лава. Деятельность этого кратера происходила одновременно с деятельностью главного кратера. Возможно такой же была деятельность кратера Камули в 1937 г., но она описана менее подробно (Меняйлов, 1947).

Несомненно, извержения этого типа могли происходить и при других циклах деятельности вулкана, но в скурых сообщениях старинных наблюдателей сведения о них, очевидно, опускались.

2) **Эксцентрические извержения.** Извержения этого типа для Ключевской сопки более обычны. При этом характерно, что



Фиг. 8. Извержение Ключевской сопки в июне 1954 г. Смешанная форма взрывов стромболианско-вулканского типа (начальные взрывы стромболианские — белое облачко, конечные — темные пепловые).

они являются частью общего цикла извержения вулкана, но отделены во времени и в пространстве от деятельности главного кратера. Обычно эксцентрическое извержение следует за терминальным, начинается от нескольких дней до нескольких месяцев позже его и проявляется на расстояниях до 15—20 км от вершины вулкана.

Эксцентрические извержения начинаются с сильной взрывной деятельности, которая либо сосредоточивается в одном пункте, либо перемещается в радиальном к главной вершине направлении сверху вниз по склону конуса (фиг. 9). В первом случае над местом сильных взрывов, в результате бурного фонтанирования лавы, создается той или иной высоты шлаковый конус, из которого, по мере его создания, изливается глыбовый поток вязкой базальтовой лавы. В такой форме происходили извержения 1932, 1946, 1951 и 1953 гг. (фиг. 10). Во втором случае стадии создания шлакового конуса предшествует стадия образования взрывных кратеров, всегда линейно сгруппированных и расположенных гипсометрически выше шлакового конуса. В такой форме происходили извержения 1938 и 1945 гг.

В отличие от терминальных извержений, эксцентрические извержения Ключевской сопки всегда существенно эффузивные. Это видно из

приведенных в табл. 1 данных о количествах излитой лавы и рыхлых материалов, выброшенных при новейших извержениях.

Образование верхних эксплозивных кратеров эксцентрического извержения всегда совершается в форме взрывов типа Вулкано, т. е. таких,



Фиг. 9. Извержение кратера Белянкина у подножия конуса Ключевской сопки. Июнь 1953 г.



Фиг. 10. Извержение кратера Былинкиной. Ноябрь 1951 г.

при которых выбрасываются только темные несветящиеся массы газа, пепла и обломков пород кровли поднимающейся инъекции. Температура этих взрывов сравнительно с лавовым кратером более низкая, и в некоторых случаях взрывы приближаются даже к типу фреатических. Про-

должительность деятельности измеряется одними или двумя сутками, редко — многими днями.

Извержения нижнего лавового или шлакового кратера характерны тем, что при этом происходят одновременно явления типа Вулкано и Стромболи. Часто в этих кратерах существует несколько бокк, из которых одни являются чисто лавовыми, и деятельность их характеризуется фонтанами раскаленной лавы типа Стромболи, тогда как другие бокки, часто одновременно действующие, выбрасывают только газы и несветящийся рыхлый материал в форме явлений Вулкано.

Таблица 1

Показатели эксцентрических извержений

Дата извержения	Продолжительность извержения	Название кратера	Лавы в млн. м ³	Выбросы в млн. м ³	Отношение лавы к выбросам
1932	12 мес.	Туйла	44	6	7:1
1938	13 »	Билюкай	240	20	12:1
1945	19 дней	Юбилейный	30	23	1:1
1946	29 » (?)	Апахончич	15	0,7	20:1
1951	10 »	Былинкиной	5	2,5	2:1
1953	11 »	Белянкина	14	1	14:1

Длительность эксцентрических извержений чаще всего небольшая, порядка 10—20 дней, но в двух случаях (извержения кратеров группы Туйла и Билюкай) она измерялась многими месяцами.

Объем излившейся лавы и нагромождения шлаков не всегда находятся в прямом соответствии с продолжительностью извержения. Длительность извержения часто зависит от неравномерной подачи газов и лавы и от растянутости во времени периодов слабой деятельности. Эти условия явно определяют особенностями не только сопряженного терминального извержения, но и от предшествующего ему эруптивного цикла.

Лавовые потоки. Явление типа Вулкано, часто наблюдающееся в формах извержений Ключевской сопки как терминальных, так и эксцентрических, вызывается очень вязкой базальтовой лавой, быстро густеющей и затвердевающей при соприкосновении с воздухом. Вязкими свойствами этой лавы обусловлен и характерный тип лавовых потоков, отличающийся от гавайских глыбовых лав более грубыми формами глыб, большей величиной и разобченностью их на поверхности потока, значительно большей мощностью, достигающей 10—15 м, и значительно меньшей скоростью движения. Такая форма потоков более характерна для дацитовых и андезитовых лав, и ее можно назвать, следуя Г. Вашингтону, санторинской глыбовой лавой (фиг. 11 и 12).

Скорость движения лавовых потоков Ключевской сопки обычно небольшая, около 10—30 м в час, и только в очень редких случаях, как это было при излиянии гавайской глыбовой лавы в конечную стадию извержения Билюкай в марте 1939 г., она может достигать 2000 м в час (Попков, 1946).

Температура лавы в момент вытекания из кратера достигает, судя по визуальным оценкам, 1200°, но движение в потоке, по данным непосредственных измерений, совершается при температурах около 1100°. При падении температуры до 980° лавы, оставаясь раскаленной, уже затвердевает. Опять, только в редких случаях, как это было при упомянутом излиянии Билюкай, по всей вероятности вследствие большого содержания растворенных в лаве газов, температура движущейся лавы может опускаться до 870° (Попков, 1946).

Содержание растворенных газов в лавах эксцентрических извержений, по-видимому, может колебаться от извержения к извержению. Явления, которые можно объяснить только этим обстоятельством, отчетливо наблюдались при последних четырех эксцентрических извержениях. Обращало на себя внимание, что первые после длительного молчания канала эксцентрические извержения (1945 и 1951 гг.) выбрасывали наряду со шлаками много витых вулканических бомб, а излитая лава обильно и длительно выделяла газы и осаждала возговы. Последующие же извержения, сравнительно скоро следовавшие за первыми (1946 и 1953 гг.),



Фиг. 11. Лавовый поток кратера Белянкина. Июнь 1953 г.

выбрасывали только шлаки, без бомб, и лавы их были весьма бедны газами, что проявляется очень характерно в ничтожно малом возгоне сульфидов. По-видимому, эти различия вызывались положением места питания эксцентрического извержения в главном выводном канале вулкана: первые эксцентрические извержения получали питание из нижних уровней магматической колонны и содержали больше газов, а последующие — из более высоких и были бедны газами.

Фумарольная деятельность. На эруптивном поле, после окончания извержения и остановки лавового потока, на определенных местах начинают длительно действовать фумаролы, обычно в пунктах расположения расколов и трещин в лавовом потоке и на шлаковом конусе (фиг. 13). В пространственном расположении фумарол всегда обнаруживается одна и та же закономерность, состоящая в том, что на дне кратеров проявляется преимущественно сольфатарная деятельность, на гребнях шлаковых и эксплозивных конусов — фторидная, а на поверхности лавового потока — преимущественно хлоридная (образование нашатыря). Очень ярко это распределение подчеркивается составом образующихся минеральных возгонов. На дне кратеров отлагаются почти исключительно элементарная сера и различные водные сульфаты (алуноген, квасцы, гипс и др.); на гребнях и склонах конусов преимущественно выделяется

фтористый водород, который интенсивно воздействует на лаву и превращает ее в белую или желтоватую массу фторида; в меньшем количестве в зоне раскаленных трещин на гребнях конусов и на их склонах отлагаются окислы (гематит, тенорит, тридимит и др.), хлориды (хлористый натрий и калий, хлорид меди и др.) и безводные сульфаты (афтиталит, эвхлорин и др.). На поверхности лавовых потоков характерно осаждение нашатыря и в качестве примеси к нему хлорного железа, всегда образующего с нашатырем двойные водные соли типа кремерзита, окрашивающие нашатырь в различные оттенки красного и желтого цвета (фиг. 14).



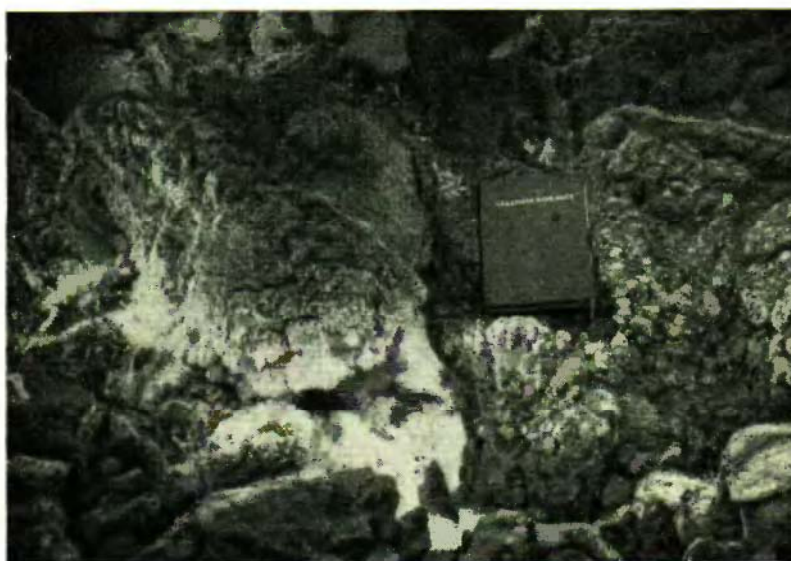
Фиг. 12. Борт лавового потока глыбового типа, излитого из кратера Заварицкого.

Объяснение такого распределения кислых газов по эруптивному полю мы находим только в том, что различные газы не одинаково выделяются из массы лавы (лавовой инъекции) при ее подъеме к поверхности. Обособившись в вершине лавовой инъекции газовое гнездо, которое разряжается сильными взрывами в начальную стадию эксцентрического извержения, состоит, в порядке уменьшающихся количеств, из сернистого газа, фтористоводородного и хлористоводородного газа, не считая присутствующей во всех газовых скоплениях преобладающей массы паров воды. При взрывах газовых гнезд сернистый газ и преобладающая масса хлористого водорода рассеиваются целиком и не захватываются падающими на землю шлаками и твердыми эксплозивными обломками, тогда как фтористый водород поглощается обломками и сохраняется длительное время в навале рыхлого материала, откуда он в результате процесса окисления лавы постепенно вытесняется. Оставшиеся в лавовой массе (инъекции) растворенные газы состоят существенно из сернистого и хлористоводородного газа. В разных условиях эти газы выделяются по-разному. В условиях, существующих на дне кратеров, куда открываются выходы тела инъекции и где не происходит окисления лавы, идет свободное выделение сернистых газов и почти совершенно не выделяется остаточный хлористоводородный газ, остающийся в нормально остывающем теле

инъекции. На поверхности лавовых потоков явление окисления лавы, совершающееся в нижнем агломератовом основании потоков в условиях вторичного нагрева лавы, побуждает выделяться растворенные газы,



Фиг. 13. Фумаролы на лавовом потоке кратера Былинкиной в первые дни после излияния лавы.



Фиг. 14. Отложение нашатыря на лаве кратера Былинкиной. Август 1956 г.

из которых сернистый газ улетучивается без осаждения возгонов, а хлористо-водородный газ, образуя с синтезированным из воздуха аммиаком нашатырь, фиксируется в виде обильного возгона. С ослаблением процесса окисления лавы, с уменьшением температуры вторичного разо-

грева, выделение хлористого водорода уменьшается и, наконец, прекращается, а сернистые газы, продолжая выделяться, осаждают сульфаты.

Окисление лавы. Этот интересный процесс, обнаруженный нами впервые на материале эксцентрического извержения 1945 г., подобный самовозгоранию отложений каменного угля или отвалов колчеданной руды, возникает на первых стадиях образования горячего рыхлого нагромождения шлакового конуса и в горячем агломератовом основании потока лавы. Процесс вызывается проникновением воздуха в горячую рыхлую лавовую массу, где кислород воздуха окисляет закисные соединения лавы и вследствие этой экзотермической реакции, совершающейся в большом объеме, вновь повышает температуру лавы. Окисление лавы — стойкий и длительный процесс, совершающийся в навале шлаков в течение многих лет (например, на кратере Туйла, образовавшемся в 1932 г., процесс окисления и разогревания шлаков наблюдался более 20 лет). Этот процесс несколько быстрее заканчивается в менее мощных агломератовых основаниях лавовых потоков.

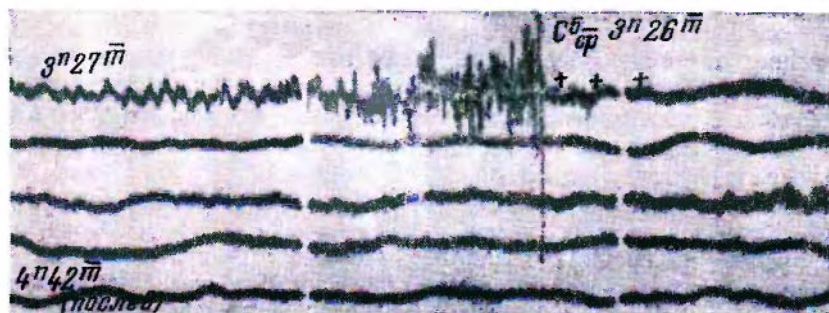
В ранние стадии процесса окисления и саморазогревания шлаковых конусов температура может достигать до такого значения, что происходит не только агглютинация рыхлого вещества, но появляется и способность его к перемещению или течению. Вторичным разогреванием материала до пластичного состояния можно объяснить появление на крутых внутренних склонах кратеров горячих агглютинативных оплывин или потоков. Непосредственное измерение температуры поверхности раскаленных трещин на гребнях шлаковых конусов спустя несколько месяцев после извержения показало, что она достигает до 840° , но внутри окисляющейся рыхлой массы температура могла быть значительно выше.

Процесс окисления, как мы уже сказали, оказывает исключительно большое влияние на фумарольную деятельность. В основном фумаролы эксцентрического извержения являются вторичными, так как газы выделяются из ограниченной лавовой массы, доставленной на поверхность; первичными являются только те, которые располагаются на дне кратеров и получают питание непосредственно из тела магматической инъекции. То обстоятельство, что появившаяся на поверхности горячая рыхлая лавовая масса легко подвергается окислению, является главной причиной, вызывающей усиленную, длительную и в некоторой степени насильственную газовую деятельность в виде вторичных фумарол. Если бы лава не окислялась, то в условиях нормального остывания ее фумаролы были бы слабыми и недолговечными. Такие условия существуют в потоках типа гавайских лав, где в основании потоков нет агломератовых подстилок и поэтому окисление не развивается. Слабая и недолговечная фумарольная деятельность, однако, может наблюдаться и в тех случаях, когда лава санторинского глыбового потока содержит очень мало растворенных газов (извержения 1946 и 1953 гг.).

Вулканические землетрясения. Сейсмометрические исследования на Вулканологической станции были начаты в 1947 г., но только в 1948 г. Г. С. Горшкову впервые удалось изучить проявление типичных вулканических землетрясений. Рой этих землетрясений, который начался в октябре 1948 г. и, ослабевая, продолжался до конца года, не завершился извержением вулкана, как это произошло в 1951 г. В данном случае землетрясения возвестили лишь начало неустойчивого состояния в зоне очага и на самом вулкане сказались только в усилении фумарольной эмиссии. О том, что этот рой был вулканическим и относился к Ключевской сопке, свидетельствовали разности фаз преимущественно около 4 сек., единичные определения азимутов, указывавшие эпицентр в районе побочных кратеров 1932 г., и, наконец, форма проявления, типичная для

роя вулканических землетрясений (фиг. 15). В этом отношении очень показательным было то, что количество землетрясений и интенсивность их достигли максимума во втором периоде сейсмической деятельности, тогда как для тектонических землетрясений, как известно, характерно начало в виде мощного сотрясения и возникновение вслед за тем многочисленного роя последующих землетрясений, которые убывают по количеству и интенсивности гораздо медленнее, чем вулканические.

Более показательной была связь между роем землетрясений и извержением в ноябре 1951 г., изучавшихся нами. Землетрясения местного типа с разностями фаз от 4 до 5 сек., с периодами в фазах \bar{P} и \bar{S} около 0,2 сек. и с значительными смещениями в фазе \bar{S} начались днем 14 ноября и в полдень следующего дня достигли максимума по количеству и силе; затем сейсмическая деятельность быстро пошла на спад. Эпицентры толч-



Фиг. 15. Вулканическое землетрясение из района Ключевской сопки. Составляющая восток — запад, разность фаз 4 сек.

ков, обнаружив небольшую миграцию с юго-юго-востока на юг, сосредоточились затем в пункте около 25 км к югу от Вулканологической станции. Всего за 10 дней было отмечено 636 толчков преимущественно умеренной силы. Проявление роя, таким образом, опять было чисто вулканическим (фиг. 16).

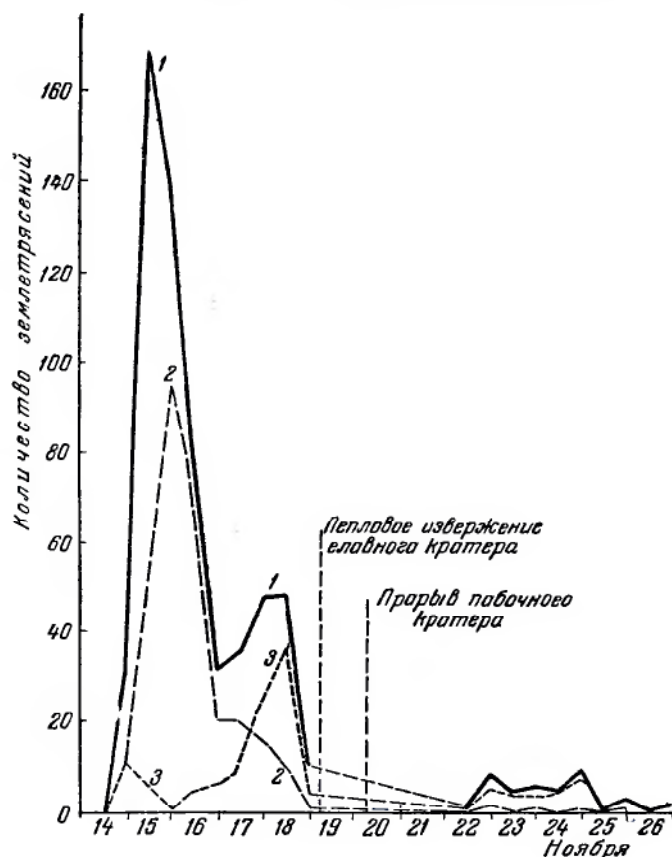
В период спада сейсмических толчков — 19 ноября, рано утром — началось сильное пепловое извержение в главном кратере Ключевской сопки, которое, однако, вскоре прекратилось. На следующий день, 20 ноября, около 5 часов утра произошло извержение нового эксцентрического кратера примерно в пункте, на который указывали эпицентры роя землетрясений. Последние в убывающем количестве продолжали происходить и во время извержения, причем некоторые из них вблизи кратера достигали значительной силы. Протяженные открытые трещины в окружающем скалистом грунте, прослеживавшиеся на расстояния до 500—700 м от кратера, свидетельствовали об исключительно сильных сейсмических сотрясениях, происходивших здесь в момент прорыва кратера.

Таким образом, в данном случае местная сейсмическая деятельность явилась ясным предвестником готовящегося извержения, которое началось через пять суток после появления толчков. Но на примере роя 1948 г. мы видим, что этот признак не всегда может быть предвестником извержения.

В извержении 1953 г. взаимосвязь вулканической и сейсмической деятельности проявилась опять по-иному. Сильному пепловому извержению главного кратера Ключевской сопки, начавшемуся утром 7 июня, не предшествовали сейсмические толчки. Они начались одновременно с терминальным извержением и были более редкими и более слабыми по сравнению с толчками роя 1951 г. То обстоятельство, что через 6 суток после

начала извержения главного кратера произошло эксцентрическое извержение, дает повод и в этих сейсмических толчках видеть предвестник извержения, но только не терминального, а побочного. По-видимому, и в извержении 1951 г. рой сейсмических толчков был предупреждением не терминального, а готовящегося побочного извержения.

К такому выводу заставляет нас прийти оценка последующего извержения 1954 г., которое началось и завершилось совершенно без сейсми-



Фиг. 16. Количество вулканических землетрясений (по полусуткам), предшествовавших извержению Ключевской сопки в ноябре 1951 г.

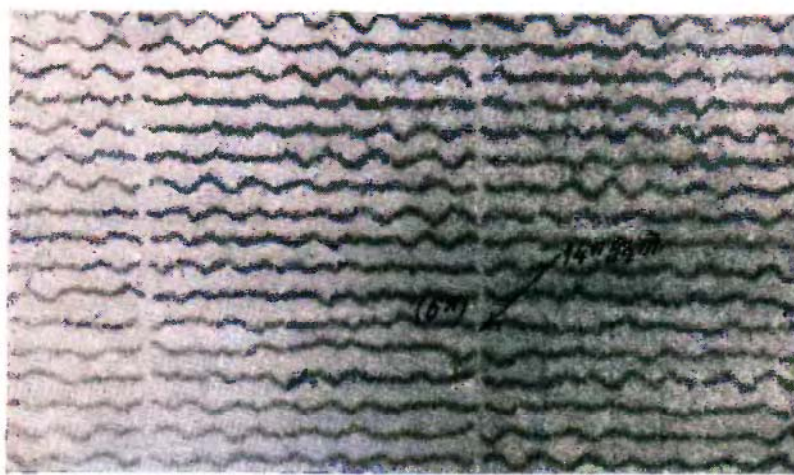
1 — общее количество толчков; 2 — количество толчков с равностью фаз 4 сек.; 3 — количество толчков с разностью фаз 5 сек.

ческих толчков (не считая дрожания, о чем будет сказано ниже) и не сопровождалось образованием побочного кратера.

Говоря о вулканических землетрясениях, возвещающих готовящееся побочное извержение, следует отметить и поставить в связь с различием извержений 1951 и 1953 гг. различие в интенсивности проявления сейсмической активности. Эксцентрическому извержению 1951 г., отличавшемуся богатством фумарольных выделений и несколько повышенной текучестью лав, соответствовала бурная и весьма интенсивная сейсмическая деятельность (636 толчков), тогда как такое же извержение 1953 г. с его более бедной фумарольной деятельностью и большей вязкостью лав характеризовалось гораздо более слабым проявлением сейсмических сил. Причина этих различий, нам кажется, заключается в том, что уровни в

главном выводном канале вулкана, откуда получали питание оба этих эксцентрических извержения, различны. Уровень питания извержения 1953 г. находился выше, вероятно в зоне, истощенной предыдущим терминальным извержением, поэтому лава была более обеднена растворенным газом, и движение ее, совершавшееся, быть может, по каналу предыдущего извержения, происходило с меньшими усилиями и вызывало вследствие этого меньшие сейсмические напряжения.

Вулкано-сейсмическое дрожание. Слабые колебания почвы, вызываемые извержением вулкана, отличные от записи колебаний обычных слабых землетрясений, уже давно отмечаются исследователями вблизи активных вулканов, изучаемых с помощью сейсмографов (Finch, 1949). Такое



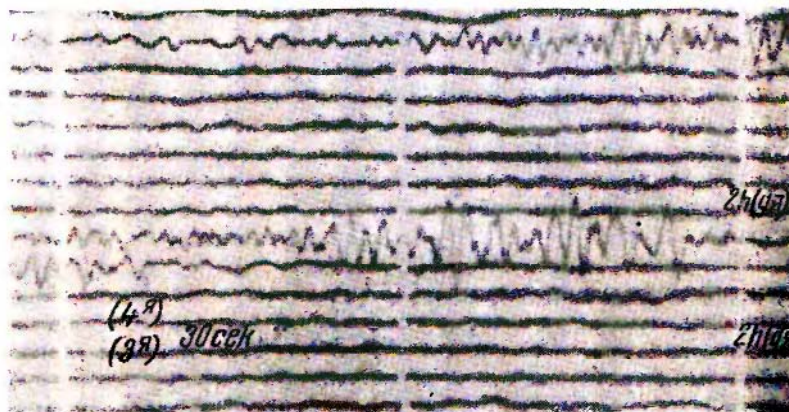
Фиг. 17. Вулкано-сейсмическое дрожание (мелкие зубчики) на фоне микросейсм.

дрожание, по общему характеру записи приближающееся к правильным синусоидальным или гармоническим колебаниям, с различными для разных вулканов периодами и различными амплитудами в зависимости от близости пункта наблюдений к вулкану и от интенсивности вулканической деятельности, описывалось при извержениях ряда японских, гавайских и итальянских вулканов, и оно, по-видимому, вообще типично для извержений любых вулканов.

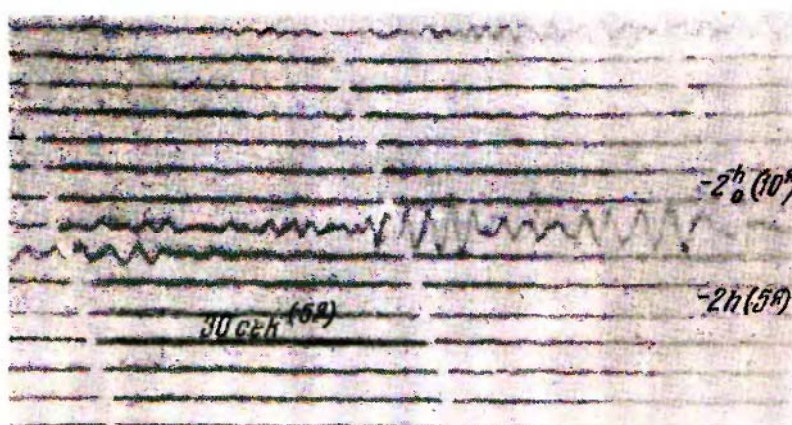
На Ключевской сопке вулкано-сейсмическое дрожание впервые наблюдал Г. С. Горшков в 1949 г., но более подробно он описывает изученное им по сейсмограммам дрожание, связанное с извержением 1951 г. (Горшков, 1954). Он выделяет два типа дрожания: 1) слабое, прерывистое, спазматическое, с периодами 1,0—1,2 сек. и с амплитудами до 1 μ , соответствующее начальным и конечным стадиям извержения и вызванное или перемещениями магмы на относительно небольшой глубине, или выделением газа из остывающей магмы в верхней части выводного канала, и 2) непрерывное, с периодом до 1,5 сек. и амплитудами до 15 μ , соответствующее наиболее интенсивной начальной стадии эксцентрического извержения и возбужденное крупными перемещениями магмы на большей, чем в первом случае, глубине. Дрожание второго типа является, по мнению Г. С. Горшкова, точным указателем начавшегося побочного извержения.

Наши наблюдения сейсмических явлений, связанных с извержениями 1951, 1953 и 1954 гг., подтвердили существование указанных типов дрожания (фиг. 17), но наряду с ними обнаружили и другого вида колеба-

ния. Терминальному извержению 1953 г. также предшествовали (за 20 часов до начала) слабые спазматические колебания с периодом 1 сек. и амплитудами до 1,5 μ , но при первых взрывах появились колебания с меньшим периодом, около 0,3 сек., и с несколько меньшими амплитудами, до 1 μ . С усилением взрывов, в данном случае исключительно типа Вулкано,



а



б

Фиг. 18. Запись поверхностных волн, вызванных взрывами ниже дна кратера:

а — составляющая восток — запад, б — вертикальная составляющая.

периоды и амплитуды дрожания увеличились соответственно до 0,8 сек. и 2 μ , но характер дрожания продолжал оставаться спазматическим. Видимого соответствия времени взрывов появлению дрожания, как и в 1951 г., не наблюдалось. На фоне дрожания и начавшихся вулканических землетрясений, предвещавших возникновение боковой инъекции магмы и продвижение ее к поверхности, через 1 час. 12 мин. после начала извержения, появились колебания еще одного типа, которые отчасти напоминали своими двумя неясными вступлениями близкие землетрясения, но отличались от них периодом (0,3 сек. для первого вступления и 2 сек. — для второго) и ясным синусоидальным характером второго вступления (всегда через 11,3 сек. после первого), очень похожего на поверхно-

стные волны (фиг. 18). Такие колебания вместе с тем напоминали отмеченные Минаками (Minakami, 1950) при извержении вулкана Асама, как он называет, эксплозивные землетрясения, возникающие из неглубокого очага при стромболианских извержениях. В нашем случае они не могли соответствовать стромболианскому извержению, так как взрывы были ясно выраженного типа Вулкано и проявление их было кратковременным: через 25 часов после возникновения они исчезли. Данных еще мало, чтобы определить природу этих колебаний, но возможно, что они представляют вулкано-тектонические землетрясения неглубокого происхождения с экранированной фазой *S* при прохождении через жидкую магматическую колонну и с весьма усиленными поверхностными волнами. Появление их, как и вулканических землетрясений, надо поставить в связь с начинающимся обособлением эксцентрической инъекции магмы, от главного питающего ствола, так как при стромболианском извержении 1954 г., не сопровождавшемся эксцентрическим извержением, подобных колебаний не наблюдалось.

Эксцентрическому извержению 1953 г. также предшествовали слабые спазматические колебания с периодом 1,2 сек., начавшиеся тоже за 20 часов до извержения. Через трое суток, вероятно с началом сильного лавового излияния, дрожание стало непрерывным и продолжалось до 22 июня, когда вновь, за два дня до конца извержения, стало спазматическим. Интересно появление перед концом извержения вновь, как и при начале, поверхностных волн, отчасти напоминавших начальные, но не столь правильные по форме; период их 2,5—3 сек., амплитуды до 15 μ . Возникновение их на данной стадии могло быть вызвано только опусканиями магмы в выводном канале.

Извержение 1954 г., начавшееся 28 мая и имевшее в начальный период характер стромболианских взрывов, а затем развившееся в деятельность типа Вулкано, не отличалось богатством сейсмических явлений. За 6 часов до видимого начала извержения появились спазматические колебания с периодом 1,2 сек. и амплитудами до 2 μ , которые, оставаясь спазматическими, продолжались до вулканической фазы извержения. С развитием пепловых взрывов период дрожания увеличился до 2 сек., но амплитуды уменьшились до 1 μ . В дальнейшем, когда извержение стало перемежаться с периодами покоя, соответствующим образом стало ослабевать дрожание. Очень показательным было отсутствие при этом извержении вулканических землетрясений, что несомненно находилось в связи с отсутствием побочного прорыва лавы.

ЛИТЕРАТУРА

- Былинкина А. А., Горшков Г. С. и Огородов Н. В. Восхождение на Ключевской вулкан 29 июля 1951 г. «Бюлл. Вулк. станции», № 20, 1954.
- Влодавец В. И. Ключевская группа вулканов. «Тр. Камч. вулк. станции», вып. 1, 1940.
- Горшков Г. С. Вулканическое дрожание, связанное с прорывом кратера Былинкиной. «Бюлл. Вулк. станции», № 23, 1954.
- Крашенинников С. П. Описание земли Камчатки. Изд. Главсевморпути и АН СССР. М.—Л., 1949.
- Меняйлов А. А. Динамика и механизм извержения Ключевского вулкана в 1937—1938 гг. «Тр. Лабор. вулканологии и Камч. вулк. станции», вып. 4, 1947.
- Набоко С. И. Извержение Билюкая, побочного кратера Ключевского вулкана в 1938 г. «Тр. Лабор. вулканологии и Камч. вулк. станции», вып. 5, 1947.
- Пийп Б. И. Извержение кратера Былинкиной. «Бюлл. Вулк. станции», № 20, 1954.
- Пийп Б. И. Образование нового побочного кратера Белянкина (телеграфное сообщение). «Бюлл. Вулк. станции», № 22, 1954.
- Пийп Б. И. Состояние действующих вулканов Северной Камчатки в 1954 г. «Бюлл. Вулк. станции», № 24, 1956.
- Попков В. Ф. О деятельности Билюкая в 1938—1939 гг. «Бюлл. Вулк. станции», Камчатке № 12, 1946.
- Герман А. Reise um die Erde... in den Jahren 1828, 1829 und 1830, Bd. III. Berlin, 1848.
- Finch R. H. Volcanic tremor. «Bull. Seism. Soc. Am». v. 39, № 2, 1949.
- Minakami T. On explosive activities of andesitic volcanoes and their forerunning phenomena. «Bull. Volcanol.», t. 10, B. V, 1950.
- Perret F. The Vesuvius eruption of 1906. «Carnegie Inst. Wash., Publ.», № 339, 1924.