

ГЛАВА 1. Вулканические извержения и проблема изучения их динамики

ДИСТАНЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

Все известные геофизические методы в той или иной мере привлекались различными исследователями для наблюдений на вулканах с целью изучения динамики и прогноза извержений. Во время извержений сейсмические, акустические явления, электрические разряды непосредственно наблюдаются и ощущаются в ближней зоне, а во время сильных извержений регистрируются на больших расстояниях от источника. «Вулканическая сейсмология» стала традиционным методом исследования вулканических процессов, в то время как «акустика вулкана» получила сравнительно ограниченное применение.

1.1. Классификация вулканических извержений

В основу всех известных классификаций вулканических извержений (ВИ), как правило, основанных на различиях в силе, характере и продуктах извержения, заложены визуальные наблюдения за извержением на конкретных вулканах. В зависимости от состава продуктов извержения, различают три типа вулканической деятельности: *эффузивный* (излияние лавы), *эксплозивный* (взрывной, являющийся следствием повышения давления магматических газов), *экструзивный* (выжимание вязкой лавы в виде купола или обелиска). На разных стадиях вулканической деятельности сочетание типов активности меняется, наиболее распространенное сочетание - эффузивно-эксплозивные извержения, при которых излияние лавы сопровождается выбросами пирокластики.

Наиболее распространенной является классификация вулканических извержений, при которой различным типам извержений присваиваются названия вулканов, в деятельности которых какая-либо сторона процесса наиболее характерна. Грубая схема такой классификации, заимствованная из работы (*Макдональд, 1975*), приведена в таблице 1.1. В этой работе в качестве исходных характеристик активности вулкана в этой работе приняты такие, как: взрывная деятельность; тип лавовых потоков; вид выбрасываемого материала и сформировавшаяся постройки. Реально в деятельности одного вулкана могут проявляться различные типы извержений.

В последние десятилетия XX века для классификации извержений привлекаются представления о физических процессах, доминирующих при подъеме магмы к поверхности (*Слезин, 2000*). По характеру взаимоотношения расплав - летучие продукты в магматическом канале можно выделить снизу вверх следующие зоны: 1) наиболее глубинная зона, в которой по каналу течет жидкость; 2) пузырьковая зона, где находится газожидкостный дисперсионный поток, в котором сплошная фаза-жидкость; 3) зона «разрушающейся пены», где возможны два варианта. В первом – увеличение расхода газа обеспечивается опережающим всплыванием

крупных пузырей (*барботирующий режим*). Во втором – в результате частичного разрушения соприкоснувшихся пузырьков возникает пористая масса, пронизанная сквозными каналами, по которым движется газ с опережающей, но ещё не достаточной для полного диспергирования расплава скоростью; 4) зона дисперсного потока, где непрерывной фазой является газ (*дисперсионный режим*).

Барботирующий режим характерен для основных маловязких магм, в то время как дисперсионный режим характерен для кислых высоковязких магм.

Таблица 1.1.

Классификация вулканических извержений по Г. Макдональду

Тип извержения	Физическое состояние магмы	Характер взрывной деятельности	Характер излияний	Характер преобладающих выбросов	Прижерловые постройки
Стромболианский	Умеренно текучая	Слабые до мощных выбросы пастообразных пузырей	Более мощные, менее протяженные потоки умеренно жидкой лавы; потоки могут отсутствовать	Сферические и веретеновидные бомбы, шлак, стекловатый пепел	Шлаковые конусы
Вулканический	Вязкая	От умеренных до мощных выбросы твердых или весьма вязких горячих обломков вновь образованной лавы	Потоки обычно отсутствуют, а если присутствуют, то короткие и мощные; пепловые потоки редки	Стекловатые и литоидные глыбы, пепел и пемза	Пепловые, глыбовые и глыбовопепловые конусы
Пелейский	Вязкая	Похож на вулканический; обычно с раскаленными лавинами	Купола и (или) короткие очень мощные потоки, но могут и отсутствовать	Похож на вулканический	Пепловые и пемзовые конусы, купола
Плинианский (особенно мощный вулканический)	Вязкая	Внезапные пароксизмальные выбросы больших объемов пепла, сопровождаемые обрушением с образованием кальдер	Пепловые потоки от небольших до очень объемных, но могут и отсутствовать вообще	Стекловатый пепел и пемза	Широко распространяющиеся пемзовые лапилли и пепловые слои; конусы обычно отсутствуют

1.2. Акустические сигналы в атмосфере, связанные с вулканическими извержениями

Воздушные волны, возникающие во время катастрофических извержений, использовались для зондирования атмосферы и изучения ее строения. Первое решение задачи о распространении возмущений в атмосфере и расчет её температурного профиля были выполнены Пекерисом (1939) на основании изучения воздушных волн, сопровождавших извержение вулкана Кракатау в 1883 г. Во время этого извержения воздушная волна оказалась столь мощной, что была зарегистрирована барографами с низкой чувствительностью на многих метеостанциях мира. Тротиловый эквивалент взрыва в атмосфере, вызывающего подобную воздушную волну, оценивается в $100 \div 150$ мегатонн.

Извержения вулканов отличаются большим разнообразием как по характеру, так и по интенсивности, что находит отражение в спектральных характеристиках волновых возмущений в атмосфере – от длинноволновых с периодом в несколько десятков минут до колебаний звукового диапазона. Характеристика ожидаемых волновых возмущений в атмосфере в зависимости от типа вулканических извержений приведена в работе (Richards, 1963). Несмотря на то, что на период публикации данной работы экспериментальных наблюдений за волновыми возмущениями в атмосфере от вулканических извержений было очень мало, в основном, он правильно спрогнозировал возможные классы волновых возмущений в зависимости от типа вулканической активности (табл. 1.2)

Таблица 1.2.
Характеристика волновых возмущений в атмосфере от типа вулканической активности (Richards, 1963)

Тип активности	Характер извержения	Характер звука
Гавайский	Спокойное истечение лавы	Относительно тихий устойчивый белый шум
Стромболианский	Умеренное, в основном, ритмичное извержение с выбросом газа и пирокластики, лавовыми фонтанами.	Широкополосный шум с хорошо выраженной основной частотой и ее гармониками
Вулканский	Сильное взрывное извержение с образованием пепловых туч и выбросом раскаленных бомб	Нет инструментальных данных. Четко выделяются основная частота, вероятно, связанная с размерами кратера, и резонансные колебания
Пелейский	Очень сильное взрывное извержение с образованием раскаленных лавин	Нет инструментальных данных. Ударные волны, генерируемые сверхзвуковым потоком, шум реактивного двигателя
Плинианский	Извержение взрывного типа, в некоторых случаях с образованием кальдеры	Сильные ударные волны, низкочастотный рев

На основании полученных экспериментальных данных автором проведена феноменологическая классификация волновых возмущений в атмосфере от вулканических извержений. За основную характеристику классов волновых возмущений приняты характерный диапазон частот и физические процессы, в результате которых происходит их генерация (*Firstov, 1994, Firstov, 1996; Фирстов, Филиппов, 1997*).

1. Аэродинамический шум ($f = 20 \div 1000$ Гц), возникающий в результате аэродинамического воздействия потока на окружающую среду.

2. Импульсные АС, воздушные ударные волны ($f = 1 \div 10$ Гц), генерирующиеся нестационарными процессами в кратерной зоне во время дегазации магмы при ее поступлении на дневную поверхность.

3. Инфразвук ($f = 0,003 \div 1$ Гц), возникающий в результате сильных конвективных процессов, происходящих во время возникновения и формирования пирокластических потоков.

4. Длинноволновые возмущения ($f < 0,003$ Гц), обусловленные формированием мощной эруптивной колонны, иногда достигающей тропопаузы, во время пароксизмальных извержений.

На рис.1.1 показано, какие классы волновых возмущений в атмосфере характерны для различных типов вулканической активности.

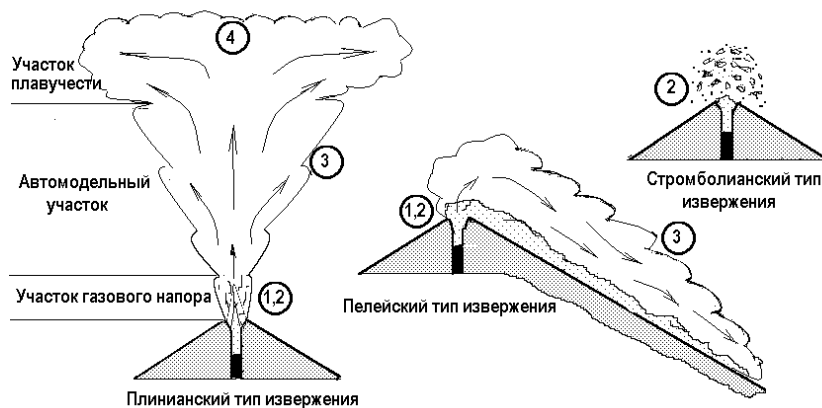


Рис. 1.1. Основные типы вулканической активности и преобладающие для них классы волновых возмущений в атмосфере

Из всех классов акустических волновых возмущений, возникающих во время извержений, наибольший интерес представляют АС 2 класса ($f = 1 \div 10$ Гц), которые генерируются непосредственно во время выноса магматического материала на дневную поверхность за счет его дегазации и дают возможность осуществлять мониторинг эксплозивной активности.

Изучение слабых акустических сигналов (АС) диапазона $1 \div 10$ Гц в ближней зоне от вулканических извержений стало возможным после появления микробарографов, что было стимулировано созданием национальных служб контроля за воздушными ядерными взрывами. АС в ранних работах (*Stewart, 1959; Токарев, 1964; Tolentino, 1973; Tanaka et al., 1974; Nain, 1976; Minakami et al., 1979; Tanaka, 1967, 1974; Dibble et al., 1984*) рассматривались как один из параметров, характеризующих динамику вулканических извержений. В работах японских исследователей (*Minakami et al., 1970; Tanaka et al., 1974*) была сделана попытка оценить глубину заложения источника вулканических эксплозий (взрывов), используя соотношение кинематических параметров акустических сигналов и эксплозивных землетрясений. Так, для вулкана Асама глубина заложения оценивается в 100 м (*Minakami et al., 1970*), а для вулкана Акита-Комагатаке в 50 м (*Tanaka et al., 1974*) от дна кратера. В этих работах, из-за малой разрешающей способности аппаратуры, не рассматривалась форма воздушной волны.

Впервые на полуострове Камчатка микробарографы были установлены в районе Ключевской группы вулканов в 1962 г. *П.И. Токаревым (1964)*. Несомненной удачей была регистрация волновых возмущений, возникших во время пароксизмального извержения вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 г. На основании записей акустического и сейсмического сигналов, сопровождавших это извержение, был дан вариант реконструкции хода этого грандиозного извержения (*П.И. Токарев, 1967*).

Начиная с 70^х годов XX столетия, автор выполнял регистрацию АС в атмосфере от извержений вулканов Камчатки в непосредственной близости от них. Обширный экспериментальный материал был получен автором во время извержения Северного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения в 1975 г. На основании этих данных по форме записи и ряду параметров было показано, что АС в ближней зоне относятся к классу слабых воздушных ударных волн (ВУВ) (*Фирстов, Адушкин, Сторчеус, 1978*).

Несколько позже японским исследователям удалось зарегистрировать ВУВ с помощью киносъемки на вулкане Сакурадзима (*Ishihara K., Igushi M., Kamo K., 1983; Ishihara K., 1985*). В этих работах детально проанализированы процессы генерации воздушной ударной волны и возникновения эруптивного облака во время эксплозий вулкана Сакурадзима. В этот период в кратере вулкана происходили отдельные выбросы, во время которых возникали ВУВ с амплитудой избыточного давления $\Delta P_+ > 100$ Па на расстоянии 2,8 км. Процесс начинался с землетрясения под кратером на глубине $0,8 \div 1,1$ км. При принятой скорости продольных сейсмических волн в 2,5 км/с, ВУВ начинала формироваться на дне кратера через $1,1 \div 1,3$ с после возникновения землетрясения. Если предположить единый источник для землетрясения и ВУВ, то скорость распространения ударной волны по магматическому каналу составляла $1,3 \div 1,6$ км/с.

Теоретическому рассмотрению вулканических источников акустических колебаний посвящена работа (*Woulff, McGetchin, 1976*), в которой авторы делают упор на теоретическом объяснении вулканического шума с позиции теории Лайтхилла.

После пароксизмального извержения вулкана Сент Хеленса в 1980 г., в результате которого возникла мощная воздушная волна в атмосфере, интерес к «акустике вулкана» значительно повысился (*Reed, 1980; Banister, 1984*). В настоящее время очень большой интерес к «акустике вулкана» проявляют американские и японские исследователи (*Garces, et. al., 1999*).

1.3. Сейсмические наблюдения, типы вулканических землетрясений

Как правило, подготовка извержений предваряется роем землетрясений, пространственно-временные характеристики которого позволяют в отдельных случаях прогнозировать извержения. Процесс извержения также сопровождается сейсмическими явлениями, которые отражают динамику извержения. Поэтому понятен интерес всех исследователей, изучающих действующие вулканы мира, к «вулканической сейсмологии».

Землетрясения, регистрируемые в районах активного вулканизма прямо или косвенно связанные с магматизмом, принято называть *вулканическими*. Первая попытка классификации вулканических землетрясений по форме записи и их связи с вулканической деятельностью в России была предпринята в работе (*Горшков, 1954 а,б*). Все местные землетрясения района Ключевской группы вулканов, зарегистрированные на сейсмической станции “Ключи”, были разбиты на 7 типов. Впервые в этих работах выделен тип вулкано-тектонических землетрясений и обращено внимание на вулканическое дрожание. Так как регистрация велась с малой скоростью развертки $V = 15$ мм/мин и небольшим увеличением $V=500$, то эта классификация при незначительной статистике была слишком условна.

Общепризнанной среди западных исследователей долгие годы была классификация вулканических землетрясений японского сейсмолога *T. Minakami (1960)*, а среди российских ученых *П.И. Токарева (1966)*.

В настоящее время *Е.И. Гордеевым (1998)* предложена новая классификация вулканических землетрясений, которая в некоторой степени синтезирует предшествующие классификации. Сейсмические сигналы, регистрируемые вблизи вулканических центров, разделены на две группы по природе их происхождения.

К первой группе относятся вулкано-тектонические землетрясения, происходящие на глубинах 20-25 км и связанные с реализацией напряжений, обусловленных изменением напряженно-деформированного состояния среды под вулканическими аппаратами.

Происхождение второй группы сейсмических сигналов связано с процессами дегазации магмы - низкочастотные землетрясения, эксплозивные землетрясения (вызваны взрывами в кратере) и вулканическое дрожание.

Вулканические акустические сигналы диапазона 1÷10 Гц возникают во время взрывов в кратере вулкана при вулканском типе активности или при разрушении всплывающих «пузырей» при стромболианской типе активности. В том и другом случае они отражают процесс дегазации магмы в верхней части магматического канала, при котором происходит и генерация сейсмических сигналов. Наибольший интерес из всего разнообразия сейсмических явлений в нашем случае представляют - *эксплозивные землетрясения (ЭЗ)* и *вулканическое дрожание (ВД)*.

При вулканических взрывах регистрируются ЭЗ, длительность записи которых достигает одной минуты и более, а очаги располагаются на глубине не более 1000 м от дна действующего кратера. Во время сильных вулканических выбросов одновременно с ЭЗ возникает воздушная ударная волна, приход которой в точку регистрации вызывает колебания грунта, фиксируемое сейсмографом. В некоторых случаях переход ЭЗ в непрерывные колебания до десятков минут связан с непрерывным истечением пепло-газовой смеси из кратера вулкана, что также вызывает акустические возмущения в атмосфере. Во время извержений стромболианского или гавайского типа эксплозивные землетрясения происходят с большой частотой. Сливаясь, они образуют квазигармоническое колебание почвы – «вулканическое дрожание». Различные типы сейсмических волн обнаружены в ВД, хотя в большинстве случаев указывается на преобладание поверхностных волн типа Релея и Лява.