

---

Российская Академия Наук  
Уральское Отделение  
Институт геологии и геохимии

*на правах рукописи*

**Мальшев Александр Иванович**

УДК 551.21

**Динамическая модель вулканического процесса и ее  
использование в палеовулканологических реконструкциях**

Специальность 04.00.08 “Петрология, вулканология”

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата

геолого-минералогических наук

Екатеринбург - 1999

---

---

Работа выполнена в Институте геологии и геохимии УрО РАН

Научный руководитель            академик РАН,  
доктор геолого-минералогических наук  
В.А. Коротеев

Официальные оппоненты  
доктор геолого-минералогических наук  
А.М. Виноградов (ИГ УрО РАН)  
кандидат геолого-минералогических наук  
В.В. Бочкарев (ИГиГ УрО РАН)

Ведущая организация  
Институт вулканической геологии и геохи-  
мии ДВО РАН

Защита состоится            марта 1999 года в            на заседании Специализи-  
рованного диссертационного совета Д 002.81.01 Института геологии и гео-  
химии им. акад. А.Н. Заварицкого УрО РАН по адресу:

**620151, Екатеринбург, Почтовый переулок, 7, ИГиГ УрО РАН.**

Отзывы на автореферат просьба высылать в двух экземплярах, заверенных  
печатью, по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института геологии и  
геохимии УрО РАН.

Автореферат разослан            февраля 1999 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

И.С. Чащухин

---

## **Актуальность проблемы**

В своих исследованиях геологи сталкиваются лишь с последствиями развития процессов, связанных с эволюцией вещества Земли. В ходе интерпретации тех или иных геологических структур они вынуждены оперировать определенными представлениями о характере и закономерностях развития этих процессов. Действующий вулкан является единственным источником информации о процессах формирования вулканических горных пород, о реальных закономерностях развития магматических систем, о динамике процессов, в них происходящих, что делает задачу изучения его закономерностей особенно актуальной.

## **Цель работы**

Выявление наиболее общих закономерностей развития вулканического процесса.

## **Задача исследований**

Создание динамической модели вулканического процесса.

## **Метод исследования**

В основу исследования положен системный анализ.

## **Фактический материал и выбор объекта исследований**

В качестве объекта исследований выбран вулкан Безымянный. Этот вулкан является не только одним из наиболее активных вулканов мира, но и, пожалуй, единственным вулканом со столь быстрой эволюцией эруптивного процесса с течением времени. Именно эта эволюция, накладывающая отпечаток на каждое из извержений и определяющая их своеобразие и неповторимость, обусловила возможность получения за сравнительно небольшой период времени достаточно представительного ряда наблюдательных данных. За 7 лет наблюдений (1980-1987 гг.) автору представилась возможность изучить последовательность из 9 сравнительно кратковременных эксплозивно - эффузивных и 5 затяжных деформационно - экструзивно - эффузивных извержений. Можно с большой степенью вероятности утверждать, что для получения столь же

представительного материала по другим, не менее активным, но более медленно эволюционирующим вулканам, потребовалось бы не одно столетие.

## **ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

1. Причиной развития вулканического процесса в приповерхностных условиях является динамическая активность магматических систем, возникающая как следствие выделения из расплава кристаллической и газовых фаз.

2. Развитие вулканического процесса реализуется в форме полициклических автоколебаний, проявляющихся как в изменении количества поступающего на поверхность ювенильного материала, так и в циклической эволюции вулканического процесса по составу и формам извержений.

3. Количественная сторона указанного выше автоколебательного процесса описывается нелинейным дифференциальным уравнением второго порядка вида

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = k \left[ \left( \frac{dx}{dt} \right)^\lambda - \left( \frac{dx}{dt} \right)_0^\lambda \right]^{\alpha/\lambda},$$

где  $x$  - параметр, характеризующий развитие системы во времени  $t$ ; коэффициент пропорциональности  $k$ , показатели степени нелинейности  $\alpha$  и  $\lambda$ , а также скорость изменения параметра в состоянии стационарного развития  $\left( \frac{dx}{dt} \right)_0$  - эмпирические константы.

## **Научная новизна исследований**

Впервые разработана динамическая модель вулканического процесса адекватно описывающая динамику вулканических извержений и позволяющая качественно и количественно прогнозировать их развитие.

## **Практическая ценность исследований**

Работа чрезвычайно важна для понимания процессов, происходящих при извержениях вулканов, имеет большое значение для прогноза начала извержений и их разви-

тия и может оказать значительное влияние на парадигмы, существующие в настоящее время в магматической геологии и смежных областях геологического знания.

Разработанный метод математического моделирования включен в федеральную программу прогноза сейсмичности как один из наиболее перспективных методов краткосрочного прогноза разрушительных землетрясений и проходит испытания в районе Южных Курил.

## **Апробация**

Основные положения работы докладывались на конференции «Повышение эффективности горных и геологоразведочных работ», VI Всесоюзном вулканологическом совещании, международном симпозиуме «Геодезия – сейсмология: деформации и прогноз», совещании «Синергетика геологических систем», международном симпозиуме EUG9, международной конференции «Проблемы геодинамики, сейсмичности и минерации подвижных поясов и платформенных областей литосферы». По теме работы имеется 26 публикаций в российской и зарубежной печати, в том числе 2 препринта, подготовлена к изданию монография.

## **Объем работы**

Работа имеет объем 24 авторских листа, 101 иллюстрацию и 16 таблиц, в которых использовано 247 штриховых рисунков, графиков и черно-белых фотографий, библиографию 305 наименований, снабжена именованным указателем и указателями рисунков и таблиц. Работа состоит из 3 частей. Первая часть – НАБЛЮДЕНИЯ – состоит из трех глав, содержащих фактический материал по геологическому положению, строению и истории развития вулкана, по динамике его исторических извержений и по составу извергающегося материала. Вторая часть – ТЕОРИЯ – состоит из двух глав и рассматривает качественный и количественный аспекты динамической модели вулканического процесса. Третья часть – ПРАКТИКА – также состоит из двух глав и рассматривает перспективы практического использования динамической модели вулканического процесса в плане прогноза извержений и оценивает ее возможное влияние на парадигмы магматической геологии и смежных областей геологического знания. Работа может быть полезна широкому кругу специалистов в областях вулканологии, магматической геологии и геофизики.

## **Первое защищаемое положение.**

*Причиной развития вулканического процесса в приповерхностных условиях является динамическая активность магматических систем, возникающая как следствие выделения из расплава кристаллической и газовых фаз.*

Летучие являются одним из основных факторов, определяющих форму извержения, поэтому большой интерес представляет вопрос о том, как меняется газонасыщенность ювенильного материала в ходе извержения. Основным источником информации о ее относительном изменении является анализ самого хода извержения, а также изучение последствий извержения. Еще одним, дополнительным, источником информации является сам облик выжимающегося лавового материала. Высокая пористость поверхности лавовых потоков Безымянного в значительной степени рассеивает и поглощает солнечный свет. Поэтому высокопористые потоки с пировойлочной текстурой поверхности с больших расстояний выглядят почти черными, хотя и состоят из светло-серого с легким зеленоватым оттенком андезита. С уменьшением пористости лав их внешний облик светлеет, достигая естественного светло-серого цвета у плотных лав обелисков и наиболее вязких и «медленных» лавовых потоков. Все это позволяет на качественном уровне отслеживать изменчивость пористости выжимающихся лав, а, следовательно, и с определенной степенью точности судить о газонасыщенности поступающего на поверхность ювенильного материала.

При изучении извержения вулкана весной 1965 г. Ю.М. Дубик и И.А. Меняйлов пришли к выводу, что эволюция форм извержения в его кульминационной и посткульминационной стадиях обусловлена изменением физических свойств ювенильного материала, а именно - уменьшением газонасыщенности и вязкости магмы. Более того, исследователи отмечают, что в пределах даже одной стадии - формирования пирокластических потоков - можно наблюдать уменьшения вязкости и газонасыщенности материала к концу стадии.

По нашему мнению, отмеченная Ю.М. Дубиком и И.А. Меняйловым тенденция представляет собой лишь часть свойственной многим извержениям общей закономерности в изменении газонасыщенности ювенильного материала. Для этих извержений характерно наличие четко выраженной кульминации, сопровождающейся бурной эксплозивной деятельностью вулкана. Кульминации предшествует период лавинообразной

активизации, первые признаки которой нередко проявляются за месяц и более до извержения. Сама активизация часто имеет непрерывно-импульсный характер, когда последовательно нарастающие вспышки активности вулкана разделяются интервалами его пониженной активности.

По мере приближения к кульминации поступающий на поверхность материал становится все более газонасыщенным, высокотемпературным и пластичным. В начальные периоды активизации он представлен жесткими, практически дегазированными в ходе предыдущих периодов активности блоками, поверхность которых благодаря низкой пористости слабо поглощает солнечные лучи и даже с больших расстояний сохраняет естественный светло-серый цвет. По мере развития извержения жесткие блоки разрушаются, и на их месте появляется более газонасыщенная и высокотемпературная лава. Дополнительное поглощение солнечного света за счет более высокой пористости обуславливает ее кажущийся более темный цвет.

Меняется и характер извержения. В ходе обвалов, сопровождающих развитие экструзивного процесса, появляются и все более усиливаются признаки проявлений эффекта автоэксплозивности, особенно отчетливые для наиболее крупных обрушений. Последние все больше приобретают характерные черты автоэксплозивных лавин. Дальнейшее нарастание температуры, газонасыщенности и пластичности ювенильного материала, соответствующее общей активизации вулкана, создает предпосылки для формирования пирокластических потоков, а максимальная газонасыщенность, совпадающая с кульминацией извержения, соответствует практически непрерывным вертикальным газопепловым выбросам, образующим мощную эруптивную колонну. В 80-е годы, во время наблюдений автора, при этом происходило одновременное излияние наиболее пластичных, максимально пористых лав, для поверхности которых характерно повсеместное распространение пировойлочных текстур. Из-за максимально высокого поглощения света пористой поверхностью эти лавовые потоки на расстоянии выглядели практически черными.

Начиная с кульминационных моментов извержения, тенденция в изменении газонасыщенности меняет знак. Последовательное снижение количества летучих в ювенильном материале обуславливает переход от практически непрерывных вертикальных газопепловых выбросов сначала к формированию пирокластических потоков затухаю-

шей мощности, затем ко все более редким автоэксплозивным лавинам. Завершает процесс стабилизации переход от остаточной экструзивной деятельности к затухающим деформациям привершинной части активного блока вулкана, сопровождающихся все более слабыми каменными лавинами. В процессе затухания извержения прослеживается определенная «лавинообразность», отличающаяся от лавинообразности активизации вулкана лишь знаком, - чем ниже уровень активности вулкана, тем медленнее происходит ее снижение.

Как и активизация, процесс затухания извержения нередко имеет непрерывно-импульсный характер. В этом случае общая тенденция к снижению уровня активности вулкана осложняется кратковременными все более слабыми вспышками. В ходе каждого из этих импульсов можно заметить, как это отмечают Ю.М. Дубик и И.А. Меняйлов, некоторое повышение температуры ювенильного материала, однако в целом на стадии затухания отмечается обратная тенденция – температура ювенильного материала, участвующего в процессе извержения, постепенно снижается, так как уменьшающаяся скорость поступления на поверхность ювенильного материала уже не компенсирует его остывания.

Альтернативу описанной выше группе представляют извержения, у которых отсутствует четко выраженная кульминация, а максимальная активность вулкана сохраняется на довольно высоком уровне в течение довольно длительного времени (до года и более). Все это время вулкан находится в состоянии экструзивного или экструзивно-эффузивного извержения. Эксплозивная деятельность практически отсутствует. Лишь в ходе наиболее крупных обрушений в большей или меньшей степени проявляются признаки автоэксплозивности. В состоянии, подобном вышеописанному, вулкан находился, например, в первую половину 1982 г. и в течение почти всего 1987 года. Это же состояние было довольно обычно для вулкана в конце 60-х — начале 70-х годов. Лавы этих извержений с больших расстояний выглядят темно-серыми. Для них характерна преимущественно закрытая пористость с порами неправильной формы, достигающих размеров 2-3 мм. Пировойлочные текстуры практически отсутствуют. Их зачаточные формы прослеживаются внутри породы в виде зон с повышенной концентрацией пористости. Размеры этих зон достигают первых сантиметров, а в их центральных частях соединяющиеся поры образуют двухфазную структуру взаимопроникновения «расплав - летучие», аналогичную пировойлочным текстурам.



Следует заметить, что подразделение извержений Безымянного на две вышеописанные группы весьма условно. Извержение этих групп скорее следует рассматривать в качестве крайних членов в ряду промежуточных форм. В качестве примера промежуточных членов этого ряда из примыкающих к первой группе можно привести извержение вулкана в феврале 1984 г., а излияния лавовых потоков в августе и декабре 1985 г. и извержения в июне и декабре 1986 г. представляют собой последовательность, в которой просматривается тенденция к переходу от извержений, близких ко второй группе (излияния лавовых потоков 1985 г.), через извержение, имеющее промежуточный характер (июнь 1986 г.), к извержению в декабре 1986 г., которое можно рассматривать в качестве типичного представителя первой группы извержений.

Все разнообразие характера извержений Безымянного определяется, на наш взгляд, единственным фактором — режимом расширения летучих. Если извержения первой группы по сути соответствуют лавинообразной дегазации ювенильного материала, то характер извержений второй группы определяется сравнительно спокойным расширением летучих внутри (в пределах) ювенильного материала.

Что касается механизма отделения летучих, то ближе всего, по нашему мнению, соответствует действительности модель, предложенная М.А. Алидибировым для процессов «взрывного» газоотделения на основе наблюдений за извержением Безымянного летом 1985 г. и изучения его последствий. Модель предполагает наличие сильновязкого или затвердевшего магматического расплава, содержащего поры, заполненные газом с некоторым избыточным давлением. Освобождение энергии сжатого газа происходит при условии декомпрессии ювенильного материала и развивается в виде волны дробления, распространяющейся вглубь газированного вязкого расплава. При разрушении межпоровых перегородок в верхнем слое сжатый газ расширяется до давления окружающей среды. При этом и сам газ, и захваченные им продукты дробления приобретают определенное ускорение. Снижение давления у вновь образованной поверхности системы приводит к возникновению перепада давления в следующем слое, который также начинает разрушаться.

Таким образом реализуется послыйный отрыв. Поверхность, разделяющая не разрушенную систему газ-магма и смесь газа и частиц раздробленной магмы и называемая М.А. Алидибировым фронтом волны дробления, будет двигаться вглубь систе-

мы с некоторой конечной скоростью. При этом во время отделения летучих в канале вулкана не происходит формирование газового объема, имеющего значительное давление, а, напротив, идет сравнительно медленное освобождение запасенной энергии. Скорость распространения волны дробления довольно низка и сопоставима скорее с процессом горения, чем с детонацией.

Хотя предложенная М.А. Алидибировым модель довольно близко соответствует действительности, на наш взгляд, она нуждается в некоторых уточнениях. Прежде всего это касается условий развития декомпрессии. 28 июня 1964 г. И.А. Меняйлов и Л.П. Никитина с близкого расстояния наблюдали, как в процессе обрушения крупных блоков ювенильного материала в момент заложения трещин отрыва вверх на несколько метров взвиваются струи пепла и газов. Подобные небольшие выбросы газа с примесью пепла, т.е. тонких частиц дробления ювенильного материала, неоднократно наблюдал и автор этих строк в начальные моменты образования крупных обвальных и, тем более, автоэксплозивных лавин. Следовательно, для выполнения условия граничной декомпрессии достаточно заложения трещины в объеме сильновязкого и газонасыщенного ювенильного материала. Перпендикулярно поверхности закладывающихся трещин и движется фронт волны дробления.

В плане изучения процесса дегазации ювенильного материала большой интерес представляет анализ трещиноватости в крупных (десятки куб. м) глыбах андезита, часто встречающихся в отложениях пирокластических потоков Безымянного. Ювенильность материала этих глыб диагностируется овальной или каплевидной формой, текстурами смятия, пирокластического выветривания и большим количеством контракционных трещин, в различных направлениях рассекающих глыбу перпендикулярно поверхности. Максимальная ширина этих трещин, как правило, не превышает 1 см, стенки сравнительно прямые и гладкие. Встречаясь у центра глыбы, эти трещины нередко рассекают глыбу на остроугольные блоки. Спустя несколько недель после извержения подобные глыбы часто полностью разрушаются, превращаясь в хаотический развал обломков.

Однако наряду с контракционными трещинами в крупных глыбах ювенильного андезита встречается отличный вид трещиноватости, имеющий непосредственное отношение к процессу дегазации ювенильного материала. В отличие от контракционных

эти трещины, назовем их автоэксплозивными, встречаются в наиболее крупных глыбах ювенильного андезита в меньшем количестве. Однако их ширина в приповерхностной части глыб нередко достигает нескольких десятков сантиметров. Как и контракционные трещины автоэксплозивные ориентированы к центру глыбы, но по мере приближения к внутренним частям часто отмечаются признаки разделения главной трещины на ряд более мелких субпараллельных с образованием древоподобной структуры, вершина которой ориентирована к центру глыбы.

Наиболее существенным отличием автоэксплозивных трещин является повсеместное распространение по их стенкам пировойлочных текстур. Характерна четко выраженная тенденция увеличения пористости андезита по направлению к осевой плоскости трещины. В поперечном разрезе на протяжении 10-15 см прослеживается постепенный переход от обычного мелкопористого андезита к предельным по пористости представителям пировойлочных текстур. Характер и масштабы автоэксплозивных трещин свидетельствуют о том, что они образуются уже после прекращения движения глыбы, так как в противном случае неизбежно произошло бы разрушение последней.

Автоэксплозивная трещиноватость в крупноглыбовом ювенильном материале пирокластических потоков Безымянного наглядно демонстрирует, что не только условие граничной декомпрессии в модели М.А. Алидибирова может реализоваться по трещинам внутри газированного и вязкого ювенильного материала, но и сами ветвящиеся декомпрессионные трещины могут спонтанно формироваться под воздействием энергии сжатых газов.

С учетом вышесказанного в деятельности Безымянного можно выделить четыре типа процессов газоотделения и освобождения энергии сжатых газов. Прежде всего дегазация ювенильного материала происходит за счет миграции летучих по долгоживущим зонам повышенной трещиноватости в постройке вулкана. Непрерывное газоотделение по этим зонам обеспечивает устойчивый фон умеренной и сильной фумарольной деятельности вулкана как в спокойном состоянии, так и во время извержений. Вторую разновидность процессов дегазации и освобождения энергии сжатых газов представляет выделение и спокойное расширение летучих внутри магмы, ведущее к общему расширению объема системы и, как следствие, к затяжным и сравнительно спокойным экструзивным, экструзивно-эффузивным или эффузивным извержениям.

Третий тип дегазационных процессов представляет автоэксплозивность, т.е. лавинообразная дегазация ювенильного материала по автоэксплозивным (декомпрессионным) трещинам. Этот тип газоотделения соответствует более высокому уровню активности вулкана. Высокое давление летучих обуславливает заложение самой трещины или даже целой системы ветвящихся трещин, распространяющихся вглубь газированного и вязкого ювенильного материала. Вдоль поверхности этих трещин происходит своего рода «вскипание» ювенильного материала, что можно рассматривать в соответствии с моделью М.А. Алидибирова, как распространение от поверхности трещин вглубь ювенильного материала фронта волны дробления. Расширяющийся по трещинам газ с захваченными частицами дробления выносится на поверхность в виде газопепловых выбросов.

Автоэксплозивная дегазация может быть как эпизодической (дискретной), так и практически непрерывной. Первый вариант был характерен для ранних этапов формирования купола Нового, когда над его постройкой периодически формировались грибовидные газопепловые выбросы. Источником их формирования нередко служила вся вершинная часть купола Нового. После подобных выбросов вершина купола оставалась практически в неизменном состоянии, лишь в некоторых частях вершины образовывались воронкообразные углубления, возникавшие, скорее всего, в районе выхода на поверхность наиболее крупных трещин как результат пирокластической эрозии и последующего осыпания в устье трещины обломочного материала.

Второй, практически непрерывный, вариант автоэксплозивной дегазации ювенильного материала был характерен для кульминационных стадий бурных эксплозивно-эффузивных извержений вулкана в 80-е годы. В этом случае быстро выжимающийся вязкий и газонасыщенный ювенильный материал в зоне выхода на поверхность практически непрерывно рассекался многочисленными автоэксплозивными трещинами, а бурно выделяющаяся газопепловая взвесь формировала над вершиной вулкана эруптивную колонну.

Особую роль в процессе извержений Безымянного играет четвертый тип процессов дегазации ювенильного материала — спровоцированная эксплозивность. Этот тип представлен процессами газоотделения, протекающими в условиях дополнительных механических воздействий (гравитационно-разгрузочных и ударно-механических).

Диапазон этих процессов чрезвычайно широк: от слабых камнепадов холодных и практически дегазированных обломков, при механическом дроблении которых освобождаются остатки содержащихся в них летучих, через процессы формирования автоэксплозивных лавин и пирокластических потоков к мощным направленным эксплозивным извержениям, разрушающим значительные части постройки вулкана (извержения 1956 и 1985 гг.). Во всех этих случаях разрушающий эффект энергии сжатых газов дополняется и усиливается внешним воздействием на породу, в результате чего происходит близодновременное образование сразу большого числа декомпрессионных (автоэксплозивных) трещин по всему объему вещества, подвергнувшемуся дополнительному механическому воздействию. Наибольшего размаха эти процессы достигают в тех случаях, когда происходит гравитационное соскальзывание с одновременным ударно-механическим (и автоэксплозивным) дроблением значительной части постройки вулкана.

Соотношения между четырьмя перечисленными выше типами дегазации ювенильного материала различны на разных стадиях активности вулкана. В состоянии покоя, как уже отмечалось, происходит лишь миграция летучих по долгоживущим зонам повышенной трещиноватости, внешне проявляющаяся в фумарольной деятельности вулкана. В процессе затяжных экструзивных, экструзивно-эффузивных или эффузивных извержений этот тип дегазации дополняется спокойным расширением летучих в пределах ювенильного материала и слабой спровоцированной эксплозивностью в процессе формирования обвальных лавин.

Эти же типы дегазации доминируют на начальных и заключительных стадиях извержений с четко выраженной эксплозивно-эффузивной (на ранних этапах исторического цикла активности вулкана – эксплозивно-экструзивной) кульминацией. По мере приближения к этой кульминации одновременно с ускорением поступления на поверхность ювенильного материала, скорее всего, происходит усиление расширения во внутривулкановом пространстве блоков ювенильного материала. Наряду с этим появляются и усиливаются процессы автоэксплозивной дегазации по спонтанно закладывающимся трещинам. В ходе обвалов усиливаются и процессы эксплозивности, спровоцированной внешним ударно-механическим или гравитационно-разгрузочным воздействием. Если при этом часть постройки вулкана оказывается в неустойчивом положении и разруша-

ется, то спровоцированная эксплозивность становится доминирующим типом дегазации ювенильного материала, обуславливая наиболее мощные извержения вулкана.

В целом развитие извержений с четко выраженной кульминацией соответствует лавинообразному предкульминационному усилению и посткульминационному ослаблению процессов дегазации ювенильного материала. Этот своеобразный газовый разряд происходит за счет летучих, находящихся под большим давлением, но рассеянных в порах близповерхностной части магматического канала. Не исключено, что в процессе этого разряда происходит дополнительное увеличение газонасыщенности ювенильного материала и увеличение энергии сжатого в порах газа за счет дополнительного выделения летучих непосредственно из расплава.

Из всех закономерностей эруптивного процесса ключевым моментом для понимания сути происходящих процессов, по нашему мнению, является тройственная взаимосвязь динамики (силы) извержений, газонасыщенности и кристалличности пород. Для того чтобы вскрыть основные движущие силы вулканического процесса, необходимо учесть ряд очевидных или общеизвестных моментов.

Прежде всего, сам факт извержений свидетельствует о наличии некоторого, избыточного по отношению к литостатическому, внутримангматического давления, причем полицикличность вулканического процесса однозначно соответствует полицикличности изменений этого давления. В свою очередь проявления признаков саморазвития в виде прямой и обратной лавинообразности свидетельствуют о том, что это избыточное давление генерируется внутри самой системы.

С другой стороны, вполне очевиден тот факт, что магматическая система, питающая вулкан, имеет более высокую температуру по сравнению с окружающими породами. На неизбежный в этих условиях теплоотвод система реагирует ростом упорядоченности структуры в виде перехода части расплава в кристаллическую фазу. Теплопотери при этом полностью или частично компенсируются за счет выделения скрытой теплоты кристаллизации.

Как показывают полевые наблюдения за извержениями вулканов и изучение их продуктов, в питающей вулкан магме всегда присутствуют летучие в свободной фазе. Помимо этого летучие находятся и в магматическом расплаве в растворенном состоя-

нии. Особенно хорошо известна и широко изучена экспериментально растворимость в расплаве паров воды. Оценки содержания воды в магмах вулканических областей, проведенные различными способами показывают, что оно чаще всего составляет 1 – 3 масс. %. Совместная кристаллизация амфибола и плагиоклаза в андезитах Безымянного по экспериментальным данным требует наличия на заключительном этапе кристаллизации содержания воды не менее 6 масс. %, а содержание воды в отдельных вулканических породах (пехштейны) достигает 8 и более масс. %.

Кроме воды в растворенном состоянии могут находиться и другие легкие элементы и их соединения, определяемые в вулканических эксгаляциях. Важно подчеркнуть два момента. Во-первых, для любого из летучих компонентов существует предел растворимости в расплаве. А, во-вторых, наличие в магме летучих в свободной фазе свидетельствует о том, что содержание летучих в расплаве близко к пределу растворимости, то есть расплав по отношению к летучим практически всегда оказывается насыщенным. Кроме того, следует учесть, что летучие не входят в кристаллическую решетку большинства породообразующих минералов вулканических пород и должны оставаться в расплаве.

В этих условиях теплотери и частичная кристаллизация расплава неизбежно должны приводить к тому, что оставшийся расплав по отношению к летучим оказывается пересыщенным, и летучие начинают выделяться из расплава. Из-за высоких температур наиболее легкая, «газовая», фракция летучих сразу оказывается в надкритическом состоянии и обособляется в газовую фазу, обеспечивая значительный прирост магматического давления. Дополнительным, усиливающим этот механизм, моментом является тот факт, что летучие в свободной фазе обладают более высокой миграционной способностью по трещинам для высоковязких расплавов или в виде всплывающих пузырьков для магм с малой вязкостью, следствием чего является транспортировка и дополнительный прирост внутриматического давления. Сброс этого давления происходит в ходе эруптивной деятельности вулкана.

В этом плане магматические системы можно рассматривать как динамически активные, т.е. испытывающие тенденцию к непрерывному расширению. Однако объем каждой магматической системы остается неизменным при нарастающем внутриматическом давлении до тех пор, пока последнее не превысит статическое сопротивление

окружающих пород, их предел прочности. В последнем случае происходит частичное разрушение окружающих пород, что и делает возможным расширение системы.

## **Второе защищаемое положение**

*Развитие вулканического процесса реализуется в форме полициклических автоколебаний, проявляющихся как в изменении количества поступающего на поверхность ювенильного материала, так и в циклической эволюции вулканического процесса по составу и формам извержений.*

Одной из основных закономерностей динамики вулканического процесса Безымянного является его полициклическость. Здесь и ниже под циклом вулканической активности мы будем понимать последовательный переход от низкого уровня активности вулкана к высокому и – далее – опять к низкому. В общем случае цикл активизации вулкана может начинаться и завершаться как состоянием покоя, так и состоянием стационарного развития, в котором присутствует некоторая, иногда довольно значительная, фоновая активность. В состоянии близком к состоянию стационарного развития вулкан находился, например, в первую половину 1982 г. и в течение почти всего 1987 года. Это же состояние было довольно обычно для вулкана в конце 60-х — начале 70-х годов.

Простейшим случаем циклическости вулканического процесса является чередование извержений и разделяющих их периодов покоя или пониженной вулканической активности. Однако наряду с этим простейшим типом циклическости в развитии вулканического процесса присутствуют циклы как более мелких, осложняющих динамику развития единичного извержения, так и более крупных масштабов. Наиболее крупным (не менее 11 тыс. лет) циклом для вулкана Безымянного является мегацикл его развития, то есть верхнеплейстоценовая – голоценовая вспышка вулканической активности на месте современного положения вулкана, продолжающаяся и в настоящее время. В ходе этого мегацикла прослеживаются черты некоторых направленных изменений в деятельности вулкана: локализация экструзивной активности, снижение среднего коэффициента эксплозивности; уменьшение размаха колебаний в вещественном составе; сокращение длительности макроциклов; повышение деструктивной активности вулкана. В свою очередь мегацикл развития вулканической деятельности в районе Безымянного осложняется макроциклическостью. Выделяются пять макроциклов длительностью порядка



первых тысячелетий. Для каждого из них был характерен постепенный переход от экструзивной деятельности к эффузивной, за начальным всплеском следовало снижение и затухание активности. Вещественный состав менялся от роговообманковых дацитов и андезитов до двупироксеновых андезитобазальтов. На рубеже конца очередного макроцикла и начала следующего прослеживается тенденция к эволюции вещественного состава в противоположном направлении.

Как можно видеть на примере макроцикла активности вулкана в историческое время, макроцикличность, в свою очередь, осложняется более мелкими эруптивными циклами длительностью порядка 10 лет. Для цикличности этого временного масштаба характерно повторение перехода от непрерывного характера извержения к импульсному, затем к непрерывно-импульсному и снова к непрерывному с приуроченностью наиболее сильных вспышек извержений к периодам импульсного характера извержений. Так, после мощного направленного извержения вулкана 30 марта 1956 г. в образовавшейся кальдере начал расти экструзивный купол. Его непрерывный рост продолжался оставшуюся часть 1956 года. С 1957 г. процесс извержений стал носить импульсный характер, с марта 1961 г. - непрерывно-импульсный, а после извержения вулкана в марте 1965 г. практически непрерывный характер. Вторично вулкан вернулся к импульсному характеру извержений во второй половине 70-х годов, и к концу 80-х опять стала прослеживаться тенденция к переходу на практически непрерывный режим извержений. В свою очередь мощные извержения вулкана в середине 90-х годов свидетельствуют о возврате вулкана к импульсному характеру извержений.

Эруптивные циклы состоят из циклов обычных, рядовых извержений, происходящих с частотой 1-2 раза в год. Развитие последних, несмотря на все их разнообразие, осложняется более мелкой цикличностью кратковременных усилений и ослаблений активности, которые, в свою очередь, могут осложняться еще более мелкими. Так, в 1968 году были описаны кратковременные импульсы усиления экструзивной деятельности. Эти импульсы диагностировались усилением сейсмической активности в виде вулканического дрожания и наличием в висячем боку растущего экструзивного купола Наутилус полос различной ширины, соответствующих амплитуде подъема выжимающегося блока в ходе каждого импульса. Все это, в конечном счете, и определяет полицикличность вулканического процесса.

Полицикличность вулканического процесса находит свое отражение в полициклическом изменении форм извержений и соответствующем изменении фациального состава вулканитов, в изменениях химического, минерального и газового состава, в эволюции самой постройки вулкана.

Мегацикл развития вулканической активности в районе современной постройки Безымянного прослеживается в формах извержений и фациальном составе в виде двух тенденций: во-первых, в тенденции к пространственной локализации развития экструживного процесса в начальные стадии макроциклов, соответствующей по своей сути переходу от ареальной экструживной активности через латеральную к терминальной и, во-вторых, к последовательному снижению от цикла к циклу среднего коэффициента эксплозивности, достигавшего максимальных значений в первом макроцикле.

Макроцикличность эруптивного процесса в формах извержений и фациальном составе проявляется в приуроченности наиболее интенсивной экструживной деятельности к периодам наибольшей активности вулкана с последующим постепенным переходом к эффузивной деятельности к концу макроцикла. В фациальном составе трех последних макроциклов возрастает значение пирокластических потоков.

Как показывает анализ исторической активности Безымянного, эруптивные циклы, осложняющие течение современного макроцикла, характеризуются переходом от импульсного к непрерывно-импульсному и, далее, к непрерывному характеру извержений с соответствующим изменением формы извержений - от извержений с ярко выраженной эксплозивной деятельностью и формированием широкого спектра пирокластических и тефровых отложений к затяжным экструживно-эффузивным извержениям, протекающим при полном отсутствии эксплозий, а основным результатом этих извержений является формирование мощных отложений лавокластита.

Цикличность обычных извержений в формах вулканической и фациальном составе их продуктов просматривается наиболее отчетливо для извержений с четко выраженной кульминацией (импульсный режим извержений). Кульминации предшествует период активизации, первые признаки которой нередко проявляются за месяц и более до извержения. В начальные периоды активизации поступающий на поверхность материал представлен жесткими, практически дегазированными в ходе предыдущих периодов активности блоками. По мере развития извержения жесткие блоки разруша-

ются, и на их месте появляется более газонасыщенная и высокотемпературная лава. В ходе обвалов, сопровождающих развитие экструзивного процесса, появляются и все более усиливаются признаки проявлений эффекта автоэксплозивности, особенно отчетливые для наиболее крупных обрушений. Последние все больше приобретают характерные черты автоэксплозивных лавин. Дальнейшее нарастание температуры, газонасыщенности и пластичности ювенильного материала, соответствующее общей активизации вулкана, создает предпосылки для формирования пирокластических потоков, а максимальная газонасыщенность, совпадающая с кульминацией извержения, соответствует практически непрерывным вертикальным газопепловым выбросам, образующим мощную эруптивную колонну. В 80-е годы, во время наблюдений автора, при этом происходило одновременное излияние наиболее пластичных, максимально пористых лав, для поверхности которых характерно повсеместное распространение пировойлочных текстур.

Начиная с кульминационных моментов извержения, тенденция в изменении газонасыщенности меняет знак. Последовательное снижение количества летучих в ювенильном материале обуславливает переход от практически непрерывных вертикальных газопепловых выбросов сначала к формированию пирокластических потоков затухающей мощности, затем ко все более редким автоэксплозивным лавинам. Завершает процесс стабилизации от остаточной экструзивной деятельности к затухающим деформациям привершинной части активного блока вулкана, сопровождающихся все более слабыми каменными лавинами.

Аналогичные закономерности прослеживаются и в ходе отдельных вспышек активности вулкана, осложняющих развитие отдельного извержения на стадии активизации, в кульминационные моменты и во время затухания активности. Однако диапазон изменчивости форм извержения и спектр фациального состава зависят от максимального для данной вспышки уровня активности вулкана.

Полицикличность вулканического процесса прослеживается в изменении химического состава лишь на уровне мега- и макроцикличности. В рамках мегацикла развития вулканической активности в районе вулкана просматривается тенденция к уменьшению от цикла к циклу размаха колебаний в химическом составе. Вариации в содержании  $\text{SiO}_2$  уменьшаются от 66 - 54.5 % для первого макроцикла до 62 - 57 % для чет-

вертого. Наблюдается смещение средних составов продуктов извержений (прежде всего повышение железистости) и сокращение диапазона вариаций химических компонентов в продуктах исторических извержений по сравнению с древними. Наиболее резким различием в составах древних и исторических вулканитов является значительное (на 0.76 вес. % в абсолютном выражении и на 20.5 % по отношению к среднему содержанию) повышение количества  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в продуктах исторических извержений. Наряду с этим средний состав исторических извержений отличается более низким содержанием  $\text{SiO}_2$ , глинозема, щелочей (прежде всего,  $\text{K}_2\text{O}$ ) и более высоким - магния и титана. Следует отметить и относительное снижение почти на четверть среднего содержания фосфора. Что касается сокращения диапазонов изменчивости химических компонентов, то наиболее сильное сокращение (в 2.6 раза) имело место для содержаний  $\text{MgO}$ . В пределах от 2.5 до 1.5 раз сократились интервалы вариаций для  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{FeO}$ .

Отражение макроцикличности в изменении химического состава в связи с возможностью надежной датировки прослеживается на протяжении третьего, четвертого и пятого (исторического) макроциклов. Пикам экструзивной активности вулкана соответствуют наиболее кислые разности пород. Им предшествуют периоды в большей или меньшей степени выраженной эволюции вещественного состава от более основных пород к кислым. После пиков экструзивной активности вулкана следуют периоды с хорошо выраженной эволюцией вещественного состава в противоположном направлении – от кислых разностей пород к более основным. Выполнявшийся на протяжении нескольких десятилетий исторической активности вулкана анализ химического состава продуктов извержений вулкана позволяет сделать некоторые количественные оценки этой эволюции.

Регрессионный анализ показывает, что историческая эволюция химического состава для Безымянного в первом приближении соответствует зависимости

$$\{\text{SiO}_2\} = (-0.077 \pm 0.011) * t + 64.065 \text{ вес. \%},$$

где размерность времени  $[t] = 1$  год. То есть имеется достаточно хорошо выраженная тенденция к ежегодному снижению содержания  $\text{SiO}_2$  на 0.077 вес. %. Практически столь же хорошо выражена лишь тенденция к ежегодному увеличению на  $0.030 \pm 0.005$  вес. % в содержании  $\text{MgO}$ .

Наряду с общей тенденцией к повышению основности извергаемого в ходе исторических извержений материала имеются признаки повышения содержаний  $\text{SiO}_2$  на самых ранних этапах исторического цикла активности. Несмотря на «эоловую» дифференциацию, которая для Безымянного делает химический состав, как правило, более кислым по сравнению с одновременными пирокластикой и лавами, пеплы, предшествовавшие извержению 30 марта 1956 г., содержат существенно меньше  $\text{SiO}_2$  по сравнению материалом этого извержения и первыми лавами купола Нового.

Как было установлено в процессе изучения исторического и более древних макроциклов цикличность этого порядка прослеживается в синхронных изменениях минерального состава пород от преимущественно пироксеновых андезитов к роговообманковым и, далее, в противоположном направлении - от роговообманковых к двупироксеновым. В пеплах, предшествовавших катастрофическому извержению вулкана 30 марта 1956 г., среди темноцветных минералов доминировал ромбический пироксен в виде неправильных зерен и обломочков кристаллов. Роговая обманка отмечалась лишь в очень небольших количествах в виде обломков кристаллов изометрической или вытянутой формы. В пеплах извержения 30 марта 1956 г. роговая обманка и ромбический пироксен встречаются примерно в одинаковых количествах, а в андезитах пирокластического потока этого извержения роговая обманка становится уже основным темноцветным минералом. Содержание роговой обманки достигло максимума в породах 1957 г. и представлена она была не зеленой, а бурой разновидностью. Призмочки гиперстена в этих образцах имеют покрасневшие края и наблюдается реакционное замещение пироксена роговой обманкой, а часть микролитов гиперстена замещена магнетитом.

В ходе последующих извержений роговообманковые андезиты сменились роговообманково-пироксеновыми, а затем - двупироксеновыми. Вкрапленники роговой обманки практически исчезают уже в лавах извержения 1961 г., подвергаясь интенсивной гранулярной диссоциации с образованием агрегатов *Pl*, *Px* и *Mt*. Роговую обманку в качестве главного темноцветного породообразующего минерала в это время сменяет ромбический пироксен. Однако роговая обманка в виде единичных кристаллов, в значительной степени подвергнувшись реакционной переработке, продолжает встречаться в породах Безымянного все последующие годы.

Кроме изменений в минеральном составе полицикличность вулканического процесса находит свое отражение в широком развитии серийно-порфировых структур, в некоторых случаях дающих практически непрерывное распределение минеральных фаз по размерам. В то же время разные размерные генерации кристаллов иногда довольно резко различаются между собой по составу минеральных фаз. В ходе исторических извержений были зарегистрированы периодически повторяющиеся изменения структуры пород, синхронные эруптивной цикличности в пределах исторического макроцикла. В первые годы после извержения 30 марта 1956 г. произошло увеличение размера микролитов основной массы: переполненное плохо развитыми кристаллитами стекло андезитов 1956-1957 гг. сменилось чистым стеклом в андезитах 1961 и последующих лет. Затем степень кристалличности лав стала увеличиваться. Количество основной массы (микролиты и стекло) резко снизилось от 65 % в 1956 г. до 34-40 % в последующие годы. Наиболее характерная особенность лав этого периода - появление фенокристаллов плагиоклаза и пироксена второй генерации. За 8-10 лет их количество, постоянно возрастая, достигло 40% общего объема породы. Именно за счет второго поколения вкрапленников росла кристалличность лав, количество фенокристаллов плагиоклаза и пироксена I генерации изменялось мало.

В 1965 г. произошло скачкообразное уменьшение кристалличности лав. Возможно это было связано с первыми крупными разрушениями растущей экструзии и поступлением на поверхность более высокотемпературного, а, следовательно, и менее раскристаллизованного ювенильного материала. Лавы второго этапа формирования экструзии (1965-1975 гг.) по характеру кристаллизации сходны с породами первого этапа формирования купола Новый. Для андезитов этого извержения было характерно увеличение основной массы до 50 %. В основной массе отмечались четко ограненные кристаллы плагиоклаза и пироксена размером до 100 мк; во вкрапленниках наблюдалось более низкое содержание плагиоклаза и ромбического пироксена II генерации, роговая обманка составляла 1-2 %. В последующие годы, как и в предыдущее десятилетие, степень кристалличности лав стала быстро возрастать. Одновременно фенокристаллы второй генерации достигли размеров вкрапленников 1 генерации. Характерно присутствие в пироксенах обеих генераций включений апатита; в зональных кристаллах эти включения концентрируются на границе зон. Основной массы мало (30-35 %), стекло чистое, много кристобалита, роговая обманка диссоциирует и исчезает.

С 1977 г. для извержений вулкана вновь стали свойственны крупные разрушения постройки купола Нового, в результате чего на поверхность опять стал поступать более высокотемпературный и менее раскристаллизованный ювенильный материал. В извержении 1985 года количество генераций плагиоклаза возросло до 4 (*Pl I*, *Pl II*, *Pl III* и микролиты) по сравнению с 2 генерациями в породах 1956-1957 гг. (*Pl I* и микролиты) и 3 - в породах 1965 г. (*Pl I*, *Pl II* и микролиты).

При исследовании раскристаллизованности пород складывалось впечатление, что в ходе кристаллизации имеющиеся в породе субфенокристаллы достигают размеров фенокристаллов и отождествляются с последними. Микролиты, дорастая, становятся субфенокристаллами, а увеличивающиеся в размерах кристаллиты становятся микролитами. Однако при всех этих плавных переходах сохранялись диагностируемые на качественном уровне разрывы в распределении минеральной фазы по размерам, что по сути соответствует неравномерностям в образовании центров кристаллизации с течением времени, то есть чередующимся периодам повышенной и пониженной интенсивности формирования новых центров кристаллизации.

Результаты применения количественно-минералогического анализа к изучению распределения площади сечений по размерам внутри одной и той же минеральной фазы показывают, что в логарифмическом масштабе в распределениях четко прослеживаются от двух до четырех крупных максимумов. Причем факт наличия нескольких максимумов устанавливается одновременно для всех присутствующих породообразующих минералов. Во многих случаях в распределениях прослеживаются неоднородности второго порядка в виде чередующихся точек перегиба или менее выраженных и более близко расположенных друг к другу второстепенных максимумов. Различия между порфировыми и серийно-порфировыми структурами с точки зрения количественно-минералогического анализа оказываются весьма условными. По сути для пород Безымянного они сводятся лишь к увеличению дистанции между крупными максимумами в распределениях площадей сечений по размеру внутри одной и той минеральной фазы.

Кроме синхронного с эруптивной цикличностью периодического повторения структур был установлен факт параллельного изменения составов *Pl I* и *Pl II* генераций вкрапленников, при сохранении разницы в средних составах для всех изученных из-

вержений на 17-19 %  $An$ . При этом высокое значение  $An$  в лавах ранних извержений (1956-1957 гг.) сменяется минимальным в лавах извержения 1961 г., а затем снова увеличивается в лавах более поздних извержений. При этом средние составы  $P_l$  каждой генерации в лавах извержения 1965 г. достигают таковых в лавах 1956-1957 гг.

В структуре пород находит свое отражение и цикличность обычных извержений. В частности, были зарегистрированы факты снижения количества вкрапленников I генерации (фенокристаллов) на фоне возрастания количества стекла и вкрапленников II генерации (субфенокристаллов). Также отмечено общее уменьшение раскристаллизованности основной массы в более поздних продуктах извержения. Не остается постоянным и минеральный состав: для более поздних продуктов в извержении 1965 г. было характерно появление в основной массе микролитов апатита. Некоторые выделения апатита достигали 100-150  $\mu$ . В этом же извержении составы  $P_l$  обеих генераций параллельно изменялись от более кальциевых в ранних продуктах извержения к менее кальциевым - в поздних.

Наряду с изменениями структуры и минерального состава полицикличность вулканического процесса находит свое отражение в зональности минеральных фаз, причем для крупных вкрапленников вполне обычен повторяющийся тип зональности. Особенно это характерно для плагиоклаза, у вкрапленников которого отмечаются прямой, обратный и повторяющийся типы зональности. Химическая зональность дополняется наличием зон, содержащих большое количество включений стекла. Как правило, эти зоны приурочены к контактам химической зональности, к центру кристаллов и, очень редко, к их внешнему окаймлению. Развитие зональности в плагиоклазе варьирует в широких пределах: иногда зональные кристаллы редки, чаще, напротив, составляют подавляющее большинство вкрапленников плагиоклаза. Отмечается зональность у некоторых вкрапленников ромбического и моноклинного пироксенов.

Полицикличность вулканического процесса находит свое отражение в изменении газового состава. Прежде всего, это относится к изменению соотношений между газами группы серы и галогеноводородами по мере нарастания и снижения активности вулкана. В начале исторического макроцикла на общем фоне существенно сульфатного состава эксгаляций извержения эксгаляции самого начала развития извержения (октябрь-ноябрь 1955 г.) содержали  $Cl$  значительно больше, чем последующие. Отноше-



ние S/Cl стало максимальным во время и непосредственно после кульминационного извержения 30 марта 1956 г., а в последующие годы стало снижаться за счет возрастания доли галогенных газов. В первое десятилетие постпароксизмальной активности вулкана по мере роста купола в газах уменьшалось содержание SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CO, CO<sub>2</sub> и увеличивалось HF и HCl. Несомненно, что на газовом составе и количестве газовых эманаций должна отражаться и цикличность обычных извержений, но при редком опробовании fumarol (1-2 раза в год) уловить эти изменения довольно затруднительно. И, тем не менее, в результате многолетних наблюдений исследователи пришли к заключению, что и в ходе рядовых извержений вулкана нарастание его активности характеризуется увеличением соотношения S/Cl, а спад - уменьшением.

За первое десятилетие активности вулкана в конденсате расположенных на одной и той же высоте fumarol было установлено снижение минерализации от 13.4 до 0.7 грамма на литр. В зависимости от степени активности вулкана менялся состав формирующихся в ходе fumarольной деятельности возгонов. В спокойном состоянии обычно происходит формирование возгонов, состоящих из гипса, хлоридов и фторидов, а непосредственно перед эксплозивной активизацией вулкана для возгонов на поверхности активных блоков характерно появление натеков переплавленной серы зеленовато-желтоватого цвета. В прямой зависимости от степени активности вулкана варьирует с течением времени и количество выносимых на поверхность микрокомпонентов. Число определяемых микрокомпонентов и их концентрации находятся в прямой зависимости от времени постэруптивного цикла, а наиболее обогащены ими первые высокотемпературные эксгаляции.

Мегацикл вулканической активности Безымянного прослеживается во все большей локализации вулканической, прежде всего экструзивной, деятельности в районе Безымянного в результате которой и произошло формирование современной вулканической постройки центрального типа. Одновременно с формированием вулканического аппарата центрального типа в ходе мегацикла развития вулкана прослеживается тенденция к повышению его деструктивной активности, выражающейся в синхронных с макроциклическими эпизодическими разрушениями постройки вулкана. Первые признаки этого появляются в третьем макроцикле - формирование обвально - обломочной лавины. Для четвертого макроцикла становятся характерны пеплово - глыбовые потоки,

формирующиеся при разрушении привершинных частей вулкана. И, наконец, в пятом, современном, макроцикле - полное разрушение значительной части постройки вулкана.

В свою очередь макроцикличность в формировании структуры вулкана отражается в виде полного или частичного разрушения в ходе мощных эксплозивных извержений сформировавшейся в предыдущем макроцикле постройки вулкана с последующим формированием экструзивного купола (или куполов) и, далее, в их частичной переработке и перекрытии стратовулканическим комплексом. Наиболее ярко иллюстрирует этот процесс историческое развитие постройки вулкана. За время, прошедшее после извержения 30 марта 1956 г. внутри кальдеры сформировалась современная часть постройки вулкана, три четверти которой занимает экструзивный купол, рост которого начался непосредственно после этого извержения. Четвертую часть современной постройки вулкана занимает активный восточный блок, с которым связаны все извержения вулкана, по крайней мере, с середины 70-х годов. По сути, этот блок представляет собой своеобразную переходную форму между экструзивным куполом и стратовулканом.

В ходе макроцикла по мере достижения новообразованной частью вулканической постройки определенных критических размеров в ее формировании начинает отражаться и цикличность масштаба эруптивных циклов. Цикличность этого временного масштаба прослеживается в развитии постройки вулкана аналогично описанной выше макроцикличности, отличаясь лишь меньшим масштабом явлений. В ходе импульсов мощных эксплозивных извержений вулкана в пределах эруптивных циклов возрастает вероятность крупных разрушений формирующейся постройки вулкана, которые «залечиваются» в ходе последующих затяжных экструзивно-эффузивных извержений при общем практически непрерывном характере извержений.

Вышесказанное можно проиллюстрировать на примере активного восточного блока купола Нового. Сосуществование в постройке восточного блока субгоризонтальной неоднородности, характерной для стратовулканов, и субвертикальной неоднородности, свойственной экструзивным куполам, ведет к значительно меньшей прочности восточного блока по сравнению как с экструзивными, так и со стратовулканическими образованиями. Это делает более вероятным возникновение крупных вулканических обвалов, которые могут спровоцировать развитие мощных направленных извержений.

Подобные извержения приводят к значительным разрушениям в постройке вулкана, и стратовулканический комплекс начинает формироваться заново. Фактически происходит не пассивное наложение стратовулканического комплекса на экструзивный купол, а периодическая, синхронная с эруптивной цикличностью, активная переработка части постройки вулкана. В конечном счете, в формирующемся разрезе будут присутствовать лишь не подвергнувшаяся переработке часть экструзивного купола и достаточно зрелый стратовулканический комплекс.

Отражение цикличности обычных извержений на эволюции постройки Безымянного наиболее ярко иллюстрируют извержения, происходившие в 80-е годы. Эти извержения, как правило, начинались с очень слабого деформационного процесса, охватывавшего привершинную часть восточного блока и приводившего к образованию деформационного поднятия с близсферической поверхностью. Дальнейшее усиление процесса обуславливало трансформацию деформационного купола в жесткую экструзию в форме обелиска. Однако и сама экструзия в процессе роста и разрушения трансформировалась в лавовое вздутие, материал которого начинал стекать вниз по склону, образуя лавовый поток. Затухание активности вулкана приводило к переходу от эффузивной деятельности к слабому экструзивно-деформационному процессу, образующему куполовидное поднятие в привершинной части лавового потока. Цикл эволюции постройки вулкана «деформационный купол – экструзивный блок – лавовое вздутие – лавовый поток – деформационный купол» в 80-е годы отражал цикличность обычных извержений и был характерен как для извержений с четко выраженной кульминацией и бурной эксплозивной деятельностью, так и для затяжных экструзивно-эффузивных извержений. Для последних, подобная, но менее ярко выраженная цикличность эволюции постройки вулкана была характерна и для циклов временных усилений и ослаблений активности, осложнявших общее течение извержения.

В рамках динамической модели вулканического процесса полицикличность вулканического процесса интерпретируется следующим образом. Из-за невозможности длительного сохранения объема системы при нарастающем давлении, так и длительного расширения системы при постоянном давлении процесс принимает автоколебательный характер по бесконечно большому числу собственных частот системы. Форма колебаний определяется периодическим выходом системы из состояния неустойчивого

равновесия и установления в системе нового равновесного состояния, которое спустя некоторое время вновь станет неустойчивым.

Возникновение полицикличности наглядно можно представить на следующей модели. Возьмем спиральную пружину малой жесткости и, плавно подталкивая ее с одного конца, будем перемещать ее в направлении другого. Пусть при этом силы трения отсутствуют, то есть чуть-чуть приподнимем пружинку над поверхностью, по которой она движется. Положим на пути движения не очень тяжелый предмет. Наткнувшись на этот предмет, пружинка будет сжиматься, накапливая энергию. В конечном счете, сжатие пружинки достигнет величины, при которой сила упругости превысит силу трения между препятствием и поверхностью. В результате пружинка преодолеет препятствие и начнет расширяться, продолжая поступательное движение. При этом *возникнут колебания по всем соответствующим формам; каждое из таких колебаний будет происходить с соответствующей собственной частотой независимо от остальных движений.* Наименьшая частота пружинки будет определять самые длиннопериодные колебания (главные колебания системы), на которые будут накладываться колебания более высоких частот. Приведенная цитата характеризует поведение любой системы после снятия статистической нагрузки.

Еще больше становлению магматических систем будет соответствовать аналогичная модель не с движущейся, а с самопроизвольно расширяющейся пружинкой. Таким образом, качественной моделью вулканического процесса является аналог саморазворачивающейся пружины – саморегулирующийся и самоорганизующийся автоколебательный процесс расширения магматических систем при наличии большого (теоретически – бесконечно большого) набора колебательных частот. Источником динамической активности магматических систем является рассеивание их тепла в окружающее пространство, сама активность возникает за счет выделения из расплава кристаллической и газовой фазы и нарастания внутриматического давления, а сброс этого давления носит полициклический характер.

Тем самым мы приходим к необходимости реабилитации концепции динамической активности магм. Динамическая активность магм, возникающая за счет возможности расширения расплавов при их затвердевании, предполагалась концепцией Штюбеля, разработанной им на рубеже XIX и XX веков. Однако в результате различных

опытов по плавлению изверженных пород, в том числе и тех, которые возникли в результате застывания лав было установлено, что плавление изверженных пород приводит к уменьшению плотности и соответствующему увеличению объема расплавленного материала. Поэтому, как считает И.В. Лучицкий *«давно уже выяснена неприемлемость»* этой концепции. Поскольку эксперименты проводились без учета реального поведения летучих, то их результат оказался некорректен. Создавшаяся ситуация обусловила едва ли не вековое господство идей пассивного всплывания магм за счет их более низкой плотности.

Естественно, что полициклическая изменчивость внутримигматического давления накладывает отпечаток и на все процессы, происходящие в магме. Широко известен факт смещения под большим давлением летучих минеральных равновесий в магме в сторону водосодержащих минералов. Для Безымянного это проявляется в реакционных замещениях пироксена роговой обманкой при нарастании давления летучих и переходе от роговообманково-пироксеновых андезитов к пироксеновым – при сбросе давления. Однако еще более ярко, на наш взгляд, полициклическая изменчивость внутримигматического давления отражается в образовании порфировых и серийно-порфировых структур вулканических пород.

Если магматическая система теряет тепло, то из-за уменьшения теплового движения вне зависимости от значения давления будет происходить упорядочивание молекул расплава с образованием кристаллических структур. Однако как именно будет происходить этот процесс, в значительной степени определяется уровнем внутримигматического давления. В условиях высокого давления преодоление потенциального барьера кристаллическими зародышами будет наименее вероятно, скорость образования новых центров кристаллизации будет падать. Поскольку в условиях постоянного теплоотвода количество образующейся кристаллической фазы должно оставаться практически неизменным, то уменьшение образования новых центров кристаллизации должно приводить к одновременному увеличению скорости роста уже возникших кристаллов. Сброс давления облегчает образование новых центров кристаллизации, скорость их образования возрастает, тогда как скорость роста уже возникших кристаллов соответственно падает.

Тем самым изменчивость внутриматричного давления находит свое отражение в образовании кристаллических структур вулканитов, а полицикличность вулканического процесса прослеживается в серийно-порфировых и порфировых структурах в виде полициклического распределения кристаллов вулканических пород по размерам. Если температуру в системе и количество рассеиваемого в окружающее пространство тепла можно рассматривать как факторы, регулирующие стратегическое направление кристаллизации и определяющие какие минеральные фазы и в каком количестве будут образовываться, то изменение внутриматричного давления будет руководить тактикой кристаллизации, определяя будет ли происходить усиленный рост уже образовавшихся кристаллов или возникновение новых центров кристаллизации. Однако поскольку для различных минеральных фаз высота потенциального барьера должна быть различной, то при значительных изменениях внутриматричного давления этот параметр может оказывать влияние и на стратегическое направление кристаллизации, вызывая смещения минеральных равновесий в магме.

### **Третье защищаемое положение**

*Количественная сторона указанного выше автоколебательного процесса описывается нелинейным дифференциальным уравнением второго порядка вида*

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = k \left[ \left( \frac{dx}{dt} \right)^\lambda - \left( \frac{dx}{dt} \right)_0^\lambda \right]^{\alpha/\lambda},$$

*где  $x$  - параметр, характеризующий развитие системы во времени  $t$ ; коэффициент пропорциональности  $k$ , показатели степени нелинейности  $\alpha$  и  $\lambda$ , а также скорость изменения параметра в состоянии стационарного развития  $\left( \frac{dx}{dt} \right)_0$  - эмпирические константы.*

В качестве исходных данных для моделирования был использован каталог вулканических землетрясений Безымянного, составленный П.И. Токаревым за период 1955-1970 гг., и оценки энергии вулканического дрожания, выполненные автором по результатам обработки сейсмограмм с/ст Апахончич. В ходе моделирования по этим данным было выявлено 220 участков закономерного развития вулканического процес-

са. Из них 80 участков, соответствующих активизации процесса, 106 участков, характеризующих его затухание, и 34 – стационарное развитие.

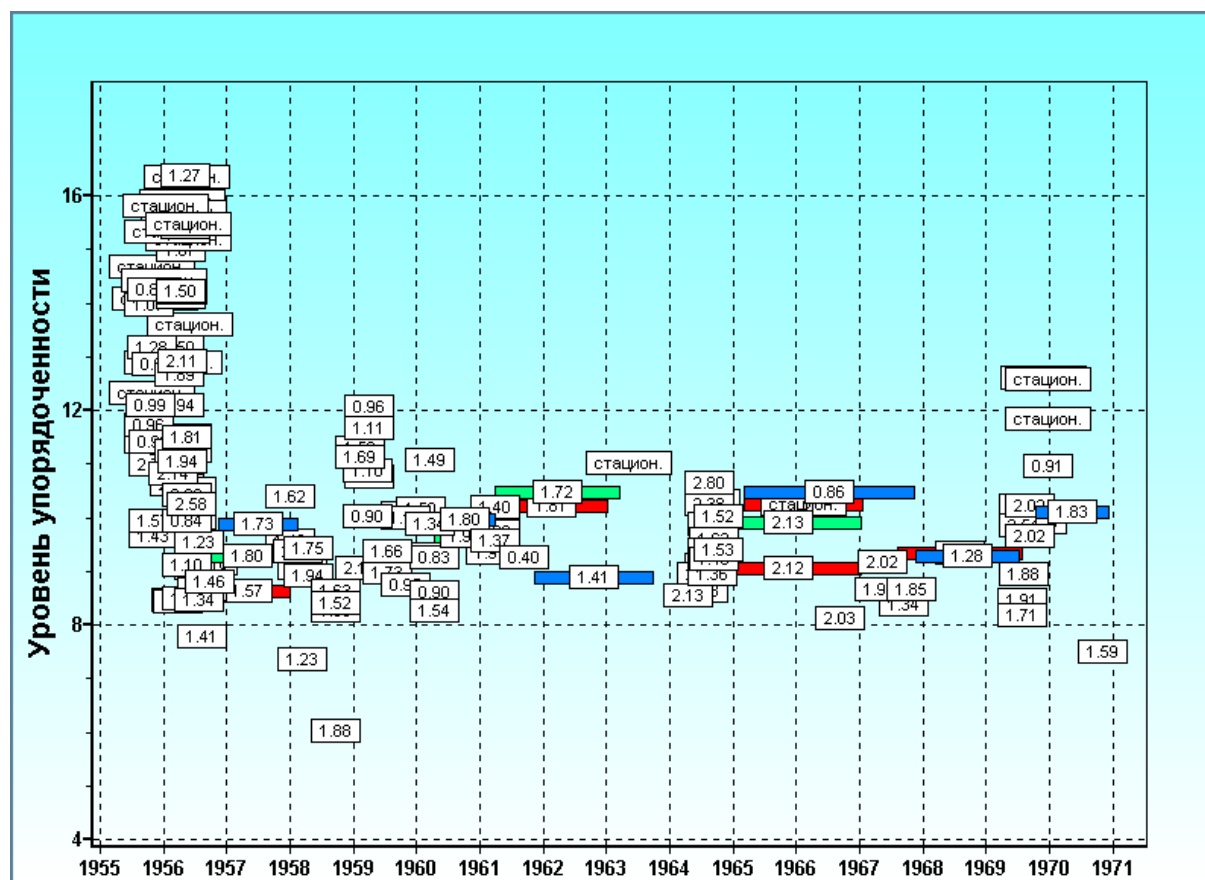


Рис. 1. Изменение абсолютного уровня упорядоченности в последовательностях активизации, затухания и стационарного развития с течением времени. В квадратных рамках - значения  $\alpha$ .

На рис. 1 показано распределение выявленных участков с закономерной динамикой сейсмической активности вулкана по всем четырем проанализированным параметрам. Как можно видеть, практически весь временной ряд наблюдений состоит из участков с закономерным развитием процесса, которое представимо частными случаями решений (стационарное развитие также принадлежит к этим решениям) дифференциального уравнения саморазвивающихся процессов, что, собственно и требовалось доказать. Закономерное развитие процесса в большей степени выражено для участков с максимальной активностью вулкана (1955-1956 гг.), что отражает представительность временного ряда наблюдательных данных. Взаимосвязь качественной и количественной сторон вулканического процесса отражает рис. 2.



Рис. 2. Взаимосвязь (синхронизация) количественной и качественной сторон динамической модели вулканического процесса.

### Список основных работ по теме диссертации.

1. Малышев А.И. Извержения вулкана Безымянный в 1981-1982 гг. // Повышение эффективности горных и геологоразведочных работ. Тез. докл. конф. СГИ. Свердловск. 1983. С. 73.
2. Курсанов И.Т., Двигало В.Н., Гирина О.А., Разина А.А., Козырев А.И., Чубарова О.С., Малышев А.И. Извержение в. Безымянного в 1984 г., его продукты, геологический и энергетический эффекты. // Вулканизм и связанные с ним процессы. Тез. докл. VI Всесоюз. вулканол. совещ. Вып.1. П-Камчатский. 1985. С.34-35.
3. Малышев А.И., Семенов И.В. Образование аккреционных лапилли при извержении



- вулкана Безымянного летом 1985 г. // Ежегодник-85. ИГиГ. Свердловск. 1986. С.54-57.
4. Малышев А.И. Извержения вулкана Безымянный в 1981-1984 гг. *Вулканология и сейсмология*. 1987. №2. С.89-93.
  5. Алидибиров М. А., Богоявленская Г.Е., Кирсанов И.Т., Фирстов П.П., Гирина О.А., Белоусов А.Б., Жданова Е.Ю., Малышев А.И. Извержение вулкана Безымянный в 1985 г. // *Вулканология и сейсмология*. 1988. №6. С.3-17.
  6. Жаринов Н.А., Жданова Е.Ю., Белоусов А.Б., Белоусова М.Г., Иванов А.П., Ханзутин В.П., Малышев А.И. Активность Северной группы вулканов Камчатки в 1985 г. // *Вулканология и сейсмология*. 1988. №3. С.3-12.
  7. Малышев А.И. Динамика спонтанных процессов. // Тез. докл. межд. симпоз. «Геодезия-сейсмология: деформации и прогноз». Ереван. 1989. С.111-112
  8. Максимов А.П., Фирстов П.П., Гирина О.А., Малышев А.И. Извержение вулкана Безымянный в 1986 г. // *Вулканология и сейсмология*. 1991. №1. С.3-20.
  9. Поплавская Л.Н., Бобков А.О., Бойчук А.Н., Миталева Н.А., Оскорбин Л.С., Рудик М.И., Стрельцов М.И., Тихонов И.Н., Малышев А.И. Симуширское землетрясение 9 января 1989 года. // *Препринт ИМГиГ ДВО АН СССР. Ю-Сахалинск*. 1991. 54 с.
  10. Малышев А.И., Тихонов И.Н. Закономерности динамики форишок-афтершоковых последовательностей землетрясений в районе южных Курильских островов. // *Докл. АН СССР*. 1991. Т.319. №1. С.134-137
  11. Малышев А.И. Динамика саморазвивающихся процессов. // *Вулканология и сейсмология*. 1991. №4. С.61-72.
  12. Малышев А.И., Тихонов И.Н., Дугарцыренов К.Ц. Методика построения математических моделей развития форишок-афтершоковых последовательностей сильных курильских землетрясений. // *Препринт ИМГиГ ДВО АН СССР. Ю-Сахалинск*. 1992. 35 с.
  13. Малышев А.И. Уравнение динамики саморазвивающихся природных процессов. // Тез. докл. совещ. «Синергетика геологических систем». Институт земной коры СибО РАН. Иркутск. 1992. С.19-21.
  14. Малышев А.И. Качественная модель рифтогенеза и спрединга Тез. докл. совещ. «Синергетика геологических систем». Институт земной коры СибО РАН. Иркутск. 1992. // С. 72-73.

15. Малышев А.И., Тихонов И.Н., Дугарцыренов К.Ц. Динамика форшокафтершокового процесса разрушительных землетрясений с точки саморазвивающихся систем. // Тез. докл. совещ. «Синергетика геологических систем». Институт земной коры СибО РАН. Иркутск. 1992. С.95-96.
16. Малышев А.И. Цикличность магматического процесса как следствие самоорганизации магматических систем. // Тез. докл. совещ. «Синергетика геологических систем». Институт земной коры СибО РАН. Иркутск. 1992. С.102-103
17. Малышев А.И. Динамика эруптивной активности вулкана Безымянный в 1986 - 1987 гг. // Вулканология и сейсмология. 1995. №3. С.16-27
18. Malyshev A.I. Evolution of Bezemyannyi Eruptive Activity in 1986-1987 // Vol. Seis., 1995, Vol.17. pp. 257-270.
19. Малышев А.И., Тихонов И.Н. Некоторые закономерности сейсмичности региона Японии перед сильными землетрясениями за 1985-1988 гг. // Вулканология и сейсмология. 1996. №3. С.53-65.
20. Malyshev A.I., Tikhonov I.N. Patterns of Japan Seismicity before the Large Earthquakes of 1985-1988 // Vol. Seis., 1996, Vol. 8. pp. 299-314.
21. Malyshev A.I. Life of a volcano (dynamic model of volcanic process on an example of historical eruptions of Bezemyanny volcano, Kamchatka) // EUG9. Abstracts of oral and poster presentations. 23-27 March. 1997. Strasbourg (France). P.195.
22. Malyshev A.I. Dynamics of self-developing natural processes and prospects of its use for the quantitative time forecast of volcanic eruptions EUG9. Abstracts of oral and poster presentations. 23-27 March. 1997. Strasbourg (France). P.195.
23. Малышев А.И. Направленный взрыв вулкана Безымянный 30 марта 1956 г. (вопросы интерпретации) // Вулканология и сейсмология. 1997. №3. С.46-53.
24. Малышев А.И. Динамика саморазвивающихся процессов и перспективы ее использования для количественного прогноза времени вулканических извержений // Тез. докл. конференц. РФФИ «Науки о Земле на пороге XXI века: новые подходы, идеи, решения», Москва, 11-14 ноября 1997 г. С. 9
25. Малышев А.И. Количественный анализ порфировых и серийно-порфировых структур вулканических пород (на примере андезитов вулкана Безымянного) // Ежегодник-96. ИГиГ. Свердловск. 1997. С.71-75
26. Малышев А.И. Развитие элементов методики краткосрочного прогноза для района

*южных Курильских островов. // Материалы междунар. конференц. «Проблемы геодинамики, сейсмичности и минерогенеза подвижных поясов и платформенных областей литосферы», Екатеринбург. 1998. С.180-182.*