

## НОВЫЙ ЭРУПТИВНЫЙ ЦИКЛ КЛЮЧЕВСКОГО ВУЛКАНА И ПРОГНОЗ ЕГО РАЗВИТИЯ (ЗА ПЕРИОД 2003-2005 гг. и далее)

**В.В. Иванов**

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский,  
683006, vivanov@kcs.iks.ru*

### ***Ключевской вулкан и его новый эруптивный цикл***

Ключевской вулкан является гигантским базальтовым и одним из самых активных вулканов Мира. За время своей жизни (около 7 тыс. лет) он извергал в среднем около 60 млн. тонн магмы в год, его продуктивность в десятки раз больше, чем у обычного наземного вулкана на Камчатке [8]. Частые вершинные и побочные извержения характерны для этого вулкана. Извержения обычно происходят группами, разделенными сравнительно длительными периодами покоя. Эти группы называются *циклами эруптивной активности*. В работе [3] проведено детальное исследование эруптивных циклов вулкана. За 51 год, с 1920 по 1970 гг., на вулкане произошло 22 извержения, из них 8 - побочных, причем последние имели явную гидравлическую связь с вершинными извержениями. Даже удаленные от вершинного кратера (т.н. эксцентрические) побочные извержения тесно связаны с его деятельностью и являются составной частью эруптивного цикла. Внутри цикла они происходят без какой-либо закономерности, но, как правило, заканчивают его [3]. На завершающей фазе эруптивного цикла нередко происходят вершинные пароксизмальные извержения наивысшей силы, при которых активизируется весь главный кратер вулкана [6, 7].

Предыдущий эруптивный цикл Ключевского вулкана имел место с июня 1983 г. по октябрь 1994 г. (продолжительность ~ 12 лет). Цикл закончился эффузивно-эксплозивным вершинным извержением, которое на завершающей стадии 1 октября 1994 г. было пароксизмальным (субплинианским). Объем пепла ~ 0.05 км<sup>3</sup> и лавы 0.02-0.04 км<sup>3</sup> [5]. После этого извержений с выбросом раскаленного материала (магматических) не было в течение около 8.5 лет.

По долгосрочному прогнозу, выданному в марте 2000 г., вулкан Ключевской с середины апреля 2000 г. по июнь 2004 г. должен был находиться в активной фазе, благоприятной как для сильного вершинного извержения с объемом >0.05 км<sup>3</sup>, так и для серии побочных прорывов с подобным объемом [1].



Рис. 1. Вершинный кратер Ключевского вулкана 29 июля 2004 г. Внутри виден новый шлаковый конус, образовавшийся в период извержения с мая 2003 по январь 2004 г. Фото одного из альпинистов с кромки вершины вулкана, предоставлено Ю.В.Демянчуком.

Новый эруптивный цикл вулкана начался в конце февраля 2003 г., первое извержение которого было вершинным эксплозивным вулканско-стромболианского типа и продолжалось более 8 месяцев по январь 2004 г. 19 мая 2003 г. нами был выдан прогноз развития этого извержения, который был передан в Камчатское отделение федерального центра прогнозирования землетрясений (КОФЦПЗ) и опубликован в камчатской газете «Вести». Оценивались параметры: продолжительность извержения, масса изверженных продуктов, характер будущей активности, время заполнения кратера, возможная вулканическая опасность для этого и последующих извержений. Прогноз оправдался, за исключением вулканической опасности для последующих извержений нового эруптивного цикла, которая оказалась заниженной. Вызвано это было тем, что

вершинный кратер заполнился быстрее, чем прогнозировалось. За один год извержения в вершинном кратере вырос новый шлаковый конус объемом около 0.04 км<sup>3</sup>. Вершина конуса достигла уровня кромки Крестовского желоба, расположенного примерно на 300 м выше отметки дна кратера в 2000 г. (рис. 1). После чего создались условия для излияния лавовых потоков на внешний склон вулкана и образования там вторичных лахаров и фреатических взрывов. Расхождение было вызвано значительным завышением принятого в расчетах объема кратера - 0.23 км<sup>3</sup>, против реального - 0.04 км<sup>3</sup>. Ошибка была вызвана отсутствием сведений о размерах кратера перед извержением 2003 г. (Иванов В.В., доклад на вулканологическом семинаре 21 февраля 2005 г.).

11 января 2005 г., примерно через год после окончания предыдущего извержения, началось *второе вершинное эксплозивно-эффузивное извержение* Ключевского вулкана с излияниями лавовых потоков на внешний склон вулкана; цикл его эруптивной активности продолжился. Возникла необходимость оценить перспективы развития извержения и уточнить параметры нового эруптивного цикла. К моменту оформления материалов доклада на конференции это второе извержение, вероятно, также закончилось (в апреле 2005 г.). Оно продолжалось около трех месяцев.

#### **Основания прогнозных оценок**

В настоящей статье ставится задача *прогноза развития нового эруптивного цикла вулкана*, а не прогноза начала его извержений. Будем основывать прогнозные оценки на следующих данных и моделях:

1. Опубликованных сведениях о характерных особенностях предыдущих эруптивных циклов вулкана и слагающих их исторических извержений; данные взяты из работ [3,6,7] и ряда статей по состоянию вулканов Камчатки в журналах «Бюллетень вулканологических станций» и «Вулканология и сейсмология».

2. Представлениях о механизме движения магмы и текущем состоянии магматической питающей системы Ключевского вулкана, которые мы попытаемся исследовать на имеющемся материале подготовки и развития его нового эруптивного цикла за период с 1998 г. по май 2005 г.

3. Оценке продуктивности вулкана за время его жизни (около 7 тыс. лет) [8].

**Некоторые особенности эруптивных циклов Ключевского вулкана (с 1920 г. по май 2005 г.)**

Проведенный нами анализ литературных данных показал, что на Ключевском вулкане во временном интервале 1920-май 2005 г. отмечено 7 эруптивных циклов и соответственно 6 разделяющих их периодов покоя. Последний эруптивный цикл начался в 2003 г. и его продолжительность пока составила около двух лет (см. ниже). Эта выборка недостаточна для проведения статистического анализа. Можно лишь констатировать, что продолжительность эруптивных циклов была от 2.5 до 18 лет, а длительность пауз между ними - от 3 до 8.5 лет. Определение понятий см. ниже. Каждый из этих шести циклов заканчивался либо пароксизмальным вершинным, либо побочным извержением, что полностью подтверждает вывод, полученный в работе [3] за интервал 1920-1970 гг.

На рис. 2 показаны построенные нами по данным из работы [3] частотные распределения продолжительности извержений внутри циклов, а также интервалов покоя между ними внутри этих циклов для Ключевского вулкана за наиболее представительный интервал с 1945 по 1970 гг. (15 извержений и 13 периодов покоя между ними).

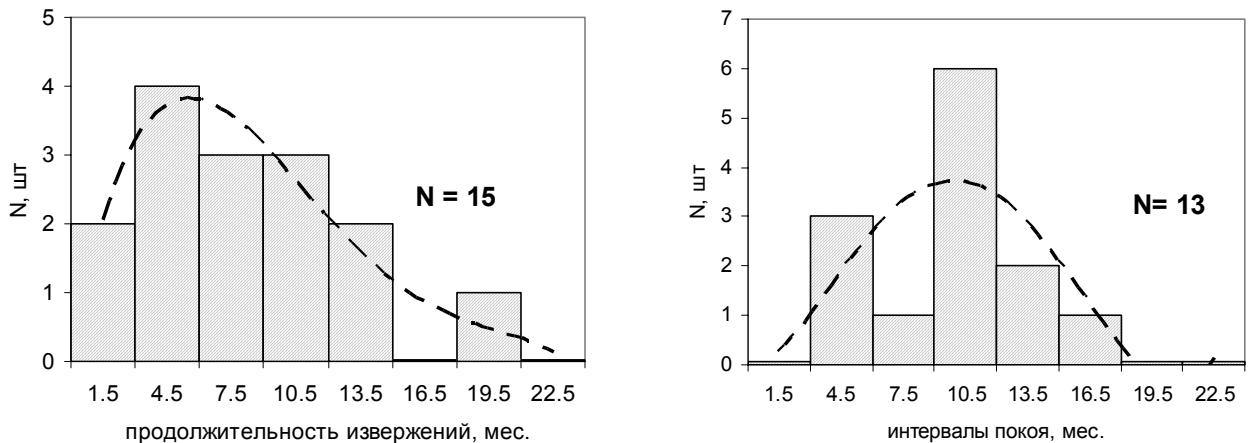


Рис. 2. Распределение продолжительности извержений Ключевского вулкана (слева) и интервалов покоя между ними (справа) за период с 1945 по 1970 гг.

Из рис. 1 следует, что продолжительность извержений Ключевского вулкана была от 2 до 19 мес. и распределена несимметрично, предположительно по закону Пуассона с максимумом, соответствующим примерно 6 мес. Длительность интервалов покоя между извержениями, слагающими эруптивные циклы, была от 3 до 16 мес. и распределена по симметричному закону (предположительно по нормальному) с максимумом в районе 10 мес. Отсюда мы можем сформулировать критерий объединения фаз активности в одно извержение и критерий объединения извержений в один эруптивный цикл.

*Под извержением Ключевского вулкана мы понимаем совокупность фаз: вулканской, стромболианской и иногда субплинианской или извержений побочных кратеров, если интервал между указанными фазами (за исключением парогазовой) не превышает трех месяцев. В противном случае мы полагаем, что эти фазы относятся к разным извержениям. Если фаза покоя продолжается более 1.5 лет, то мы считаем, что предыдущий цикл эруптивной активности закончился.*

**Подготовка и развитие нового эруптивного цикла вулкана (началась в 2003 г.)**

Для изучения процесса подготовки и развития нового эруптивного цикла Ключевского вулкана мы исследовали следующие данные:

1) Распределение во времени средних за сутки величин отношений амплитуды к периоду ( $A/T$ ) ср вулканического дрожания (ВД) на радиотелеметрической сейсмостанции «Цирк» ( $\Delta = 9$  км). Данные из оперативных бюллетеней с.ст. «Ключи» КОМСП ГС РАН, сбор данных проведен Ю.В.Карпухиной и Н.И. Реутовой.

2) Результаты визуальных наблюдений из пос. Ключи, включающие такие характеристики как: ФД-фумарольная деятельность, ПГВ-парогазовые выбросы, ГП-газовые продувки, ГПВ-газопепловые выбросы, ИЛ-излияния лавы, Б-выбросы бомб, ФЛ-фонтанирование лавы (последние два явления видны только вечером).

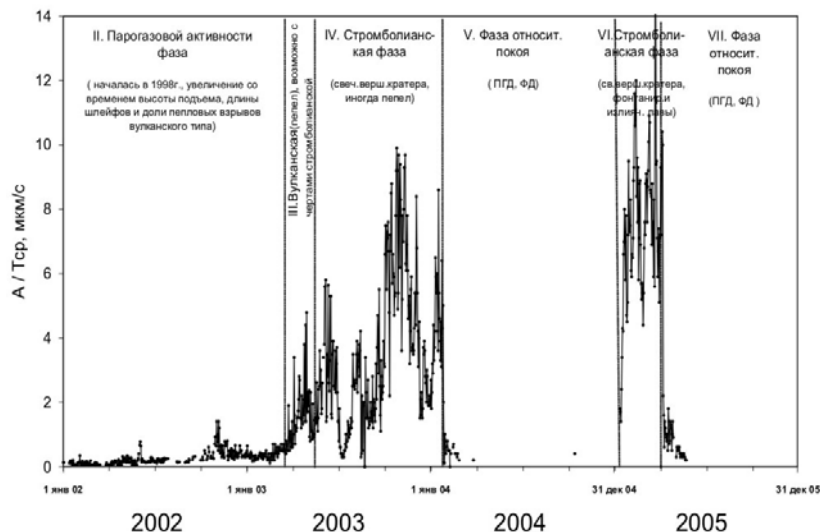
3) Видео- и фотосъемки фумарол и облаков извержения, любезно предоставленные Ю.В.Демянчуком.

4) Устные сообщения В.Н.Двигало и Ю.В.Демянчука о размерах и заполнении вершинного кратера шлаковыми конусами.

При интерпретации данных вулканического дрожания будем использовать подход, опубликованный в работе [2], где исследовано отношение мощности вулканического дрожания  $W_{вд}$  к тепловой мощности эруптивных (фумарольных) струй  $Q$  для двух вершинных извержений Ключевского вулкана в 1984-1985 гг. и 1985-1986 гг. Эти извержения включали как стромболианские, так и вулканские и парогазовые фазы. Показано, что отношение  $W_{др}/Q$  для стромболианских (магматических) извержений на один-два порядка больше, чем для парогазовых или пеплогазовых (вероятно в большей мере фреатических) извержений. Из наблюдений следует, что в 1998-2002 гг. в процессе подготовки настоящего цикла эруптивной активности высоты подъема и, соответственно, величина тепловой мощности вулканических струй менялись не очень сильно. Поэтому в нулевом приближении резкое изменение среднего значения отношения амплитуды к периоду ( $A/T$ ) ср вулканического дрожания будем интерпретировать как смену режима извержения. Напротив, плавные изменения отношения ( $A/T$ ) ср ВД будем связывать с изменением величины тепловой мощности вулканических струй без изменения типа активности.

### **Основные фазы активности вершинного кратера Ключевского вулкана за период с 1995 по май 2005 г.**

На рис. 3. показано распределение во времени средних за сутки величин отношений амплитуды к периоду вулканического дрожания  $A/T$  ср на вулкане Ключевской за период с 1 января 2002 г. по 24 мая 2005 г. а также основные выделенные нами фазы подготовки и развития нового эруптивного цикла. Заметим, что величины  $A/T$  ср более 8 мкм/с на графике ограничены из-за выхода их за пределы динамического диапазона радиотелеметрической сейсмической аппаратуры.



Выделены следующие фазы:

Рис. 3. Распределение во времени средних за сутки величин отношений амплитуды к периоду вулканического дрожания ( $A/T$ ) ср на сейсмостанции «Цирк» с 1 января 2002г. по 24 мая 2005г. Обозначения: ПГД-парогазовая, ФД-фумарольная деятельность.

I. *Фаза относительного покоя.* 1995-1997 гг. Продолжалась около трех лет. Основные особенности фазы таковы: отсутствие заметной из пос. Ключи фумарольной деятельности или вулканического дрожания, проваленность дна вершинного кратера к 2000 г. (по устному сообщению В.Н. Двигало его диаметр был около 700 м и глубина около 450 м. см. рис. 4). Отмечались рои вулканических землетрясений.

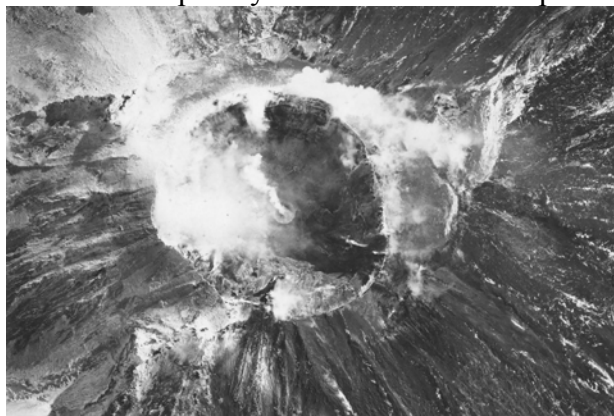


Рис. 4. К сожалению, мы не располагаем фото кратера Ключевского вулкана непосредственно до начала текущего цикла активности. Поэтому представляем фото Н.П.Смелова, показывающее кратер Ключевского вулкана и рост внутри него шлакового конуса 4 апреля 1993г. Диаметр кратера ~ 500м, а глубина ~ 190 м (В.Н.Двигало).

II. *Фаза парогазовой активности.* 1998 - 21 марта 2003 г. Продолжалась более 5 лет. Постепенное увеличение со временем высот подъема и длин парогазовых шлейфов, возрастание частоты происходящих время от времени пеплогазовых взрывов в вершинном кратере. Немонотонное возрастание уровня вулканического дрожания (рис. 3). Таким образом, доля вулканской активности в эту фазу непрерывно увеличивалась, хотя превалировала парогазовая активность.

III. *Вулканская фаза первого извержения.* 22 марта - 17 мая 2003 г. Продолжалась около двух месяцев. Отмечалась пеплогазовая эмиссия и пепловые взрывы, сопровождающиеся взрывными вулканическими землетрясениями. Свечения вершинного кратера не отмечено. Тем не менее, уровень вулканического дрожания в эту фазу был достаточно высоким, что позволяет высказать гипотезу о присутствии в это время и стромболианской активности на дне глубокого кратера, что могло остаться незамеченным наблюдателями из пос. Ключи. Поэтому началом магматического извержения 2003 г. (с выбросом ювенильных продуктов) мы считаем 22 марта 2003 г.

IV. *Стромболианская фаза первого извержения.* 18 мая 2003 г. - конец января 2004 г. Продолжалась около 8 мес. 18 мая 2003 г. впервые была отмечена подсветка вершинного кратера (Ю.В.Демянчук и Н.А.Напылова). В темное время суток часто отмечалось свечение вершинного кратера, иногда пепловые эмиссии и взрывы. Вулканическое дрожание имело наивысшую интенсивность за время извержения. По окончании извержения внутри вершинного кратера вырос шлаковый конус высотой около 300 м, вершина его достигла уровня Крестовского желоба. Создались условия для излияния лавы на внешний склон вулкана, но лавовых потоков не было.

19 Май 2003 г. - дан первый прогноз развития извержения 2003г. и нового эруптивного цикла вулкана (В.В.Иванов).

В конце января 2004 г. первое извержение закончилось. Его продолжительность (фазы III и IV) составила около 10 мес.

V. *Фаза относительного покоя.* Февраль-декабрь 2004 г. (продолжительность - 12 мес.). Отмечалась слабая фумарольная активность и эпизодически вулканическое дрожание.

VI. *Стромболианская фаза второго извержения.* 11 января-3 апреля 2005 г. (продолжительность - 2.7 мес.). Началась практически одновременно с извержением вулкана Безымянный. Отмечалась стромболианская активность на вершине образовавшегося в 2003 г. внутрикратерного шлакового конуса и излияния лавы на внешний склон вулкана в Крестовский желоб, которые происходили из основания этого конуса. Пепла извергалось относительно мало.

VII. *Фаза относительного покоя.* Началась с апреля 2005 г. и продолжается до настоящего времени (24 мая 2005 г.) в течение полутора месяцев.

***Основные особенности подготовки и начала нового эруптивного цикла Ключевского вулкана и возможный механизм движения магмы в его питающем канале***

Подготовка и начало развития нового эруптивного цикла имеет следующие особенности:

1) Длительный перерыв в извержениях после пароксизмального взрывного извержения 1 октября 1994 г. (субплинианского типа). После 1 октября 1994 г. магматических извержений на вулкане не было в течение 8.5 лет. В результате извержения произошел полный сброс избыточного давления в магматическом очаге Ключевского вулкана, а также опустошение его питающего канала и, возможно, верхней части очага. Поэтому предыдущий эруптивный цикл вулкана закончился - на восстановление давления в очаге необходимо было значительное время. Б.И.Пийп [6,7] писал, что цикл эруптивной активности обычно завершается такими пароксизмальными извержениями. Как указывают И.Т.Кирсанов, Г.П.Пономарев, Г.С.Штейнберг, эруптивный цикл может также завершаться и побочным извержением [3].

2) Длительная (в течение трех лет, с 1995 по 1997 гг.) фаза полного покоя вулкана, которая наступила после окончания извержения 1 октября 1994 г. К 1995 г. дно вершинного кратера значительно просело. Мы полагаем, что после этого извержения питающий канал до больших глубин оказался заполнен холодной неконсолидированной брекчией (фрагментами разрушенной магмы и обломками старых пород). Под действием силы тяжести вся эта пористая колонна начала уплотняться, что и вызвало просадку дна кратера. Со временем эта колонна была обводнена немагматическими водами.

3) Новый эруптивный цикл начался 22 марта 2003 г. К настоящему времени в нем произошло два вершинных (в основном стромболианско-вулканских) извержения продолжительностью 10 мес. и 2.7 мес., разделенных периодом покоя в 12 мес. Это типично для Ключевского вулкана [3].

4) Новый эруптивный цикл предварялся длительной, в течение более 5 лет (с 1998 до марта 2003 г.), парогазовой фазой II (рис. 3). В течение этой фазы происходило нарастание вулканической и сейсмической активности и увеличение доли вулканской активности, что, по нашему мнению, свидетельствует об увеличении со временем доли выделявшихся из магмы летучих. Можно предложить следующий механизм этих явлений. Если допустить, что генерация магмы в очаге происходит непрерывно, то после окончания извержения 1 октября 1994 г. избыточное давление в магматическом очаге начало возрастать, в результате чего уровень магмы в питающем канале вулкана начал подниматься ближе к поверхности Земли, где литостатическое давление меньше и больше доля выделившихся из магмы летучих.

Мы полагаем, что заполнявшая питающий канал холодная брекчия представляла значительное препятствие продвижению магмы - питающие дайки быстро застывали, не достигая поверхности Земли. Об этом свидетельствуют результаты моделирования, опубликованные в работах [4,10]. Дополнительное препятствие продвижению, вероятно, представляло прохождение дайки через обводненную брекчию (водоносный горизонт) из-за взаимодействия с водой и дополнительного охлаждения и разрушения магмы с образованием пепла и др. Продвижение магмы в канале происходило каждый раз по новым, все более протяженным дайкам. Пример такой дайки в кратере вулкана показан на рис. 5.

Большое количество выбрасываемого во время парогазовой фазы II пара, вероятно, была связано с вскипанием немагматической воды в неглубоко расположенном водоносном горизонте под действием отделяющегося от внедряющейся магмы высокотемпературного флюида.

Таким образом, с 1998 г. по март 2003 г. происходило насыщение магматического очага Ключевского вулкана магмой и летучими, увеличение в нем избыточного давления, подъем уровня магмы в питающем канале и крупномасштабный интрузивный процесс в теле вулкана. Однако продвижение магмы в канале вулкана к поверхности Земли было прерывистым.

5) Резкое возрастание уровня вулканического дрожания с марта 2003 г. Мы полагаем, что с этого времени началось первое магматическое извержение, под которым мы понимаем

не прерывистое, а непрерывное движение магмы по питающему каналу. Пульсации давления в двухфазном потоке (расплав-газ или твердые частички-газ) генерировали вулканическое дрожание максимальной интенсивности. Начальная двухмесячная фаза первого извержения была вулканской. Вероятно, в это время на поверхность Земли подавались первые достаточно вязкие порции магмы, в течение длительного времени поднимавшейся по магматическому каналу, и поэтому заметно остывшие. Повышенная вязкость магмы и приводила к вулканскому типу извержения.



Рис. 5. Некк на вершине Ключевского вулкана. 1 апреля 1993 г. Фото Н.П.Смелова.

б) Быстрое прекращение первого извержения 2003 г., быстрое начало и быстрое окончание второго извержения (январь-март 2005 г.) текущего эруптивного цикла. Это происходило в течение всего нескольких дней, в чем заключается отличие от длительной 6-летней подготовки первого извержения настоящего цикла. Это свидетельствует о том что, начиная с мая 2003 г., магма относительно свободно перемещается в питающем канале вулкана. Есть две возможные причины этого: а) улучшение проводимости канала из-за его основательного прогрева и осушения движущейся магмой; б) достаточное избыточное давление в магматическом очаге, из-за чего магма сравнительно быстро достигает поверхности Земли (или уходит на глубину), не успевая охладиться в канале.

Полученные данные позволяют объяснить физическую природу эруптивного цикла. В нем группируются близкие по времени извержения, происходящие по одному обновленному (прогретому и осушенному питающему каналу). После длительного перерыва в извержениях, вызванного полным снятием избыточного давления в магматическом очаге и прочисткой канала после пароксизмального или сильного подбочного извержения, питающий канал успевает остыть. Поэтому требуется значительное время на восстановление его проводимости, что, вероятно, происходит в результате медленного продвижения магмы в холодной брекчии питающего канала каждый раз по новым дайкам. Возникает длительная фаза покоя вулкана или медленного нарастания парогазовой активности.

На основании изложенного мы полагаем, что в настоящее время (май 2005 г.) состояние магматического очага и канала на Ключевском вулкане характеризуется следующими условиями :

А) Магматический очаг вулкана насыщен магмой и летучими и находится примерно в квазистационарном состоянии. Питающий канал вулкана в результате предыдущего извержения обновлен и не представляет серьезной преграды для продвижения в нем магмы. Поэтому условия выхода магмы на поверхность Земли теперь, вероятно, определяются только нарастанием избыточного давления магмы в очаге (мы полагаем, что она генерируется непрерывно) и региональными тектоническими напряжениями (вспомним указанную выше одновременность начала извержений Безымянного и Ключевского 11

января 2005 г.). Воздействие последних может происходить, например, по механизму выдавливания жидкости из груши.

Б) Поэтому при последующих извержениях эруптивного цикла магма будет подниматься по каналу достаточно быстро и будет иметь сравнительно высокую температуру и невысокую вязкость, что благоприятно для извержений стромболианского типа.

В) После первого извержения в 2003 г. в вершинном кратере вулкана вырос новый шлаковый конус, поэтому при последующих вершинных извержениях высота стояния магмы в кратере будет примерно на 300 м больше по сравнению с ситуацией до начала цикла. При плотности магмы  $2.5 \text{ тонн/м}^3$  это соответствует возрастанию избыточного давления в магматической питающей системе вулкана примерно на 80 бар. Это увеличивает вероятность побочных извержений.

### ***Прогноз развития извержения***

Будем основывать прогнозные оценки на следующих предпосылках, которые вытекают из сказанного выше:

1) Магматический очаг, насыщенный магмой и летучими, находится в квазистационарном состоянии, а питающий канал вулкана представляет собой «проточную систему». Поэтому условия выхода магмы на поверхность определяются только избыточным давлением в магматическом очаге и региональной тектонической обстановкой. Генерация магмы принимается постоянной и равной средней продуктивности вулкана за время его жизни (~7 тыс. лет, 60 млн.тн./год) [8]. Избыточное давление в очаге медленно, но верно увеличивается, что увеличивает вероятность новых извержений.

2) Циклы эруптивной активности Ключевского вулкана и извержения внутри них имеют типичные особенности, исследованные выше (рис. 2).

3) Существует гидравлическая связь в магматической питающей системе вулкана.

Наши прогнозные оценки таковы:

1) Ожидаемая продолжительность настоящего цикла эруптивной активности вулкана - от 2.5 до 18 лет, т.е. он продолжится до августа 2005-2021 г. После окончания второго извержения в апреле 2005 г. и вплоть до настоящего времени вулкан находится в покое. Согласно введенному выше критерию (продолжительность паузы должна превышать 1.5 года), у нас пока нет оснований считать, что настоящий эруптивный цикл закончился. Мы ожидаем продолжения этого цикла.

2) Учитывая распределение пауз и длительностей извержений, новое извержение вулкана ожидается в интервале июль 2005 г. - август 2006 г. (наиболее вероятно в январе 2006 г.). Ожидаемая продолжительность будущих извержений - от двух месяцев до 1.5 лет.

3) Ожидаемый характер будущих извержений - типичные вершинные, преимущественно стромболианские, вулканско-стромболианские с излияниями лавовых потоков как в кратер, так и на внешний склон, образованием лахаров и фреатических взрывов на склоне. Вероятность вулканских извержений оценивается как пониженная. Учитывая повышенное избыточное давление в магматическом очаге, вероятность побочного извержения в настоящее время высока, они могут произойти как внутри эруптивного цикла, так и завершать его. Побочные извержения могут произойти только в условиях наличия вершинного стромболианского извержения с выбросом раскаленных фрагментов на большую высоту (несколько сотен метров) над вершинным кратером. Пароксизмальные вершинные извержения наиболее вероятны в конце цикла активности.

4) Лахары и вторичные фреатические взрывы, образующиеся от таяния снега и льда во время излияния лавовых потоков во время побочных и вершинных извержений, могут представлять опасность для лиц, находящихся у подножия вулкана. Пепловые облака могут быть опасны для авиации.

Автор выражает благодарность Ю.В.Демянчуку, Н.П.Смелову за предоставление видео и фотоматериалов, Г.П.Пономареву, А.А.Овсянникову и В.Н.Двигало за полезные обсуждения и советы. Особая благодарность В.А.Широкову за редактирование статьи.



**Список литературы**

1. *Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В.* Состояние вулканов Шивелуч и Ключевской в 1999 г., долгосрочный прогноз их деятельности // Вулканология и сейсмология. 2001. № 2. С. 30-38.
2. *Иванов В.В.* О сопоставлении тепловой мощности эруптивных струй и вулканического дрожания для извержений разных типов // Вулканология и сейсмология. 1988. № 5. С. 53-63.
3. *Кирсанов И.Т., Пономарев Г.П., Штейнберг Г.С.* Некоторые закономерности извержений Ключевского вулкана // Бюл. вулканол. станций. 1973. № 49. С. 93-98.
4. *Михайлова-Филлипова М.И.* Теплообмен потока магмы со стенками трещины-дайки: математическая модель и алгоритм расчета // Вулканология и сейсмология. 1994. № 6. С. 17-23.
5. *Озеров А.Ю., Карпов Г.А., Дроздин В.А. и др.* Динамика извержения Ключевского вулкана 7 сентября-2 октября 1994г. (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1996. № 5. С. 3-16.
6. *Пийп Б.И.* Ключевская сопка и ее извержения в 1944-1945 гг. и в прошлом // Тр. Лаборатории вулканологии АН СССР. Вып.11. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 307 с.
7. *Пийп Б.И.* Особенности извержений Ключевского вулкана // Тр. Лаборатории вулканологии АН СССР. Вып. 13. М.: Изд-во АН СССР, 1958. С. 99-119.
8. *Поляк Г.Б., Мелекесцев И.В.* Продуктивность вулканических аппаратов // Вулканология и сейсмология. 1981. № 5. С. 22-37.
9. *Токарев П.И.* Некоторые закономерности вулканического процесса // Магмообразование и его отражение в вулканическом процессе. М.: Наука, 1977. С. 25-40.
10. *Федотов С.А., Михайлова-Филлипова М.И.* Течение магм в дайках разной мощности (по данным математического моделирования при вязкости, зависящей от температуры) // Вулканология и сейсмология. 1994. № 6. С. 24-43.