

**МОНИТОРИНГ ОБРАЗОВАНИЯ ЭКСТРУЗИВНОГО КУПОЛА
ВУЛКАНА ШИВЕЛУЧ В 1980-2007 ГГ.
ПО ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ НАБЛЮДЕНИЯМ И ВИДЕОСЪЁМКАМ**

Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский

Введение

Среди камчатских вулканов андезитовый вулкан Шивелуч по продуктивности со средним расходом 36 млн. т в год занимает второе место на Камчатке. Этот самый северный действующий вулкан Камчатки имеет координаты: 56.6° с.ш. и 161.4° в.д. После пароксизмального извержения вулкана в 1964 году последовал 16-ти летний перерыв в активности вулкана. С августа 1980 года по настоящее время с небольшими перерывами в пределах внутрикратерной кальдеры происходит рост экструзивных куполов, сопровождаемый периодическими эксплозивными извержениями. Внедрение вязкой лавы вызывает деформации склона лавового купола, в результате выжимания отдельных блоков происходят вертикальные и горизонтальные смещения склонов купола на десятки и иногда на сотни метров со скоростью от дециметров до метров в сутки. Во время повышенной активности действующих вулканов деформации земной поверхности, по величине и скорости, превосходят деформации от тектонических движений на 1-2 порядка.

В 1980-1982 гг., в начале образования экструзивного купола расход продуктов извержения был минимальный и не превышал 0.1-0.2 млн. м³ в сутки. На всех последующих этапах извержения формирование купола происходило неравномерно. Извержение продолжилось эксплозивно-экструзивным этапом 22 апреля 1993 года. С апреля 1993 г. последующие этапы формирования экструзивного купола, как правило, предварялись эксплозивными извержениями (рис.1).

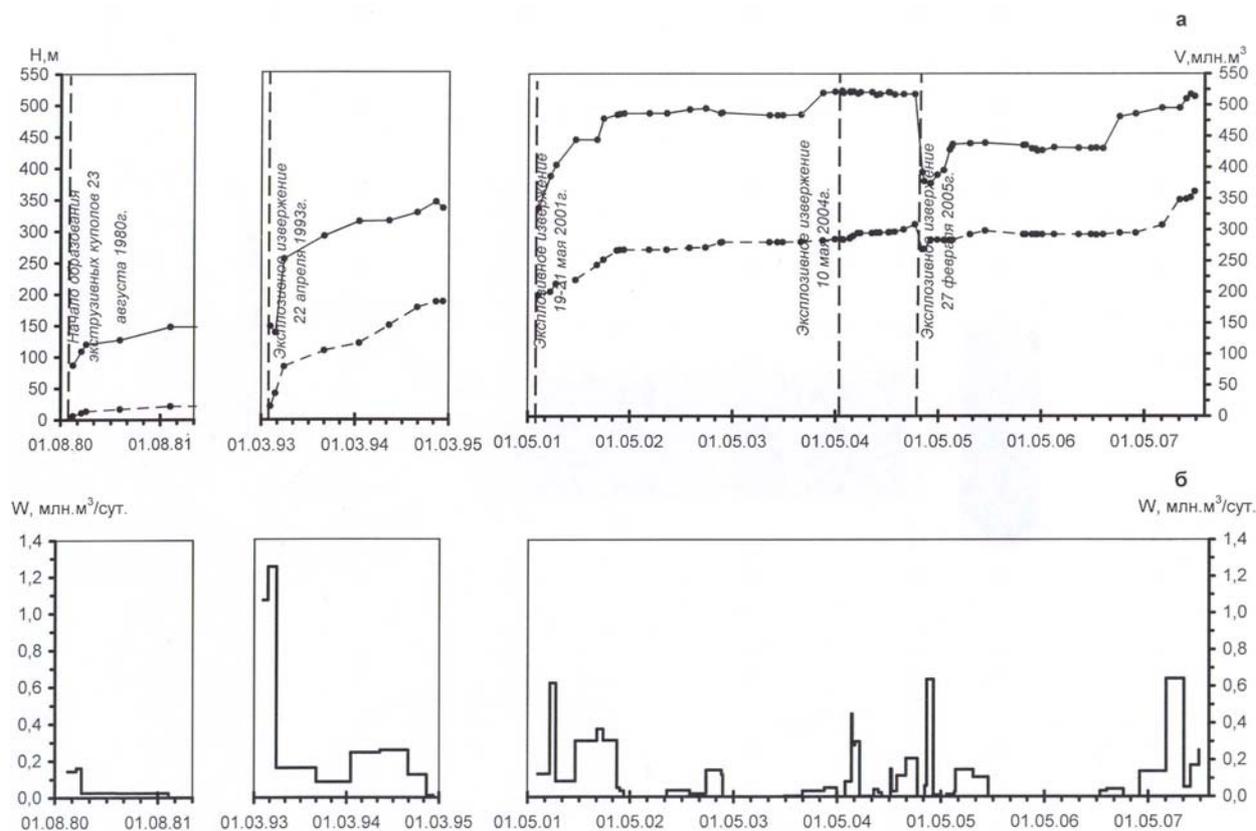


Рис. 1. Характеристики роста экструзивных куполов в 1980-1981 гг., 1993-1995 гг., 2001-2007 гг.: а - изменения высот (H сплошная линия) и объемов (V-пунктирная линия) продуктов извержений экструзивных куполов, б - среднесуточный расход (W) продуктов извержений.

Описание начальных этапов формирования новых экструзивных куполов с августа 1980 г по май 2004 г отражено в работах [2, 7, 11-13]. В 2004 - 2007 гг. извержение вулкана продолжалось.

С начала 2004 года активность вулкана вновь возобновилась. Это выразилось в увеличении количества пепловых выбросов и периодическом сходе каменных лавин и пирокластических потоков. 10 мая произошло небольшое эксплозивное извержение, после которого изменений высоты и формы лавового купола не произошло, но увеличился расход продуктов извержений. Увеличивался объём самого купола за счёт увеличения размеров его основания и диаметра вершины. После эксплозивного извержения 10 мая 2004 г наблюдалось затишье в видимой активности до октября. В октябре-декабре выбросы вновь возобновились.

С начала 2005 года наблюдается усиление вулканической активности, в середине января сошло три пирокластических потока. В феврале продолжают пепловые выбросы, усиливается фумарольная активность, в ночное время наблюдается свечение лавового купола. К началу февраля 2005 года объём купола достиг своей максимальной величины с начала образования, высота купола также была наивысшей ≈ 520 м, диаметр основания был близок 1346 м, диаметр вершины -190 м.

В ночь с 27 на 28 февраля 2005 г. произошло эксплозивное извержение. По сейсмическим данным наибольшая активность отмечена с 23 час. 34 мин. до 01 час. 15 мин. местного времени. На куполе произошла серия взрывов, и затем сошло несколько пирокластических потоков. В пос. Ключи выпал пепел, в ходе извержения под пирокластическими отложениями была погребена сейсмотелеметрическая станция, полностью было разрушено здание полевой базы вулканологов, расположенное в 7.5 км к ЮЗ от купола. В ходе эксплозивного извержения значительная часть вершины купола была разрушена взрывами. Высота купола уменьшилась на 125 м, объём разрушенной части купола был более 0.04 км^3 .

Пирокластический поток распространился на расстояние до 25 км от вулкана. В работе [5] объём продуктов извержения 28 февраля оценен в 0.2 км^3 . Уже в апреле 2005 г. вновь возобновился рост лавового купола. Следует отметить, что с начала нового эруптивного цикла вулкана в апреле 2001 года было отмечено три центра выжимания вязкой лавы [12, 13]. В 2001-2004 гг. выжимание вязкой лавы происходило из одного центра, расположенного на западной кромке лавового купола. Именно этот купол и был частично разрушен в ходе февральского извержения 2005 г. С декабря 2006 г центр выжимания лавы переместился на восток (на правую, со стороны п. Ключи, кромку лавового купола). Дополнительные сведения о ходе извержения 28 февраля 2005 г. изложены в работе [5]. В 2006 г. значительных изменений высот лавового купола отмечено не было. В это время на куполе происходило выжимание отдельных блоков в восточном секторе купола. В 2007 году свечение вершины и склонов лавового купола наблюдается в ночное время практически постоянно с января по ноябрь включительно. Интенсивность и продолжительность свечения, а также расход магмы в 2007 г. были выше всех наблюдаемых ранее. К концу октября объём купола достиг максимальной величины: 360 млн. м^3 .

Наблюдения за ходом извержения показали, что с начала нового эруптивного цикла в 1980 г. на вулкане происходили как экструзивные, так и эксплозивные режимы извержений. При переходе от эксплозивного режима к экструзивному происходит снижение скорости подъёма магмы более чем на три порядка. Механизм вулканических извержений с физической точки зрения рассматривается подробно в работе [9]. Теоретические расчёты показывают, что экструзивный режим происходит при скорости подъёма магмы $< 0.1 \text{ см/с}$. Эксплозивные извержения осуществляются при скорости подъёма магмы $> 1 \text{ м/с}$.

Результаты наблюдений и их обсуждение

Методика наблюдений. С момента появления первого экструзивного купола в середине сентября 1980 г. периодически выполнялись наблюдения за его ростом: проводились аэросъёмки, наземная фототеодолитная съёмка, тригонометрическое нивелирование, а также видеосъёмки. Самый результативный метод слежения за изменением морфологии растущих куполов - это аэросъёмка, которую, к сожалению, невозможно выполнять с необходимой частотой [2]. На первом этапе появления экструзии в 1980-1982 гг. наблюдения за её ростом выполнялись с помощью наземной фототеодолитной съёмки (НФТС) [15]. Наблюдения выполнялись с базиса, расположенного в 2,5 км от центральной части экструзивного купола. Обработка результатов съёмки выполнялась по стандартным методикам [8]. Параллельно с фотограмметрической съёмкой выполнялись теодолитные наблюдения за куполом. По результатам

фотограмметрических съёмок строились профили экструзивного купола. Точность определения координат профиля близка ± 1.0 м.

По теодолитным наблюдениям с меньшей степенью детальности и точности тоже получали профили экструзии. В отличие от НФТС, при теодолитной съёмке не требуется присутствия наблюдателей в непосредственной близости от экструзивного купола. Как выяснилось позже, находиться в окрестностях растущих экструзивных куполов вулкана Шивелуч опасно: пункты базиса, а также полевая база, построенная в 2,5 км от купола, были погребены пирокластическими потоками в ходе эксплозивного извержения в апреле 1993 года [6]. Более того, в феврале 2005 года, также в ходе эксплозивного извержения, была разрушена и погребена пирокластическим потоком сейсмостелеметрическая станция в 7.5 км к ЮЗ от экструзивного купола [5]. Учитывая эти обстоятельства, в дальнейшем теодолитные наблюдения для слежения за изменениями морфологии экструзивного купола выполнялись непосредственно из пос. Ключи. Точность определения координат при этом близка $\pm 3-5$ м.

Более точно изменения профиля лавового купола были получены по наземным цифровым снимкам. Съёмки выполнялись из пос. Ключи с расстояния 46 км, а также с базиса, расположенного в 20 км от купола. На рис. 2. приведены профили лавового купола на разных этапах его образования.

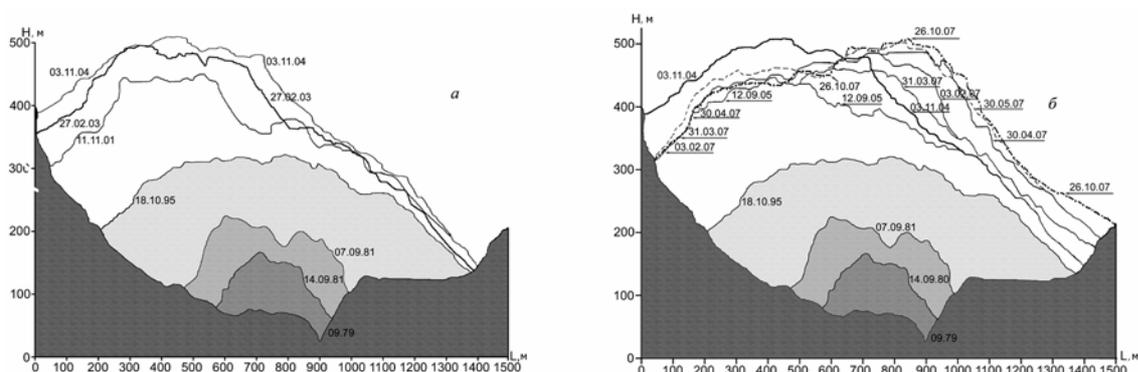


Рис.2. Профили лавового купола на разных этапах его образования: а- начальный этап формирования и рост западного сектора (1980-2004 гг.), б – формирование экструзивного купола в восточном секторе (10.09.2005-26.10.2007 гг.). Вид из пос. Ключи.

Практические полевые обследования лавовых куполов, результаты аэросъёмки показывают, что в первом приближении форма экструзивного купола близка усечённому конусу. Принимая лавовый купол на вулкане Шивелуч за усечённый конус, с точностью до 10% можно определить объём экструзии.

Скорость роста, объём и расход изверженных продуктов

При расчётах размеров вулканических очагов, определении расположения этих очагов в пространстве важно знать расход магмы. Прямые наблюдения за ростом экструзивных куполов дают возможность точно определить эту величину. Полные данные об изменениях относительных высот лавового купола, его объёма и расходе магмы в сутки за период с сентября 1980 г. по октябрь 2007 г., приведены на рис. 1. Рассматриваемый интервал времени охватывает три этапа формирования экструзивного купола: начальный этап с августа 1980 г. по 1981 г., следующий этап с апреля 1993 г. по январь 1995 г. и последний этап с конца апреля 2001 г. и по настоящее время. Таким образом, есть возможность проследить общие закономерности изменений расхода магмы на различных этапах развития вулкана.

Для всех этапов извержения можно отметить следующие характерные особенности. Во-первых, наибольшая скорость роста купола наблюдалась в первые два месяца после начала эруптивного процесса. Эта особенность характерна как для сентября-октября 1980 г., так и для апреля-мая 1993 г., а также апреля-мая 2001 г. и февраля-марта 2005 г. Для этих же периодов регистрируются наибольшие величины расхода магмы: от 0.14 до 1.25 млн. м³/сутки. Сравнение наблюдений за ростом экструзивных куполов на других вулканах мира показывает, что начальные скорости их роста также максимальны в первые месяцы. Предположения авторов работы [14] о зависимости расхода материала от его вязкости не подтверждается имеющимися данными.

Анализ состояния вулкана Шивелуч.

Для определения характера извержения большое значение имеет оценка глубины и размеров очага, являющегося источником экструзивной магмы. Такую оценку можно сделать, используя косвенные показатели: сейсмологические и геологические данные, а также теоретические расчёты. Наблюдения показали, что экструзивный процесс в 1980 г. начался без каких либо признаков сейсмической подготовки, а также без признаков взрывной деятельности. Этот факт указывает на то, что перед началом извержения магма находилась в периферическом очаге на небольшой глубине под вулканом [3]. Исследования включений андезитов вулкана Шивелуч показали, что кристаллизация вкрапленников плагиоклаза могла происходить на глубинах более 5-6 км [1].

Теоретические расчёты [9,10] также указывают на наличие неглубокого периферического очага. Об этом свидетельствует неравномерность хода извержений на вулкане. Такой очаг может располагаться на глубине около 5-7 км. Цикличность извержений происходит благодаря поступлению дополнительных порций магмы с глубины [9].

Оценку глубины промежуточного очага можно сделать, применяя следующие допущения. Полагая, что магматическая (лавовая) колонна с плотностью ρ_l и высотой h будет находиться в равновесии с перекрывающими породами с плотностью ρ_n и мощностью H , можно написать:

$$\rho_l gh = \rho_n gH, \quad (1)$$

Отсюда мощность перекрывающих пород или глубина магматического очага определится:

$$H = h \frac{\rho_l}{\rho_n} \quad (2)$$

Высота лавовой колонны над уровнем моря:

$$h_0 = h - H, \quad (3)$$

Обозначив $\beta = \frac{\rho_l}{\rho_n}$, после преобразований, получим:

$$H = \beta * \frac{h_0}{1 - \beta}, \quad (4)$$

При $\rho_{\text{лавы}} \approx 2.2 \text{ г/см}^3$, $\rho_{\text{породы}} \approx 2.4 \text{ г/см}^3$ и $h_0 \approx 0.39 - 0.52 \text{ км}$, где h_0 - высота купола относительно подошвы вулкана, глубина магматического очага будет изменяться от 4.3 до 5.8 км. Эта величина близка к значениям, полученным из исследования расплавных включений и теоретических расчётов [1,9].

Для оценки объёма периферического очага воспользуемся выражением, определяющим объём сферического источника [10].

$$V = 0.9 \cdot \Delta V_n \cdot \frac{10^5}{\Delta P}, \quad (5)$$

где ΔV_n - объём продуктов извержения (в пересчете на объём магмы), ΔP , бар - сброс избыточного давления в магматической питающей системе вулкана. В результате взрывного извержения 28 февраля 2005 г. общий объём продуктов извержения составил 0.2 км^3 [5]. Составные части этого объёма: отложения пирокластических потоков 0.16 км^3 и объём разрушенной части лавового купола 0.04 км^3 . В пересчете на объём магмы получим следующие величины: 0.098 км^3 и 0.030 км^3 . В расчетах принято: плотность лавы $\rho_l = 2.2 \text{ г/см}^3$, плотность магмы $\rho_m = 2.4 \text{ г/см}^3$, средняя плотность пирокластиков андезитов вулкана Шивелуч $\rho_{\text{потока}} = 1.47 \text{ г/см}^3$ [4]. Расчет по формуле (5) дает величину объёма в пределах $88-350 \text{ км}^3$ при изменении избыточного давления от 25 до 100 бар.

В ходе взрывного извержения 28 февраля 2005 г. экструзивный купол был частично разрушен, высота купола уменьшилась на 125 м. Для разрушения лавовой пробки такой мощности необходимо избыточное давление 25 - 30 бар. В магматическом очаге в начале извержения избыточное давление достигает 100 бар и более.

Для вулкана Шивелуч расчет размеров неглубокого периферического очага выполнен в [13]. Минимальный объём такого очага получен близким 102 км^3 при радиусе 2.9 км и глубине залегания верхней кромки 4 км. Приведённые нами данные с использованием для расчета непосредственно измеренного расхода продуктов извержения дают сходные результаты. Следует отметить, что неглубокий периферический очаг является только частью магматической питающей

системы. Некоторые данные о размещении корового магматического очага приведены в работе [10].

Во время извержений происходит только частичное опустошение очага. Наблюдения последних лет показали, что за один цикл извержения на дневную поверхность может поступить от 50 до 350 млн. м. куб. вулканических продуктов - лавы и пепла, (по данным, полученным во время извержений 1980-1981, 1993-1995, 2001-2004 гг.). Средний объём извергнутых продуктов во время одного цикла извержения близок 200 млн. т. [6]. При средней продуктивности вулкана 37 млн. т. в год образование такого объёма может продолжаться 5-6 лет. Объёмы изверженных продуктов во время мощных эксплозивных извержений 1854 и 1964 гг. были от $1.02-1.42 \times 10^9$ т. до 5.1×10^9 т. соответственно [7]. Для накопления такого объёма ювенильных продуктов (свыше одного млрд. т.) должно потребоваться как минимум в пять раз больше времени, т.е. 25-30 лет.

Заключение.

Отмечена неравномерность роста экструзивного купола. Спокойный этап появления экструзии в 1980 г. сменился на эксплозивно-экструзивные этапы извержений: 1993-1995 гг., 2001-2004 гг., 2004-2007 гг. Каждый последующий этап начинался с кратковременных эксплозивных извержений. Эксплозивные периоды извержений по времени кратковременные (1.5-2.5 часа), но по расходу продуктов извержения на 3 порядка превышали самые продуктивные периоды экструзивных периодов. Полученные данные по расходу продуктов извержений использованы для оценки объёмов и размещения неглубокого периферического очага. Информация о скорости поступления магмы может быть использована для оценки состояния вулкана и прогноза его деятельности в комплексе с другими геофизическими и геохимическими данными.

Список литературы

1. Богоявленская Г.Е., Хубуная С.А., Наумов В.Б. Составы расплавов и условия кристаллизации андезитов вулканов Безымянного и Шивелуча: предполагаемая модель очага // Современный вулканизм и связанные с ним процессы. Петропавловск-Камчатский, 12-15 апреля 1999. С. 26-32.
2. Двигало В.Н. Рост купола в кратере вулкана Шивелуч в 1980 – 1981 гг. по фотограмметрическим данным // Вулканология и сейсмология. 1984. №2. С.104-109.
3. Горельчик В.И., Гарбузова В. Т., Дрозин Д.В. и др. Вулкан Шивелуч: глубинное строение и прогноз извержений по данным детальной сейсмичности в 1962-1994 гг. // Вулканология и сейсмология. 1995. №4. С. 54-75.
4. Гирина О.А. Пирокластические отложения современных андезитовых вулканов Камчатки и их инженерно-геологические особенности // Владивосток: Дальнаука, 1998. 173 с.
5. Нуждаев А.А., Гирина О.А., Мельников Д.В. Некоторые результаты изучения пирокластических отложений извержений 28 февраля и 22 сентября 2005 г. вулкана Молодой Шивелуч наземными и дистанционными методами // Вестник КРАУНЦ Серия науки о Земле. 2005. №2. Вып. №6. С. 62-66.
6. Жаринов Н.А., Богоявленская Г.Е., Хубуная С.А., Демянчук Ю.В. Новый эруптивный цикл вулкана Шивелуч – 1980–1993 гг. // Вулканология и сейсмология. 1995. №1. С. 20-28.
7. Мелекесцев И.В., Двигало В.Н., Кирсанова Т.П. и др. 300 лет жизни камчатских вулканов: молодой Шивелуч (анализ динамики и последствий эруптивной активности в XVII-XX вв). Ч. II. 1963-2000 гг. // Вулканология и сейсмология. №1. 2004. С. 5-24.
8. Сердюков В.М. Фотограмметрия в промышленном и гражданском строительстве. М.: Наука, 1977. 151 с.
9. Слѣзин Ю.Б. Механизм экструзивных извержений // Вулканология и сейсмология. 1995. №4. С. 76-83.
10. Федотов С.А. Магматические питающие системы и механизм извержений вулканов. М.: Наука, 2006. 455 с.
11. Федотов С.А., Жаринов Н.А., Двигало В.Н. и др. Эруптивный цикл вулкана Шивелуч в 2001–2004 гг. // Вулканология и сейсмология. 2004. №6. С. 3–14.
12. Федотов С.А., Двигало В.Н., Жаринов Н.А. и др. Извержение вулкана Шивелуч в мае – июле 2001 г. // Вулканология и сейсмология. 2001. №6. С. 3-15.
13. Федотов С.А., Жаринов Н.А., Двигало В.Н. и др. Рост экструзивных куполов и сильные взрывы на вулкане Шивелуч (Камчатка) в 2001–2003 гг. // Вулканизм и геодинамика. Екатеринбург, 2003. С. 902–906.
14. Swanson D.A., Dzurisih D., Holcomb R.T. et al. Growth of lava dome at Mount St. Helens. Washington (USA) 1981-1983 // US. GS. Special Paper 212. 1987. P.1-16.
15. Zarinov N.A. and Skuridin Yu.F. A study of the dynamics of growth of extrusive domes using a method of sub-aerial photo-topographic survey // Generation of Major Basalt Types. Scientific Assembly. Reykjavik, Iceland, August 15.