

УДК 551.21.032

СОВРЕМЕННАЯ ЭКСТРУЗИВНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ВУЛКАНА МОЛОДОЙ ШИВЕЛУЧ ПО ДАННЫМ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ И ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТЕРЕОФОТОСНИМКОВ

© 2014 А.В. Шевченко^{1,2}, И.Ю. Свирид^{1,2}, В.Н. Двигало¹

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006, бульвар Пийпа, 9; e-mail: shevchenko@kscnet.ru

²Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга, Петропавловск-Камчатский, 683032, ул. Пограничная, 4

В статье рассмотрены особенности экструзивной деятельности новейшего периода активности (2001 г. – настоящее время) вулкана Молодой Шивелуч. Представлены морфологические и вулканологические описания купола за исследуемый период, составленные на основе геоморфологического дешифрирования стереофотоизображений. Посредством фотограмметрического метода получены точные морфометрические характеристики купола на разных стадиях его роста. Произведена интерпретация наблюдаемой на вулкане экструзивной деятельности, описаны три основные стадии формирования экзогенного купола. На основе выделенных морфологического и физического критериев отличия эффузивной активности от экструзивной приведены аргументы отсутствия предполагаемых ранее лавовых потоков на современном куполе вулкана.

Ключевые слова: экзогенный рост купола, структуры расщепления, критерий типа деятельности.

ВВЕДЕНИЕ

Вулканический массив Шивелуч расположен в северной части Центральной Камчатской депрессии (рис. 1). Массив состоит из двух вулканических объектов: Старого Шивелуча – гигантского разрушенного стратовулкана и Молодого Шивелуча – активного вулкана, расположенного в юго-западной части массива. Координаты наивысшей точки Молодого Шивелуча – Четвертой вершины: 56°38'10" с.ш., 161°18'54" в.д.

Деятельность Старого Шивелуча была сосредоточена в позднем плейстоцене и имела две фазы: экструзивно-эксплозивная активность сменилась излияниями мощных лавовых потоков (Горбач, 2011). Формирование Молодого Шивелуча в голоцене происходило в основном за счет экструзивного процесса (Мелекесцев и др., 1991), периодически сопровождалось пароксизмальными извержениями и крупными обвалами. Так вследствие катастрофического события 12.11.1964 г. образовался современный кратер вулкана, в котором с 1980 г. по настоящее время происходит рост нового экструзивного купола.

Рост купола прерывался двумя продолжительными периодами покоя, поэтому можно выделить три его этапа: 1980–1981 гг., 1993–1995 гг. и с 2001 г. по настоящее время. Первые два этапа были детально изучены в результате систематически проводимых комплексных геологических и фотограмметрических работ (Двигало, 1984; Мелекесцев и др., 2004; Хубуная и др., 1995). Однако исследования последнего этапа развития купола носят фрагментарный характер по причине высокой опасности его непосредственных наблюдений и отсутствия аэрофототопографических съемок вулкана с 2003 по 2010 гг.

Новейший период экструзивной деятельности вулкана Молодой Шивелуч был освещен в немногочисленных работах (Горбач, 2006а, 2006б, 2013; Жаринов, Демянчук, 2008, 2013). Предметом остальных исследований по данной теме в основном является эксплозивная деятельность вулкана.

В работах (Горбач, 2006а, 2006б, 2013) детально изучен состав вещества купола и даны его краткие морфологические описания, основанные на визуальных наблюдениях. Н.А. Жаринов и Ю.В. Демянчук (2008, 2013) приводят количе-

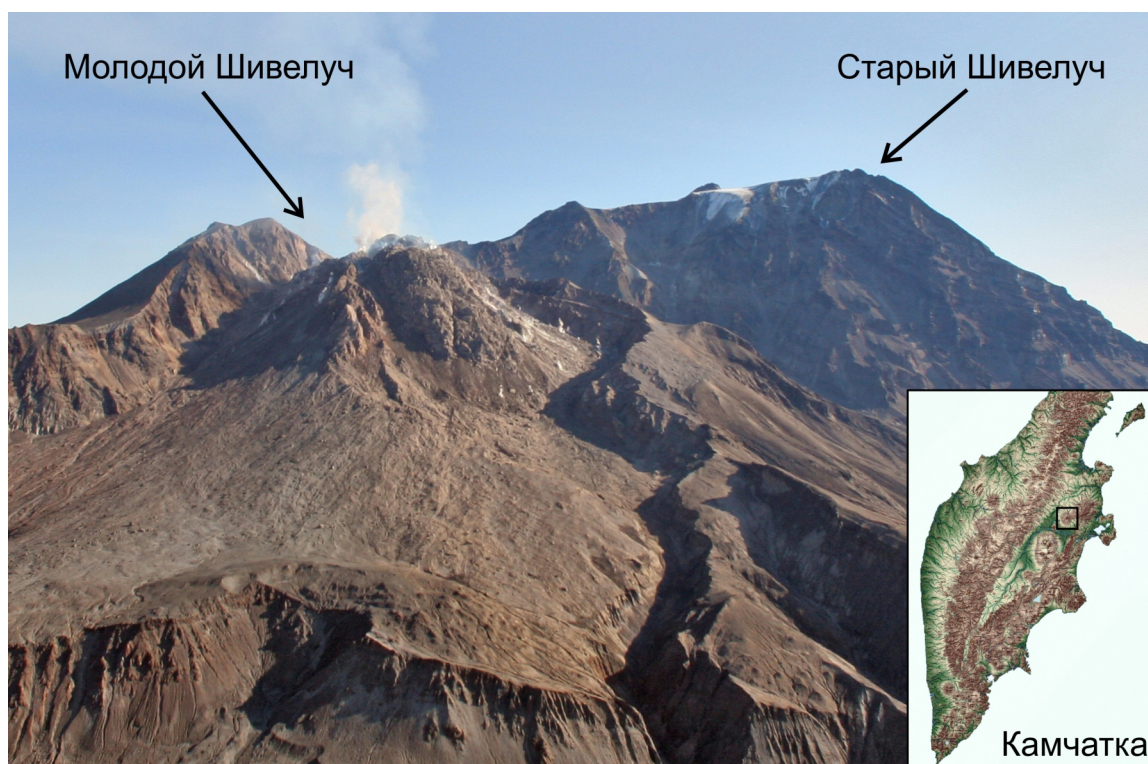


Рис. 1. Перспективный аэрофотоснимок вулканического массива Шивелуч 12.07.2012 г. Фото И.Ю. Свирида. На врезке показано географическое положение массива.

ственные оценки роста купола. Однако поскольку эти оценки получены на основе теодолитных наблюдений с большого расстояния (из пос. Ключи), они обладают низкой точностью, недостаточной для подробного описания морфологии современного купола, что подчеркивается в работе (Жаринов, Демянчук, 2008).

Таким образом, мы можем заключить, что геоморфологический аспект экструзивного роста на вулкане Молодой Шивелуч практически не освещен в литературе, а точные параметры купола для новейшего этапа его формирования отсутствуют. В настоящей статье на основе геоморфологического дешифрирования и фотogramметрической обработки фотоматериалов дается подробный анализ современной экструзивной активности вулкана, а также приводятся точные морфометрические характеристики купола.

Текущий этап экструзивной деятельности вулкана Молодой Шивелуч характеризуется появлением на активном куполе новых морфологических элементов, не свойственных прежним этапам его формирования, что свидетельствует о смене типа роста экструзивного купола (Шевченко, Свирид, 2013; Шевченко и др., 2014). Для обозначения купола нового (для вулкана Молодой Шивелуч) типа авторы настоящей статьи, по аналогии со сходными формами экструзивных куполов, изученных зарубежными вулканологами (Anderson et al., 1995; Avard, Whittington, 2012;

Bull et al., 2013; Fink, Anderson, 2000; Harris et al., 2003; Major et al., 2009; Ramsey et al., 2012; Swanson et al., 1987; Walter et al., 2013; Watts et al., 2002) применяют термин «экзогенный купол», ранее также использовавшийся в работах Б.И. Пийпа (1941, 1948) и А.А. Меняйлова (1955).

Эндогенный и экзогенный типы роста экструзивных куполов¹ были впервые выделены в 1932 г. Х. Виллиамсом (1932). В.И. Влодавец (1954) приводит определения этих терминов: «Обычно купола разделяют на эндогенные и экзогенные. К первым относят те из них, которые выросли путем первоначального расширения изнутри ... К экзогенным относят купола, которые образуются в результате выжимания ряда слоев вязкой лавы, перекрывающих друг друга» (Влодавец, 1954, с. 46), но после 1955 г. данные термины выходят из употребления в отечественной вулканологической литературе. Тем не менее, разделение куполов на эндогенные и экзогенные является устоявшимся в зарубежной вулканологии и лежит в основе большинства современных исследований по данной теме.

В процессе дешифрирования стереопар снимков 2001-2012 гг. купола Молодого Шиве-

¹Необходимо подчеркнуть, что термины «эндогенный» и «экзогенный» в данном случае характеризуют только расположение центра роста купола по отношению к постройке вулкана, а не природу самого экструзивного процесса (в геологическом отношении всегда являющуюся эндогенной).

луча были выявлены экструзивные образования, получившие название и изученные только в зарубежных работах.

Термин «структура расщепления» (Шевченко, Свирид, 2013) употребляется для обозначения элементов купола, образующихся на его поверхности посредством выжимания жесткопластического материала по трещине либо по проработанному каналу в его затвердевшем теле, и имеющих следующую характерную особенность: появляясь на поверхности лава, из которой они формируются, расщепляется на отдельные пластины, напоминающие лепестки (рис. 2). Данный термин является наиболее подходящим эквивалентом англоязычных терминов «crease structure» (Anderson, Fink, 1988) и «cleavage canal» (Omori, 1916).

Термин «глыбовый панцирь» (Шевченко, Свирид, 2013) является эквивалентом англоязычного термина «blocky saharase» и обозначает раздробленную на отдельные глыбы (вследствие температурных деформаций и механических нагрузок) внешнюю часть экструзивного купола, покрывающую его пластичное ядро. В некоторых случаях поверхность экзогенных экструзивных образований может растрескиваться, приобретая шлакообразную текстуру. Панцири, имеющие такую текстуру называются шлаковидными (scoriaceous saharase) (Anderson et al., 1995).

Термин «кули» (coulée) обычно используется для определения эрозионных долин (Mather, 1976). В англоязычной вулканологической литературе, начиная с работы (Putnam, 1937) он также употребляется для обозначения пластичного экструзивного образования, промежуточного между куполом и лавовым потоком, претерпевающего некоторое латеральное распространение при выходе из жерла (Fink, Anderson, 2000). Морфологические особенности кули свидетельствуют как об экструзивном происхождении: мощность порядка десятков и первых сотен метров при

отсутствии каплевидной формы и бортовых валов, так и о высоковязком течении: наличие на поверхности выпуклых в сторону движения широких дугообразных гряд, часто называемых в зарубежной литературе огивами (ogives).

Этот термин также используется в работе (Walter et al., 2013) при описании экструзивного купола на вулкане Мерапи (о-в Ява), морфологически сходного с рассматриваемыми в данной статье образованиями на вулкане Молодой Шивелуч.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Определение морфометрических характеристик купола и его элементов производилось на основе стереофотограмметрической обработки плановых аэрофотоснимков 2001, 2003 и 2012 гг., полученных авторами посредством топографического аэрофотоаппарата АФА-ТЭ-140 и калиброванной ручной цифровой камерой Canon EOS-20D. Обработка всех стереопар снимков выполнена в цифровой стереофотограмметрической системе Photomod 4.3.

Фотограмметрический метод также был применен для обработки плановых аэроснимков купола, выполненных Р.Л. Весселсом (R.L. Wessels) в 2005 г. любительским цифровым фотоаппаратом Canon Power Shot A510 и переданных им для использования сотрудникам Института вулканологии и сейсмологии.

Аэрофототопографическая съемка купола не выполнялась с октября 2003 г. по октябрь 2010 г., поэтому материал для определения точных количественных параметров фотограмметрическим методом на этот период (за исключением 2005 г.) отсутствует. По этой причине для исследования объекта в данном отрезке времени авторы были вынуждены ограничиться применением визуального дешифрирования стереопар, составленных из перспективных снимков купола, выполненных обычными, не топографическими



Рис. 2. Структуры расщепления на куполах вулканов: *а* – Ундзен (Япония), 10.12.1991 г., фото из работы (Nakada, 1992); *б* – Сент-Хеленс (США), 11.09.1981 г., фото USGS (Геологического общества Соединенных Штатов) (http://vulcan.wr.usgs.gov/Images/Jpg/MSH/Images/MSH81_spreading_center_sept81_lobe_09-11-81_small.jpg); *в* – Суфриер-Хиллс (Монсерат), 22.01.1997 г., фото из работы (Watts et al., 2002).

камерами. Анализ стереоизображений позволил авторам выделить морфологические элементы, трудно различимые на одиночных снимках.

АНАЛИЗ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ КУПОЛА

С августа 1980 по конец 1981 гг. в кратере Молодого Шивелуча сформировался купол высотой 180 м и объемом 0.02 км³ (Двигало, 1984). В феврале 1981 г. в центральной части купола образовалась взрывная воронка диаметром 100 м и глубиной 25 м, которая, вследствие высокой эксплозивной активности 1984–1993 гг., увеличилась до размеров 250×350 м и глубины 100 м. Абсолютная отметка ее дна (2189 м) почти достигла уровня поверхности кратера 1964 г. в этом месте (~2180 м). После 11-летнего перерыва экструзивная деятельность возобновилась в апреле 1993 г. и продолжалась до января 1995 г. За этот период высота купола достигла 300 м, объем – 0.2 км³ (Федотов и др., 2001).

Морфодинамические процессы на куполе в 1980–1981 гг. и 1993–1995 гг. были сходными, отличалась только их интенсивность. В периоды формирования 1980–1981 гг. и 1993–1995 гг. морфология купола была классической эндогенной (рис. 3а, 3б): его вершинная часть была образована крупными экструзивными блоками, четко выделялась корона купола, на склонах и у подножия формировалась рыхлая осыпная мантия (Двигало, 1984; Хубуная и др., 1995). Экструзивная деятельность, возобновившаяся в кратере Молодого Шивелуча в апреле 2001 г. (Федотов и др., 2001) и продолжающаяся по настоящее время, отличается необычными для прежних циклов активности морфологией и расположением выжимаемых образований.

Во время извержения 2001 г. единого экструзивного центра не было (Федотов и др., 2001).

В разных частях старого купола – на западном и северо-восточном склонах, а также в западном секторе вершины – выжимались три отдельных объекта. На аэрофотоснимке кратера 2001 г. (рис. 4а) отчетливо видно, что эти экструзивные новообразования представляют собой структуры расщепления. Таким образом, в 2001 г. произошла смена режима экструзивной деятельности, и купол стал формироваться по экзогенному типу (Шевченко, Свирид, 2013).

Наиболее крупная структура расщепления (рис. 4з), сформировавшаяся на западном склоне купола посредством выжимания нового материала сквозь осыпную мантию, представлена семью расходящимися радиально из одного центра пластинами. Ее размеры составляют: 200×186 м по основанию, средний диаметр – 193 м, абсолютная отметка наиболее высокой пластины – 2460 м (~140 м относительно поверхности склона купола 1995 г.). На юго-западном склоне купола наблюдается связанный с этой структурой глыбовый панцирь, состоящий из оползающих без изменения своего взаимного расположения крупных глыб, среди которых идентифицируется сползшая вниз зеркально-симметричная структура расщепления, по всей видимости, находившаяся прежде на месте радиальной.

Структура расщепления на северо-восточном склоне купола (рис. 4б) образована четырьмя парами субгоризонтально расходящихся отдельностей. На ее вершине находится обелиск, который уже начал расслаиваться на две части. Очевидно, что характерную форму она получила при выжимании через узкую трещину на крутом склоне у самого подножия купола – все ее отдельности направлены от склона. На дне атрио близ данной структуры, к западу от нее, находится небольшое скопление глыб, отколовшихся от одной из ее отдельностей. Размеры данной структуры:

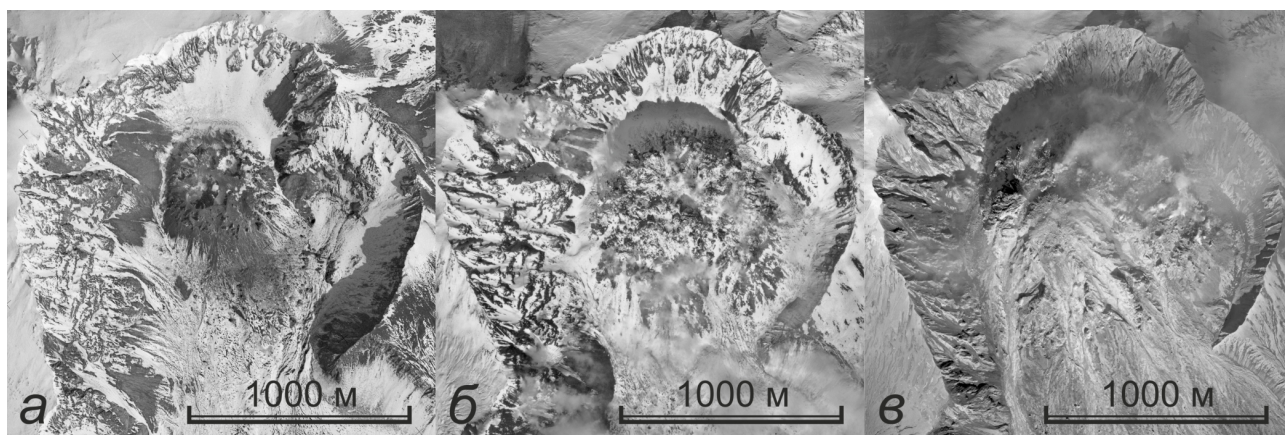


Рис. 3. Эндогенный рост купола вулкана Молодой Шивелуч. Аэрофотоснимки В.Н. Двигало: а – 19.09.1987 г. (морфология купола после прекращения роста в конце 1981 г. изменялась только за счет образования эксплозивных воронок); б – 01.10.1995 г.; в – 07.10.2003 г. Здесь и далее указанный линейный масштаб соответствует среднему значению масштаба для отображенных участков местности.

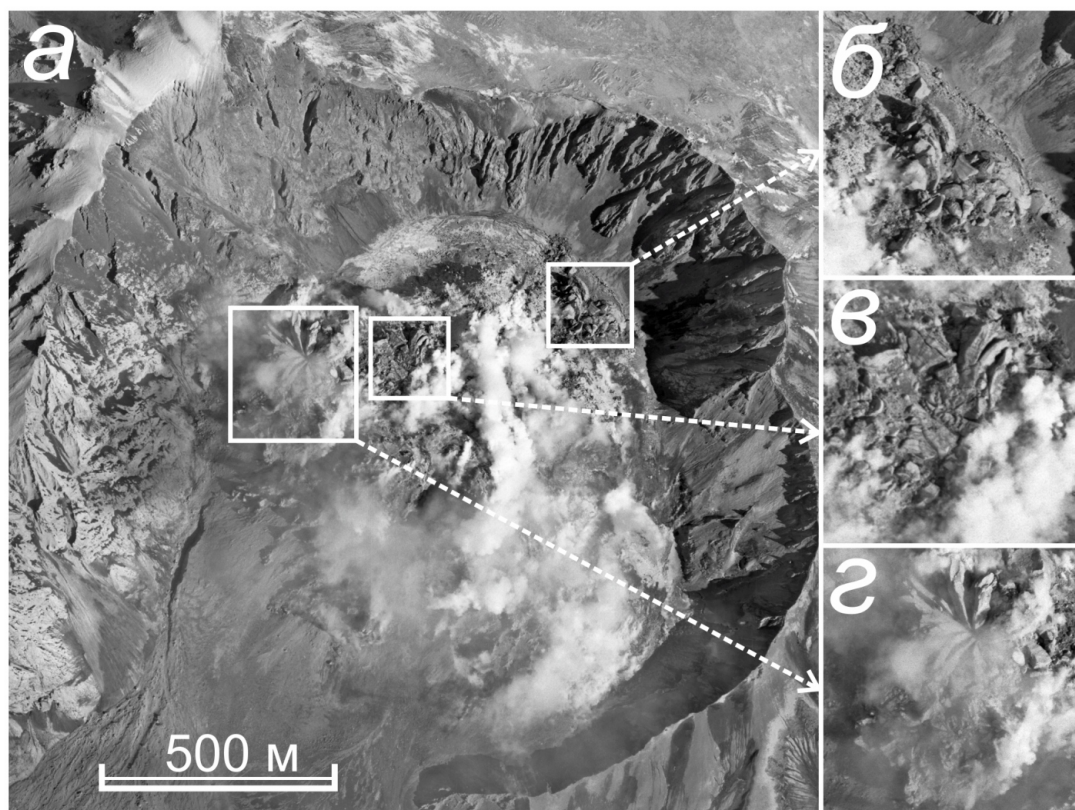


Рис. 4. Экзогенный рост купола вулкана Молодой Шивелуч с изменениями и дополнениями по (Шевченко, Свирид 2013; Шевченко и др., 2014): *a* – аэрофотоснимок В.Н. Двигало 16.05.2001 г., структуры расщепления выделены прямоугольниками; *б, в, г* – увеличенные фрагменты.

по основанию – 172×113 м, абсолютная отметка верхнего обелиска – 2400 м, относительная высота от дна атрио – 106 м.

В центральной части старого купола ближе к его западному краю в эксплозивной воронке образовалась третья структура расщепления (рис. 4*в*), являющаяся не совсем типичной, поскольку ее пластины имеют иррегулярную направленность расхождения: в ее северо-восточном секторе они имеют субмеридиональное простираие и слегка наклонены на запад, в юго-западном – расходятся радиально от одного центра, расположены субгоризонтально. На пластинах этой структуры отмечаются концентрические трещины и полосы темного цвета, видно, что трещины образовались по некоторым из этих полос. Наибольший диаметр – 140 м, абсолютная высота самой высокой пластины – 2425 м, средняя высота над поверхностью выжимания – 40 м.

Таким образом, в процессе анализа снимков 2001 г. на куполе вулкана Молодой Шивелуч авторами были выделены три типа структур расщепления: радиальный, зеркально-симметричный и иррегулярный (Шевченко, Свирид, 2013).

Впервые появившись в 2001 г. экзогенные экструзивные формы продолжают образовываться на куполе Молодого Шивелуча, периодически разрушаясь вследствие эксплозивных и гравитационных процессов. На снимке (рис. 5*а*),

сделанном в июле 2002 г., мы видим расползание трех отдельных «языков» экзогенного купола по склонам старого эндогенного купола.

На плановом снимке 07.10.2003 г. (рис. 3*в*) запечатлена обратная смена режима экструзивного роста – с экзогенного на эндогенный. В западной части купола сформировались три крупных экструзивных блока, один из которых – южный – вместе со своим подножием отделен от остальной части купола полукольцевым сбросовым оврагом. В результате выжимания блоков эндогенного купола покрывавший его экзогенный купол, образованный в 2002 г., обрушился, от него осталась только часть северо-западного «языка» (Шевченко, Свирид, 2014). Из описанных выше структур расщепления на куполе сохранилась только одна – северо-восточная. Ее форма практически не изменилась, за исключением вершинного обелиска, который сильнее расслоился на две части. Отдельности этой структуры покрыты осыпной мантией вновь растущего эндогенного купола.

На основе фотограмметрической обработки стереопар снимков 07.10.2003 г. были получены следующие морфометрические характеристики купола: наибольшая ширина основания – 1380 м, отметка наивысшей точки – 2630 м, относительная высота от дна воронки в кратере 1964 г. (2131 м) – 499 м.

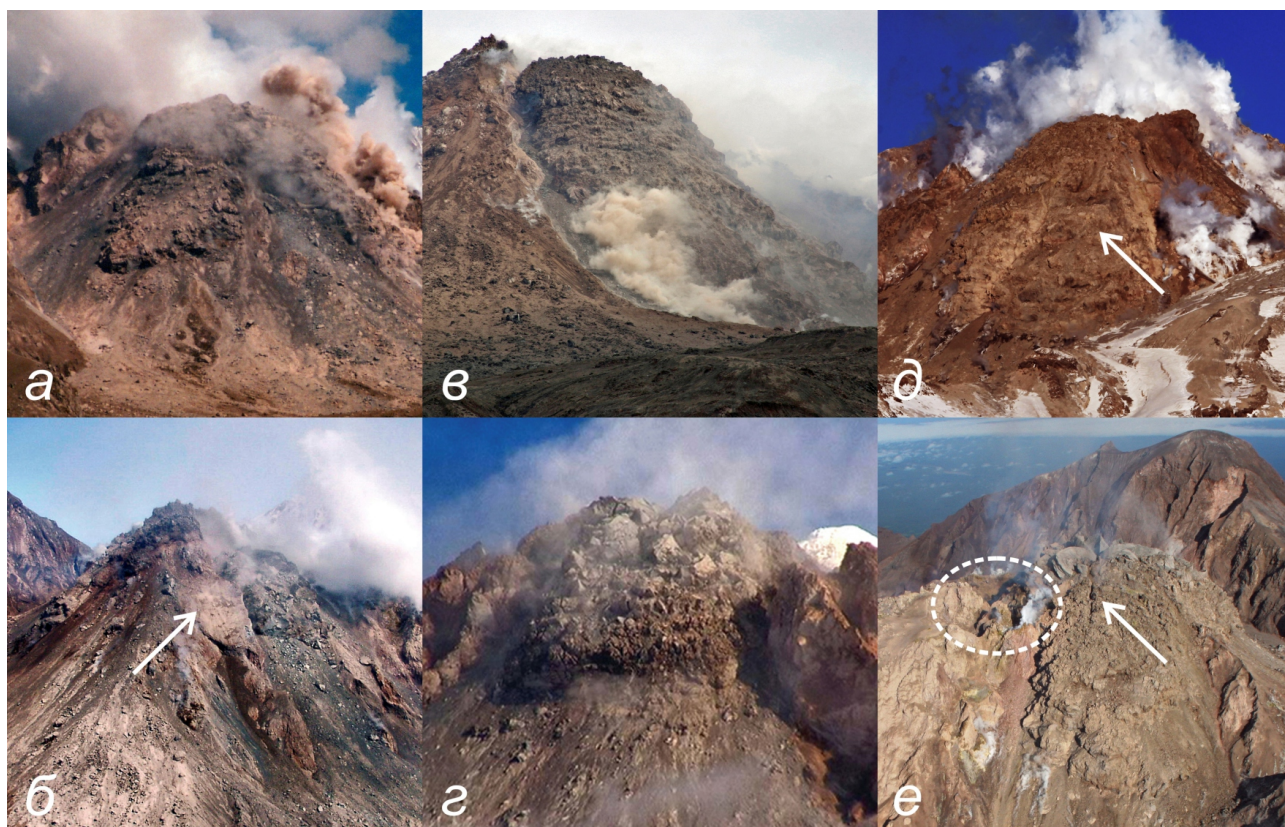


Рис. 5. Фотоснимки экзогенных экструзивных образований вулкана Молодой Шивелуч: *а* – экзогенный купол, июль 2002 г., фото А.В. Сокоренко; *б* – начальная стадия формирования экзогенного купола 29.05.2004 г., фото С.А. Хубуная, стрелкой показано зеркало скольжения; *в* – дальнейшая стадия формирования экзогенного купола 28.07.2004 г., фото М.Е. Зеленского; *г* – структура расщепления на вершине купола 29.08.2005 г., фото Ю.В. Демянчука; *д* – экзогенный купол 25.01.2012 г., фото Ю.В. Демянчука, стрелкой показан глыбовый вывал; *е* – купол 12.07.2012 г., фото И.Ю. Свирида, пунктирной линией обведена эксплозивная воронка, стрелкой показана трещина в теле экзогенного купола.

В 2004 г. экзогенный рост купола возобновился. На снимке (рис. 5б) зафиксирована начальная стадия формирования экзогенного купола на южном склоне старого эндогенного купола. За передней порцией глыб экзогенного купола наблюдается поверхность старого купола, что свидетельствует о происходящих из средней части экзогенного купола глыбовых обвалах. Слева от фронта оползающего экзогенного купола четко идентифицируется выработанное зеркало скольжения с характерными бороздами. Строго над ним располагается поверхность отрыва, срезающая остатки предыдущего экзогенного купола. Зеркало скольжения свидетельствует о медленном оползании затвердевшего материала прежнего, впоследствии обрушившегося, экструзивного образования, то есть – о существенно отличающемся от течения лавового потока характере его движения.

На рис. 5в мы можем наблюдать дальнейшую стадию развития экзогенного купола, когда его глыбовый панцирь спустился к подножию старого купола. В верхней части склона экструзивный материал движется сплошным покровом, к середине склона – разделяется на два «языка»,

между которыми обнажается подстилающая поверхность. В средней части панциря и по его краям продолжают происходить обвалы глыб. Очевидно, что вершинная часть экзогенного купола еще сохраняет некоторую пластичность, о чем свидетельствует нависающий над обвальным оврагом округлый снизу карниз. По структурным линиям на поверхности глыбового панциря мы можем видеть, что экзогенный купол теряет пластичность в верхней части склона. Выгнутость структурных линий против направления движения, также свидетельствует об отсутствии процессов течения.

Впервые экзогенные экструзивные образования на куполе Молодого Шивелуча были выделены американскими исследователями, которые выполнили термосъемку и аэрофотосъемку купола в августе 2005 г. (Ramsey et al., 2012). Посредством визуального дешифрирования снимков и сопоставления их с данными термосъемки, полученными ручным тепловизором FLIR ThermaCAM S40, и спутниковыми снимками ASTER они составили описание купола, охарактеризованного ими как экзогенный, и сделали попытку определить его морфометрические ха-

рактеристики: диаметр — от 335 до 410 м, высота — 32 м (установлена из длины тени и солнечного угла)². Они указали, что купол (рис. 5з) расщечен выступающей структурой расщепления в форме полумесяца и отметили отличие гладкой поверхности выжимаемых отдельностей структуры от остальной части купола, имеющей шлаковидную текстуру, что позволило им провести параллели с куполом вулкана Сент-Хеленс в 1980-1986 гг.

Посредством фотограмметрической обработки аэрофотоснимков одного из соавторов работы (Ramsey et al., 2012) Р.Л. Весселса авторами настоящей статьи были получены следующие морфометрические характеристики: отметки наивысших точек отдельностей структуры расщепления: 2605 м — на восточном крыле и 2615 м — на западном; максимальная высота относительно линейной впадины — 40 м; наивысшая точка экзогенного купола (без учета структуры расщепления) — 2590 м, высота основания у его видимой подошвы в северной части — 2560 м, таким образом, его относительная высота составляет 30 м, средний диаметр экзогенного купола — 270 м. Сравнивая эти характеристики с приведенными в работе (Ramsey et al., 2012) мы видим, что ошибка американских исследователей в определении диаметра купола составляет около 100 м.

В 2012 г. экзогенный экструзивный рост купола продолжался. По стереопарам, составленным из перспективных и плановых снимков, сделанных в январе и в июле 2012 г. (рис. 5д, 5е), мы можем проследить его развитие и морфологические особенности.

Свидетельством экзогенного роста купола в юго-восточном направлении является глыбовый панцирь, продвинувшийся вниз до отметки 2150 м. Единственным видимым отличием состояния данного глыбового панциря на две даты съемки является парение в его нижней части в январе 2012 г. (рис. 5д), прекратившееся за последующие полгода. На снимке 12.07.2012 г. (рис. 5е) в вершинной части купола на поверхности этого панциря видна крупная взрывная воронка (диаметр — 150 м, глубина — 60 м), обрамленная отложениями пепла, не отмечающимися на стереопаре 25.01.2012 г. Очевидно, образовавшие ее взрывы происходили в интервале между съемками, на протяжении которого соответствующая деятельность отмечалась 21-31 мая 2012 г.

Морфологические особенности нижней части данного глыбового панциря демонстрируют полное затвердевание и отсутствие связанности

составляющих его отдельных глыб: наблюдаются два сектора их сваливания и осыпания. В ЮЮВ секторе панциря находится вывал, образовавшийся в результате опрокидывания глыб, а в ЮВВ — конус выноса обвалившегося материала (рис. 5д).

В 2012 г. центр экструзивной деятельности на вулкане Молодой Шивелуч переместился на северный склон купола. Восточный «язык» экзогенного купола северного центра, покрытый шлаковидным панцирем, спустился до отметки 2420 м. На рис. 5е видно, что его поверхность расщечена трещиной СЗ-ЮВ простираения. Эта трещина пересекает даже поверхность шлаковидного панциря, сложенного довольно рыхлым и легко осыпающимся материалом, где ее ширина составляет около 6 м. По всей видимости, она образовалась гораздо глубже — в эндогенном куполе вулкана Молодой Шивелуч в результате интенсификации экзогенного экструзивного роста. В самой верхней ее части происходит выжимание пластичного материала, образующего структуру расщепления, имеющую форму, близкую к зеркально-симметричной и относительную высоту порядка 30 м. Абсолютная высота самой высокой ее отдельности — 2657 м. Направление разрастания экзогенных экструзивных образований изменилось на перпендикулярное прежнему и происходит сразу в обе стороны: на северо-восток и на юго-запад.

СТАДИИ ЭКЗОГЕННОГО РОСТА КУПОЛА

На основе выполненного подробного анализа стереофотоизображений авторы выделяют три основные стадии цикла экзогенного роста купола на вулкане Молодой Шивелуч (рис. 6).

В большинстве случаев экзогенный рост купола начинается с образования линейной трещины (трещин) в его затвердевшем теле, либо коре (если внутренняя часть еще не остыла и сохраняет пластичность). Выжимаемый сквозь трещину на поверхность купола экструзивный материал под воздействием внутренних напряжений, возникающих вследствие неравномерности остывания и кристаллизации, разделяется на изогнутые гладкие пластины, образуя структуру расщепления (рис. 6а). Форма образованной структуры зависит от формы трещины, сквозь которую она выжимается, а также от характера распределения внутренних напряжений. Преобладающая форма структур расщепления — зеркально-симметричная, так как на первых стадиях их формирования выжимание происходит по линейной трещине в теле эндогенного купола, и только в случае дальнейшей проработки канала, либо при выжимании в взрывной воронке или сквозь рыхлый материал осыпной

²В работе (Ramsey et al., 2012) информация об оборудовании или ПО, использовавшемся для обработки снимков отсутствует, кроме того не указано каким образом: во-первых была измерена длина тени; во-вторых — определена сложная форма поверхности, на которую эта тень ложится.

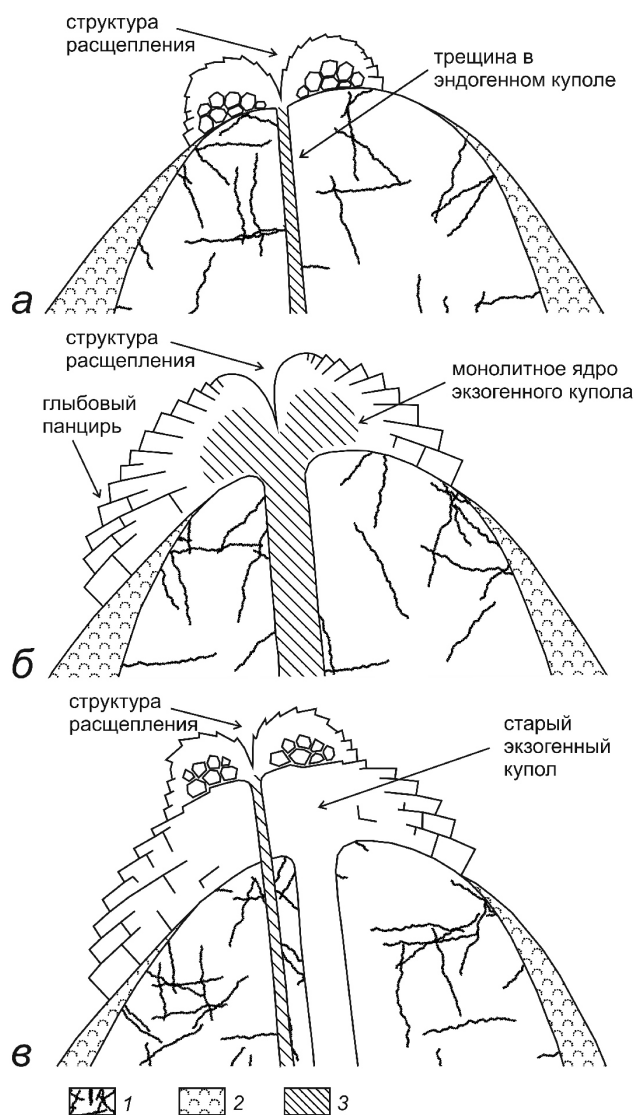


Рис. 6. Схематические разрезы стадий экзогенного роста купола с изменениями и дополнениями по (Шевченко и др., 2014): *а* – формирование структуры расщепления на эндогенном куполе; *б* – формирование экзогенного купола; *в* – формирование структуры расщепления на экзогенном куполе; 1 – тело эндогенного купола; 2 – осыпная мантия эндогенного купола; 3 – пластичный экструзивный материал.

мантии, форма структур расщепления может стать радиальной или иррегулярной.

Затвердевший материал структуры расщепления на периферии растрескивается и распадается, формируя первообразованную часть глыбового панциря. В то же время под отдельностями структуры расщепления выжимается пластичный материал, образующий монолитное ядро экзогенного купола. Движимое давлением новых порций экструзивного материала пластичное ядро оползает вниз, постепенно остывая и затвердевая. Мощность покрывающего пластичное ядро глыбового панциря постоянно увеличивается вследствие растрескивания экс-

трузивного материала вглубь и его дробления на глыбы в процессе охлаждения. Ниже некоторой определенной отметки движение экзогенного купола происходит в виде оползания отдельных, не связанных между собой глыб, которые удерживаются на склоне за счет своей массы и силы трения (рис. 6б).

При схождении экзогенного купола достаточно далеко вниз по выпуклой поверхности эндогенного купола он неизбежно разделяется на отдельные «языки» (рис. 5а, 5б); его неразделенность может сохраняться только при условии плоской или вогнутой подстилающей поверхности, то есть если движение происходит по ущельям, глубоким барранкосам и обвальнопользовым желобам.

По причине изменения скорости экструзии, повышения интенсивности кристаллизации, либо вследствие перерывов в деятельности экзогенные экструзивные образования могут полностью застывать еще на вершине купола. В этом случае образование новой трещины происходит не только в теле эндогенного купола, но и в затвердевшем теле экзогенного, как это наблюдалось в июле 2012 г. (рис. 5е). Поступающий по трещине новый пластичный материал погребает под собой старый, уже затвердевший. Таким образом, экзогенный рост купола осуществляется посредством нагромождения новых экструзивных образований поверх прежних (рис. 6в).

В настоящее время на куполе вулкана Молодой Шивелуч отсутствует постоянный эруптивный центр. Очевидно, что необходимое для нормальной эффузивной деятельности жерло в его постройке еще не сформировано. Лавы современного цикла деятельности, выжимаемые из периодически возникающих временных эруптивных центров, вследствие претерпевания характерных для экструзивного процесса около- и постсолификационных деформаций в значительной мере разупрочнены и легко обрушаются при крупных эксплозиях, а также непосредственно под действием силы тяжести (Шевченко, Свирид, 2014).

К ВОПРОСУ О ТИПЕ СОВРЕМЕННОЙ АКТИВНОСТИ

В настоящей работе приведена новая интерпретация эруптивных процессов, происходящих на вулкане Молодой Шивелуч. Она существенно отличается от представлений авторов предшествующих работ (Горбач, 2006а, 2006б; Жаринов, Демянчук, 2008, 2013), в которых сформированные этими процессами элементы купола на основе визуальных наблюдений описываются как лавовые потоки. Однако, по мнению авторов настоящей работы, эти образования не являются

лавовыми потоками. Для обоснования данного утверждения необходимо провести четкую границу между эффузивной деятельностью и экструзивной. Необходимость в строгом разграничении данных типов деятельности была отмечена еще Б.И. Пийпом (1941). С тех пор это разграничение лежит в основе отечественных исследований вулканических процессов и имеет под собой достаточные основания, происходящие из различий в морфологии объектов, а также физических различий в механизме эруптивного процесса. Приведем два основных критерия отличия эффузивной деятельности от экструзивной.

Морфологический критерий. Вязкие андезитовые потоки имеют каплевидную, расширяющуюся книзу форму, четко выраженный мощный фронт, бортовые валы; на их поверхности выделяются выгнутые в направлении течения складки. У экзогенных экструзивных образований на вулкане Молодой Шивелуч вершинные части значительно мощнее фронтальных, фронт не выражен, бортовые валы отсутствуют, структурные линии на поверхности выгнуты против направления движения. Возникновение последней особенности возможно только при отсутствии течения: движение экзогенных куполов вниз по склону имеет характер оползания, их латеральные части подвержены постоянным осыпаниям и вследствие вызванного ими истончения оказывают меньшую нагрузку на подстилающую поверхность и поэтому движутся быстрее центральных частей (Шевченко и др., 2014).

По аэрофотоснимкам (рис. 7) мы можем сравнить современный экзогенный купол Молодого Шивелуча, старые андезитовые потоки на восточном склоне этого вулкана и двухлопастной поток вулкана Кизимен (Камчатка), образованный в 2011-2012 гг. и являющийся наиболее показательным примером вязкого андезитового потока. Лавовые потоки сохраня-

ют каплевидную форму, выраженные фронт и бортовые валы даже при происходящих на них интенсивных обрушениях, которые наблюдались на потоке вулкана Кизимен (Мельников и др., 2011) (рис. 7в). Более того, каплевидная форма сохраняется и по прошествии тысяч лет после их образования, несмотря на процессы эрозии (рис. 7б). У экзогенных экструзивных куполов вулкана Молодой Шивелуч каплевидная форма отсутствует, мощность фронтов не превышает мощность вершинных частей (рис. 7а).

Необходимо подчеркнуть, что настоящие потоки даже самой высоковязкой лавы имеют сложное строение: в их вертикальном сечении можно выделить монолитное жидкое ядро, а также верхний и нижний слои коры. Поток при движении «подстиляет под себя» брекчированную кору. Таким образом, при движении потока обязательно наблюдается вертикальный градиент скорости, жидкое ядро стекает в его нижнюю часть, образуя каплевидную форму, и подобно смоле удерживает на себе фронтальный слой коры, вследствие чего обвал всего фронта практически невозможен.

Напротив, крупные обвалы фронтальной части при движении являются характерным признаком экзогенных экструзивных образований. На снимках (рис. 5а, 5б, 5в) отчетливо видны вертикальные поверхности отрыва, при этом разделение на слои отсутствует. Очевидно, что так называемые «современные лавовые потоки» Молодого Шивелуча не имеют жидкого ядра и представляют собой однородную массу, сползающую, а не стекающую вниз по склону.

Материал структур расщепления во время их выхода на поверхность еще обладает пластичностью, но не способен к вязкому течению под действием силы тяжести, так как при его наличии невозможно образование отдельных пластин, имеющих острые грани. Структуры расщепления образованы твердым (в субаэ-

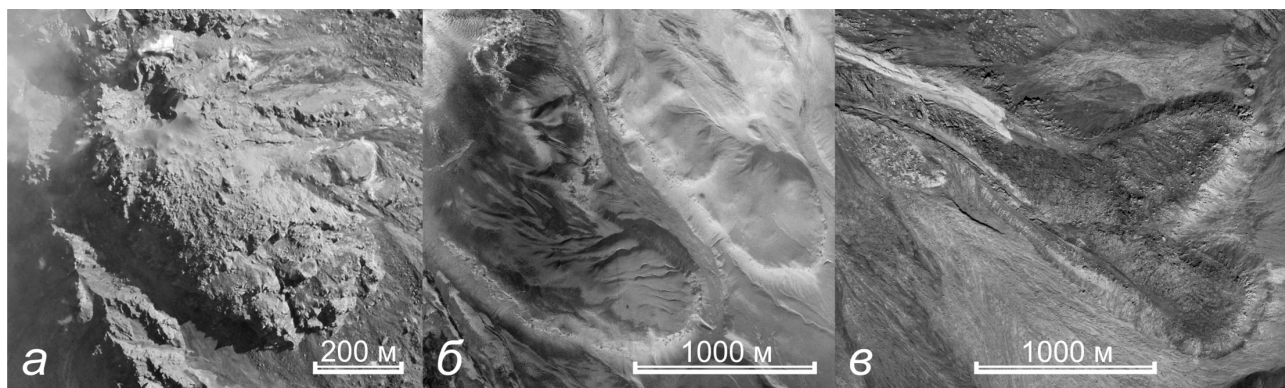


Рис. 7. Экзогенный купол в сравнении с андезитовыми лавовыми потоками: а – купол Молодого Шивелуча, 12.07.2012 г., фото И.Ю. Свирида из работы (Шевченко и др., 2014); б – доисторические потоки на восточном склоне вулкана Молодой Шивелуч 27.10.2010 г., фото В.Н. Двигаго; в – современный поток вулкана Кизимен, 13.07.2012 г., фото И.Ю. Свирида.

ральных условиях) материалом, пластически деформированным в процессе экструдирования, а не жидкой лавой.

Не представляется возможным, чтобы в эруптивном канале одновременно продвигались магмы с разными физическими свойствами (способные и не способные к вязкому течению под тяжестью собственной массы) и, не смешиваясь, одновременно выходили на поверхность. Таким образом, наличие структур расщепления подтверждает отсутствие современной эффузивной деятельности вулкана Молодой Шивелуч.

Физический критерий. В работе (Слезин, 1998) приводится граничный критерий:

$$Di = U\eta n^{1/3} \frac{a^2}{c_0^2} \quad (1)$$

(U – скорость подъема магмы, η – эффективная (или иначе – кажущаяся) вязкость, n – концентрация зародышей пузырьков в магме, a – коэффициент растворимости летучих, c_0 – содержание летучих). Пороговым значением является безразмерная величина равная 0.05, ее достижение предопределяет переход от «барботирующего» режима (соответствующего эффузивной деятельности) к режиму «разрушающейся пены» (соответствующего экструзивной либо газопепловой деятельности). Следует отметить отсутствие температуры в явном виде в числе данных параметров, а также их неравнозначность. Для некоторого определенного типа магмы, то есть – в пределах одного эруптивного цикла, n и a можно считать неизменными (Слезин, 1998). Таким образом, характер эруптивной деятельности обуславливается соотношением расхода магматического вещества, его газонасыщенности и эффективной вязкости.

Относительное постоянство последней характеристики для магм в работе (Слезин, 1998) принимается а priori. В связи с этим необходимо учитывать, что оценка эффективной вязкости среды имеет смысл только если в рамках решаемой задачи эту среду можно считать ньютоновской жидкостью, то есть удовлетворяющей соотношению:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (2)$$

(τ – напряжение сдвига, $\dot{\gamma}$ – градиент скорости), но в данном случае обязательно следует принимать во внимание возможность существенно неньютоновского поведения магматического расплава.

Одной из ключевых отличительных особенностей экструзивного типа деятельности является субликвидусная температура эруптивного материала. При этом значительное влияние на его реологические свойства оказывает содержа-

ние твердой фазы (φ), представленной кристаллами сложной формы. Возникающие вследствие трения таких кристаллов друг о друга эффекты невозможно объяснить с классических позиций механики сплошных сред, разделом которой является реология. Поведение такой среды не соответствует ни одной из простых и составных (включающих вязкость, пластичность и упругость) реологических моделей. Нелинейный характер зависимости деформации нагретых до соответствующих эруптивным температур образцов лавы от нагрузки подтверждается экспериментальными исследованиями (Avard, Whittington, 2012). Для аппроксимации такого поведения в современной реологии используются феноменологические модели.

Одной из наиболее простых и при этом – дающей достаточно хорошее приближение для описания магматических расплавов (Castruccio et al., 2014), является модель Хершеля-Балкли:

$$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^N \quad (3)$$

(τ_0 – предел текучести, K – консистентность, $N \in \mathbb{R}$ – характеристический показатель). Кажущаяся вязкость η среды Хершеля-Балкли в соответствии с (2) и (3) изменяется следующим образом:

$$\eta = \begin{cases} \infty & \text{при } \tau < \tau_0 \\ \tau_0 / \dot{\gamma} + K \dot{\gamma}^{N-1} & \text{при } \tau > \tau_0 \end{cases} \quad (4)$$

Обуславливающие η параметры модели Хершеля-Балкли изменяются в зависимости от φ , содержания H_2O в расплаве (Dingwell, 2006) и SiO_2 в остаточном стекле (Ритман, 1964). Очевидно, наибольшее значение для исследуемого вопроса имеет φ , так как, прежде всего им определяется τ_0 , вследствие относительно небольших изменений которого η может скачкообразно возрастать от приемлемой для «барботирующего» режима величины до бесконечности. В свою очередь φ зависит от температуры расплава, а также содержания в нем H_2O (Melnik, Sparks, 2005).

Пороговое значение τ_0 соответствует τ , создаваемому архимедовой силой, действующей на всплывающий в магматическом расплаве пузырек. Очевидно, что оно одного порядка с производимым силой тяжести напряжением, вызывающим течение соразмерного пузырьку объема вышедшей на поверхность лавы вниз по крутому склону. Температура расплава, которой соответствует исключительное течение под действием силы тяжести критическое значение φ , называется температурой нулевой жидкотекучести (Чуркин, 2006). Таким образом, экструзивной деятельностью является извержение материала с температурой, не превышающей температуру нулевой жидкотекучести, а отсутствие морфологических признаков течения выходящей на

поверхность лавы — ее надежным признаком.

Тем не менее, при нагромождении экструзивного материала τ , создаваемое давлением вышележащих масс на нижележащие, может превысить τ_0 . В таком случае его движение будет иметь характер более близкий к поведению жесткопластической среды, нежели вязкопластической (как у лавовых потоков). Именно этим явлением объясняется формирование кули и их особенностей.

Однако лавовые новообразования на вулкане Молодой Шивелуч, описанные в настоящей статье, не имеют морфологических признаков даже пластического течения вниз по склонам активного купола. На основании этого авторы полагают, что для их описания не могут быть использованы термины лавовый поток и кули. Хотя, следует отметить, что вопросы применения того или иного термина в каждом отдельно взятом случае требуют индивидуального рассмотрения и выходят за пределы настоящей статьи.

ВЫВОДЫ

1. На основе геоморфологического дешифрирования и фотограмметрической обработки стереофотоснимков вулкана Молодой Шивелуч выполнен подробный анализ его современной экструзивной деятельности. Определены основные морфометрические характеристики активного купола и его элементов на разных стадиях формирования. Установлено что с 2001 г. рост купола происходит преимущественно по экзогенному типу.

2. Выявлен эпизод обратной смены типа экструзивного роста с экзогенного на эндогенный в 2003 г., демонстрирующий возможность чередования обоих типов экструзивной деятельности на вулкане Молодой Шивелуч.

3. Выделены три стадии экзогенного роста купола вулкана Молодой Шивелуч. Установлены процессы, вызывающие формирование структур расщепления (внутренние напряжения, возникающие вследствие неравномерности остывания и кристаллизации).

4. Определены морфологический (наличие или отсутствие следов течения) и физический (температура лавы выше или ниже температуры нулевой жидкотекучести) критерии различия эффузивной и экструзивной деятельности. В соответствии с данными критериями установлено отсутствие эффузивной деятельности вулкана Молодой Шивелуч в его текущем эруптивном цикле.

Авторы благодарят Ю.В. Демянчука, А.В. Сокоренко, С.А. Хубуня, М.Е. Зеленского и Р.Л. Весселса за предоставленные фотоматериалы.

Список литературы

- Влодавец В.И.* О вулканологической терминологии // Бюлл. вулканологической станции. 1954. № 21. С. 43-46.
- Горбач Н.В.* Первый лавовый поток на экструзивном куполе вулкана Шивелуч, 2004 г. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 2. С. 9-16.
- Горбач Н.В.* Формирование экструзивного купола вулкана Шивелуч и состав его лав в 2004-2005 гг. // Материалы международного симпозиума «Проблемы эксплозивного вулканизма». Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2006 г. С. 112-119.
- Горбач Н.В.* Вулкан Старый Шивелуч: геологическое строение, реконструкция эруптивных центров и характер деятельности в позднем плейстоцене // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 1. Вып. 17. С. 77-90.
- Горбач Н.В.* Происхождение и эволюция магм вулканического массива Шивелуч (Камчатка) по геологическим и петролого-геохимическим данным: Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. Владивосток, 2013. 29 с.
- Двигало В.Н.* Рост купола в кратере вулкана Шивелуч в 1980-1981 гг. по фотограмметрическим данным // Вулканология и сейсмология. 1984. № 2. С. 104-109.
- Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В.* Рост экструзивного купола вулкана Шивелуч (Камчатка) в 1980-2007 гг. по геодезическим наблюдениям и видеосъемке // Вулканология и сейсмология. 2008. № 4. С. 3-13.
- Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В.* Крупные эксплозивные извержения вулкана Шивелуч (Камчатка) с частичным разрушением экструзивного купола 28 февраля 2005 г. и 27 октября 2010 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 2. С. 48-62.
- Мелекесцев И.В., Вольнец О.Н., Ермаков В.А. и др.* Вулкан Шивелуч // Действующие вулканы Камчатки. Т. 1. М.: Наука, 1991. С. 84-103.
- 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.). Часть II. 1965-2000 гг. // Вулканология и сейсмология. 2004. № 1. С. 5-24.
- Мельников Д.В., Двигало В.Н., Мелекесцев И.В.* Извержение 2010-2011 гг. камчатского вулкана Кизимен: динамика эруптивной активности и геолого-геоморфологический эффект (на основе данных дистанционного зондирования) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 2. Вып. 18. С. 87-101.
- Меняйлов А.А.* Вулкан Шивелуч — его геологическое строение, состав и извержения // Труды лаборатории вулканологии АН СССР. 1955. Вып. 9. С. 3-262.

- Пийн Б.И.* Материалы по геологии и петрографии района рек Авачи, Рассошины, Гаванки и Налачевы на Камчатке // Труды Камчатской комплексной экспедиции 1936-1937 гг. 1941. Вып. 2. 132 с.
- Пийн Б.И.* Новое эруптивное состояние вулкана Шивелуч с конца 1944 по май 1945 гг. и некоторые замечания о геологической структуре этого вулкана и его прошлых извержениях // Бюлл. вулканологической станции на Камчатке. 1948. № 14. С. 38-51.
- Ритман А.* Вулканы и их деятельность. М.: Мир, 1964. 438 с.
- Слезин Ю.Б.* Механизм вулканических извержений (стационарная модель) М.: Научный мир, 1998. 127 с.
- 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.
- Хубуная С.А., Жаринов Н.А., Муравьев Я.Д. и др.* Извержение вулкана Шивелуч в 1993 г. // Вулканология и сейсмология. 1995. № 1. С. 3-19.
- Чуркин Б.С.* Теория литейных процессов. Екатеринбург: РГППУ, 2006. 454 с.
- Шевченко А.В., Свирид И.Ю.* Геоморфологические особенности формирования современного купола вулкана Молодой Шивелуч // Материалы XI Региональной молодежной научной конференции «Исследования в области наук о Земле». Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2013. С. 45-60.
- Шевченко А.В., Свирид И.Ю.* Обвальные процессы на современном куполе вулкана Молодой Шивелуч // Материалы XIII Региональной молодежной научной конференции «Природная среда Камчатки». Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2014. С. 129-142.
- Шевченко А.В., Свирид И.Ю., Двигало В.Н.* Формирование экзогенного купола вулкана Молодой Шивелуч // Материалы региональной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2014. С. 127-133.
- Anderson S.W., Fink J.H.* Crease structures as lava emplacement rate indicators // EOS. 1988. V. 69. P. 1486.
- Anderson S.W., Fink J.H., Rose W.I.* Mount St. Helens and Santiaguito lava domes: The effect of short-term eruption rate on surface texture and degassing processes // J. Volcanol. Geotherm. Res. 1995. V. 69. № 3-4. P. 105-116.
- Avard G., Whittington A.G.* Rheology of arc dacite lavas: experimental determination at low strain rates // Bull. Volcanol. 2012. V. 74. P. 1039-1056.
- Bull K.F., Anderson S.W., Diefenbach A.K. et al.* Emplacement of the final lava dome of the 2009 eruption of Redoubt Volcano, Alaska // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2013. V. 259. P. 334-348.
- Castruccio A, Rust A.C., Sparks R.S.J.* Assessing lava flow evolution from post-eruption field data using Herschel-Bulkley rheology // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2014. V. 275. P. 71-84.
- Dingwell D.B.* Transport Properties of Magmas: Diffusion and Rheology // Elements. 2006. V. 2. № 5. P. 281-286.
- Fink J.H., Anderson S.W.* Lava domes and coulees. Encyclopedia of volcanoes / Sigurdsson H. ed. Academic Press, 2000. P. 307-319.
- Harris A.J.L., Rose W.I., Flynn L.P.* Temporal trends in lava dome extrusion at Santiaguito 1922-2000 // Bull. Volcanol. 2003. V. 65. P. 77-89.
- Major J.J., Dzurisin D., Schilling S.P. et al.* Monitoring lava-dome growth during the 2004-2008 Mount St. Helens, Washington, eruption using oblique terrestrial photography // Earth Planet. Sci. Lett. 2009. V. 286. P. 243-254.
- Mather C.* Coulees and the coulee country of Wisconsin // Wisconsin Academy review. 1976. V. 22. N. 4. P. 22-25.
- Melnik O., Sparks R.S.J.* Controls on conduit magma flow dynamics during lava dome building eruptions // J.G.R. 2005. V. 110. B02209.
- Nakada S.* Photographic records of eruption products at Unzen Volcano during May 1991-May 1992. Unzen Volcano: the 1990-1992 Eruption. Fukuoka, Japan, The Nishinippon & Kyushu University Press, 1992. P. 12-20.
- Omori F.* The Sakura-Jima eruptions and earthquakes // Bull. Imperial earthquake investigation committee. 1916. V. 8. P. 181-321.
- Putnam W.C.* The Geology of the Mono Craters, California: Minor Thesis. Pasadena, 1937. 195 p.
- Ramsey M.S., Wessels R.L., Anderson S.W.* Surface textures and dynamics of the 2005 lava dome at Shiveluch volcano, Kamchatka // GSA Bulletin. 2012. V. 124. № 5/6. P. 678-689.
- Swanson D.A., Dzurisin D., Holcomb R.T. et al.* Growth of the lava dome at Mount St. Helens. The emplacement of silicic domes and lava flows: GSA special paper 212 / Fink J.H. ed. Arizona State University, 1987. P. 1-16.
- Williams H.* The history and character of volcanic domes // Univ. Calif. Publ. Bull. Dept. Geol. Sci. 1932. 21. P. 51-146.
- Walter T.R., Ratdomopurbo A., Subandriyo et al.* Dome growth and coulée spreading controlled by surface morphology, as determined by pixel offsets in photographs of the 2006 Merapi eruption // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2013. V. 261. P. 121-129.
- Watts R.B., Herd R.A., Sparks R.S.J. et al.* Growth patterns and emplacement of the andesitic lava dome at Soufriere Hills Volcano, Montserrat // Geological Society of London Memoirs. 2002. V. 21. P. 115-152.

СОВРЕМЕННАЯ ЭКСТРУЗИВНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ
**INVESTIGATION OF RECENT MOLODOY SHIVELUCH VOLCANO
EXTRUSIVE ACTIVITY ON THE BASE OF GEOMORPHOLOGICAL ANALYSIS
AND PHOTOGRAMMETRIC PROCESSING OF STEREO IMAGES**

A.V. Shevchenko^{1,2}, I.Yu. Svirid^{1,2}, V.N. Dvigalo¹

¹The Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Piip avenue 9, Petropavlovsk-Kamchatskiy, 683006, Russia

*²Vitus Bering Kamchatka State University, Pogranichnaya str. 4, Petropavlovsk-Kamchatskiy, 683032, Russia
e-mail: shevchenko@kscnet.ru*

The paper considers new features of Molodoy Shiveluch Volcano extrusive activity over the newest period since 2001. The authors have made the morphological and volcanological descriptions of the lava dome over the study period using geomorphological interpretation of stereo imagery. By means of photogrammetric method the precise morphometric characteristics of the dome were obtained for the different stages of its growth. On the basis of derived materials the authors have made interpretation of the ongoing extrusive activity. Three stages of the exogenous dome growth were described. Revealed morphological and physical criteria of the difference between extrusive and effusive activity show that despite expectations, recently no lava flows have been detected at the dome.

Keywords: exogenous dome growth, crease structures, activity type criterion.