



УДК 551.21.032

А. В. Шевченко<sup>1,2</sup>, И. Ю. Свирид<sup>1,2</sup>, В. Н. Двигало<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,  
г. Петропавловск-Камчатский  
e-mail: shevchenko@kscnet.ru*

<sup>2</sup> *Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга,  
г. Петропавловск-Камчатский*

## Формирование экзогенного купола вулкана Молодой Шивелуч

Приведено описание процесса формирования современного экзогенного экструзивного купола вулкана Молодой Шивелуч, составленное на основе дешифрирования стереофотоизображений вулкана, а также сравнения его экструзивной деятельности со сходными процессами на других вулканических объектах. Указаны возможные причины смены экструзивного режима в 2001 г. с эндогенного на экзогенный. Установлено отсутствие ранее предполагаемых лавовых потоков на куполе вулкана.

### Введение

Вулкан Молодой Шивелуч расположен в юго-западной части Шивелучского массива, в зоне сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Координаты наивысшей точки Молодого Шивелуча — Четвёртой вершины:  $56^{\circ}38'$  с. ш.,  $161^{\circ}18'$  в. д. Формирование вулкана в голоцене происходило в основном за счёт экструзивного процесса, следы доисторической эффузивной активности в виде мощных андезитовых и андезибазальтовых потоков наблюдаются на его восточных склонах.

В настоящее время в кратере, образованном катастрофическими событиями 1964 г., происходит интенсивное формирование экструзивного купола. Вследствие высокой интенсивности экструзивной деятельности вся поверхность дна кратера перекрыта новым экструзивным материалом, высота купола превышает высоты северной и восточной кромок кратера. Современная экструзивная деятельность на вулкане характеризуется особенностями, не свойственными прежним этапам формирования купола [11].

### Описание экструзивной активности 2001–2012 гг.

С целью описания современных экструзивных процессов на вулкане Молодой Шивелуч необходимо использовать терминологическое деление экструзивных куполов на купола эндогенного и экзогенного типов. Впервые данные типы экструзивных куполов были выделены в 1932 г. Х. Виллиамсом [22]. В отечественной вулканологии термин «экзогенный купол» использовался в работах Б. И. Пийпа [5, 6]. В. И. Влодавец [1] без обоснования причины предложил отказаться от деления куполов на эндогенные и экзогенные и ввёл свою классификацию. Однако в настоящее время это деление является общепринятым и лежит в основе интерпретаций

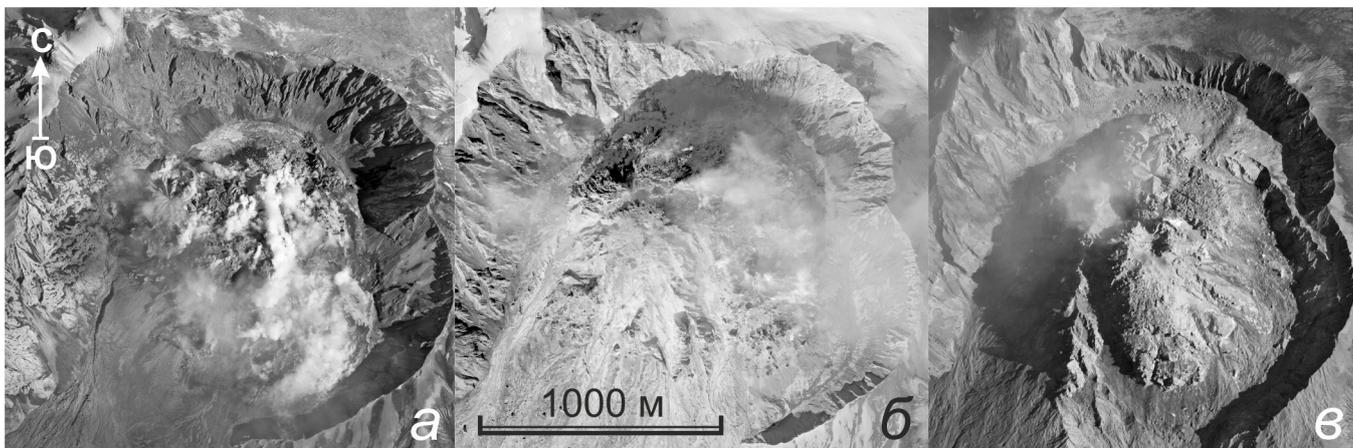
экструзивной деятельности в работах многих зарубежных авторов [13, 21]. Эндогенный рост купола происходит за счёт увеличения его внутреннего ядра с поступлением новых порций лавы в пределах внешней затвердевшей поверхности (коры), экзогенный — при выжимании сквозь затвердевшую поверхность уже существующего купола лавовых образований и нагромождении их друг на друга.

Вместе с возвращением в употребление терминологического деления экструзивных куполов на эндогенные и экзогенные, авторы используют новую для русскоязычной вулканологической литературы терминологию. Термин «структуры расщепления» (crease structures, cleavage canals, petal structures) используется для обозначения экструзивных образований на поверхности уже сформированного купола в виде расходящихся отдельностей пластичного, но уже в достаточной мере закристаллизовавшегося материала (рис. 1). Термин «глыбовый панцирь» (blocky saharase) обозначает внешнюю часть экструзивного купола, покрывающую его пластичное ядро, которая вследствие температурных деформаций и механических нагрузок дробится на отдельные крупные глыбы. Образование структур расщепления и глыбовых панцирей присуще исключительно экзогенному типу формирования экструзивных куполов.

В работе [11] авторами была установлена смена типа экструзивной деятельности с эндогенного на экзогенный, произошедшая на куполе вулкана Молодой Шивелуч в 2001 г. Смена типа деятельности сопровождалась появлением структур расщепления и глыбовых панцирей. На куполе 2001 г. (рис. 2а) были выделены три структуры расщепления (на его западном, северо-восточном склонах и в западном секторе его вершины) и глыбовый панцирь, связанный с наиболее крупной из них.



**Рис. 1.** Структуры расщепления на куполах вулканов: *а* — Сент-Хеленс, 26 июня 1981 г., фото Д. Дзурисин; *б* — Ундзен, 20 января 1992 г., фото С. Накада; *в* — Молодой Шивелуч, 21 августа 2005 г., фото Р. Л. Весселса.



**Рис. 2.** Плановые аэрофотоснимки купола вулкана Молодой Шивелуч: *а* — 16 мая 2001 г.; *б* — 7 октября 2003 г., фото В. Н. Двигало; *в* — 12 июля 2012 г., фото И. Ю. Свирида. Здесь и далее указанный линейный масштаб соответствует среднему значению масштаба для отображённых участков местности.

В 2002 г. экзогенный рост купола продолжался. Однако на аэрофотоснимках 7 октября 2003 г. отмечаются признаки обратной смены экструзивного режима с экзогенного на эндогенный: на рис. 2б мы можем видеть три крупных экструзивных блока, выжимающихся в западной части купола. Из наблюдаемых ранее структур расщепления сохранилась только одна — северо-восточная, она практически не изменила своей формы. Образование каких-либо новых экзогенных экструзивных форм на куполе 2003 г. не наблюдается.

В 2004 г. экзогенная экструзивная деятельность возобновилась (рис. 3а и 3б) и происходит по настоящее время (рис. 2в и 3в), сопровождаясь образованием структур расщепления и глыбовых панцирей на поверхности старого эндогенного купола.

#### **Вероятный механизм экзогенного формирования купола**

Схематическое изображение разреза купола, наглядно отображающее особенности современного экструзивного процесса, представлено на рис. 4.

Преобладающая форма структур расщепления — зеркально симметричная — позволяет предположить,

что на первых стадиях их формирования выжимание происходит по линейной трещине в теле эндогенного купола. В случае дальнейшей проработки канала, либо изначального образования в эксплозивной воронке [18] структуры расщепления могут приобретать радиальную или иррегулярную форму. В большинстве случаев экзогенный экструзивный процесс начинается с образования трещин в затвердевшем теле эндогенного купола.

По образовавшейся трещине на поверхность начинает поступать пластичный экструзивный материал, который под воздействием напряжений, возникающих от неравномерности остывания и кристаллизации, расщепляется на изогнутые гладкие отдельные и, таким образом, формирует структуру расщепления. Материал структуры расщепления на периферии растрескивается и распадается на отдельные глыбы, формируя вокруг себя первообразованную часть глыбового панциря. В то же время под гладкой поверхностью структуры расщепления выжимается ещё пластичный материал, формирующий монолитное ядро экзогенного купола.

Пластичное ядро, постепенно остывая, расходится по поверхности старого эндогенного купола и на-

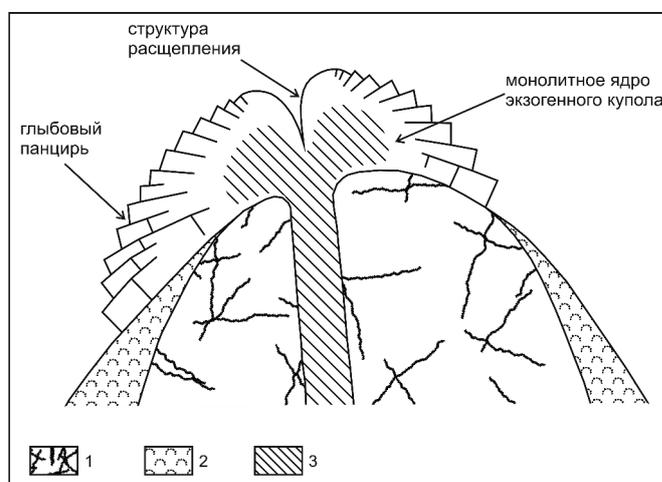


**Рис. 3.** Перспективные фотоснимки купола вулкана Молодой Шивелуч: *a* — 29 мая 2004 г., фото С. А. Хубуная; *б* — 28 июля 2004 г., фото М. Е. Зеленского; *в* — 25 января 2012 г., фото Ю. В. Демянчука. Стрелкой показано зеркало скольжения.

чинает затвердевать. Мощность глыбового панциря, покрывающего пластичное ядро, постоянно увеличивается вследствие растрескивания остывающего материала вглубь и его дробления на глыбы. Монолитное ядро также дробится на глыбы при оползании вниз по склону старого купола. Глыбы, сформированные при дроблении ядра, являются более крупными по сравнению с глыбами, составляющими поверхностный глыбовый панцирь. Многочисленные фотографии подобных экструзивных образований подтверждают наличие самых крупных глыб во фронтальной, вскрытой обвалами внутренней части (рис. 5).

При дальнейшем движении вниз по склону экструзивный материал полностью теряет пластичность и затвердевает. Происходит оползание отдельных, не связанных между собой глыб, которые удерживаются на склоне за счёт своей массы и силы трения. В таком случае мы можем говорить об оползании глыбового панциря по поверхности эндогенного купола. Края панциря оползают быстрее центральных частей, так как краевые части вследствие постоянных осыпаний истончаются, что приводит к относительному (по сравнению с центральными) уменьшению нагрузки на подстилающую поверхность и, таким образом — к относительному уменьшению сил трения. Этим объясняется выгнутость структурных линий на поверхности панциря против направления движения (рис. 3б).

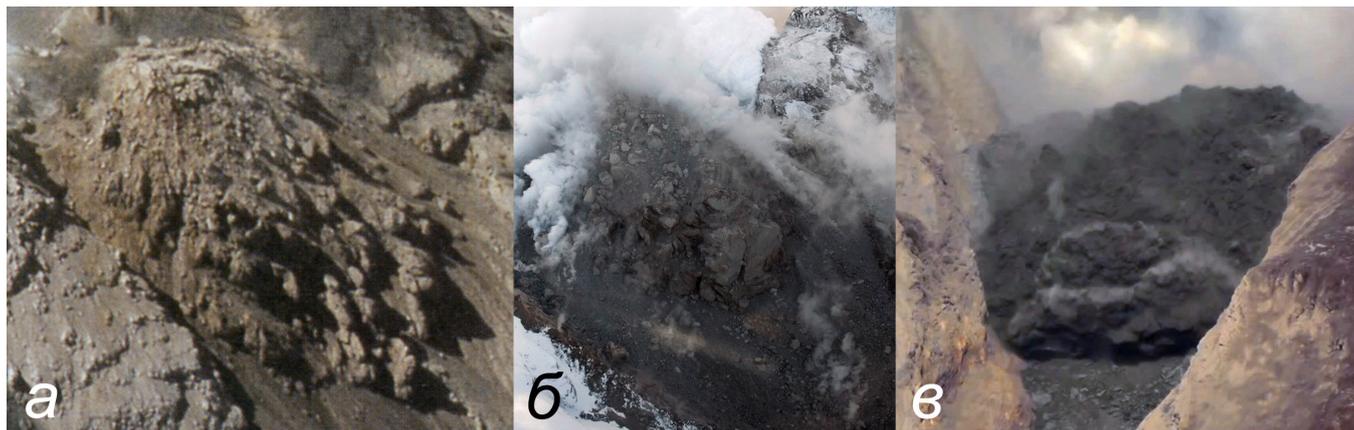
Центральные части могут замедлять свой ход вплоть до остановки, в случае которой нагромождение надвигающегося сверху на остановившийся участок материала будет происходить до достижения им критической массы, обусловленной пределом устойчивости на поверхности склона. При его превышении масса глыб в центральной части обваливается, обнажая подстилающую поверхность, зачастую проработанную до приобретения типичной формы зеркала скольжения (рис. 3а) вследствие оползания панциря.



**Рис. 4.** Схематический разрез экзогенного купола: 1 — тело эндогенного купола; 2 — осыпная мантия эндогенного купола; 3 — пластичный экструзивный материал.

Таким образом, формирование экзогенных экструзивных образований происходит неразрывно с последующим постоянным их разрушением. Кроме гравитационных факторов, причинами разрушения также являются часто сопровождающие процесс экструзивного роста эксплозии.

Рис. 6 иллюстрирует выделенные в работе [11] типы структур расщепления на активном куполе Молодого Шивелуча в 2001 г. и морфологически сходные с ними — на вулкане Ундзен (извержение 1991–1995 гг.) [18, 19]. Обе показанные радиальные структуры (рис. 6а и 6б) имеют также и плоскость зеркальной симметрии, однако следует отметить, что радиальная структура расщепления на куполе Молодого Шивелуча относительно этой плоскости не совсем симметрична: по одну её сторону мы наблюдаем четыре отдельные, по другую — три, поверхность отдельных — гладкая. Структура расщепления на вулкане Ундзен, напротив почти совершенно симметрична и относительно зер-



**Рис. 5.** Фронтальные части экзогенных куполов вулканов: а — Суфриер-Хиллс, 6 ноября 1997 г., фото Б. Даррú; б — Редаут, 16 апреля 2009 г., фото Г. Мак-Гимси; в — Синабунг, январь 2014 г., стоп-кадр из видеосъёмки Р. Поско (<http://www.photovolcanica.com/VolcanoInfo/Sinabung/Sinabung.html>) на первой секунде обвала крупных глыб из фронтальной части.

кальной плоскости: по три отдельности выжаты в разные стороны, их поверхность имеет характерные ступенеобразные неровности поперёк направления выжимания, обозначаемые в работе [13] «striations». Из структур расщепления Молодого Шивелуча такую ступенчатость имеет только иррегулярная (рис. 6д), по мнению авторов настоящей работы, это свидетельствует о прерывистом процессе её образования. В дополнение к ступенчатости она также имеет полосчатость (термин «banding» в работе [13]), которой не обладает ни одна из структур расщепления вулкана Ундзен.

Поперечная трещиноватость внешних ребер нижних отдельностей зеркально-симметричной структуры расщепления активного купола Молодого Шивелуча (рис. 6в), очевидно, возникла уже после их выжимания вследствие разламывания их поверхности при изгибании от внутренних напряжений в процессе расхождения в разные стороны. Крылья аналогичной структуры расщепления на вулкане Ундзен (рис. 6з) расходятся без разделения на отдельности.

Иррегулярная структура расщепления на вулкане Ундзен (рис. 6е) образовалась в конце ноября 1991 г. на поверхности одним месяцем ранее сформированного экзогенного купола, а не старого эндогенного, как в случае Молодого Шивелуча (рис. 6д). Подобные события — образование трещины на поверхности экзогенного купола с последующим выжиманием из неё материала структуры расщепления — на вулкане Молодой Шивелуч имели место в 2012 г. (рис. 2в).

Такие процессы могут происходить при условии полного застывания экзогенных экструзивных образований ещё на вершине купола. В этом случае новая трещина проходит не только в теле эндогенного купола, но и в затвердевшем теле экзогенного. Поступающий по трещине новый пластичный материал погребает под собой старый, уже затвердевший. При этом рост купола осуществляется посредством

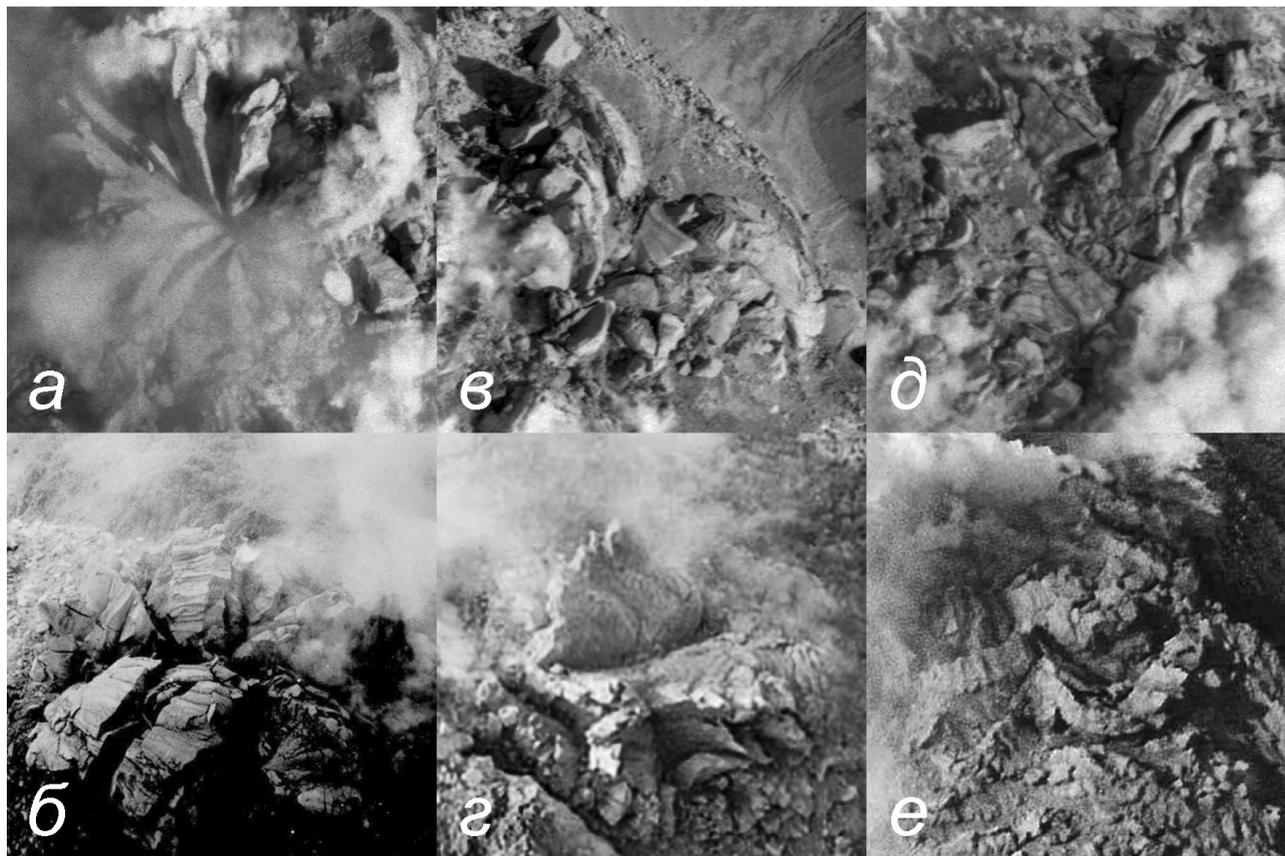
нагромождения новых экзогенных экструзивных образований поверх прежних.

#### **Возможные причины смены типа экструзивной активности**

Смена типа экструзивной активности с эндогенного на экзогенный может обуславливаться достижением критической массы купола, при этом продвижение крупных участков его постройки вверх без их разламывания, сопровождающегося выходом свежего материала на поверхность, становится невозможным. В таком случае также вероятно продолжение деятельности в виде не экзогенного роста купола, а катастрофического обрушения, как это имело место в 1964 г. Иными словами, в настоящее время наличие экзогенной формы экструзивной деятельности вулкана Молодой Шивелуч в некоторой мере предохраняет его активный купол от катастрофического обрушения.

Также вероятной причиной появления экзогенного типа экструзивной деятельности, может быть изменение физических свойств экструзивного материала за счёт вариаций его состава. Повышение содержания кремнекислоты с 60,41 – 61,30%  $\text{SiO}_2$  (данные на 1980 г.) [4] до 62,44 – 62,52%  $\text{SiO}_2$  было зафиксировано ещё при извержении 1993 г. [10], а в 2004 г. была установлена смена состава вещества с андезитового на андезитодацитовый (63,47 – 64,17%  $\text{SiO}_2$ ) [2].

Ритманом [7] в отношении определения зависимости физических свойств магматического расплава от его состава предлагается следующий подход: «Образовавшиеся уже на глубине в очаге или в канале кристаллы... становятся “мёртвым грузом” и не принимаются во внимание при сопоставлении химического состава магмы и рода извержения. Поэтому решающим для характера извержения является не химический состав всей магмы, а только химический состав остаточного расплава» [7, стр. 172]. В работе [2] было указано, что при общем



**Рис. 6.** Структуры расщепления на куполах вулканов: *а, в, д* — Молодой Шивелуч, 16 мая 2001 г., фото В. Н. Двигало; *б, г* — Ундзен, 3 июня 1991 г.; *е* — Ундзен, 24 ноября 1991 г., фото С. Накада.

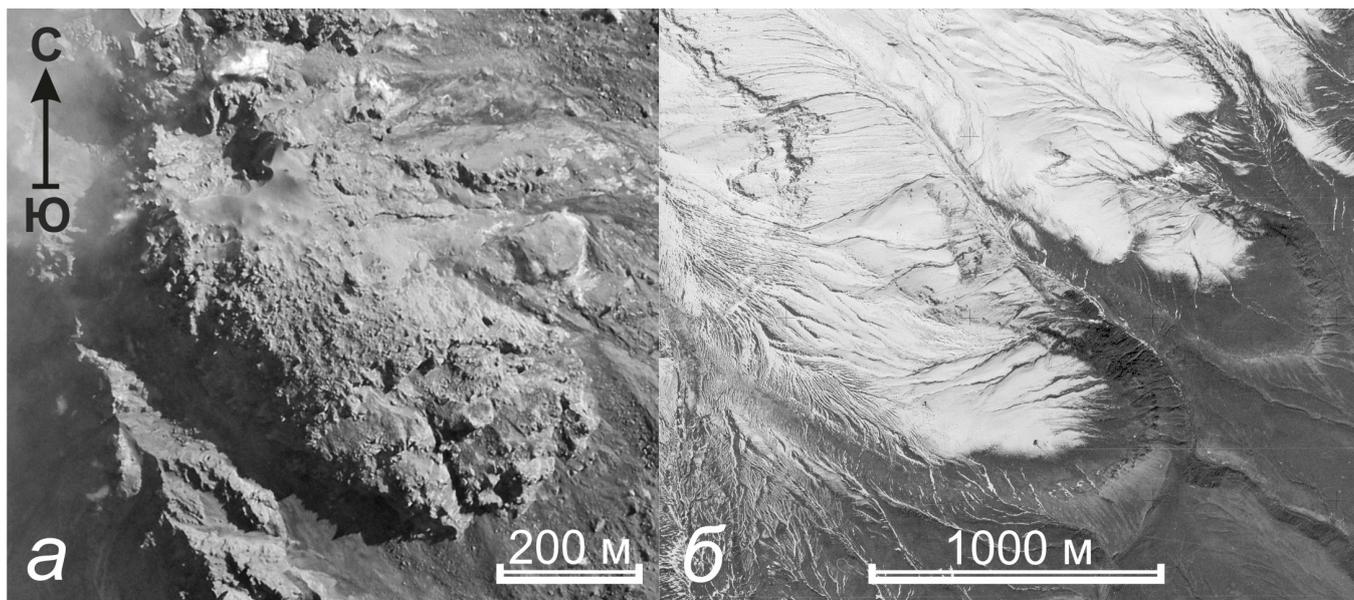
андезитодацитовом составе образцов с купола 2004 г. их остаточное стекло является риолитовым (79,42%  $\text{SiO}_2$ ). Предыдущее известное значение содержания кремнекислоты в остаточном стекле изверженных пород вулкана Молодой Шивелуч составляло по данным работы [9] на 1993 г. — 76,08% (при 61,26% в общей массе).

Экзогенные экструзивные процессы, подобные наблюдаемым в настоящее время на куполе Молодого Шивелуча, на других вулканах чаще всего происходят при извержении вещества кислого состава. Так на вулкане Сент-Хеленс с октября 1980 г. по октябрь 1986 г. отмечено 15 эпизодов роста нового купола, каждый из которых начинался с периода эндогенной экструзивной деятельности и продолжался по экзогенному типу [14]. По содержанию кремнекислоты породы нового купола относятся к дацитам (62,51 – 63,78%  $\text{SiO}_2$ ) с риолитовым (77,05 – 78,67%  $\text{SiO}_2$ ) остаточным стеклом [17]. При сравнении с тефрой прежних извержений Сент-Хеленс [15] можно отметить их приблизительное (в пределах  $\pm 3\%$ ) соответствие по кремнекислоте в общей массе, однако остаточное стекло 1980–1986 гг. является на 4 – 8% более кислым, чем у продуктов всех известных предыдущих эруптивных событий. В процессе извержения 1990–1995 гг. на вулкане Ундзен было сформировано 13 экзогенных экструзивных образований [19] дацитового состава (64,54 – 65,45%  $\text{SiO}_2$ ),

остаточное стекло одного из них содержит 75,83%  $\text{SiO}_2$ , пяти других, для которых удалось отобрать образцы — 78,03 – 78,70%  $\text{SiO}_2$  [20]. На вершине вулкана Редрут в 2009 г. происходил рост экзогенного экструзивного купола андезитового состава (59,23 – 62,36%  $\text{SiO}_2$ ), с риолитовым остаточным стеклом (77,92 – 79,57%  $\text{SiO}_2$ ). Начало роста предварялось серией из 18 эксплозивных событий, большая часть образцов пемз и шлаков которых при содержании 57,30 – 62,45%  $\text{SiO}_2$  в общей массе имеет не настолько кислое (66,57 – 74,65 %  $\text{SiO}_2$ ) остаточное стекло [12]. Лавы вулкана Мерапи представлены породами от основного до среднего состава, причём кислотность на протяжении всей его эруптивной истории увеличивалась. С конца XIX в. и по настоящее время для его экструзивной деятельности характерно появление экзогенных образований, в этот период содержание  $\text{SiO}_2$  в общей массе варьируется от 53,9 до 58,2%, а в стекле — от 71,2 до 78,1% [16].

#### Обсуждение результатов

В предшествующих работах [2, 3] описанные выше экзогенные экструзивные образования интерпретируются как лавовые потоки. По нашему мнению, они не могут быть названы лавовыми потоками, так как их форма и структура поверхности демонстрируют отсутствие каких-либо следов даже самого высоковязкого течения [11].



**Рис. 7.** Экзогенный купол вулкана Молодой Шивелуч (а) в сравнении с доисторическими андезитовыми лавовыми потоками на восточном склоне этого вулкана (б).

По аэрофотоснимкам (рис. 7) мы можем сравнить современные экзогенные экструзивные образования Молодого Шивелуча и старые андезитовые потоки на восточном склоне этого вулкана. Очевидно, что лавовые потоки сохраняют каплевидную форму и выраженный фронт даже по прошествии тысяч лет после их образования, несмотря на процессы эрозии (рис. 7б). У экзогенных экструзивных образований вулкана Молодой Шивелуч каплевидная форма отсутствует, мощность их фронтов не превышает мощность вершинных частей (рис. 7а). Такая морфология наблюдается на протяжении всего последнего эруптивного цикла, начиная с 2001 г.

При рассмотрении структур расщепления становится очевидно, что слагающий их материал во время выхода на поверхность ещё может обладать пластичностью, но не способен к вязкому течению под действием силы тяжести, так как при его наличии невозможно образование расходящихся в разные стороны отдельных пластин, имеющих острые грани. Структуры расщепления образованы твердым (в субаэральных условиях) материалом, пластически деформированным в процессе экструдирования.

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, мы можем заключить, что наличие структур расщепления, подтверждает отсутствие лавовых потоков на куполе вулкана Молодой Шивелуч.

В отечественной вулканологии ещё Б. И. Пийпом было отмечено строгое разграничение эффузивной и экструзивной активности: «требуемыми уточнения терминами являются “эффузия” и “экструзия” ... эти термины принято считать синонимами... Тот или иной термин применяется или в зависимости от выбора исследователя, ... или по установившейся традиции... Мы предлагаем эти два термина разграничить» [5, стр. 31]. Это разграничение по-прежнему лежит в основе отечественных исследований вулканических процессов: «Экструзивными называют извержения высоковязкой магмы, которая не способна образовать поток» [8, стр. 76], и имеет под собой достаточные основания, происходящие из физических различий в механизме эруптивного процесса.

Несмотря на отсутствие эффузивной активности на вулкане Молодой Шивелуч в настоящее время, она возможна в его дальнейшей деятельности, поскольку свидетельства прошлых эффузий — доисторические лавовые потоки — имеют место на его постройке.

Несмотря на отсутствие эффузивной активности на вулкане Молодой Шивелуч в настоящее время, она возможна в его дальнейшей деятельности, поскольку свидетельства прошлых эффузий — доисторические лавовые потоки — имеют место на его постройке.

### Заключение

С 2001 г. по настоящее время происходит новый цикл активности вулкана Молодой Шивелуч. На поверхности активного экструзивного купола из жестко-пластического материала формируются не наблюдавшиеся прежде образования: структуры расщепления и глыбовые панцири, свидетельствующие о смене типа экструзивной деятельности с эндогенного на экзогенный.

Экструзивная деятельность вулкана Молодой Шивелуч в новом цикле сопровождается мощными взрывными событиями, крупными обвалами, сходами пирокластических лавин и грязевых потоков. Так как эти явления представляют высокую опасность для людей и объектов окружающей среды, необходимы постоянные исследования активного купола вулкана, в настоящее время производимые в недостаточном объеме.

Наиболее надежным и в то же время безопасным методом исследования деятельности Молодого Шивелуча является геоморфологическое дешифрирование, осуществляемое на основе стереофотограмметрической обработки материалов аэро — и наземных фототопографических съёмок. Отсутствие этих материалов за некоторые годы невосполнимо лишает нас достоверных данных об исследуемом объекте, количественных и качественных характеристиках его деятельности. Для составления целостной картины морфодинамических процессов, формирующих активный купол вулкана Молодой Шивелуч его аэрофотосъёмка должна производиться при каждом наблюдательном облёте не реже двух раз в год.

Авторы благодарят Ю. В. Демянчука, С. А. Хубуня, М. Е. Зеленского и Р. Л. Весселса за предоставленные фотоматериалы, а также А. П. Максимова за консультации по теме работы.

### Список литературы

1. *Влодавец В. И.* О вулканологической терминологии // Бюллетень вулканологической станции. 1954. № 21. С. 43–46.
2. *Горбач Н. В.* Первый лавовый поток на экструзивном куполе вулкана Шивелуч, 2004 г. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 2. С. 9–16.
3. *Жаринов Н. А., Демянчук Ю. В.* Рост экструзивного купола вулкана Шивелуч (Камчатка) в 1980–2007 гг. по геодезическим наблюдениям и видеосъёмке // Вулканология и сейсмология. 2008. № 4. С. 3–13.
4. *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.
5. *Пийп 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.
6. *Пийп 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 // Бюллетень вулканологической станции на Камчатке. 1948. № 14. С. 38–51.
7. *Ритман А.* Вулканы и их деятельность. М.: Мир, 1964. 438 с.
8. *Слёзин Ю. Б.* Механизм экструзивных извержений // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4–5. С. 76–84.
9. *Толстых М. Л., Наумов В. В., Бабанский А. Д. и др.* Состав расплава и условия кристаллизации андезитов вулкана Шивелуч (Камчатка) по данным изучения включений в минералах // Доклады Академии наук. 1998. Том. 359. № 5. С. 676–679.
10. *Хубуня С. А., Жаринов Н. А., Муравьев Я. Д. и др.* Извержение вулкана Шивелуч в 1993 г. // Вулканология и сейсмология. 1995. № 1. С. 3–19.
11. *Шевченко А. В., Свирид И. Ю.* Геоморфологические особенности формирования современного купола вулкана Молодой Шивелуч // Материалы XI Региональной молодёжной научной конференции «Исследования в области наук о Земле», 26 ноября 2013 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2013. С. 45–60.
12. *Coombs M. L., Sisson T. W., Bleick H. A. et al.* Andesites of the 2009 eruption of Redoubt Volcano, Alaska // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. Vol. 259. P. 349–372.
13. *Fink J. H., Anderson S. W.* Lava domes and coulees // Sigurdsson H. ed. Encyclopedia of volcanoes, Academic Press. 2000. P. 307–319.
14. *Fink J. H., Malin M. C., Anderson S. W.* Intrusive and extrusive growth of the Mount St. Helens lava dome // Nature. 1990. Vol. 348. P. 435–437.
15. *Gardner J. E., Rutherford M., Carey S. et al.* Experimental constraints on pre-eruptive water contents and changing magma storage prior to explosive eruptions of Mount St. Helens volcano // Bulletin of Volcanology. 1995. Vol. 57. Iss. 1. P. 1–17.
16. *Innocenti S., Marmol M-A. del, Voight B. et al.* Textural and mineral chemistry constraints on evolution of Merapi Volcano, Indonesia // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. Vol. 261. P. 20–37.
17. *Melson W. G.* Monitoring the 1980–1982 Eruptions of Mount St. Helens: Compositions and Abundances of Glass // Science. 1983. Vol. 221. P. 1387–1391.
18. *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 and Kyushu University Press. 1992. P. 12–20.
19. *Nakada S., Shimizu H., Ohta K.* Overview of the 1990–1995 eruption at Unzen Volcano // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1999. Vol. 89. P. 1–22.
20. *Nakada S., Motomura Y.* Petrology of the 1991–1995 eruption at Unzen: effusion pulsation and groundmass crystallization // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1999. V. 89. P. 173–196.
21. *Swanson D. A., Dzurisin D., Holcomb R. T. et al.* Growth of the lava dome at Mount St. Helens // Fink J. H. ed. The emplacement of silicic domes and lava flows: Geological Society of America special paper 212. 1987. P. 1–16.
22. *Williams H.* The history and character of volcanic domes // Univ. Calif. Publ. Bull. Dept. Geol. Sci. 1932. 21. P. 51–146.