

Эндогенный механизм формирования лахаров на андезитовых вулканах (на примере вулкана Шивелуч, Камчатка)

Endogenic mechanism of lahar formation on andesitic volcanoes (by the example of the shiveluch Volcano, Kamchatka)

СЕЙНОВА И.Б.

Ведущий научный сотрудник Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, к.г.н, г. Москва, seynova@gmail.com

ЧЕРНОМОРЕЦ С.С.

Старший научный сотрудник Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, к.г.н, г. Москва, devdorak@gmail.com

ДЕМЯНЧУК Ю.В.

Начальник Камчатской вулканологической станции им. Ф.Ю. Левинсона-Лессинга Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, п. Ключи (Усть-Камчатский район Камчатского края), demyanchuk.yu@yandex.ru

SEYNOVA I.B.

Leading scientist of Lomonosov Moscow State University, PhD (candidate of science in Geography), Moscow, seynova@gmail.com

CHERNOMORETS S.S.

Senior scientist of Lomonosov Moscow State University, PhD (candidate of science in Geography), Moscow, devdorak@gmail.com

DEMYANCHUK Y.V.

Head of the Levinson-Lessing Kamchatka Volcanological Station of the Institute of Volcanology and Seismology of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Klyuchi (Ust'-Kamchatka Region, Kamchatka Kray), demyanchuk.yu@yandex.ru

Ключевые слова: лахар; сель; вулкан; Камчатка.

Аннотация: в результате проведения анализа вулканической деятельности вулкана Шивелуч (Камчатка) установлено, что действующим фактором формирования нивальных лахаров являются пирокластические потоки, характерные для извержений андезитовых вулканов. Их особенность состоит в одновременном образовании как твердой, так и жидкой составляющих грязекаменных масс в условиях супервысоких температур. В статье рассматривается эндогенный механизм зарождения селей вулканического генезиса, основанный на энергетическом потенциале парогазовых взрывов на стартовой фазе этого процесса.

Key words: lahar; mudrock flow; volcano; Kamchatka.

Abstract: on the basis of analysis of the Shiveluch volcano activity (Kamchatka) the authors established that the leading contributors of forming nival (snowmelt) lahars are pyroclastic flows that are typical during andesitic volcanoes eruptions. Their feature is that both solid and liquid components of mud-and-stone (mudrock) flows are formed simultaneously in the conditions of extremely high temperatures. The article considers the endogenic mechanism of volcanic mudrock flows origination that is based on the energy potential of gas-vapour explosions at the start phase of this process.

Введение

Активный андезитовый вулкан Шивелуч расположен в исключительно динамичной северной части Центральной Камчатской депрессии. По объему выноса ювенильных продуктов извержений, в среднем 36 млн т в год, он уступает лишь самому мощному из действующих вулканов Евразии — Ключевскому, возглавляющему группу из 12 различных по характеру вулканической деятельности вулканов, на соседнем с ним берегу реки Камчатки (рис. 1, 2).

Между Шивелучем и Ключевским, в относительной безопасности от палящего воздействия их лавовых и пирокластических потоков, находится

крупный поселок Ключи. Во время извержений его жители, а также жители других населенных пунктов — Козыревска, Майского и Усть-Камчатска, периодически подвергаются воздействию пеплопадов и почти ежегодно остаются без транспортного сообщения при размыве и перекрытии дорог грязекаменными селевыми потоками — лахарами. Лахары являются частыми и опасными спутниками извержений. При сходе по руслам рек они распространяются далеко за пределы вулканических построек и достигают освоенных территорий. Эндогенный характер вулканической деятельности определяет масштабность и особенности многофакторного процесса их формирования.

Целью настоящей статьи является оценка активности лахаров на Шивелуче на современном этапе его вулканической деятельности. На основе опубликованных данных об извержениях Молодого Шивелуча¹ и исследований авторов пирокластических потоков и лахаров во время экспедиций 2008–2013 гг. проведен анализ условий их формирования. Были выделены значимые факторы механизма зарождения нивальных лахаров в условиях супервысоких температур на фазе перехода от вулканических процессов к гидрологическим.

Терминология

Терминология для описания селевых процессов вулканического генезиса недостаточно разработана. Утвердившийся специальный термин *лахар* употребляется собирательно для всех видов проявления селевых потоков на вулканах. Термин имеет индонезийское (яванское) происхождение и введен в научный оборот Г.Л.Л. Кеммерлингом [38]. Принято подразделение лахаров на «горячие», непосредственно связанные с извержением, и «холодные», не связанные с извержением. Используя известные термины, авторы вводят дополнительные к ним, позво-

¹ Вулкан Шивелуч представлен двумя постройками — Старый Шивелуч и Молодой Шивелуч. Молодой Шивелуч расположен на дне кальдеры и ближе к ее северо-западному краю. — *Ред.*

ляющие объяснить особенности эндогенного механизма образования лахаров в контексте данной статьи.

Термин «лахар» без прилагательного «горячий» применяется нами для «одного из генетических типов селевых явлений при извержениях вулкана» [29].

Лахар — мощный грязекаменный поток, формирующийся в долинах «сухих» рек в результате вулканической деятельности.

По генезису водной составляющей мы различаем *гляциальные, нивальные и ливневые* лахары [35].

Гляциальные лахары образуются при экстремальном таянии и разрушении ледников под воздействием лавовых потоков и пироклаستيку. Нивальные лахары образуются при катастрофическом таянии снежного покрова под воздействием продуктов извержения. Ливневые лахары вызываются ливневыми осадками из облаков, образованных при извержении вулкана.

Процессы лахарообразования связаны с эксплозивными, экструзивными, эффузивными и пароксизмальными извержениями. Эксплозивные извержения приводят к выбросу в атмосферу газопепловых колонн, образующих тефру при оседании на поверхность вулканических построек. Тефра — термин для обозначения изверженного материала с признаками воздушной транспортировки, впервые использован в работе С. Тораринссона [41].

Экструзивные извержения сопровождаются выдавливанием из жерла вулкана высоковязкой магмы андезитового состава в виде куполов, с их последующим разрушением (андезитовые вулканы типа Шивелуча).

Эффузивные извержения сопровождаются истечением потоков базальтовой лавы (базальтовые вулканы типа Ключевского).

Пароксизмальные (взрывные) извержения приводят к разрушению экструзивных куполов и постройки вулкана с образованием «палящих туч» (образуются на максимальной фазе извержений вулканов, преимущественно андезитовых).

Пирокластический поток (ПП) — раскаленная текучая смесь ювенильного и резургентного материала, доля обломков в котором превышает газовую составляющую. Термин предложен С. Арамаки в 1957 г. [1].

Ювенильными именуется изверженные магматические породы, резургентными — породы разрушенного купола вулкана.

Строение и характер вулканической деятельности вулкана Шивелуч

Стратовулкан Шивелуч является крупнейшей вулканической постройкой на Камчатке с абсолютной высотой главной вершины 3283 м. Поперечник



Рис.1. Ключевская группа вулканов (в левой нижней части снимка) и вулкан Шивелуч (вверху справа). Съемка выполнена с Международной космической станции в рамках программы «Ураган». Фото С.Н. Рязанского, 1 января 2014 г.

его основания, включая аккумулятивные равнины подножий, равен 50 км, площадь составляет 1300 км², объем — порядка 1000 км³ [25] (см. рис. 2). Его строение асимметрично, что обусловлено гигантским взрывом, разрушившим 30 тысяч лет назад центральный и южный сектора Старого Шивелуча, на месте которых образовалась кальдера до 9 км в поперечнике. Высота ее крутого уступа составляет от нескольких сотен до 1500 м. Согласно определению И.В. Мелекесцева, стратовулкан Шивелуч можно отнести к сооружениям типа Сомма — Везувий. «Соммой» именуется открытая на юг дугообразная кальдера в постройке Старого Шивелуча.

Активно действующий после взрыва новый вулканический аппарат, именуемый Молодым Шивелучем, подобно Везувию, формирует современный конус в ее полости. Последний состоит из слившихся экструзивных куполов, к настоящему времени достигших высоты 2800 м и ширины в поперечнике 6-7 км.

Форма вулканических построек, типы извержений и физико-механический характер вулканических продуктов как предпосылок для формирования лахаров находятся в прямой зависимости от состава огненно-жидкого расплава в магматическом очаге. Его главными показателями является насыщенность газами и содержание



Рис. 2. Эксплозивное извержение Шивелуча в июле 2007 г. Съемка выполнена с Международной космической станции в рамках программы «Ураган». Фото Ф.Н. Юрчихина. www.federalspace.ru



Рис. 3. Эруптивная колонна над вулканом Шивелуч. Фото Ю.В. Демянчука, 15 мая 2014 г.

кремнезема. Андезиты образуются из магмы со средним содержанием кремнезема 55-65%. Эксплозивные и экструзивные извержения Молодого Шивелуча свидетельствуют, что в составе его магмы существуют две разновидности: богатая летучими веществами, потенциально взрывчатая и дегазированная, очень вязкая, не образующая лавовых потоков. В связи с этим в процессе вулканической деятельности наблюдается два типа роста экструзивных куполов: эндогенный и экзогенный. При эндогенном типе пластичное вещество новой магмы постепенно внедряется в пределы остывающего конуса. При экзогенном — новая лава проламывает затвердевшую кору и распространяется по поверхности конуса. Умеренный период формирования куполов, как правило, завершается пароксизмом — взрывом с разрушением постройки вулкана [25, 36].

В процессе формирования экструзивного купола Молодого Шивелуча происходили сильнейшие пароксизмальные извержения различного типа. В результате реконструкции установлено, что за прошедшие 10 000 лет было не менее 60 катастрофических извержений вулканического и плинианского типов, что в 10 раз чаще, чем на других вулканах Камчатки [25].

Вулканический тип извержений известен в мире со времен расцвета греческой цивилизации. Его наименование происходит от названия острова Вулкано в Тирренском море, на котором извержения наблюдались в то время наиболее часто. Отсюда, собственно, произошел и сам термин «вулкан». Началом вулканической деятельности служит разрушение магматической пробки в жерле вулкана скопившимися парами и газами. В результате на высоту в несколько километров выбрасыва-

ется вертикальная (эруптивная) колонна глубинного расплава, разорванного на частицы в виде пепла, лапиллей и других разновидностей тефры, в охлажденном виде образующей многослойный почвенно-пирокластический чехол у подножий вулканов (рис. 3).

При плинианском типе, получившим название в честь Плиния Младшего, описавшего извержение Везувия в 79 г. н.э., происходят взрывы, направленные под углом к горизонту. В результате вслед за разрушением постройки образуются палящие пирокластические потоки и тучи с огромной скоростью, несущиеся по склонам вулканов. В этих случаях основной вклад в объем постройки вносят наземные потоки тяжелой по составу пирокластики. Постоянно возобновляемые и чрезвычайно рыхлые отложения тефры и пирокластических потоков представляют неисчерпаемые запасы твердого материала, который при размыве водными потоками превращается в грязекаменную массу лахара.

Эндогенные факторы образования лахаров при извержениях

Самые мощные из известных в историческое время пароксизмальных извержений на Шивелуче были зафиксированы 1 марта 1854 г. и 12 ноября 1964 г. По объему обвалившегося резервентного материала постройки (1 и 1,5 км³) они на порядок уступали древнему грандиозному обвалу, кардинально изменившему строение и характер вулканической деятельности Шивелуча. Описание первого из зафиксированных извержений на Шивелуче приводится в отчете К. фон Дитмара об исследовании вулканических районов Камчатки в 1851–1855 гг. Со слов оче-

видцев... «Заречная сопка «Сивелыч» так сильно горела, что половина ее разрушилась и своими громаднейшими камнями счистила весь лес у подножья, а река Камчатка, сломавши лед, пошла». [Крахмалев, 1880, с. 110, цит. по: 24]. И далее: «Со всех сторон текли книзу потоки лавы, доходившие почти до р. Еловки. Вулканический песок и пепел падали в таком значительном количестве, что у лежащей напротив деревни Ключей снег был покрыт ими на целый фут» [17].

Согласно исследованиям, проведенным специалистами Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, извержение имело экструзивный характер без выделения лавы. Образовавшиеся пирокластические потоки не выходили за пределы постройки вулкана [39]. Основываясь на последних исследованиях, мы считаем, что «потоки, доходившие до крупных рек Камчатки и Еловки», могли быть лахарами. Грубая тефра большой мощности сносилась на северные склоны вулкана. Ее отложения, пемзовый песок с разноразмерным гравием мощностью 30-40 см, были обнаружены в 11 км от эпицентра, на концевой части ледника в долине 2-го Ледникового ручья. В результате взрыва и обрушения постройки вулкана образовался подковообразный кратер диаметром 1,5 км, который в течение 110 лет до следующего пароксизма периодически, от извержения к извержению, заполнялся экструзивными куполами. При пароксизме вулкана в 1964 г. были снесены купола Центральный и Суелыч, образованные соответственно в 1879-1883 и 1946–1949 годах [24].

12 ноября 1964 г. в 7 ч 04 мин над вулканом на высоту в 15 км поднялась эруптивная колонна. Быстро увеличивающееся в размерах пепловое облако стало распространяться в сторону Тихого океана. Через полтора часа закрывшая небосвод туча погрузила во тьму город Усть-Камчатск в 100 км от центра извержения. Пеплопад продолжался полтора часа, на 1 м² площади выпало 28 кг холодного пепла. В привершинной части вулкана обвалились купола Суелыч, Центральный и другие. На их месте образовался сдвоенный кратер диаметром 1,7-2 км с крутыми стенками высотой до 600 м. Объем удаленной части постройки составлял 1,154 км³. У южного подножия вулкана грубо-обломочные отложения обвала образовали покров на площади 98 км² с характерным холмистым рельефом. В его резервентной массе были обнаружены смерзшееся глыбы и куски льда, остатки разрушенного ледника, что указывало на то, что материал отложился на снег в холодном состоянии и это исключило образование лахаров в обширной зоне его распространения [16]. На заключительной стадии извержения с 7 ч 47 мин до 8 ч 17 мин на склонах на-

блюдалось движение раскаленной массы пирокластических потоков и по руслам рек сошли лахары. По объему ювенильной пирокластики ($0,8 \text{ км}^3$) это извержение относится к сильнейшим историческим извержениям плинианского типа на Камчатке [5].

После мощного пароксизма 1964 г. в активности вулкана последовал шестнадцатилетний перерыв [19]. Возобновление вулканической активности началось в августе 1980 г. Последовавший умеренный эндогенный тип роста купола продолжался 21 год, что сопровождалось слабыми эксплозивными извержениями. Во время одной из таких эксплозий со сходом пирокластического потока 22 апреля 1993 г. произошло локальное образование лахара по реке Каменской.

Режим вулканической деятельности изменился после мощного извержения 19-20 мая 2001 г., завершившегося сходом значительных пирокластических потоков и лахаров. С этого времени Молодой Шивелуч вступил в агрессивную, экзогенную фазу извержений, которая наблюдается в настоящее время [36]. Быстрый рост экструзивных куполов стал сопровождаться появлением структур расщепления и глыбовых панцирей, покрывающих поверхность раскаленного пластичного ядра ранее образованного купола. Крупная структура расщепления, образовавшаяся при извержении 2001 г. в его западной части, прослеживается также в центральном и северном секторах. С нею связано появление на юго-западном склоне первого глыбового панциря. Появившись впервые, глыбовые панцири продолжают формироваться на экструзивном куполе при поступлении новых порций лавы. К началу 2005 г. высота нового конуса вулкана достигла 517 м, а максимальный объем составил 360 млн м^3 . На его вершине образовалась лавовая корона толщиной 39-40 м. Под силой тяжести короны верхняя часть купола теряет пластичность и остывающая кора, раскалываясь на глыбы, оползает к подошве конуса. Обнажение раскаленного ядра в процессе роста нового конуса обуславливает современную активизацию вулканической деятельности.

Сильные извержения плинианского типа, подобных которым не было при эндогенном типе роста конуса Молодого Шивелуча, произошли на экзогенном этапе его формирования в 2004, 2005 и 2010 гг.

27 февраля 2005 г. были разрушены северо-западная и западная части купола, его объем уменьшился на $0,04 \text{ км}^3$, а высота — на 136 м. Объем пирокластических отложений составил $0,16 \text{ км}^3$. Лахары сошли по рекам Байдарная, Каменская и Сухой Бекеш [27]. При последующем мощном взрыве вулкана 22 октября 2010 г. разрушилась значительная часть постройки с



Рис. 4. Извержение со сходом пирокластического потока на Шивелуче. Фото Ю.В. Демянчука, 3 декабря 2013 г.

юго-восточной стороны, и образовался глубокий врез — шарра размером $2,5 \times 1,1 \text{ км}$. Объем обрушения составил $0,27 \text{ км}^3$, что в 7 раз больше, чем в 2005 году. Отложения пепла массой в 7,8 млн т покрыли площадь 2 тыс. кв. км. Пирокластический поток прошел по южному сектору вулкана и заполнил верховья р. Кабеку. Объем его отложений составил $0,02 \text{ км}^3$, что в 8 раз меньше, чем в 2005 г. Образования лахаров не наблюдалось [18].

В 2012-2013 гг. при образовании структур расщепления на экструзивном куполе Молодого Шивелуча наблюдались слабые и умеренные извержения пирокластических потоков. На снимках июля — августа 2012 г. идентифицируется вывал, образовавшийся ранее в средней части купола при

опрокидывании глыб затвердевшего панциря [36]. Очевидно, этот экзогенный процесс смог спровоцировать сход малообъемного пирокластического потока и лахара по реке Сухой Бекеш в апреле 2012 г., отложения которых мы изучали в августе этого же года в ее долине.

В 2013 г. Молодой Шивелуч извергался 2 февраля, 26 июня, 26 июля. Развитие извержения 26 июля наблюдалось вулканологами в 13 км от кратера [13]. В течение двух-трех минут произошло два выброса — вертикальный и наклонный на высоту 8-9 км. Облако эруптивной колонны распространилось на 11 км от центра извержения и по ее краям появились молнии. В верховьях реки Байдарной сошел малообъемный пирокластический поток



Рис. 5. Следы схода пирокластического потока. Фото Ю.В. Демянчука, 7 декабря 2013 г.

длиной в 6 км. Его отложенный материал состоял из раскристаллизованных обломков экструзивных лав, погруженных в пылеватый заполнитель, обильно насыщенный газом. Свойство сыпучести пирокластических отложений объясняет «... присутствие стекла, которое настолько слабо цементирует кристаллы, что даже при слабом прикосновении горячий заполнитель приобретает подвижность» [13]. Умеренное извержение со сходом пирокластического потока 3 декабря 2013 г. изучалось Ю.В. Демянчуком (рис. 4, 5). В 2013 году схода лахаров отмечено не было.

Современный период роста Молодого Шивелуча характеризуется высокой скоростью поступления на поверхность экструзивных лав, что сопровождается частыми сериями пепловых выбросов, образованием раскаленных каменных лавин и пирокластических потоков. Рассмотрение событий вулканической деятельности Молодого Шивелуча показало, что пирокластические потоки образуются при всех типах извержений, характерных для андезитовых вулканов. Аналогичная тенденция наблюдается и на андезитовом вулкане Кизимен, который извергается с 2010 г. по настоящее время. «Необычно, что пирокластические потоки образуются даже при слабых взрывах» [2].

Анализ характера извержений Молодого Шивелуча за время с 1854 г. по 30 января 2014 г. приводит к выводу о ведущей роли эндогенного фактора в формировании лахаров, которым являются пирокластические потоки на андезитовых вулканах. Обоснованием данному заключению являются фактические наблюдения, фиксирующие сход лахаров непосредственно после извержения пирокластических потоков на завершающем этапе эруптивной деятельности.

Пирокластические потоки как триггерный механизм зарождения нивальных лахаров

Пирокластический поток является сложным вулканогенным образованием, в единой системе которого происходит ярусная дифференциация фракционного состава изверженного материала. Более крупная часть его фракции потоками стекает со склонов в сопровождении летучих частиц пирокластической газопепловой облаков и шлейфов приземных волн (см. рис. 4). Такой тип извержений представляет собой скоростной высокоэнергетический процесс с охватом за короткое время значительной части постройки вулкана и воздушного пространства над ним. С его мощной тепловой энергией связан феномен зарождения лахаров нивально-вулканического генезиса, который заключается в одновременном образовании как твердой (рас-

каленный агломерат в долинах рек), так и жидкой (интенсивное стокообразование в результате таяния снега на склонах) составляющих грязекаменной массы нивальных лахаров.

Механизм формирования грязекаменной массы лахаров

За период вулканической активности Молодого Шивелуча в 1964–2013 годах во всех известных случаях формированию лахаров предшествовало извержение пирокластических потоков. Образование агломерата разноразмерных частиц раскаленной пирокластической из первозданного вещества андезитовой магмы происходит в результате расширения и мощного выброса ювенильного водяного пара, заполняющего более 35% пор в ее объеме под давлением, в десятки раз превышающем литостатическое. После снятия внешнего давления скорость распространения волны разрушения в магматическом веществе с температурой 1000 °C составляет от 100 до 200 м/с [3]. Таким образом, из андезитовой магмы образуется раздробленный и распыленный материал пирокластических потоков, сыпучие отложения которых служат основой для формирования грязекаменной массы лахаров.

С. Арамаки выделяет два механизма образования пирокластических потоков [1].

1. Суффриерский тип — коллапс эруптивной колонны в случае, когда несущая способность газопепловой струи минимальна. В составе ПП первого типа до 80% занимают ювенильные пористые андезиты в виде песка, пепла и гравия, объемным весом 1,47 г/см³ [8]. Отложения несортированы, в заполнителе частицы более 2 мм составляют до 30–40%, Глыбы резургентного материала достигают 1,5 м. Поверхность потоков ровная, длина достигает 10–25 км.

2. Тип Мерапи — коллапс экструзивного купола, блоки которого в процессе роста становятся неустойчивыми. ПП второго типа имеют пеплово-глыбовый состав. Отложения несортированы, 40–50% обломков, достигающих 7–10 м. Количество ювенильного вещества 20–30%. Длина потоков до 10 км, на поверхности выражены боковые и фронтальные валы высотой 10–15 м.

Распределение массы пирокластических отложений зависит от соотношения между твердыми частицами и газом в изверженном материале. При максимальном превышении 25/1 массы частиц над содержанием газа, 80% их количества отлагается в пределах вулканической постройки. При соотношении 10/1, на поверхности остается 1/3 изверженного материала. Его значительная часть выносится в воздушное пространство [3].

Изверженный агломерат пирокластических потоков приобретает свой-

ства высокой подвижности и способности, подобно жидкости, перемещаться по склону под действием сил гравитации [22]. Движущая сила ПП объясняется высокой насыщенностью ювенильными газами, автоэксплозивностью изверженного материала, обусловленной выделением растворенного газа из стекловидных частиц, нагреванием и расширением воздуха, захваченного в процессе движения. Лавина, состоящая из суспензии газов и твердого ювенильного и резургентного материала, устремляется к подножью вулкана, выравнивая поверхность склонов и заполняя долины рек. Первично раскаленный до 1000 °C агломерат остывает к завершающей фазе его аккумуляции до 600 °C. На его пути сгорают леса, испаряются снега, лед, вода в реках и озерах, и остаются безводные, подобно пустыне, песчаные пространства.

По данным наблюдений высокая температура поверхности отложений сохраняется несколько дней, а на глубине отложения остаются перегретыми и обезвоженными в течение многих лет. Через 4 дня после извержения в ноябре 1964 г. поверхность пирокластического потока представляла собой «нагретую массу с погруженными в нее глыбами и температурой порядка 200 °C на поверхности» (сообщение Ю. Дубика). Даже по прошествии нескольких месяцев поверхность ПП оставалась нагретой до 25 °C. После остановки потока из глубины агломератов толщи поднимаются возгоны множества вторичных фумарол, приуроченных к погребенной речной сети и скоплениям глыб ювенильного андезита.

После извержения 19 мая 2001 г. над долиной реки Байдарной наблюдалась сплошная стена паровых выбросов в краевой зоне контактов склоновых потоков снеготаяния с отложениями пирокластического потока на дне долины (рис. 6). Измерения, сделанные через месяц после пароксизмального извержения Шивелуча 27 февраля 2005 г., показали, что температура отложений на глубине 21 см составляла 67 °C и увеличивалась до 402 °C на глубине 167 см [27]. Трансформация первично раскаленной и сохраняющей высокую температуру в течение многих лет пирокластической жидкой грязекаменной массу осуществляется многократно и только в результате внешнего воздействия водного стока, охлаждающего и размывающего ее отложения (рис. 7). Непрерывно возобновляясь от извержения к извержению, пирокластические отложения образуют неисчерпаемые запасы твердого материала, предоставляя нелимитированные возможности для формирования лахаров, селевых и других метеорологически обусловленных грязевых потоков в районах активной вулканической деятельности.

Механизм формирования водного импульса лахаров

Ведущая роль в формировании водного стока лахаров принадлежит приземным пирокластическим волнам — неотъемлемой субстанции в системе пирокластических потоков.

Пирокластические волны (ПВ, *ground surge*) — термин, введенный Р. Спарксом и Г. Уолкером в 1957 г. ПВ образуются при обрушении экструзивных куполов и краевых частей эруптивной колонны и по времени опережают пирокластический поток, формирующийся при коллапсе ее центральной части [40]. Р. Фишером выделяется также тип пирокластических волн пепловых облаков, возникающий в процессе гравитационной дифференциации при движении пирокластических потоков по склону (ПВПО, *ash cloud surge*) [8]. Пирокластические волны представляют собой суспензионные потоки, слабонасыщенные обломочным материалом, частицы которого перемещаются турбулентно под влиянием сил гравитации. Скорости распространения приземных волн менее 300 м/с, температура — менее 300 °К у влажных волн и не более 1000 °К у сухих волн. Соотношение твердой составляющей к газу составляет от 5/1 и более, размер частиц редко превышает несколько сантиметров. Важными чертами пирокластических волн является отложение материала на большой площади [3].

Катастрофическим проявлением ПВ являются так называемые «палящие тучи». Не выделяя в отдельный тип, но подчеркивая их различия, Г.С. Горшков и Г.С. Богоявленская писали, что тучи, поднимающиеся над раскаленными лавинами, сколь они ни эффективны, имеют низкую температуру и не могут ничего опалить [15].

По нашему мнению, для образования водной составляющей лахаров необходима именно «низкая» температура пирокластических волн, способная растопить, а не «опалить» снег, превращая его в пар. Именно поэтому тепловое воздействие приземных волн на окружающие заснеженные склоны, не затронутые высокотемпературным наземным потоком, приводит к формированию значительных объемов водного стока, достигающего дна долин, заполненных перед этим раскаленными отложениями.

В имеющейся информации о пирокластических волнах содержатся данные о распространении, структуре и вещественном составе летучих частиц, позволяющие отличить их от наземной фракции ПП. По структуре ПВ представляют отсортированные средне- и мелкозернистые пески с небольшим количеством обломков. Залегают они в основании ПП и его обрамлении. Пирокластические волны имеют структуру монолитного облика или слоистую. За-



Рис. 6. Фреатические взрывы, происходящие в отложениях пирокластического потока под воздействием талых вод. Фото Ю.В. Демянчука, 2004 г.

легают в виде пятен и заплесков по бортам долин, а также в виде дюнного рельефа и протяженных покровов. По сведениям об отложениях приземных волн на юго-западном склоне вулкана Безымянный при извержении 11 января 2005 г. шлейф их распространения в 20 раз превышал площадь агломерата ПП [9]. Во время пароксизмального извержения 9 мая 2004 г. в результате обрушения краевых частей эруптивной колонны отмечалось формирование пирокластических волн пепловых облаков [10]. Газонасыщенность отложений пирокластических волн была в 2 раза выше, чем у наземного потока.

Значения плотности ПП составляли 1,63–1,77 г/см³, в то время как у ПВ находились в пределах 0,71–0,91 г/см³. Частиц диаметром менее 2 мм в заполнителе отложений ПП содержалось до 70–80%, в ПВ — до 90–95%. Превалирующая фракция заполнителя ПП — от 0,5–1,0 мм, ПВ — от 0,125–0,25 мм. Детальное изучение отложений пирокластических потоков и волн крупнейших извержений последних лет, эксплозивно-экструзивного 2005 г. со сходом лахаров и преимущественно экструзивного в 2010 г., без схода, показало различие в их составе [21]. Тонкозернистых (0,064–0,125 мм)



Рис. 7. Размытые отложения пирокластического потока 2010 г. Фото И.Б. Сейновой, 7 августа 2013 г.

и мелких (0,125-0,25 мм) фракций в заполнителе волн в 2010 г. содержалось до 73%, а крупнозернистая фракция не превышала 1%. В составе среднезернистого заполнителя волн 2005 г. крупных частиц более 1 мм содержалось порядка 27%, что говорит о значительном в сравнении с 2010 г. энергетическом потенциале проявления ПВ, как одним из факторов лахарообразования.

Ярусность структуры изверженного вещества в пирокластическом потоке определяет феноменальную особенность триггерного механизма нивальных лахаров, отличающую их от всех других генетических типов селей. Ее уникальность заключается в мощном энергетическом потенциале стартовой фазы процесса, обусловленной взаимодействием противоположных по своей физической сути стихий воды и огня. Процесс зарождения лахаров сразу после схода пирокластических потоков сопровождается сериями мощных парогазовых выбросов или фреатических взрывов. Взрывы возникают на контактах отложившегося в долинах рек слоя раскаленного пирокластического потока с потоками талых вод со склонов, захваченных шлейфом приземных волн, способных растопить залегающий на них снежный покров. Энергия фреатических взрывов ведет к его разрыхлению и охлаждению, подготавливая, таким образом, к трансформации в грязекаменную консистенцию лахаров. В местах взрывов по линии контактов образуется линейная цепочка воронок, где после бурного этапа испарения происходит концентрация талого стока, ведущая к его накоплению и сбросу. Обозначенные выше энергетические предпосылки приводят к лавинообразному процессу размыва отложений, охлажденных по краевой зоне нарушения их сплошности, что в конечном счете, является заключительной фазой триггерного механизма образования нивальных лахаров.

Хроника известных событий сходов лахаров при извержениях Молодого Шивелуча в современный и исторический периоды времени

Изучением древних извержений и лахаров Шивелуча занимались И.В. Мелекесцев [24] и А.Б. Белоусов [37]. Отложения лахаров, связанные с установленными датами мощных извержений, были выделены на южном склоне вулкана, наиболее мощные их слои возрастом 10 тыс. лет сохранились в долинах рек Байдарная и Каменская. В 14 км от кратера в разрезах по долине р. Кабеку отмечены трехметровые толщи лахаров возрастом 5700 и 3700 лет. В 20 км от кратера по р. Каменской были найдены отложения лахара мощностью от 3 до 10 м, сошедшего 1600 лет назад. В 970 году при плинианском типе извержения с обвалом постройки,

аналогичном 1964 году, следы сошедшего лахара обнаружены на расстоянии в 16 км. Крупнейшим событием являлось извержение 1030 года. На севере и на юге, во всех секторах стратовулкана представлены мощные слои андезитовой тефры общим объемом 5–6 км³. По долинам рек Байдарная и Каменская выклиниваются отложения мощных пирокластических потоков.

При гигантском взрыве в 1430 г. произошел самый большой в голоцене обвал постройки Малого Шивелуча. Его отложения сохранились в долинах рек Байдарная и Каменская в 20 км от эпицентра. Объем обвала достигал 3 км³. Разнос тефры обнаружен как в юго-восточном (Кабеку), так и в западном секторах вулкана (Карина, Мутный). Во время извержения лахары сходили одновременно по всем рекам южного сектора вулкана; по Каменской — на расстояние в 19 км от кратера, по Кабеку — на 14,5 км. А.Б. Белоусов предполагал, что гранью распространения древних лахаров является группа холмов на расстоянии в 20 км от кратера. Судя по основному направлению распространения этих отложений, лахары доходили до реки Камчатка, что составляет 35 км.

Сведения об условиях схода лахаров во время сильнейших исторических извержений 1854 и 1964 годов устанавливались по данным о характере и последствиях вулканической деятельности в эти годы. При извержении в марте 1854 г. вскрылся ледостав на реке Камчатке, был снесен лес в южном секторе вулкана, а на севере потоки доходили до р. Еловки [24]. Такие явления весьма вероятны в случае катастрофического таяния снежного покрова под воздействием палящей тучи. Распространившаяся за пределы арены извержения волна горячей суспензии газов и пирокластических частиц вызвала сход лахаров на севере, по ледниковым притокам р. Еловки. При извержении пирокластических потоков мощные лахары сошли по рекам южного сектора вулкана, Байдарной, Кабеку и др., сломав ледостав и спровоцировав паводок на реке Камчатке.

О проявлении лахаров после пароксизма 1854 г. свидетельствует значительно более развитая, чем в настоящее время, речная сеть в сравнении с абрисами карт топографических съемок южного сектора до и после катаклизма 1964 г. Типичные для этого времени события с образованием потоков пирокластических и раскаленными тучами, отмечались в 1928-1930 гг. и в 1948-1950 гг. в процессе формирования куполов в кратере Молодого Шивелуча [31].

Сильнейшее извержение с обвалом постройки вулкана повторилось через 110 лет, 12 ноября 1964 г. Это привело к значительным изменениям в орографическом строении южного сектора вулкана, повлиявшим на условия фор-

мирования лахаров. У южного подножья Молодого Шивелуча на площади в 98 км² образовался покров резургентного материала объемом 1,5 км³. Под обвальными отложениями были погребены русла рек в центральной части южного сектора вулкана и частично притоки в верховьях Каменской и Кабеку. На заключительной фазе извержения 1964 г. потоки раскаленной пирокластической растекались по понижениям рельефа и речным долинам, обрамляющим зону обвального массива. Площадь отложений составила 50 км², протяженность — 15 км, объем — 0,3 км³, мощность — до 40 м. Мощность отложений лахаров, установленная по следам в долинах рек Байдарная и Каменская на расстоянии в 12 км от вулкана, составляла порядка 10 м [5, 37]. После обвала и до настоящего времени пирокластические потоки перидрически заполняют краевые долины рек подверженного вулканическому воздействию южного сектора вулкана, вызывая сход лахаров по Байдарной, Каменской и Кабеку.

Мощный пароксизм вулкана 1964 г. вызвал также сход лахаров за пределами зоны извержения. На схеме Б.И. Пийпа обозначен грязевой поток длиной в 5 км в западном секторе вулкана [30]. По данным А.Б. и М.Г. Белоусовых, в этом же секторе лахары сходили в долинах рек Мутная и Громовская. Это могло произойти в результате воздействия на снежный покров волн приземной пирокластической, распространившихся за пределы активной зоны извержения, что отмечалось и ранее, при взрыве вулкана в 1854 г.

В книге К.Н. Рудича, исследовавшего пирокластические отложения и следы лахаров в южном секторе через несколько дней после извержения, приводится следующее описание: «Когда началось извержение, на склоны вулкана выпадали раскаленные частицы вулканического материала. Снег интенсивно таял, и водные потоки устремились вниз, увлекая с собой обломки лав, пепел, песок, создавая мощные грязевые потоки. Одним из таких потоков уничтожена щирокая полоса леса. Река с мощным водным потоком тоже была уничтожена и засыпана горячими вулканическими обломками, русло ее стало сухим. Деревья, находящиеся на большом расстоянии от места извержения, были умерщвлены пеплом» [31]. К.Н. Рудич приводит фотографию русла реки, «засыпанного раскаленными обломками», не указав ее названия. Там же приведена фотография «грязевого потока, проложившего себе путь по лесу». Очевидно, это верховья рек Каменская и Кабеку. Участок вековых лиственниц, «погубленных пеплом», находится в зоне современной аккумуляции отложений лахаров по реке Кабеку, на расстоянии 20 км от кратера и в 2 км ниже автодо-

рожного моста. Предположительно гибель векового леса произошла во время извержения 1964 г. в результате одноактного повреждения и подтопления корней деревьев плотной грязекаменной массой лахара. Факт схода лахара по р. Кабеку в тот год подтверждается также дендрохронологическим датированием, которое проводилось нами в 2012 г.

С августа 1980 г. в пределах кальдеры начался новый этап роста экстрезивных куполов. Во время извержения в январе 1981 г. образовались раскаленные обломочные лавины, которые вызвали грязевые потоки на склонах вулкана объемом до 800–900 м³ [19]. Первое крупное эксплозивное извержение вулкана произошло почти через 30 лет после катаклизма 1964 г. 22 апреля 1993 г. Пепловые эксплозии поднимались на высоту 16–18 км, протяженность пирокластических потоков составила 5–8 км и грязевых потоков (лахаров) — 28 км от купола [10]. Сотрудники Камчатской вулканологической станции Ю.В. Демянчук, Н.А. Жаринов и С.А. Хубуная, проводившие наблюдения за кратером вулкана, стали очевидцами зарождения и схода лахара по реке Каменской. В описании свидетелей этого редкого случая содержатся непосредственно зафиксированные фактические данные, которые приводятся ниже. Проводивший у подножья купола фототеодолитную съемку Ю.В. Демянчук заметил, что на куполе открылась трещина и пошел пар. Сначала извержение развивалось медленно, и первый пирокластический поток прошел всего 2 км. Затем на куполе последовал мощный взрыв. А через полчаса по заснеженному руслу реки Каменской, где ранее находился лагерь, прошел грязевой поток. «Его высота была 2 метра, в 18 км от вулкана он срезал деревья и нес огромные валуны. А всего прошел 25 км» [26]. По данным фактических наблюдений скорость потока была порядка 10 м/с, что находится на уровне максимальных скоростей обычных грязекаменных селей. Лохары прошли также по рекам Байдарная и Кабеку. Общая площадь их отложений составляла 50 км², объем — 15 млн м³ (<http://www.kscnet.ru/ivs/volcanoes/shvel.html>).

Умеренные и слабые экстрезивные извержения вулкана наблюдались с января 2000 г. по конец марта 2002 г. Пирокластические потоки прошли 19 мая 2001 г. по долине р. Байдарной на расстоянии 18 км. «Поверхность потока напоминала «пляж», состоящий из галек андезитовой пемзы с включением обугленных остатков деревьев и 3-метровыми обломками постройки. Крупные обломки были горячими, а на поверхности отложений наблюдались парящие площадки. Со дна долины в течение года продолжал подниматься пар вторичных fumarol». Лохары про-

шли по руслам рек Байдарная, Каменская и Кабеку на расстояние до 30 км от кратера. По результатам обследований, проведенных на выходе из каньона Байдарной, ширина лахара в 13 километрах от купола достигала 200 м при мощности 4–6 м, с заплесками до 10 м. В 18 км от купола мощность лахара составляла 2 м с заплесками до 3–4 м. В лесу образовались многочисленные завалы деревьев. Лохарами на несколько месяцев была повреждена дорожная трасса от пос. Ключи до Усть-Камчатска и дороги к лесозаготовительным пунктам. Грязевым потоком была смыта дамба через р. Кабеку (<http://www.kscnet.ru/ivs/volcanoes/shvel.html>) [33].

Эксплозивное извержение Молодого Шивелуча со сходом лахара по Кабеку произошло 9–10 мая 2004 года. По масштабам проявления оно было умеренным: объем выброшенного пирокластического материала (0,06 км³) уступал пароксизму 1964 г. более чем на порядок. Активная фаза извержения происходила с 13:30 до 18:30. Плотный шлейф пепла протянулся на 500 км и достиг о. Беринга. Спустя 2 часа (в 22:14) после второй фазы усиления активности (в 20:00) в юго-восточном секторе вулкана был отмечен фронт пирокластического потока, прошедшего расстояние 15 км от купола. Образовавшимся в результате таяния снежного покрова грязекаменными потоками было размыто полотно дороги между поселками Ключи и Усть-Камчатск [10].

27 февраля 2005 года произошло сильнейшее пароксизмальное извержение на Шивелуче [27]. 22 сентября извержение повторилось, но было на порядок меньше, чем в феврале. «Масштаб февральского события поражающе воображение: блоки пород размером до 8 м, перенесенные на 25 км от вулкана, навалы деревьев высотой 2–3 м по пе-

риметру языков потоков, обломанные на разных высотах деревья в 20 км от вулкана и т.п.». Объем продуктов извержения составил 0,2 км³, протяженность ПП — 28 км, площадь покрытия — 21 км². Пирокластические потоки и лахары прошли по долинам рек Байдарная, Каменская и Сухой Бекеш. Долина Байдарной была полностью заполнена сорокаметровым слоем раскаленного агломерата. В процессе формирования лахара размывание высокотемпературных, газонасыщенных отложений непрерывно сопровождалось фреатическими взрывами. Через два месяца после извержения (3–5 мая) фреатические взрывы, вызванные паводком весеннего снеготаяния в ее долине, продолжались [19]. Измерения температуры в июле показали наибольшее значение (420°) на глубине 4 м в борту реки Байдарной. Русло реки, промытое лахаром и потоками снеготаяния в образованиях февральского извержения, вновь было заполнено пирокластическим потоком 22 сентября. Во время сентябрьского извержения образования лахара не произошло из-за отсутствия снежного покрова.

В 2007 году, так же как в сентябре 2005 г., лахаров не было в связи с отсутствием при извержениях в летний сезон года необходимого для их образования водного стока в долинах сухих рек. 17 февраля 2008 г. был зафиксирован сход нескольких грязевых потоков в русле Байдарной.

При крупном извержении 22 октября 2010 г., сопровождавшемся обрушением значительной части постройки Шивелуча, лахар не сформировался. Обследованиями, которые проводились сразу же после схода пирокластического потока, установлено, что его отложениями была заполнена долина р. Кабеку на протяжении 6 км. Над ней стлалась сплошная пелена про-



Рис. 8. Испарение водного стока на отложениях пирокластического потока 2010 года. Фото Ю.В. Демянчука, октябрь 2010 г.



Рис. 9. Эрозионный врез в верховьях р. Сухой Бекеш. Фото С.С. Черноморца, 7 августа 2013 г.

ра. Шло интенсивное испарение и вскипание воды в мелких лужицах на поверхности раскаленной толщи (рис. 8). Схода лахара не произошло из-за недостатка водного стока в связи с отсутствием снежного покрова на окружающих склонах.

Альтернативой этой ситуации явилось событие схода лахара в этой же долине 19 апреля 2012 г. Эксплозивные выбросы на Шивелуче начались 17 апреля, а 19 апреля произошло слабое извержение со сходом пирокластического потока по руслу р. Сухой Бекеш до высоты 900 м. При зарождении лахара образовался узкий каньон глубиной до 12 м (рис. 9). Накопление грязекаменной массы лахара происходило в результате интенсивной эрозии многослойной толщи от-

ложений прошлых пирокластических потоков и обвалов.

Процесс образования лахара протекал в пределах днища долины. Разгрузка крупноглыбовой фракции началась после глубокого вреза в древний пирокластический чехол, так называемых пирокластических ворот (рис. 10). В среднем течении долины на уклонах от 5 до 3° потери крупной фракции восполнялись мелкообломочным материалом. Последующее отложение мелкой фракции, в основе состоящей из вулканического песка, происходило на уклонах от 3 до 0°. Ниже впадения р. Сухой Бекеш в р. Кабеку русло долины шириной до 200 м оказалась заполнено равномерной серой толщей, перекрывшей снежный покров и наледи слоем до 1 м (рис. 11).



Рис. 10. Крупноглыбовые отложения лахара 19 апреля 2012 г. в верховьях долины р. Сухой Бекеш. Фото И.Б. Сейновой, 18 августа 2012 г.

Практически весь объем твердой составляющей отложился в руслах Сухого Бекеша и Кабеку выше автодорожного моста. Нивальный лахар прошел путь в 20 км, что характеризует его масштабы как обычные. Согласно результатам глазомерной съемки с измерением поперечных профилей объем отложений в зоне аккумуляции составил не менее 500 тыс. м³. По результатам моделирования объем лахара в целом достигал почти 1 млн м³. На пути лахара построенный несколько лет назад автодорожный мост явился преградой, которая подпрудила и изменила направление его течения. Уровень подпора достиг высоты насыпи автодорожного полотна, и грязевые волны на протяжении трех километров заблокировали дорогу от п. Ключи до Усть-Камчатска.

Роль снежного покрова в формировании нивальных лахаров

За период наблюдений с 1964 по 2013 г. было отмечено 8 случаев лахаров при извержении Молодого Шивелуча: 12 ноября 1964 г., 22 апреля 1993 г., 19-22 мая 2001 г., 9-10 мая 2004 г., 27 февраля 2005 г., 17 февраля 2008 г., 19 апреля 2012 г. и 4 декабря 2013 г. Из них в 4 случаях формирование лахаров происходило во время весеннего снеготаяния, 3 случая было в зимний период и один — осенью. Согласно этим данным лахароопасный период на вулкане может продолжаться при устойчивом снежном покрове в течение 7 месяцев, с ноября по май включительно.

Снежный покров играет роль потенциального массива водной составляющей нивальных лахаров. К весеннему сезону накапливаются его максимальные запасы. При наложении на волну снеготаяния талого стока за счет вулканического тепла значительно возрастает энергия эрозионных процессов, что приводит к зарождению особо крупных лахаров нивального генезиса. Ярким свидетельством тому является событие образования на Камчатке грандиозного лахара при взрыве андезитового вулкана Безымянный 30 марта 1956 г. «Если бы катаклизм подобной мощи произошел где-нибудь в Средиземноморье, Японии или Индонезии, количество жертв исчислялось бы сотнями тысяч» [32]. Экстремальный лахар образовался при одновременном сочетании вулканических и климатических факторов на уровне их максимально возможного проявления. Его образующим водным импульсом явилось единовременное таяние снежного покрова на площади 500 км² под воздействием палящей тучи в сезон максимального снегонакопления.

Запасы снеготаяния являются значимым предиктором лахарообразования наряду с вулканическими факторами.

Только в результате их симбиоза возникает феномен зарождения нивальных лахаров, что необходимо учитывать при оценке и прогнозировании селевой опасности.

Заключение

Современный период роста нового купола Молодого Шивелуча (рис.12) характеризуется высокой скоростью поступления на поверхность экструзивных лав. Тенденция прогрессирующего этапа вулканической деятельности ведет к увеличению частоты извержений пирокластических потоков, вызывающих сход лахаров. Анализ реальных событий вулканической деятельности за исторический период времени показал, что ПП образуются при всех типах извержений, характерных для андезитовых вулканов. Извержение пирокластического потока представляет собой скоростной высокоэнергетичный процесс с охватом за короткое время значительной части постройки вулкана и воздушного пространства над ним. С его мощной энергией связано формирование лахаров нивального генезиса, что заключается в одновременном образовании твердой (раскаленный агломерат в долинах рек) и жидкой (интенсивное стокообразование при таянии снежного покрова) составляющих грязекаменной массы.

В статье впервые рассматривается эндогенный феномен зарождения селевых потоков на фазе перехода от вулканических процессов к гидрологическим, провоцируемый энергией парогазовых взрывов при контактах раскаленных отложений пирокластических потоков с водным стоком.

Установлены критериальные условия, предопределяющие сход лахаров:

- характерный для андезитовых вулканов эксплозивно-экструзивный тип извержений пирокластических потоков, при котором происходит одновременное образование твердой и жидкой составляющих грязекаменной массы лахаров;
- наличие значительных запасов снежного покрова, лимитирующее временные периоды образования лахаров.

Несмотря на активизацию лахаров вследствие прогрессирующего этапа современной вулканической деятельности, их сход в обозримое время, как и в прошлом, будет оставаться безопасным для ближайших поселков



Рис. 11. Песчаные отложения лахара в русле р. Кабеку, размытые потоками весеннего снеготаяния 2012 г. Фото И.Б. Сейновой, 15 августа 2012 г.

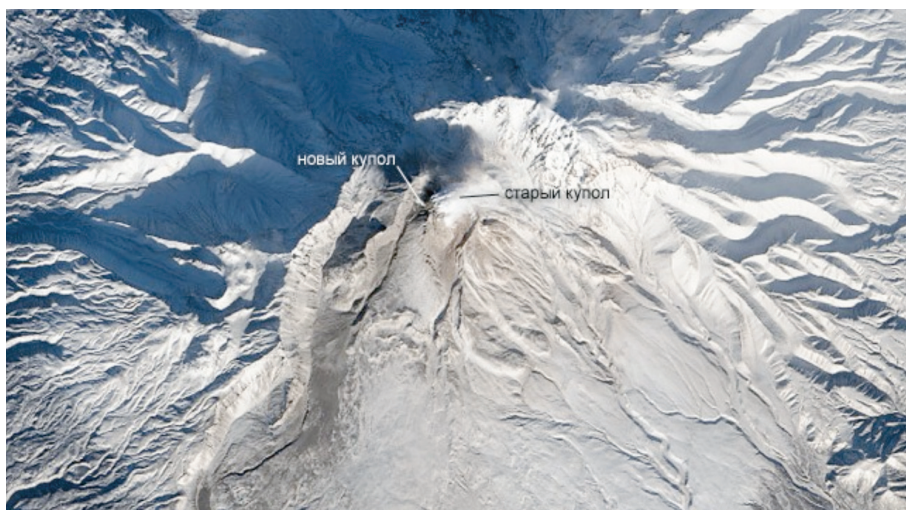


Рис.12. Формирование нового купола Молодого Шивелуча. Снимок со спутника LANDSAT 31 января 2014 г. NASA

Усть-Камчатск и Ключи. Воздействию разрушительных потоков будут подвергаться транспортные магистрали в период схода лахаров.

Благодарности

Авторы выражают благодарности старшему научному сотруднику Камчатской вулканологической станции к.т.н. Н.А. Жаринову за научные консультации, ценные советы и поддержку при проведении полевых работ, сотрудникам Института вулканологии и

сейсмологии ДВО РАН к.г.-м.н. О.А. Гириной, д.г.-м.н. И.В. Мелекесцеву, к.г.н. Я.Д. Муравьеву, к.г.н. Д.В. Мельникову, сотруднику Высокогорного геофизического института к.г.н. М.Д. Докукину за ценные научные консультации, космонавтам С.Н. Рязанскому и Ф.Н. Юрчихину за предоставленную возможность использования в статье фотографий с МКС, К.И. Одинцову за помощь в оформлении рукописи. Работы выполнены при финансовой поддержке РФФИ, проекты 14-05-00768 и 12-05-00391.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арамаки С. Пирокластические потоки и кальдеры Японии // Вулканизм островных дуг. М.: Наука, 1977. С. 164-172.
2. Арбугаева О.В. Изучение сейсмических сигналов, сопровождающих извержения пирокластических потоков на вулкане Кизимен, с целью выделения информативных параметров для их автоматической селекции // Исследования в области наук о Земле: материалы XI региональной молодежной научной конференции. 26 ноября 2013 г. Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2013. С. 125-140.
3. Артемьева Н., Белоусов А., Войт Б., Белоусова М. Численное моделирование направленного взрыва извержения вулкана Безымянного в 1956 г. // Материалы международного симпозиума «Проблемы эксплозивного вулканизма (к 50-летию катастрофического извержения вулкана Безымянный)», 25-30 марта 2006 г. Петропавловск-Камчатский, 2006. С. 58-62.

4. Белоусов А.Б., Войт Б., Белоусова М.Г. Извержение вулкана Безымянный в 1956 г. и сходные события в мире: последовательность эруптивных событий, отложения и механизм // Материалы международного симпозиума «Проблемы эксплозивного вулканизма (к 50-летию катастрофического извержения вулкана Безымянный)», 25-30 марта 2006 г. Петропавловск-Камчатский, 2006. С. 43-49.
5. Белоусов А.Б., Белоусова М.Г. Извержение Шивелуча в 1964 г. (Камчатка) —плинианское извержение, предварявшееся крупномасштабным обрушением постройки // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4-5. С. 116-126.
6. Богоявленская Г.Е. Вулкан Безымянный: новый эруптивный цикл — 50 лет активности // Вестник КРАУНЦ. Серия «Науки о Земле». 2006. № 1. Вып. 7. С. 10-13.
7. Вулкан Шивелуч. Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. URL: <http://www.kscnet.ru/ivs/volcanoes/shvel.html>.
8. Гирина О.А. Пирокластические отложения современных извержений андезитовых вулканов Камчатки и их инженерно-геологические особенности. Владивосток: Дальнаука, 1998, 174 с.
9. Гирина О.А., Горбач Н.В. Извержение вулкана Безымянный 11 января 2005 г. // Материалы международного симпозиума «Проблемы эксплозивного вулканизма (к 50-летию катастрофического извержения вулкана Безымянный)», Петропавловск-Камчатский, 25-30 марта 2006 г. Петропавловск-Камчатский, 2006. С. 85-94.
10. Гирина О.А., Ушаков С.В., Демянчук Ю.В. Пароксизмальное извержение вулкана Молодой Шивелуч, Камчатка, 9 мая 2004 г. // Вестник КРАУНЦ. Серия «Науки о Земле». 2007. № 2. Вып. № 9. С. 65-73.
11. Горбач Н.В. Старый Шивелуч: геологическое строение, реконструкция эруптивных центров и характер деятельности в позднем плейстоцене // Вестник КРАУНЦ. Серия «Науки о Земле». 2011. № 1. С. 77-90.
12. Горбач Н.В. Формирование экструзивного купола и состав продуктов извержения вулкана Шивелуч в 2004-2005 гг. // Материалы международного симпозиума «Проблемы эксплозивного вулканизма (к 50-летию катастрофического извержения вулкана Безымянный)», Петропавловск-Камчатский, 25-30 марта 2006 г. Петропавловск-Камчатский, 2006. С. 112-120.
13. Горбач Н.В., Плечова А.А., Пономарева В.В., Тембрал И.И. Эксплозивное извержение вулкана Шивелуч 26 июня 2013 г. // Вестник КРАУНЦ. Серия «Науки о Земле». 2013. № 2. Вып. № 22. С. 15-19.
14. Горшков Г.С. Извержение сопки Безымянной (предварительное сообщение) // Бюлл. Вулканологической станции. 1957. № 26. С. 19-72.
15. Горшков Г.С., Богоявленская Г.Е. Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения 1955—1956 гг. М.: Наука, 1965. 172 с.
16. Горшков Г.С., Дубик Ю.М. Направленный взрыв на вулкане Шивелуч // Вулканы и извержения. М.: Наука, 1969. С. 3-37.
17. Дитмар К., фон. Поездки и пребывание в Камчатке в 1851—1855 гг. Часть первая. Исторический отчет по путевым дневникам. СПб., 1901.
18. 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.
19. Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В. Рост экструзивного купола Шивелуч (Камчатка) в 1980-2007 гг. по геодезическим наблюдениям и видеосъемке. // Вулканология и сейсмология. 2008. № 4. С. 3-13.
20. Краевая Т.С., Мелекесцев И.В. Рыхлае отложения подножий молодых стратовулканов Камчатки и вопросы их генезиса // Вулканические фации Камчатки. М.: Наука, 1969. С. 35-56.
21. Курочкина Т.А. Особенности пирокластических пород современного извержения вулкана Шивелуч // Исследования в области наук о Земле: материалы XI региональной молодежной научной конференции. 26 ноября 2013 г. Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2013. С. 65-78.
22. Малеев Е.Ф. Агломератовые пирокластические потоки // Вулканические фации Камчатки. М.: Наука, 1969. С. 5-35.
23. Маневич А.Г., Гирина О.А., Малик Н.А. и др. Активность вулканов Камчатки и Северных Курил в 2005 г. // Материалы международного симпозиума «Проблемы эксплозивного вулканизма (к 50-летию катастрофического извержения вулкана Безымянный)», 25–30 марта 2006 г. Петропавловск-Камчатский, 2006. С. 76-86.
24. Мелекесцев И.В. Новейшие гигантские эксплозивно-обвальные лавины катастрофических извержений вулкана Шивелуч на Камчатке: детерминированность и возможные причины // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. С. 215-234.
25. Мелекесцев И.В., Вольнец О.Н., Ермаков В.А. и др. Вулкан Шивелуч // Действующие вулканы Камчатки. В 2 т. Т. 1. М.: Наука, 1991. С. 84–103.
26. Нечаев А. Камчатка. Царство вулканов. М.: Логата, 2008. 199 с.
27. Нурбаев А.А., Гирина О.А., Мельникова 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. 62-73.
28. Панов В.К. Экспериментальное моделирование процессов, происходящих при извержении типа «направленный взрыв» // Материалы международного симпозиума «Проблемы эксплозивного вулканизма (к 50-летию катастрофического извержения вулкана Безымянный)», 25–30 марта 2006 г. Петропавловск-Камчатский, 2006. С. 49–58.
29. Перов В.Ф. Селеведение: учебное пособие. М.: Географический факультет МГУ, 2012. 272 с.
30. Пийт Б. И., Мархинин Е. К. Гигантское извержение вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 г. (предварительное сообщение) // Бюлл. вулканол. ст. М., 1965. № 39. С. 28-34.
31. Рудич К.Н. Каменные факелы Камчатки. Новосибирск: Наука, 1978. 189 с.
32. Тазиев Г. На вулканах. М.: Мир. 1987. 263 с.
33. 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.
34. Фирсов П.П., Тристанов А.Б. Особенности процесса генерации волновых возмущений в атмосфере во время извержений пирокластических потоков и мощной эксплозивной деятельности андезитовых вулканов // Материалы конференции, посвященной дню вулканолога. 30-31 марта 2009 г. Петропавловск-Камчатский, 2010. С. 50-62.
35. Черноморец С.С., Сейнова И.Б. Селевые потоки на вулканах. М.: УНЦ ДО, 2010. 72 с.
36. Шевченко А.В., Свирид И.Ю. Геоморфологические особенности формирования современного купола вулкана Молодой Шивелуч // Исследования в области наук о Земле: материалы XI региональной молодежной научной конференции. 26 ноября 2013 г. Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2013. С. 45—58.
37. Belousov A., Belousova M., Voight B. Multiple edifice failures, debris avalanches and associated eruptions in Holocene history of Shiveluch volcano, Kamchatka, Russia // Bull. Volcanol. 1999. 61. P. 324-342.
38. Kemmerling G.L.L. De uitbarsting van den G. Keloet in den nacht van den 19^{den} op den 20^{sten} mei 1919. Weltevreden, Landsdrukkerij, 1921. 121 s.
39. Ponomareva V.V., Pevzner M.M., Melekestsev I.V. Large debris avalanches and associated eruptions in history of Shiveluch Volcano, Kamchatka, Russia // Bull. Volcanol., 1998. № 59. P. 490-505.
40. Sparks R.S.J., Walker G.P.L. The ground surge deposit — a third type of pyroclastic rock // Nature. Physical Science. 1973. V. 241. P. 62-64.
41. Thorarinsson S. Tefroknonologiska studier islan // Geografiska Annaler. 1944. No. 26. 217 p.