

**УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СЕЛЕВЫХ ПОТОКОВ
В РАЙОНАХ АКТИВНОГО ВУЛКАНИЗМА
(на примере вулканов Ключевской и Шивелуч, Камчатка). Часть 2**

И.Б. Сейнова, С.С. Черноморец*, О.В. Тутубалина*,
А.Ю. Баринов*, И.А. Соколов*****

* *Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, географический ф-т,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия, devdorak@gmail.com*

** *Университетский центр инженерной геодинамики и мониторинга, Москва, Россия*

*** *Институт географии РАН, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29, Россия*

В результате полевых исследований в 2008 г., анализа космических снимков и литературных материалов были выявлены особенности формирования вулканогенных селей (лахаров) при извержениях вулканов Ключевской и Шивелуч на Камчатке. В Части 2 реконструирована хронология вулканогенных селей на Шивелуче. Рассмотрено формирование водной составляющей селевых потоков на вулканах. Исследованы механизмы зарождения лахаров нивально-вулканического генезиса.

Сель, лахар, гляциально-вулканический механизм селеформирования, нивально-вулканический механизм селеформирования, Камчатка

**DEBRIS FLOW FORMATION IN AREAS OF ACTIVE VOLCANISM
(case study of Kluchevskoy and Shiveluch volcanoes, Kamchatka). Part 2**

I.B. Seynova, S.S. Chernomorets*, O.V. Tutubalina*, A.Y. Barinov*, I.A. Sokolov*****

* *M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography,
119991, Moscow, Leninskie Gory, 1, Russia, devdorak@gmail.com*

** *University Centre for Engineering Geodynamics and Monitoring, Moscow, Russia*

*** *Institute of Geography, RAS, 119017, Moscow, Staromonetny per., 29, Russia*

We considered features of the formation of volcanic debris flows (lahars) on the basis of our field research in 2008, interpretation of satellite images, and analysis of literature on volcanic eruptions of Kluchevskoy and Shiveluch volcanoes in Kamchatka Peninsula, Russia. In Part 2 we reconstructed the chronology of volcano-induced debris flows at the Shiveluch Volcano. We focused particular attention on the formation of the water component of volcano-induced debris flows. Mechanisms of lahar initiation as a result of snow melting on volcanoes have been highlighted.

Debris flow, lahar, glacial/volcanic debris flow initiation mechanism, snow-melting/volcanic debris flow initiation mechanism, Kamchatka

ВУЛКАН ШИВЕЛУЧ

Геолого-геоморфологическое строение

Шивелуч (см. фотографию на обложке), самый северный из действующих вулканов Камчатки, обособленно расположен в 50–60 км от Ключевской группы. По объему ювенильных продуктов выноса (36 млн т/год) он уступает Ключевскому, однако его продуктивность значительно превышает среднюю продуктивность других вулканов [Мелекесцев и др., 1991]. Современная постройка вулкана площадью 1300 км² состоит из Старого Шивелуча, древней кальдеры и Молодого

Шивелуча. Абсолютная высота главной вершины Старого Шивелуча – 3283 м, а высшая точка действующего Молодого Шивелуча – 2800 м. Старый Шивелуч начал формироваться 70–60 тыс. лет назад и по особенностям строения был полигенным стратовулканом. В основании его разреза преобладают отложения агломератовых потоков и направленных взрывов (обвалов). Доля лавовых потоков увеличивается с высотой, достигая 1000 м в районе главной вершины. По правобережью самой се-

В Части 1 рассмотрены вопросы терминологии, методики исследований, условия формирования селей на вулканах; детально изучены селевые потоки на вулкане Ключевской. Часть 1 опубликована в журнале “Криосфера Земли”, 2010, т. XIV, № 2, с. 29–45.

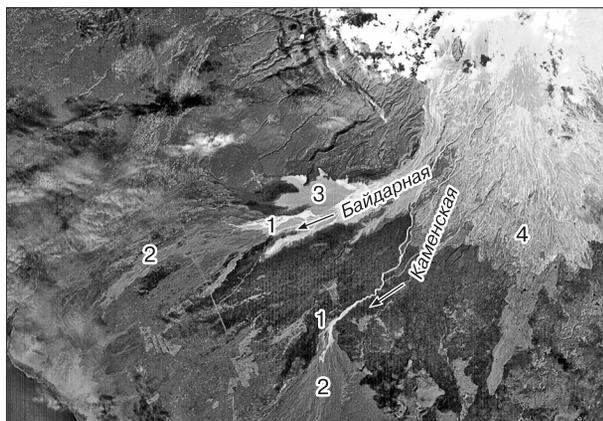


Рис. 1. Юго-западный сектор вулкана Шивелуч:

1 – отложения лахаров XX века, 2 – отложения лахаров XX в., частично поросшие лесом, 3 – отложения пирокластического потока 2005 г., 4 – отложения обломочной лавины 1964 г. Космический снимок SPOT-2, 03.08.2008 г. (снимок предоставлен ИТЦ “СканЭкс”).

леактивной реки Байдарной они образуют лавовые равнины мощностью до 200 м. Часть вершины и южный сектор старого вулкана были разрушены 30 тыс. лет назад в результате эксплозивного извержения. Из образовавшейся кальдеры диаметром 9 км было выброшено 10 км^3 материала постройки. В конце верхнего плейстоцена (25–10 тыс. лет назад) вулканическая постройка Шивелуча представляла самый крупный центр оледенения на Камчатке. Площадь ледникового щита охватывала 3000 км^2 . Он имел овальную форму $50 \times 80 \text{ км}$, распространяясь в южном направлении, поскольку на юг открывалась кальдера, служившая основной зоной аккумуляции снежно-фирновой толщи. Шивелучский ледник достигал р. Камчатки и занимал территорию современного поселка Ключи. От подножия вулкана далеко на юг распространены флювиогляциальные равнины и поля аккумулятивного холмисто-котловинного рельефа с озерами, образовавшиеся при отступании ледника в голоцене. Днище древней кальдеры является ареной активной вулканической деятельности. В голоцене здесь формировалась постройка Молодого Шивелуча, что сопровождалось образованием лавовых куполов и сильными эксплозивными извержениями. За это время их насчитывается более 60, и происходили они в несколько раз чаще, чем на других вулканах Курило-Камчатского пояса. Голоценовые отложения пирокластических потоков и обвалов занимают площадь более 300 км^2 . В настоящее время они размываются паводками и селевыми потоками, образуя у подножия вулкана пролювиальные равнины [Мелекесцев и др., 1991].

В историческое и современное время для вулкана Шивелуч было характерно два типа извержений [Мелекесцев и др., 1991].

1. Катастрофические эксплозивные извержения типа направленных взрывов (обвалов) с образованием эруптивных колонн высотой более 20 км и пирокластических потоков. В ходе подобных извержений выбрасывалось от 1 до 6 км^3 обвального и ювенильного материала, покрывавшего площади до $100\text{--}150 \text{ км}^2$ слоем мощностью до 50 м. Интенсивные пеплопады происходили на площадях в десятки и сотни квадратных километров. По руслам всех рек и ручьев сходили мощные лахары. Такие извержения повторялись через $100\text{--}300$ лет и имели кратковременный характер (десятки минут–часы). Последние два катастрофических извержения разделены отрезком времени в 110 лет (1–2 марта 1854 г. и 12 ноября 1964 г.).

2. Слабые и умеренные извержения, связанные с ростом экструзивных куполов. Рост куполов мог предваряться взрывами, сопровождавшимися образованием раскаленных обломочных лавин и пирокластических потоков с объемами на порядок меньше, чем при катастрофических извержениях. В ходе каждого извержения формировались купола объемом от 10 до 300 млн м^3 . Продолжительность таких извержений охватывала 1944–1950, 1980–1982, 1993–1995, 2001, 2004–2005, 2008–2009 гг.

На рис. 1 показан юго-западный сектор вулкана Шивелуч.

Вулканические условия формирования селей на Шивелуче

Вулканические предпосылки селевых процессов на Шивелуче рассматриваются на примерах гигантского извержения 1964 г. и последующих событий 2004–2005 гг. [Белусов, Белоусова, 1995, 1997; Мелекесцев и др., 1991]. 12 ноября 1964 г. произошло самое мощное современное извержение на Молодом Шивелуче. Оно продолжалось 1 ч 15 мин и по объему выброшенной пирокластике относится к сильнейшим эксплозивным извержениям на Камчатке. Извержение началось после сильного землетрясения. На первом этапе произошло крупномасштабное обрушение вулканической постройки, в результате образовался открытый на юг подковообразный кратер поперечником 1750 м. Обвал трансформировался в обломочную лавину, которая в виде широкого ($15\text{--}16 \text{ км}$) языка отложила на площади 98 км^2 . Ее объем составил $1,5 \text{ км}^3$ при мощности от 3 до 150 м. Характер грубообломочных отложений был исключительно резургентный с отсутствием стратификации и сортировки. Часть материала находилась в смерзшемся состоянии с глыбами льда в отложениях, что являлось показателем низкой

температуры обломочной лавины. Пологая в целом поверхность грубообломочных отложений имеет характерный холмистый рельеф. Конусообразные холмы высотой до 15 м сгруппированы в отдельные гряды с бессточными озерами между ними. Крутой, резко очерченный фронт отложений имеет высоту до 3 м, без явно выраженных следов водной эрозии по его периферии. В секторе обвала селевые процессы не получили развития ввиду отсутствия водной составляющей в “холодной и сухой” массе обломочной лавины при ее движении со скоростью 60–80 м/с и из-за последующего слабого развития эрозии на пологом пространстве ее отложений. Обрушение постройки привело к снятию давления в магматической системе вулкана, и в результате фреатического взрыва произошел выброс пепла объемом около 0,01 км³. На заключительной стадии извержения был выброшен ювенильный пирокластический материал объемом 0,8 км³. Раскаленная масса пирокластических потоков полностью заполнила все неровности рельефа – долины рек и ручьев, врезы, рытвины и депрессии, образовав песчаную пустыню с сожженными деревьями.

После катастрофического извержения 1964 г. вулканическая деятельность Молодого Шивелуча была связана с ростом нового купола. При извержении 22 апреля 1993 г. пепловые эксплозии поднимались на высоту 16–18 км, пирокластические потоки распространялись на 8 км, а лахары – на 28 км. 22 мая 2001 г. пепловая колонна поднялась на 20 км, отложения пирокластических потоков распространились на 18 км, а лахаров – на 30 км. При пароксизмальном извержении 9 мая 2004 г. пепловые шлейфы эруптивной колонны распространились на 100 км, а фронт пирокластического потока – на 15 км в юго-восточном направлении от купола Молодого Шивелуча. Грязевыми потоками, возникшими в результате таяния снега под действием горячего материала пирокластического потока, была размыта дамба и полотно дороги в районе р. Бекеш на расстоянии 30 км от вулкана [Гирин и др., 2007]. 21 мая 2004 г. сотрудниками Института вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН проводились исследования продуктов пароксизмального извержения 9 мая, при котором образовалось два пирокластических потока, получивших названия Большого и Малого. Большой отложился в виде конуса выноса длиной 12–15 км, а Малый заполнил долину реки. Поверхности потоков частично перекрывались газонасыщенными отложениями пирокластических волн. Температура отложений, измеренная в 15 см от поверхности, изменялась от 130 до 300 °С.

В 2005 г. произошло два пароксизмальных извержения вулкана Молодой Шивелуч. Изверже-

ние 27 февраля было самым сильным после пароксизма 1964 г., а повторившееся 22 сентября – на порядок меньше. В июле сотрудниками ИВиС ДВО РАН проводились полевые исследования отложений пирокластических потоков. Были определены их площади, объемы и распределение температуры по глубине отложений, в дальнейшем скорректированные по спутниковому снимку от 18 марта 2005 г. [Нуждаев и др., 2005]. Протяженность пирокластических потоков от купола вулкана достигала 28 км, а их объем на площади в 21 км² у подножия составлял 0,2 км³. На глубине 21 см от поверхности температура равнялась 67 °С. Ее наибольшее значение (420 °С) было измерено на глубине 4 м в отложениях, размытых р. Байдарной. Продолжавшийся размыв высокотемпературных отложений сопровождался фреатическими взрывами. Во время повторного извержения 22 сентября пирокластический поток спустился по руслу р. Байдарной, врезанному к тому времени в отложениях предыдущего потока на глубину 40 м, и вновь полностью ее заполнил (рис. 2, а). Его протяженность составила 20 км, объем 0,01 км³ при площади всего 2 км². Температура на глубине 40–150 см варьировала от 330 до 512 °С. Отложения пирокластических потоков продолжают оставаться горячими в течение многих месяцев и лет после извержения, в чем мы непосредственно убедились, обнаружив вторичные фумаролы на их поверхности во время рекогносцировочных обследований в июне 2008 г.

Во всех известных в XX в. случаях формирования лахаров на Шивелуче их твердой составляющей являлись отложения пирокластических потоков, за счет которых после каждого извержения происходило восполнение потенциального селевого массива непосредственно в очагах зарождения селей – долинах рек и руслах временных водотоков.

Подобный аспект формирования мощных лахаров имел место и в других случаях катастрофических взрывов и обвалов вулканов: в 1956 г. на Безымянном, в 1980 г. на вулкане Сент-Хеленс. Крупномасштабные обрушения с выбросом больших объемов пирокластике и последующим сходом лахаров являются обычным событием на стратовулканах. Они были широко распространены в прошлом и представляют значительную опасность в будущем [Белоусов, Белоусова, 1997].

Сводные данные о лахарах на Шивелуче приведены в табл. 1. Здесь помещены только опубликованные сведения. Согласно нашим оценкам, при любом типе извержения на Шивелуче формируются лахары по большинству рек южного сектора вулкана. Типичный вид долины, сформированной лахарами и временными водотоками – вреза р. Каменской, показан на рис. 2, б.



Рис. 2. Вулкан Шивелуч:

a – отложения пирокластического потока 2005 г. с сожженным лесом (фото С.С. Черноморца, 24.06.2008 г.); *б* – врез р. Каменская со следами прохождения лахара (фото С.С. Черноморца, 23.06.2008 г.); *в* – пирокластический поток на вулкане Шивелуч (фото Ю.В. Демянчука (Камчатская вулканологическая станция ИВиС ДВО РАН), 11.07.2007 г.); *з* – пересыщенный наносоводный поток на р. Байдарная (фото С.С. Черноморца, 21.06.2008 г.).

Таблица 1.

Сведения о лахарах на вулкане Шивелуч

Даты схода лахаров	Характеристика извержения	Река, по которой лахары зафиксированы или могли проходить	Источник сведений
01–02.03.1854	Пароксизмальное	Байдарная, Кабеку, Мутный. Лахары доходили до рек Камчатка и Еловка	[Горшков, Дубик, 1969; Ропотаева et al., 1998]
12.11.1964	Пароксизмальное	Байдарная, Каменская, Кабеку	[Горшков, Дубик, 1969]
22.04.1993	Пароксизмальное	Реки не указаны	[Вулкан Шивелуч]
19–20.05.2001	Экструзивное	Байдарная, Каменская, Кабеку, Бекеш	[Вулкан Шивелуч]
01.2002	Экструзивное	Байдарная, Каменская, Кабеку, Бекеш	[Вулкан Шивелуч]
09.05.2004	Экструзивно-эффузивное	Бекеш	[Гирина и др., 2007], А.Н. Озеров [Пепловый шлейф..., 2004]
27.02.2005	Пароксизмальное	Байдарная	[Нуждаев и др., 2005; Гирина и др., 2006]
22.09.2005	Пароксизмальное	Байдарная	[Нуждаев и др., 2005]
29.03.2007	–	Бекеш, Кабеку	[Гусева, 2007а]
06.05.2007	–	Бекеш, Кабеку	[Гусева, 2007б]
27.04.2009	–	Бекеш	А.Н. Озеров [Кутол..., 2009]

Механизм формирования водной составляющей селей нивально-вулканического генезиса

Селевые потоки нивально-вулканического генезиса образуются при взаимодействии продуктов вулканических извержений, преимущественно пирокластических, со снежно-фирновым покровом. Они играют ведущую роль среди рельефообразующих процессов, предопределенную благоприятными условиями для их формирования, как вулканическими – катастрофизм и частота проявления, так и климатическими – значительная мощность и продолжительность залегания снежного покрова.

В последнем столетии пирокластические потоки и лахары наблюдались при различных типах извержений – взрывах, обвалах, экструзиях, вершинных и побочных излияниях. Самым грандиозным и хорошо изученным из них в России является лахар, сошедший по р. Большая Хапица в результате взрыва вулкана Безымянный в марте 1956 г. Сход вулканогенно-нивальных лахаров неоднократно отмечался на Шивелуче по рекам Байдарная, Каменская, Бекеш, Кабеку.

Пирокластические потоки – это раскаленные лавины из смеси крупных глыб, пепла и вулканических газов. Собственно пирокластический поток представляет собой несущуюся по склону вулкана высокоскоростную смесь, перегруженную твердым ювенильным материалом с включением крупных глыб (см. рис. 2, в). Его температура достигает 600–700 °С, а переложенный материал продолжает оставаться горячим (до 200–500 °С) в течение нескольких лет. Очевидно, что непосредственный переход гравитационного потока пирокластики в селевой поток исключен по причине его обезвоженности. В формировании водной составляющей участвует воздушный перенос. В изначальном выбросе пирокластической массы из недр вулкана содержится большой объем раскаленных газов, которые выносят в атмосферу пепел и тонкообломочный материал. Одновременно при контактах подошвы раскаленного потока с покровом снега и льда на склонах происходят мощные фреатические взрывы. В этом случае перегретый пар вместе с газопепловыми колоннами поднимается на десятки километров. Однако в своем первоначальном раскаленном состоянии воздушная пирокластика, так же как и гравитационная, может обратить снег в пар, а не в воду, необходимую для формирования селей. Для того чтобы стать генератором водного стока, необходимо охлаждение пеплово-газовой смеси до температуры ниже 100 °С, что происходит при подъеме эруптивных туч на большие высоты. При тепловом воздействии выпадающих из них твердых или жидких осадков происходит бурный сход снега на боль-

ших пространствах. Образующиеся водные потоки стекают по склонам вулкана, концентрируясь в понижениях рельефа. Они достигают долин рек, заполненных перед этим твердым материалом раскаленных масс пирокластики. При ее размыве начинается процесс образования лахаров. Он сопровождается вторичными фреатическими взрывами, нарушающими сплошность пирокластических отложений, что ведет к быстрому увеличению селевой массы. Такие лахары распространяются на десятки километров дальше пирокластических потоков.

Особо опасным процессом является образование пирокластических волн – так называемых палящих туч. Этот механизм формирования лахаров несколько отличается от вышеописанного. Отрываясь от пирокластического потока и обгоняя его, палящие тучи охватывают значительные территории у подножия вулканов и могут вызвать практически мгновенное таяние снега. Охлаждение пирокластических волн до температуры, необходимой для таяния, происходит не посредством подъема эруптивной колонны, а при движении по поверхности снежного покрова. Такой процесс наблюдался, например, на вулкане Безымянном в 1997 г. [Белоусов, Белоусова, 1998].

Самый крупный на Камчатке лахар нивально-вулканического типа, объемом 500 млн м³, образовался в результате таяния снежного покрова при пароксизмальном извержении вулкана Безымянный 30 марта 1956 г. [Горшков, 1957]. После обрушения постройки вулкана раскаленный поток пирокластики распространился вниз и заполнил верховья р. Сухая Хапица. Все понижения рельефа на расстоянии 16 км от вулкана были погребены под рыхлым покровом на площади 50 км². Их мощность составляла от 20 до 100 м. Через месяц после извержения и схода лахара с поверхности потока вдоль узкой линии над погребенным руслом реки поднимались тысячи вторичных фумарол. Таким образом, в формировании лахара верховья р. Сухая Хапица, заполненные раскаленным агломератом, участия не принимали. Водный импульс селеформирования был вызван бурным таянием снежного покрова, сошедшего с прилегающих склонов вулканов Ключевской и Зимина. Выброшенная при взрыве вулкана газопепловая смесь не поднялась в воздух, а образовала поток, который распространился в восточном направлении, растопив двухметровый слой снега на площади 500 км². Грязевые сели по притокам Сухой Хапицы и многочисленным “сухим” рекам слились в ее среднем течении в единый поток. Через час после извержения гигантский лахар прошел по р. Большая Хапица. На расстоянии 80 км от вулкана его язык шириной 6 км достиг р. Камчатки. Гигантский лахар на Безымянном является яркой

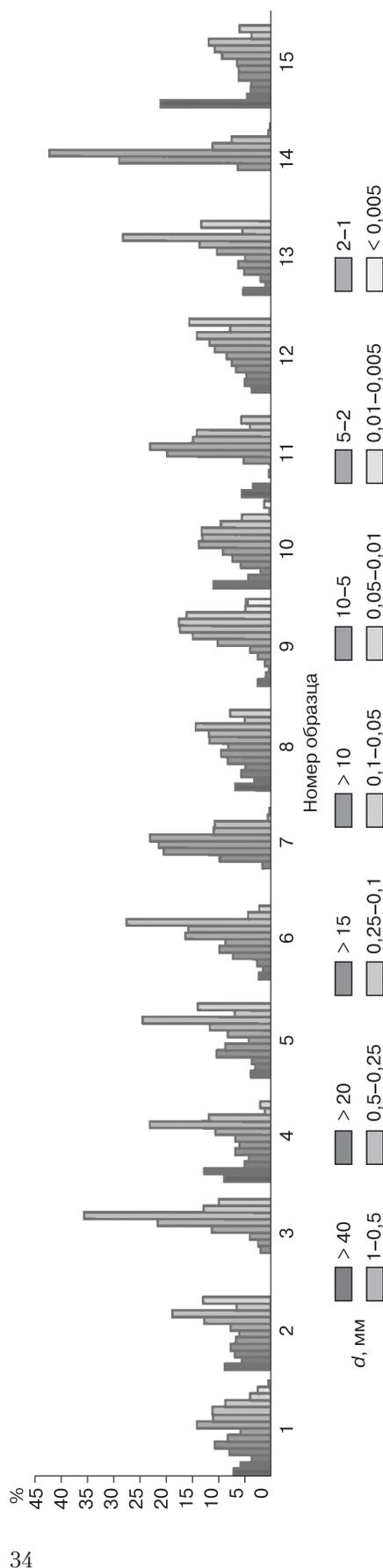


Рис. 3. Гранулометрический состав заполнителя различных типов рыхлых отложений у подножия вулканов Ключевской и Шивелуч.
 Ось абсцисс – номера образцов (см. табл. 2); ось ординат – содержание фракции, %. В легенде указан диаметр частиц d , мм.

Таблица 2. Гранулометрический состав заполнителя различных типов отложений на вулканах Ключевской и Шивелуч (фракции мельче 5 см)

Номер образца	Вулкан	Описание образца, тип отложений	Гранулометрический состав (%), диаметр частиц (d , мм)*													
			>40	40–20	20–15	15–10	10–5	5–2	2–1	1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	<0,005
1	Ключевской	Морена, ледник Сопочный	7,0	5,7	3,5	7,8	10,5	8,2	5,7	14,1	10,9	11,1	8,7	4,0	2,4	0,5
2	Ключевской	Морена, ледник Келля	-	8,8	5,6	6,9	7,6	6,6	6,0	7,6	12,8	18,8	6,5	12,9	-	-
3	Ключевской	Селевые	-	-	-	-	2,0	2,6	4,2	11,2	21,6	35,5	12,9	10,0	-	-
4	Ключевской	Морена, ледник Эрмана	9,0	12,7	5,1	4,4	6,9	6,1	6,9	10,6	23,1	11,8	1,2	2,1	-	-
5	Ключевской	Морена, ледник Эрмана	-	4,0	3,1	3,8	10,4	8,8	4,5	8,3	11,8	24,5	7,0	13,9	-	-
6	Ключевской	Селевые, р. Киргурич	-	2,4	1,6	2,8	7,4	9,9	8,8	16,5	15,9	27,6	4,6	2,4	-	-
7	Ключевской	Селевые, р. Сопочная	-	-	-	1,8	9,7	20,5	21,6	23,1	11,0	10,9	0,9	0,5	-	-
8	Шивелуч	Пирокластические (перемытые)	7,0	3,4	5,9	5,1	8,5	9,8	8,3	12,0	12,1	14,7	5,3	8,0	-	-
9	Шивелуч	Пирокластические (перемытые)	-	2,7	1,2	0,7	1,4	2,8	4,2	10,4	15,2	17,5	17,7	16,4	5,1	4,7
10	Шивелуч	Пирокластические	-	11,3	4,7	2,3	6,0	7,6	9,4	14,1	13,3	13,5	9,7	5,9	0,6	1,6
11	Шивелуч	То же	5,8	3,7	0,0	0,8	0,4	5,6	20,0	23,4	15,2	14,6	4,4	6,1	-	-
12	Шивелуч	»	-	4,1	5,3	5,1	7,0	7,8	8,9	11,1	12,1	14,5	8,1	16,0	-	-
13	Шивелуч	»	-	5,8	1,5	2,4	5,6	6,6	5,3	10,7	14,0	28,6	5,8	13,7	-	-
14	Шивелуч	»	-	-	-	-	-	6,8	29,4	42,5	11,6	8,0	0,9	0,7	-	-
15	Шивелуч	Селевые, р. Каменская	21,6	5,0	4,6	4,3	6,6	6,7	7,0	9,8	11,2	12,3	4,3	6,6	-	-

* См. также рис. 3.

иллюстрацией формирования селей нивально-вулканического генезиса.

Помимо “истинных” лахаров, пирокластические отложения становятся источниками последующих селей ливневого и снегового генезиса. Грязевые сели сезонного снеготаяния представляют собой потоки, пересыщенные тонким мелкоземистым материалом (*hyperconcentrated flow*). Их плотность более $1,5 \text{ т/м}^3$, а характер движения близок к ламинарному (см. рис. 2, з). В таком потоке “плавают” глыбы и валуны, не нарушая его сплошности. Поверхность потока внешне похожа на текучий расплавленный металл. При аккумуляции они формируют пологонаклонные равнины у подножия вулкана.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОТЛОЖЕНИЙ ЛАХАРОВ

Идентификация отложений лахаров имеет большое значение для диагностики, но является недостаточно изученным вопросом. Надежные критерии отнесения отложений к этому типу пока отсутствуют. Нами были отобраны пробы заполнителя различных генетических типов: лахаров, пирокластических потоков, морен, флювиогляциальных отложений, полигенных толщ в очагах зарождения селей. Пробы обработаны в лаборатории грунтоведения геологического факультета МГУ. На рис. 3 и в табл. 2 представлен гранулометрический состав заполнителя различных типов рыхлых отложений.

Так как отложения потенциальных селевых массивов (морены, тефра, пирокластика) являются легко размываемыми и подвижными, при их переносе лахарами не происходит достаточной дифференциации материала. Поэтому, скорее всего, состав заполнителя не может считаться надежным показателем для идентификации генетической принадлежности отложений.

Сложно идентифицировать лахары и по морфологическому облику отложений. В ряде случаев “морены” и “флювиогляциальные шлейфы” у подножия вулканов на самом деле являются селевыми отложениями. Ошибки в идентификации могут стать причиной неточной оценки риска для освоенных территорий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Селевые потоки, являющиеся завершающей стадией в цепи катастрофических процессов при извержениях, кардинально отличаются от лавовых и пирокластических потоков, поскольку их реологические свойства определяются наличием водной среды. Вулканы Ключевской и Шивелуча, находящиеся в стадии повышенной активности, значительно различаются по характеру изверже-

ний. От этого зависят их геологическое и геоморфологическое строение и как следствие селеформирующие факторы, в числе которых важную роль играет генезис водного импульса зарождения селей.

Механизм возникновения водного импульса селеформирования в условиях сверхвысоких температур чрезвычайно сложен. Нами рассмотрены два основных механизма формирования селей, которые предложено называть гляциально-вулканическим и нивально-вулканическим. По-видимому, при дальнейших исследованиях использование этих терминов позволит более четко описывать характер селеформирования в зависимости от генезиса водной составляющей.

На вулкане Ключевской самые мощные селевые процессы относятся к гляциально-вулканическому типу и образуются при взаимодействии продуктов вулканических извержений с ледниками. При *пароксизмальном* режиме вершинных извержений они приобретают массовый характер и с частотой 1 раз в 50 лет сходят по руслам всех рек в радиусе от северо-восточного до юго-восточного секторов вулкана, для краткости называемого в тексте восточным. При извержениях преимущественно *эффузивного* характера излияния лавы локализуется по трем постоянным желобам – Крестовскому, Ушковскому и Апахончичевскому. Сход лахаров с частотой 1 раз в 20 лет происходит по рекам Сухая, Крутенькая, Киргурич на северо-восточном склоне вулкана и по рекам Лавовый Ключ и Голубельная на юго-восточном склоне. Во время *эксплозивно-эффузивных* извержений вершинного кратера излияние лавовых потоков обычно идет только по Крестовскому желобу. Лахары сходят по рекам Крутенькая и Киргурич с периодичностью 3–5 лет. При активизации *побочных* кратеров причинами селеформирования являлись подвижки ледников Влодавца, Сопочного и Келля. В период с 1932 по 1987 г. лахары сходили по рекам Киргурич, Сопочная, Межкратерная с частотой 1 раз в 5 лет. Таким образом, северо-восточный сектор является самой селеопасной зоной Ключевского вулкана, грязекаменные отложения рек которого заносят дороги в непосредственной близости от пос. Ключи. Нами составлена карта условий формирования селей восточного сектора вулкана в масштабе 1:100 000.

Преобладающий для Ключевского вулкана гляциально-вулканический генезис водной составляющей селей на южном склоне вулкана Шивелуч не получил развития. Существовавший здесь в плейстоцене крупный ледник был полностью разрушен катастрофическими взрывами и обвалами, сопровождавшими формирование Молодого Шивелуча в голоцене. Поэтому для Шивелуча основным механизмом селеформирования

является нивально-вулканический, при котором происходит катастрофическое таяние снежного покрова в результате извержений. Сведения о сходе лахаров на вулкане Шивелуч до 2001 г. были эпизодическими. В XXI в. сели нивально-вулканического генезиса формировались при каждом извержении по рекам южного сектора вулкана – Байдарной, Каменской, Бекеш и др. Наблюдениями в 2001–2009 гг. зафиксировано не менее восьми событий. Однако фиксировались только случаи, когда происходили размывы автомобильных дорог у подножия вулкана. Реальное количество лахаров, видимо, было значительно бóльшим.

Селевая активность на вулканах Ключевской и Шивелуч очень высока, а механизмы формирования селей недостаточно изучены. Необходимо дальнейшее совершенствование методических подходов с применением новых технологий анализа (космическая съемка высокого разрешения, ГИС-картографирование и др.). В первую очередь следовало бы осуществлять прямые наблюдения за лахарами в реальном времени. Для их детального изучения представляется целесообразным в будущем организовать у подножия Ключевского и Шивелуча долговременные стационарные исследования.

Авторы выражают благодарность канд. геогр. наук Я.Д. Муравьеву, д-ру геол.-мин. наук И.В. Мелекесцеву, канд. геол.-мин. наук О.А. Гириной, канд. техн. наук Н.А. Жаринову (ИВиС ДВО РАН), канд. геогр. наук Ю.А. Евтодьеву (Камчатское Метеоагентство) за ценные советы, А.А. Коневу, Ю.В. Демянчуку, М.В. Демянчук (ИВиС ДВО РАН), Р.В. Шелопугину (авиакомпания “Ксудач”) за помощь в организации экспедиции, д-ру геол.-мин. наук, проф. Е.А. Вознесенскому (геологический факультет МГУ) за обработку образцов, Инженерно-технологическому центру “СканЭкс” за предоставление космических снимков, канд. геогр. наук Д.А. Петракову, И.В. Крыленко, канд. геогр. наук И.Н. Крыленко (географический факультет МГУ), проф. С.Дж. Эвансу (Университет Уотерлу, Канада) за полезные дискуссии.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 10-05-01127, 08-05-92206, 09-05-00934), Программы поддержки ведущих научных школ (проект НШ-3405.2010.5) и программы NATO Science for Peace (проект 982143).

Литература

- Белоусов А.Б., Белоусова М.Г.** Извержение вулкана Шивелуч в 1964 г. – плинианское извержение, предварявшееся предварительным разрушением постройки // Вулканология и сейсмология, 1995, № 4–5, с. 116–126.
- Белоусов А.Б., Белоусова М.Г.** Гигантские обвалы на вулканах // Природа, 1997, № 11, с. 70–81.
- Белоусов А.Б., Белоусова М.Г.** Извержения вулкана Безымянный // Природа, 1998, № 3, с. 35–38.
- Вулкан Шивелуч** / Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. (<http://www.kscnet.ru/ivs/volcanoes/shivel.html>).
- Гирин О.А., Демянчук Ю.В., Мельников Д.В. и др.** Пароксизмальная фаза извержения вулкана молодой Шивелуч, Камчатка. 27 февраля 2005 г. (предварительное сообщение) // Вулканология и сейсмология, 2006, № 1, с. 5–23.
- Гирин О.А., Ушаков С.В., Демянчук Ю.В.** Пароксизмальное извержение вулкана молодой Шивелуч, Камчатка, 9 мая 2004 г. // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле, 2007, вып. 10, № 2, с. 65–73.
- Горшков Г.С.** Извержение сопки Безымянной (Предварительное сообщение) // Бюл. вулканол. станции, 1957, № 26, с. 19–72.
- Горшков Г.С., Дубик Ю.М.** Направленный взрыв на вулкане Шивелуч // Вулканы и извержения. М., Наука, 1969, с. 3–37.
- Гусева О.** На Камчатке извержение вулкана привело к сходу грязевых потоков // РИА–Новости, 30.03.2007а. (<http://eco.rian.ru/nature/20070330/62816182.html>).
- Гусева О.** Со склона вулкана Шивелуч сошел грязевой поток // РИА–Новости, 7.05.2007б. (<http://eco.rian.ru/nature/20070507/64993901.html>).
- Купол** вулкана Шивелуч на Камчатке прорезала глубокая расщелина // РИА–Новости, 28.04.2009. (<http://eco.rian.ru/natural/20090428/169419270.html>).
- Мелекесцев И.В., Вольнец О.Н., Ермаков В.А. и др.** Вулкан Шивелуч // Действующие вулканы Камчатки. В 2-х т. М., Наука, 1991, т. 1, с. 84–105.
- Нуждаев А.А., Гирин О.А., Мельников Д.В.** Некоторые результаты изучения пирокластических отложений извержений 28 февраля и 22 сентября 2005 г. вулкана Молодой Шивелуч наземными и дистанционными методами // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле, 2005, вып. 6, № 2, с. 63–66.
- Пепловый шлейф** от вулкана Шивелуч на Камчатке протянулся более чем на 300 км // РИА–Новости, 11.05.2004. (<http://www.rian.ru/incidents/20040511/586364.html>).
- Ponomareva V.V., Pevzner M.M., Melekestsev I.V.** Large debris avalanches and associated eruptions in the Holocene eruptive history of Shiveluch Volcano, Kamchatka, Russia // Bull. Volcanol., 1998, vol. 59, p. 490–505.

Поступила в редакцию
30 сентября 2009 г.