



СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ НА ВУЛКАНАХ

С.С. Черноморец
И.Б. Сейнова

Московский государственный университет
имени М.В.Ломоносова

Географический факультет

С.С. Черноморец
И.Б. Сейнова

СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ НА ВУЛКАНАХ

Учебное пособие



УДК 551. 217(075.8)

ББК 26.325я75

Ч-49

Ч-49 **Черноморец С.С., Сейнова И.Б.**

Селевые потоки на вулканах. Учебное пособие. – Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Географический факультет. - Москва: Издательство УНЦ ДО, 2010. – 72 с.

Chernomorets S.S., Seynova I.B.

Debris Flows on Volcanoes. A Tutorial. / Faculty of Geography, M.V. Lomonosov Moscow State University. Moscow: ESC PHSE, 2010. – 72 pp.

ISBN 978-5-88800-341-1

В учебном пособии изложены особенности формирования лахаров – селевых потоков, зарождающихся при извержениях действующих вулканов. Детальный анализ истории лахаров показан на примере северных вулканов Камчатки – Ключевского и Шивелуча. Для студентов-геоморфологов и специалистов по селевым потокам.

This tutorial describes features of the formation of lahars, the debris flows triggered by volcanic eruptions. History of lahars is analysed in detail for a case study of Klyuchevskoy and Shiveluch volcanoes in the Kamchatka Peninsula, Russia. The book is intended for geomorphology students and for experts in the debris flow science.

Набор и верстка авторов.

Издательство УНЦ ДО
ИД № 00545 от 06.12.1999г.

117246, Москва, ул.Обручева, 55А
тел/факс +7(495) 718-6966, -7767, -7785
e-mail: izdat@abiturcenter.ru, <http://abiturcenter.ru/izdat>

Подписано в печать 04.02.2010г. Формат 60х88\16

Бумага офсетная. Усл.п.л. 4,5. Тираж 200 экз.

Отп. ООО «РПринто», Московская обл., г. Лыткарино, ул. Парковая, ст. Заводская, стр. 4

ISBN 978-5-88800-341-1

© С.С. Черноморец, И.Б. Сейнова
© Географический факультет МГУ имени
М.В. Ломоносова

© S.S. Chernomorets, I.B. Seynova
© Faculty of Geography, M.V. Lomonosov
Moscow State University

ПРЕДИСЛОВИЕ

В данное учебное пособие вошли материалы о лахарах – селевых потоках, зарождающихся на склонах действующих вулканов. Эта тема пока была недостаточно освещена в отечественной литературе. Сводных обобщающих работ по лахарам в России практически нет, и поиск материалов даже в лучших библиотеках является весьма непростой задачей.

Детальный анализ истории лахаров показан на примере северных вулканов Камчатки – Ключевского и Шивелуча, где авторами были проведены экспедиционные исследования.

Пособие предназначено для студентов географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, обучающихся по специализации «геоморфология и палеогеография», и относится к курсу «Экологическая и прикладная геоморфология».

С.С. Черноморец, И.Б. Сейнова

ВВЕДЕНИЕ

*Но гора падая разрушается, и скала
сходит с места своего; вода стирает
камни; разлив ее смывает земную пыль.*

Книга Иова, 14:18–19

Селевые потоки вулканического происхождения, обычно именуемые «лахарами», находятся в ряду самых катастрофических стихийно-разрушительных процессов в горных странах. Иногда они могут быть более опасными, чем сами извержения, поскольку достигают освоенных территорий, удалённых от вулканов на десятки и сотни километров.

Случаи вулканогенных селей известны с давних времен. Так, с ними могут быть связаны некоторые фразы из Библии. Книга пророка Иезекииля, составленная в Вавилоне предположительно в VI в. до н.э., упоминает «всепотопляющий дождь и каменный град, огонь и серу» (38:22). В Новом Завете есть слова «Разверз камень, и потекли воды, потекли рекою по местам сухим» (Псалтирь, 104:41). Ряд исследователей полагали, что первым документально зарегистрированным лахаром был поток, накрывший город Геркуланум во время описанного Плинием Младшим [*Письма...*, 1984] извержения Везувия в 79 г. н.э. Впоследствии на склонах Везувия неоднократно формировались грязевые потоки (рис. 1); наиболее мощные из них были в 1631, 1794, 1872 г. [*Неймайр*, 1902]. Ф. Юнгхун описывал извержение вулкана Галунггунг на Яве в 1822 г., при котором 2000 человек «потонули в потоках грязи и кипящей воды, перемешанной с пеплом и обломками камней» [*Неймайр*, 1902, с. 149]. Известны извержения вулкана Бандай в Японии в 1888 г. [*Неймайр*, 1902], Катмай на Аляске в 1911 г. [*Griggs*, 1919], сопровождавшиеся мощными селевыми потоками. Л.П.Т. Юстесен был очевидцем селей в вулканических районах Суматры [*Justesen*, 1919-1920].

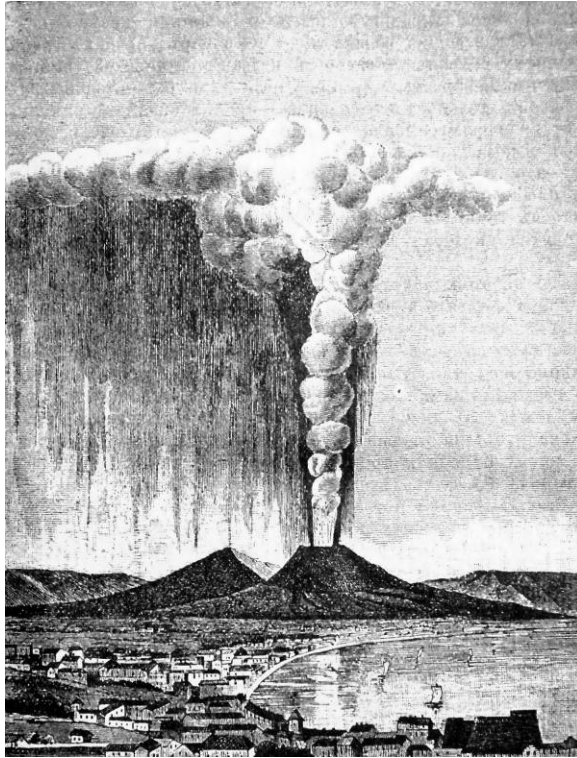


Рис. 1. Извержение Везувия в 1822 г. [Неймайр, 1902]. При извержении сформировались дожди, вызвавшие сход селевых потоков. С картины Дж.Ю.П. Скроупа.

Слово «лахар» имеет индонезийское (яванское) происхождение. После извержения вулкана Келуд в 1919 г., при котором в результате прорыва кратерного озера погибло 5000 человек, была создана вулканологическая служба Нидерландских Восточных Индий [ter Braake, 1945]. Термин «лахар», видимо, впервые был введен в научный оборот сотрудниками службы Г.Л.Л. Кеммерлингом [Kemmerling, 1921] (рис. 2, 3) и Б.Г. Эшером [Escher, 1922] и получил дальнейшее распространение в работах К.Г. Шмидта [Schmidt, 1931], Р.В. ван Беммелена [van Bemmelen, 1949] и других авторов. Интересно, что в различных частях Индонезии использовались и другие местные названия вулканогенных селей: на Суматре – «банджир» [Justesen, 1919–

1920], на Яве (вулкан Семеру) – «бузук» [ван Беммелен, 1957], однако эти наименования не получили широкого распространения.



Рис. 2. Экспедиция по изучению лахаров на вулкане Келуд, 24 мая 1919 г. [Kemmerling, 1921].



Рис. 3. Крупные валуны, принесенные лахаром (слева), и обложка первой книги о лахарах [Kemmerling, 1921].

Современная зарубежная литература о лахарах довольно обширна. Это связано с тем, что они нередко отличаются крупными размерами и приводят к большим жертвам. Наибольшее количество человеческих жертв вызвала катастрофа при извержении вулкана Невадо дель Руис в Колумбии в 1985 г., когда от лахаров погибли около 23 тыс. человек [Pierson et al., 1990, Witham, 2005]. В настоящее время вулканогенные селевые потоки активно изучаются в Новой Зеландии [Manville et al., 2007], США [Miller, 1989; Tilling et al., 1990; Vallance, 2005; Major et al., 2005; John et al., 2008], Индонезии [Lavigne et al., 2000; Newhall et al., 2000], Перу [Thouret et al., 2001], Эквадоре [Aguilera et al., 2004], Мексике [Huggel et al., 2008], на Филиппинах [Thouret, 1999; Carranza, Castro, 2006] и в других вулканических районах.

На рис. 4 приведена карта вулканов мира.

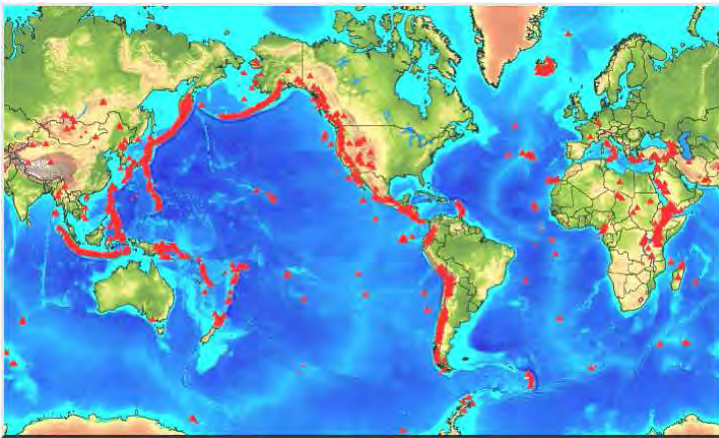


Рис. 4. Карта вулканов мира [Global Volcanism Program].

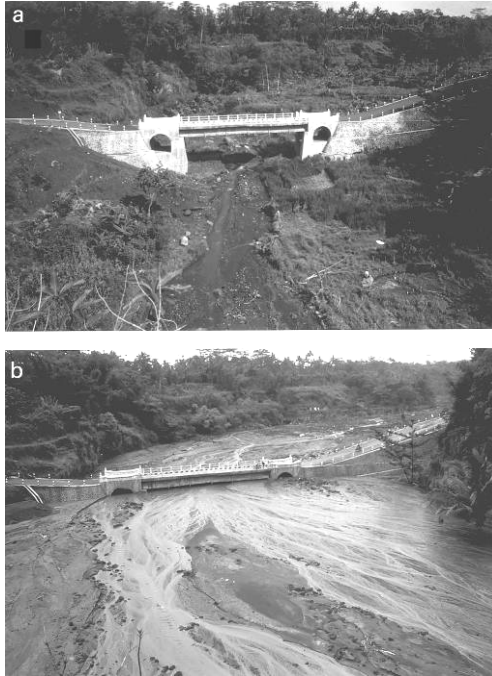


Рис. 5. Мост на р. Бойонг, Индонезия:верху - до лахара, внизу – после лахара [Lavigne et al., 2000].

В России вулканогенные селевые потоки исследовались при оценке извержений вулканов Камчатки. Еще в XVIII веке была известна особенность, присущая вулканическим районам Камчатки – феномен «сухих» рек: «Третья речка тем знатна, что течет из под самой горы огнедышащей, которой подножье в том месте до самой реки Камчатки простирается. Вода в ней бывает токмо летом от тающего на горе снегу, которая густа и беловата цветом. Дно ея черноватым песком покрыто, от чего она получила и название: ибо Биокось на Камчатском языке значит черной песок» [Крашенинников, 1755, с. 16].

Массовое формирование наносоводных селей по руслам «сухих» рек в периоды снеготаяния изучалось в XX веке рядом исследователей [Былинкина, 1954, Краевая, 1969, Евтодьев, 1970, 1971, 1976]. Сход мощных грязевых потоков отмечался при извержении вулкана Ключевской в 1945 г. [Заварицкий и

др., 1954]. Слово «лахар» на русском языке стало использоваться после публикации перевода книги Р. ван Беммелена [*ван Беммелен*, 1957]. Крупнейшее селевое событие в истории России – лахар, сформировавшийся при взрыве вулкана Безымянный в 1956 г. (рис. 6). Объем отложений лахара составил около 500 млн. м³ [*Горишков*, 1957]. Проводилось изучение лахаров и их отложений при крупных извержениях, а также анализ отложений и оценка риска [*Пийп*, 1946; *Апрелков*, 1964; *Краевая*, 1964, 1977; *Горишков и Богоявленская*, 1965; *Малеев*, 1969; *Догановский и Орлов*, 1970; *Мелекесцев и др.*, 1970, 1987, 1995, 2003; *Краевая и Олюнин*, 1976; *Мелекесцев*, 1980; *В.Н. Виноградов*, 1985; *Виноградов и Муравьев*, 1985, 1989; *Vogoyavlenskaya et al.*, 1985; *Melekestsev et al.*, 1989, 1995; *Хренов и др.*, 1991; *Braitseva et al.*, 1996; *Белоусов и Белоусова*, 1998 а,б; *Брайцева и др.*, 1998; *Ponomareva et al.*, 1998, 2006 а,б; *Belousov et al.*, 1999, 2002; *Двигало и Мелекесцев*, 2000; *Малышев*, 2000; *Базанова и др.*, 2001, 2003; *Ramsey and Dehn*, 2004; *Белоусов и др.*, 2006; *Гирина и др.*, 2006].

Было уделено внимание проблеме классификации вулканогенных селей [*Ю.Б. Виноградов*, 1969, *Балабаев и др.*, 1980]. Проводилось мелкомасштабное картографирование селевых явлений Камчатки [*Бударина и Перов*, 1981, 1984].

Однако нельзя не отметить, что основные исследования селей в Советском Союзе были сосредоточены в районах, где отсутствует современный вулканизм – Центральной Азии, на Кавказе, в Крыму, Карпатах, Южной Сибири. Поэтому специфика вулканических селей не нашла отражения в методических руководствах, разработанных в те годы [*Методическое...*, 1971; *Руководство...*, 1976; *Руководящий...*, 1990]. Между тем, особенности вулканических селепроявлений, отличающие их от «традиционных» селей, требуют разработки специального подхода к их изучению.

В XX и XXI столетиях на Камчатке произошло немало извержений вулканов, которые сопровождались грандиозными по масштабам паводками и селевыми потоками. Их предпосылками являлись разрушения и подвижки ледников, уничтожение кратерных и других озёр, внутриледниковые излияния лав и катастрофически быстрое таяние льда и снежного покрова. Цепь действующих вулканов, на склонах которых зарождаются грандиозные селевые потоки, протянулась на Камчатке на 700 км. Прилегающие к ним обширные территории селеопасны.

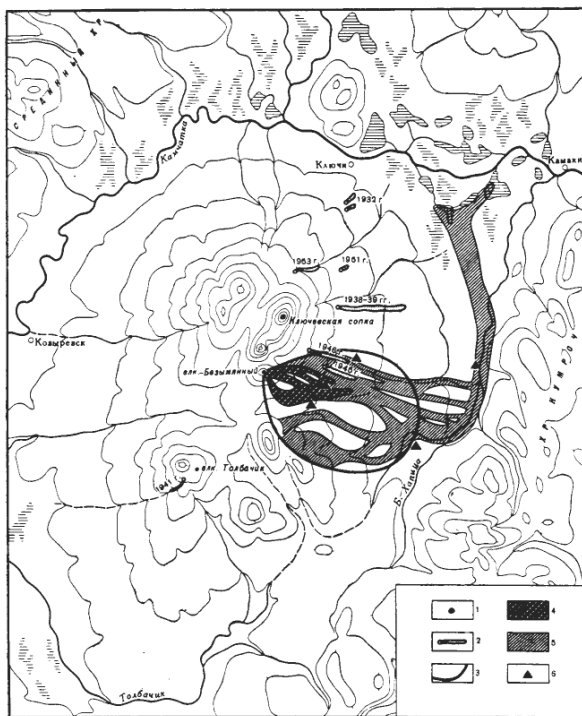


Рис. 6. Схема грязевого потока (лахара) при извержении вулкана Безымянный в 1956 г. [Горшков, 1957]. 1 - действующие вулканы; 2 - лавовые потоки побочных извержений и их даты; 3 - граница массового таяния снега под горячим пеплом; 4 - аггломератовый поток; 5 - путь лахара (схема нанесена на топографическую карту масштаба 1: 1000 000, сечение горизонталей через 500 м).

Проблема изучения вулканогенных селей остаётся нерешённой. Это объясняется сложностью данного явления природы, обусловленного широким спектром взаимодействующих факторов. Сели на Камчатке – в самом селеактивном районе России – изучались в основном специалистами-вулканологами, для которых лахары были лишь одним аспектом извержения, второстепенным для их профессиональных интересов. Поэтому сводных обобщающих работ по лахарам в России нет. Как правило, исследователи ограничивались фиксацией события и оп-

ределением зоны его распространения. Механизмы формирования лахаров и строение очагов почти никогда не попадали в сферу исследования. Вне поля интересов оставалась важнейшая проблема – формирование водной составляющей селей в условиях высокой температуры.

Задачей нашей работы являлось изучение особенностей формирования селей на активно действующих вулканах Ключевской и Шивелуч в зависимости от характера извержений, морфологии, геологического строения и оледенения. Для этого в июне-июле 2008 г. были проведены экспедиционные работы для выявления механизмов селеформирования, составления карты условий формирования селей и каталогов схода селей с использованием аэрокосмических методов. Результаты экспедиционных исследований, последующей обработки полевых материалов и анализа литературных источников приведены в настоящем пособии.

ТЕРМИНОЛОГИЯ

Следует отметить неопределенность использования в различных публикациях, применительно к селевым явлениям на вулканах, таких терминов, как «лахары», «грязевые потоки», «сели».

В нашей работе используется принятая в России селевая терминология, что дает возможность описать территорию с точки зрения ее пораженности селями и условий формирования. Селевые потоки (сели) – это горные потоки, состоящие из смеси воды и рыхлообломочной породы [Виноградов и Виноградова, 2008]. Термин «сель» или «грязевой поток» используется нами как общее понятие для вулканогенных и для иных типов селей.

Что касается лахаров, большинство зарубежных авторов относят к лахарам все селевые потоки на вулканах [van Bemmelen, 1949, Neall, 1976, Lavigne et al., 2000, Major et al., 2005, Vallance, 2005 и др.]. Начиная с Г.Л.Л. Кеммерлинга [Kemmerling, 1921], лахары принято делить на «горячие» (или истинные, или син-эруптивные), непосредственно связанные с извержениями, и «холодные», при которых происходит вовлечение вулканических отложений в селевой поток. В настоящей работе мы уделяем мало внимания селевым потокам, не связанным с извержениями («холодным», или метеорологически обусловленным, селям), сосредотачиваясь в основном на первичных («горячих») потоках. Термин «лахар» употребляется нами в узком значении – для селей, непосредственно связанных с конкретными событиями извержений. Генетически механизмы зарождения лахаров на Ключевском и Шивелуче относятся к двум основным типам – гляциально-вулканическому и нивально-вулканическому.

Гляциально-вулканические сели – потоки, зарождение которых связано с таянием ледников в результате извержений. Нивально-вулканические сели – потоки, возникающие при быстром таянии снега в ходе извержений.

Следует привести также определения смежных понятий, упоминаемых в тексте.

Пирокластические потоки представляют собой газонасыщенную смесь разноразмерного пирокластического материала, доля обломков в которой значительно превышает газовую составляющую.

Промежуточное положение между селевыми потоками и наносоводными паводками занимает тип потока, обычно обозначаемый в англоязычной литературе как *hyperconcentrated flow* [Pierson, 2005]. Этот термин не имеет общепринятого аналога в русском языке, при этом наиболее близко ему соответствовало бы обозначение «высокоплотный поток», «перенасыщенный поток» или «селеподобный паводок».

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В мире накоплен значительный опыт изучения лахаров с применением различных методов. В настоящем разделе методика исследований лахаров излагается на примере наших исследований на Камчатке.

В июне-июле 2008 г. нами были проведены экспедиционные маршрутные исследования очагов и механизмов зарождения селей на вулканах Шивелуч и Ключевской. В полевых маршрутах проводилось картографирование геолого-геоморфологических условий селеформирования на местности параллельно с дешифрированием космических снимков. Прослеживалась динамика селевых процессов по оставленным следам их схода, с описанием разрезов отложений. Проводился отбор проб мелкоземистого заполнителя всех типов рыхлообломочных и собственно селевых отложений для физико-механического анализа с целью определения их отличий, необходимых для идентификации границ распространения древних лахаров. Полевые маршруты сопровождались подробными описаниями, фото- и видеодокументацией и были обеспечены спутниковой привязкой на местности. Было проведено аэровизуальное обследование труднодоступной юго-восточной части Ключевского вулкана. В результате полевых обследований получена информация о формировании селей при различных по характеру извержениях.

Выполнялся подбор и полевое дешифрирование космических снимков Landsat ETM+, IRS-P5, SPOT HRVIR, любезно предоставленных участникам экспедиции Инженерно-технологическим центром «СканЭкс».

Составлена карта условий формирования селей восточного сектора Ключевского вулкана масштаба 1 : 100000. Для составления карты было проведено полевое и камеральное дешифрирование космического снимка IRS-P5 (Cartosat) от 6 июня 2008 г. Снимок был привязан к топографической основе. Составление карты проводилось в программном пакете ArcGIS.

Был выполнен анализ публикаций по пробле-

ме. Вулканические факторы селеформирования на Камчатке достаточно хорошо изучены. Начиная с 1935 г., здесь регулярно проводились фундаментальные исследования вулканической деятельности. Изучались вопросы взаимодействия вулканизма и оледенения, имеющие непосредственное отношение к возникновению селей. Информация о гидрометеорологическом и снего-лавинном режиме содержится в фондах, публикациях и других источниках. Этот обширный, но разобшённый материал составил базу для нашего анализа закономерностей селеформирования в условиях действующих вулканов Камчатки. Ценная информация была получена при консультациях с сотрудниками Института вулканологии и сейсмологии РАН, в том числе Камчатской вулканологической станции, Геофизической службы РАН, Камчатского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и Камчатского Метеоагентства.

ГЕОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СЕЛЕЙ НА ВУЛКАНАХ

По масштабам селевых процессов, максимальные объемы выносов которых достигают сотен миллионов тонн, вулканические районы являются приоритетными в сравнении с большинством горных территорий. Это обусловлено экстремальными эндогенными проявлениями вулканической деятельности, формирующими рельеф, особый тип отложений и оказывающими влияние на локальные особенности климата и распределение снежно-ледового покрова. Всё это в комплексе предопределяет крайне активное развитие эрозионно-селевых процессов.

Феноменальные особенности образования селей, обусловленные активным вулканизмом, рассматриваются на примерах вулканов Ключевской и Шивелуч. Последние находятся в самой крупной на Камчатке Северной группе вулканических сооружений, отличающейся преобладанием молодых вулканов и вулканогенно-осадочных отложений четвертичного возраста, что объясняется их расположением в зоне новейших и современных тектонических опусканий. Большую часть её площади, 6500 км², занимает Ключевская группа, включающая 12 вулканов. Из них действующими являются Ключевской, Безымянный, Плоский Толбачик, Ушковский [Федотов и др., 1991]. В нескольких десятках километров к северу от них расположен вулкан Шивелуч. Они относятся к существенно пирокластическим стратовулканам, конусы которых на 70–80% сложены пирокластикой и на 20–30% – лавой [Новейший..., 2005].

Все предпосылки, необходимые для активного развития селевых процессов, выражены здесь в превосходной степени.

Перепад высот от очагов зарождения к аккумуляции селевой массы превышает 3000 м. Уклоны, по которым происходит транспорт селевого материала, изменяются от начальной фазы формирования к его распаду от 45 до 4–5°. Физико-механические свойства грунтов, состоящих из сыпучего мате-

риала – вулканического песка, шлаков и пепла, обеспечивают им высокую подвижность при взаимодействии с потоками вод. Паводки, проявляющиеся ежедневно в период снеготаяния ко второй половине дня по руслам «сухих» рек, приобретают селевой режим.

Склоны вулканических построек, представляют собой «грандиозный эрозионный селевой очаг», а запасы рыхлых отложений, постоянно пополняемые при извержениях, «неисчерпаемы» [Ю.Б. Виноградов, 1969].

Источниками водной составляющей селей являются талые воды сезонного и круглогодичного снежно-фирнового покрова, а также ледников, снежников и ливневых осадков. Камчатский полуостров относится к зоне избыточного увлажнения, хотя распределение осадков здесь крайне неравномерно. Их среднемноголетние суммы колеблются от 400 до 2000 мм. Максимальное количество ливневых осадков достигает 60–70 мм. Основной особенностью климата является существенное преобладание зимних осадков, формирующих мощный снежный покров в горных районах. В среднем его мощность к началу сезона снеготаяния достигает 2–3 м, а на седловинах вулканов, которые являются областями аккумуляции ледников, до 10–15 м [Глазырин и др., 1985].

Вулканические районы Камчатки, благодаря большим высотам и особенностям климата, отличительной чертой которого является многоснежность зим, особенно благоприятны для существования ледников. Здесь находится 415 ледников площадью 880 км². Один из самых крупных узлов оледенения площадью 43 км², находится в Ключевской группе вулканов [В.Н. Виноградов, 1975, 1985]. Её основу составляет ледник, заполняющий кальдерную систему массива вулканов Ушковский и Крестовский. Этот ледник служит областью питания кальдеро-долинных ледников на северо-западных склонах, а на востоке существенно восполняет запасы зоны аккумуляции крупнейших ледников Камчатки – Эрмана и Богдановича.

Интенсивное таяние снега и ледников во время извержений является причиной формирования грандиозных селей. Поэтому в большинстве случаев они формируются в зимнее время и особенно катастрофичны в начале весны.

Ниже рассматриваются региональные условия образования селей на конкретных примерах вулканов Ключевской и Шивелуч, с различными типами извержений.

КЛЮЧЕВСКОЙ ВУЛКАН

Геолого-геоморфологическое строение

Вулкан Ключевской (Ключевская сопка) (рис. 7, 8) является одним из самых активных вулканов мира и самым высоким из действующих на евразийской территории (4835 м в 1987 г.). В среднем за год он поставляет на поверхность 60 млн. т ювенильного материала, почти половину от среднегодового выноса в пределах Курило-Камчатского вулканического пояса. Ключевской представляет собой типичный существенно пирокластический стратовулкан, осложнённый по периферии многочисленными шлаковыми конусами. Его формирование началось в голоцене, около 5000 г. до н.э., отложениями мощных толщ лавово-пирокластического материала.

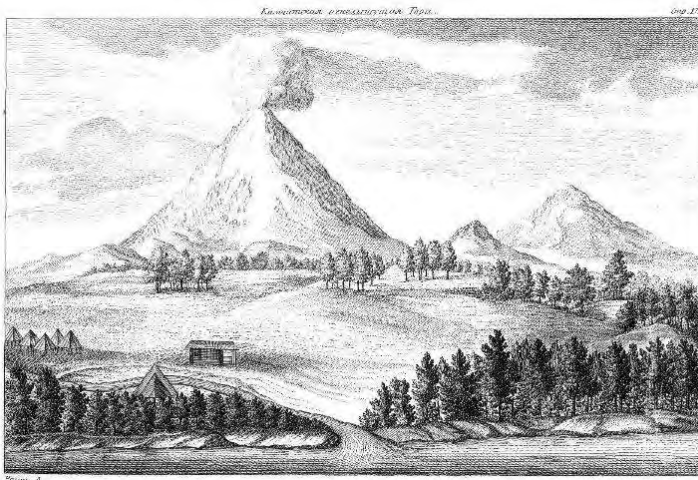


Рис. 7. Камчатская огнедышущая гора [Крашенинников, 1755] – вулкан Ключевской.



Рис. 8. Общий вид основного конуса и боковых кратеров вулкана Ключевской. Фото С.С. Черноморца, 29 июня 2008 г.

В результате активной эруптивной деятельности современный конус вулкана сформировался достаточно быстро и приобрёл ярко выраженную конусообразную форму, с плавно изменяющейся крутизной склонов. Основание конуса сопрягается с обширным равнинным поясом, сформированным паводочными водотоками и лахарами из переотложенных продуктов его вулканической деятельности. Сейчас относительная высота его крутосклонного конуса составляет 3200 м, а площадь основания, включая пролювиальные равнины, порядка 1000 км². Около 4000 лет назад вулкан достиг своего максимального объёма и высоты, именно тогда на его склонах и у подножия начались извержения побочных конусов, часть из которых происходила под ледниками, вызывая их подвижки и лахары. За это время произошло более 100 побочных прорывов, 12 из которых возникли, с перерывами от 2 до 10 лет, между 1932–1987 годами, в восточном секторе вулкана.

Особо мощные пароксизмальные извержения сопровождались сейсмотектоническими обрушениями. Один из таких обвалов произошёл в январе 1945 г. В результате на северо-

западном склоне вулкана возникла обширная лоткообразная структура – шарра, что явилось одной из причин подвижки ледника Эрмана и схода мощного лахара. По мнению И.В. Мелекесцева, северо-западный сектор Ключевского вулкана представляет в этом отношении большую опасность и в будущем [Мелекесцев, 2006].

Привершинная часть конуса изрезана барранкосами и осложнена вулcano-тектоническими желобами, которые, постепенно сужаясь от вершины к подножию, прослеживаются до высоты 2700 м. Постоянные желоба получили названия: Крестовский – на северо-западном склоне вулкана, Козыревский – на западном, Апахончичевский – на юго-восточном. По ним происходит сброс продуктов вершинных извержений к ледниковому постаменту вулкана. При сильных извержениях кратер диаметром 700 м переполняется жидкой лавой, стекающей по желобам и непрерывно меняет свою морфологию, даже во времена относительного покоя.

Особенностью эруптивной деятельности Ключевского вулкана являются побочные извержения, периодически происходящие на фоне постоянной активности центрального кратера. Современные извержения сконцентрированы в восточном секторе, где переслаивающиеся между собой продольные молодые лавовые потоки и трансформированные ими ледники частично перекрыли рыхлообломочный пирокластический чехол, который активно перерабатывается флювиогляциальными и паводочными потоками. Весь этот полигенный комплекс служит потенциальным массивом для формирования селевых потоков, как вулканогенного, так и метеорологически обусловленного генезиса. Самые мощные из них – лахары, как правило, проходят по руслам рек, начинающихся от ледников.

Западный и восточный секторы Ключевского вулкана значительно различаются по комплексу природных условий, определяющих процессы селеформирования.

Западный сектор Ключевского примыкает к массиву покрытых ледниками вулканов Ушковский и Крестовский (4108 м), сопрягающемуся на юге с потухшим вулканом Камень (4575 м), что и определяет его отличие от восточного сектора. Обширная седловина между Ключевским и Крестовским является зоной аккумуляции ледников Эрмана и Богдановича. На высотных отметках 2800–2600 м эта мощная гляциальная система полностью обрамляет западный сектор Ключевского вулкана.

Запасы фирна и льда в ней постоянно восполняются за счёт притока от кальдерного ледника, площадью более 20 км², занимающего усечённый эллипсоидный конус вулкана Ушковского. Одновременно в область аккумуляции фирно-ледовой толщи непрерывно поступают продукты извержений и склоновых процессов активно действующего Ключевского вулкана, которые трансформируются во внутренние и поверхностные морены. Большая их часть сбрасывается по Крестовскому желобу. Содержание обломочного материала в теле ледников достигает 20-30%, а на их поверхности образуется сплошной моренный чехол [Краевая и Кураленко, 1985]. Таким образом, основной функцией западного сектора в цикле селеформирования является потенциальная подготовка ледников Эрмана и Богдановича, которая заключается в единовременной консервации в аккумулятивной зоне как жидкой, так и твёрдой фаз будущих селевых процессов.

Ледник Эрмана широким потоком длиной 16 км спускается на северо-восток до высоты 1200 м. В зоне аккумуляции между склонами вулканов Ключевским, Ушковским и Камнем зарождается ледник Богдановича, узкая и длинная (14 км) лента которого заканчивается на высоте 1500 м. На юго-восточном склоне расположен ледник Шмидта.

Перегруженность твёрдым материалом и отепляющее воздействие геотермического потока являются перманентными предпосылками неустойчивого состояния ледников, способствующими подвижкам при извержениях Ключевского вулкана и образованию лахаров. В случаях пароксизмальных извержений, сопровождающихся сейсмотектоническими обвалами, что характерно для западного сектора, существует реальная угроза схода селей с катастрофическими последствиями для равнинных территорий, прилегающих к Ключевскому вулкану.

Восточный сектор является ареной побочных извержений (рис. 9). В его пределах расположены малые ледники Влодавца, Сопочный и Келля, радиально спускающиеся по склону в пределах высот от 3000 до 1000 м.

На севере восточный сектор ограничен ледником Эрмана, а на юге – ледниками Богдановича и Шмидта. В отличие от западного сектора, в его свободных от ледникового покрова пределах представлен комплекс вулканогенно-осадочных отложений за продолжительный цикл развития вулкана.

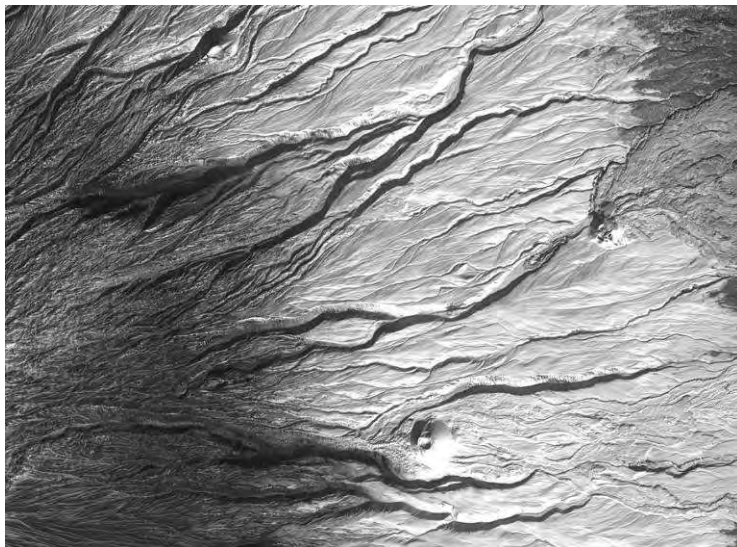


Рис. 9. Часть восточного сектора вулкана Ключевской с многочисленными врезами, образующими «селевой бедленд». Космический снимок IRS-P5 (Cartosat-1), 11 октября 2007 г. Снимок предоставлен ИТЦ «СканЭкс».

Здесь склоны ниже отметок 2800–2600 м сложены рыхлым разуплотнённым материалом и легко подвергаются водной эрозии. Поэтому среди экзогенных рельефообразующих процессов ведущими являются селевые потоки. Механизм их образования прослеживается от начального импульса – к накоплению и транзиту грязекаменной массы в пределах вулканической постройки и её распаду на выположенной поверхности аккумулятивной равнины. Весь комплекс процессов и условий, сопутствующих их образованию, достаточно однозначно определяется высотной зональностью. При амплитуде почти 5000 м здесь выделено 5 высотных поясов с различным вкладом в процессы селеформирования (рис. 10).

1. Первый высокогорный пояс (5000–3000 м).

Высокогорная привершинная часть конуса Ключевского вулкана является первичной зоной зарождения горячих селевых потоков-лахаров. Покров молодого купола сложен агломератовой толщей вулканогенных образований, которая сцементирована льдом и покрыта снежным покровом. Его крутые, от

Селевые потоки на вулканах

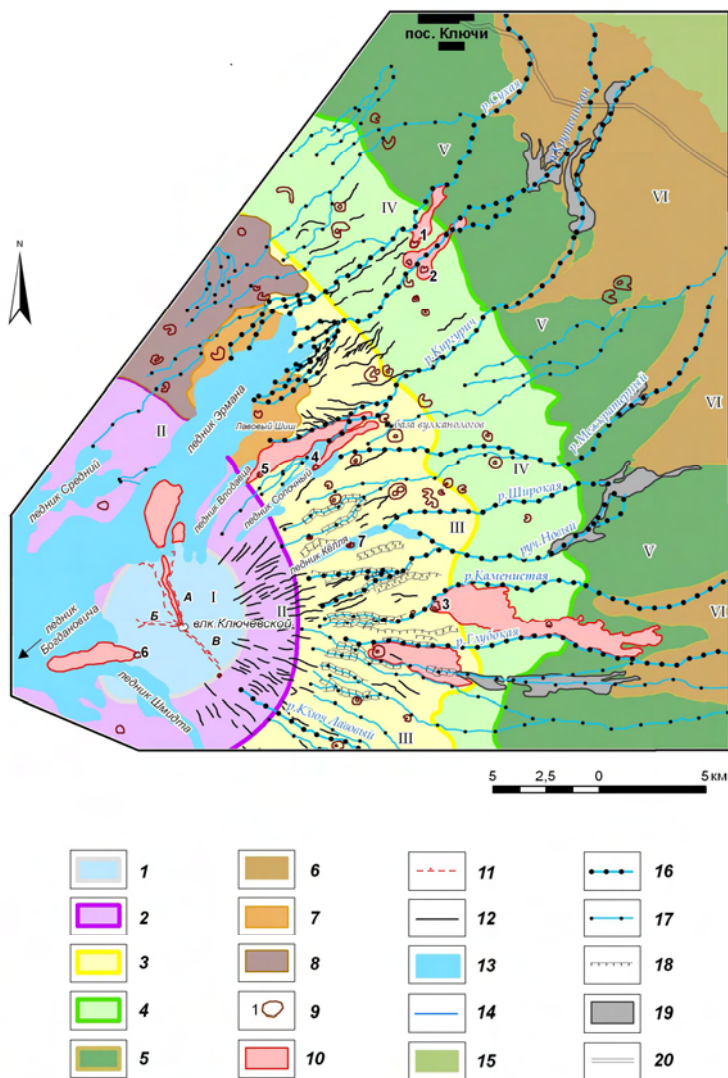


Рис. 10. Условия формирования селей в восточном секторе вулкана Ключевской. Составили И.Б. Сейнова, И.А. Соколов, С.С. Черноморец, О.В. Тутубалина [Сейнова и др., 2010].

Высотные зоны селеформирования: 1 – I. зона сброса продуктов вершинных извержений (от 3000 м и выше); 2 – II. зона ак-

кумуляции ледников и снежников, концентрации сброса водного стока (от 1800 до 3000 м); 3 – III. зона побочных извержений и очагов твердой составляющей селей (от 900 до 1800 м); 4 – IV. Зона развития транспортного селевого процесса по руслам рек (от 400 до 900 м); 5 – V. зона перехода от транспортного к аккумулятивному режиму селей (от 200 до 400 м); 6 – VI. зона аккумулятивных равнин и паводочных отложений рек (ниже 200 м).

Вулканогенные формации: 7 – лавовые поля и платообразные поверхности раннеголоценовых образований андезито-базальтового состава типа Лавового Шиша (4 тыс. лет назад); 8 – андезито-дацитовые лавы вулкана Крестовский; 9 – шлаковые конусы побочных извержений и их номера (**1, 2** – Туйло, **3** – Билукай, **4** – , **5** – Пийпа, **6** – Белянкина, **7** – Новый); 10 – поля современных лавовых потоков; 11 – желоба кратера Ключевского вулкана (А – Крестовский, Б. Ушковский, В – Апахончичевский); 12 – барранкосы.

Гляцио-гидрологические формации: 13 – ледники; 14 – реки; 15 – пойма реки Камчатка.

Селевые формации: 16 – пути схода вулканогенных селевых потоков по руслам рек; 17 – пути схода селевых потоков снеговыведного генезиса; 18 – бровки глубоких каньонов и врезов в рыхлых отложениях; 19 – зоны аккумуляции современных селевых отложений.

Прочие объекты: 20 – грунтовая автодорога.

45 до 35°, склоны слабо расчленены, поскольку обновляются при периодически повторяющихся извержениях, что способствует сохранению почти идеальной конической формы. Образование грязевых потоков происходит при каждом типе извержений в результате взаимодействия жидкой лавы, раскалённых лавин и тефры со снежным покровом и льдистым агломератом. При средних и слабых извержениях лавы, лавины и грязевые потоки распластываются в пределах крутосклонной части вулканического конуса. Во время сильных извержений мощные лахары распространяются на расстояние до 30–35 км от вершинного кратера за пределы вулканической постройки.

2. Второй высокогорный пояс (3000–1800 м).

Представляет собой первоначальную зону выполаживания вершинного купола от 35 до 25°. Его шлейф образован многочисленными лавовыми и пирокластическими потоками. Они

образуют систему узких ложбин, котловин и выемок, называемых барранкосами. Здесь широко развиты многолетние снежники, а сезонные занимают все понижения рельефа, являясь источниками талых вод после схода основного снежного покрова. На этих же высотах формируются зоны аккумуляции ледников Влодавца, Сопочного и Келля. Во время интенсивного снеготаяния и ливней в крутых барранкосах происходит концентрация водного стока. Ниже по течению бурные водотоки, врезаясь в рыхлообломочную толщу, приобретают селевой режим.

3. Среднегорный пояс (1800–900 м).

Среднегорный пояс Восточного сектора Ключевского вулкана является основной селеформирующей зоной. Его особенность – побочные извержения, которые начинаются с мощных эксплозий, выбрасывающих на поверхность большой объём пирокластического материала [Хренов и др., 1991]. Вулканическая деятельность побочных прорывов определяет характер современного геологического строения района и влияет на режим оледенения, склоновых и русловых процессов, ведущим из которых являются селевые.

Самые ранние образования побочных извержений 3–4 тыс. лет назад сформировали гигантский шлейф лавовых потоков базальтового состава и пирокластики. Он хорошо сохранился на севере и перекрывается на востоке полигенным чехлом вулканогенно-осадочных, гляциальных и склоновых отложений. В своей основе эта аккумулятивная толща содержит легко подвижный материал пирокластики и тефры. Массив древнего почвенно-пирокластического чехла сохранился фрагментарно по левобережному приводораздельному склону р. Киргурич. Здесь русло реки на протяжении нескольких километров врезано на глубину 10–20 м в толщу черного вулканического песка, переслаивающегося с пепловыми горизонтами, и представляет собой типичный для вулканических районов эрозионный очаг селеформирования (рис. 11а).

В верхней части среднегорного пояса пирокластические отложения частично перекрыты моренными и флювиогляциальными отложениями, образовавшимися во время малого ледникового периода. Судя по их широкому распространению, масштабы оледенения в недалёком прошлом (300–150 лет назад), были более значительными по сравнению с современными. В регрессивную фазу малого ледникового периода ледники деградировали. Процесс их сокращения был усилен побочными из-

вержениями вулкана. Побочные извержения, после 300-летнего перерыва, происходили в среднегорном поясе с 1932 по 1989 годы. Они провоцировали подвижки ледников и образование селей вулканогенно-гляциального генезиса. В настоящее время все ледники восточного сектора находятся в угнетённом состоянии, а ледник Келля – в стадии отмирания.



Рис. 11. Пути прохождения лахаров на склонах вулкана Ключевской. Слева: река Киргурич. Фото И.Б. Сейновой, 27 июня 2008 г. Справа: эрозионный врез р. Глубокая на восточном склоне вулкана Ключевской. Фото с вертолета С.С. Черноморца, 2 июля 2008 г.

Потенциальным селевым массивом у подножия восточного сектора Ключевского вулкана является непрерывная толща аккумулятивного шлейфа, состоящая из слоистых вулканических песков, тефры и пепловых горизонтов, мощностью порядка 30 м. Её поверхность частично перекрыта глыбовыми потоками лав, флювиогляциальными и моренными отложениями.

Сели зарождаются в истоках берущих здесь начало рек и в многочисленных притоках, врезам и промоинам, густой сетью расчленяющих склоны. Эти эрозионные формы являются первичными звеньями речной сети в верховьях бассейнов основных селеопасных рек восточного сектора (реки Сухая, Крутенькая, Киргурич, Межкратерная, Глубокая, Лавовый Ключ и др.), по руслам которых лахары достигают предгорных равнин.

Мощные врезы, образованные лахарами при извержениях, служат в дальнейшем очагами массового зарождения селей метеорологически обусловленного генезиса (рис. 11б). Здесь классически выражено правило, «которому природа редко изменяет – приуроченность селевых бедлендов первому поясу

низкого обрамления..., который сплошной полосой или пунктиром обозначает границу горного и равнинного миров» [*Виноградов и Виноградова, 2008, с. 150*].

4-5. Низкогорный пояс (900-200 м).

Селевой сток, сформировавшийся в среднегорном поясе в первичных звеньях речной сети, вниз по пути к низкогорью и на высотах 1000-900 м сосредотачивается в единое русло. Под воздействием мощной эрозии здесь образуются наиболее глубокие участки долин. Они имеют вид каньонов с отвесными стенками высотой 70-80 м. В долинах рек Крутенькая и Киргурич на этих высотах вскрыт древний фундамент крупнопорфировых лав, перекрытый андезито-базальтовыми потоками вершинных и побочных извержений Ключевского вулкана [*Былинкина, 1954*].

6. Равнинный пояс (ниже 200 м).

Пояс образован слившимися дельтами селевых рек и занимает обширные пространства у подножия вулканов. В пределах дельт реки, постоянно мигрируя, переносят твердый материал на значительные расстояния. Их отложения представлены валунно-галечниковым материалом грубой укладки с гравийно-песчаным заполнителем и характерной линзовой слоистостью (рис. 12а).

Для этого пояса характерен феномен так называемых «сухих» рек. В периоды интенсивного снеготаяния (май–июль) селевая суспензия заливает десятки километров дорог у подножия вулкана. Передвижение транспорта по таким дорогам надолго становится невозможным. С наступлением летней межени сток рек полностью исчезает, оставляя следы сухих русел и открытые поверхности «черных песков». Обширные равнинные пространства у подножия вулканов, в своей основе сложенные селевыми наносами, представляют непрерывный элемент ландшафта вулканических районов.



Рис. 12. Вулкан Ключевской: а) Селевые отложения в полосе аккумулятивных равнин. Дельта р. Киргурич. Фото С.С. Черноморца, 25 июня 2008 г. б) Селевая терраса, сложенная тонкодисперсным материалом, в долине р. Киргурич. Фото И.Б. Сейновой, 29 июня 2008 г. в) Крупноглыбовые селевые террасы р. Сопочная – правого притока р. Киргурич. Фото И.Б. Сейновой, 28 июня 2008 г. г) Ледник Сопочный, подвижки которого при побочных извержениях вулкана Ключевской вызывали сход лахаров. Фото С.С. Черноморца, 26 июня 2008 г.

Вулканические условия формирования селей на Ключевском

Вулканическая деятельность Ключевской сопки проявляется сериями вершинных извержений, разделённых периодами относительного покоя. По определению Б.И. Пийпа, они именуются эруптивными циклами [Piiip, 1956]. Активизация вершинного кратера на Ключевском вулкане сопровождается побочными извержениями. На завершающей фазе извержения вершинного кратера приобретают катастрофический пароксизмальный характер.

Согласно проведенным исследованиям установлено,

что с 1697 по 2009 годы произошло 74 события вершинных и побочных извержений.

С конца 17 века по 1932 год Ключевской вулкан формировался за счёт вершинных извержений. За этот период их произошло 38, из которых шесть были катастрофическими пароксизмальными с разрушением вершинного кратера.

С 1932 г., наряду с вершинными, началась активизация побочных извержений, которая продолжалась по 1987 г. В течение 55 лет в ареальной зоне вулканического конуса произошло 12 извержений с образованием многочисленных побочных шлаковых конусов и излияниями лавовых и пирокластических потоков.

Завершающее эруптивный цикл катастрофическое пароксизмальное извержение произошло в 1994 г. Всего за 300-летний период произошло 8 катастрофических извержений, что даёт среднюю повторяемость 1 раз в 40–50 лет. Пароксизмальные извержения сопровождаются сеймотектоническими обвалами и раскалёнными потоками лавы и пирокластики, которые внедряются в ледниковую зону. Следствием вулканических катаклизмов является сход по руслам рек мощных селевых потоков – лахаров, выносы которых представляют большую опасность для освоенных равнинных территорий.

С 1994 по 2002 гг. вулкан находился в стадии покоя.

Согласно долгосрочному прогнозу, современный эруптивный цикл будет продолжаться до 2013 года [Жаринов и Демьянчук, 2008].

Ниже рассматривается хронология формирования селей при вершинных и побочных извержениях вулкана Ключевской.

Вершинные извержения

Из документально зафиксированных и изученных пароксизмальных извержений известны три даты: 1737 г. [Крашенинников, 1755], 1945 г. [Пийп, 1956], 1994 г. [Селиверстов, 2007].

Сведения о лахарах в 1737 г. не приводятся, но можно с высокой степенью вероятности предполагать, что при столь сильном извержении они, скорее всего, были. Мощный пароксизм в январе 1945 г. сопровождался сеймотектоническим обвалом в верхней зоне ледника Эрмана, что явилось одной из причин его подвижки. Одновременно ледник испытывал термическое воздействие лавового потока, изливавшегося по Крестовскому желобу. Процессы, разрушающие тело ледника при под-

вижках, как правило, провоцируют сход мощных селевых потоков. Извержение 1945 г. сопровождалось мощным выбросом пепла, выпадение которого на снежный покров вызывало бурное таяние. «Обрушение на склоны конуса колоссальных масс раскаленных частиц вызвало бурное таяние глетчеров и мощного покрова снега. Образовавшийся при этом объем талых вод и грязевых масс был настолько велик, что потоки воды и грязи, несмотря на суровый мороз (-33°C), пронеслись вниз на расстояние до 30-35 км от места зарождения на северо-западном склоне конуса. Талая вода при этом влилась в р. Камчатку (в 10 км к востоку от п. Ключи), а грязевые потоки остановились, не дойдя 3–5 км до реки» [Заварицкий и др., 1954, с. 39]. В сложившихся условиях происходило массовое образование селевых потоков, особенно мощных по ближайшим к леднику рекам Сухой, Крутенькой, Киргуричу.

В 1978–1980 гг. произошло эксплозивно-эффузивное извержение вершинного кратера. От ряда предыдущих оно отличалось тем, что впервые после 1945 года заполнившая чашу кратера лава стала поступать на внешний склон вулкана. При её взаимодействии с льдистым конгломератом, фирном и льдом, покрывающим конус вулкана, на его крутых склонах происходило формирование грязевых потоков.

Существенно эффузивное извержение 1984–1987 гг. было особенно продолжительным и мощным за период после 1945 г. Исследованиями сотрудников Института вулканологии и сейсмологии одновременно с основными наблюдениями за извержением вулкана прослеживалась ситуация формирования лахаров. Лавовые потоки в течение всего цикла извержения периодически изливались по Крестовскому, Козыревскому и реже по Апахончичевскому желобам. Во время усиления вулканической деятельности их расход значительно увеличивался и раскалённые до 1000°C потоки спускались до высот 3200-2800 м в ледниковый пояс вулкана. По склонам скатывались лавины раскалённых обломков. Пеплопадами захватывались площади от 10 до 500 км^2 . Парогазовое облако при фреатических взрывах поднималось до высоты 13 км. Грязевые потоки растекались более чем на 30 км от подножия вулкана [Хренов и др., 1991].

Пароксизмальное извержение Ключевского вулкана повторилось почти через 50 лет. Оно началось 7 сентября и продолжалось до 2 октября 1994 года. 1 октября из вершинного кратера на высоту 12-13 км поднялась эруптивная колонна. Ис-

течение пеплогазовой колонны происходило по всему сечению кратера. Её тепловое воздействие вызывало протаивание ледяного конгломерата привершинной части конуса, локальными потоками грязи стекающего вниз по склонам. Лахары прошли по уже проработанным руслам путь 25-30 км и достигли р. Камчатки [Селиверстов, 2007].

В течение семилетнего периода текущего эруптивного цикла, с 2002 по 2009 гг., произошли четыре извержения. За это время имеются сведения не только о фактах, но и о датах схода мощных лахаров, что имеет значение для понимания механизма их зарождения. Первая активизация, включая фазы подготовки, непосредственного извержения и релаксации, была самой длительной. Она продолжалась с 17 января 2002 г. по 3 апреля 2004 г., но характеризовалась слабой эффузивной деятельностью. Лава периодически заполняла кратер без излияния на склоны с 19 апреля 2003 г. по 1 февраля 2004 г., что исключало формирование лахаров [Иванов, 2008]. Вторая активизация продолжалась с 10 января по 30 мая 2005 г. Сильное извержение наблюдалось 2,5 месяца, с 17 января по 3 апреля. Оно сопровождалось пеплопадами и излиянием лавы по Крестовскому желобу. В конце января при внедрении лавового потока в ледник Эрмана, происходили фреатические взрывы высотой до 7-8 км. Сход лахаров отмечался 2 и 25 февраля. Они зарождались от ледников Эрмана и Влодавца и по рекам Крутенской, Киргуричу достигали р. Камчатка, в 6 км от пос. Ключи [Селиверстов, 2007].

Третья активизация вулкана началась 25 ноября 2006 г. и завершилась 15 июля 2007 г. Фаза непосредственного извержения продолжалась 4 месяца, с 18 марта по 15 июля 2007 г. [Жаринов и Демянчук, 2008]. Активность вулкана оставалась на высоком уровне до конца извержения и по масштабам была близка к существенно эффузивному извержению 1987–1988 гг. Во время эксплозивной деятельности высота эруптивной колонны достигала 7–8 км. Этап эксплозивно-эффузивного извержения, с 28 марта по 3 июня характеризовался заполнением лавой вершинного кратера и её излияниями на склоны вулкана. Через месяц после появления лавы в Крестовском желобе, 28 апреля, фронт потока продвинулся по леднику Эрмана до отметки 2200 м, а его длина достигла 4,5 км. Излияния лавы происходили попеременно в Крестовском и Ушковском желобах, а также одновременно в двух желобах сразу. К концу извержения, с 30 мая

по 3 июня поступление лавы наблюдалось и в Апахончичевском желобе. Непосредственные контакты раскалённых потоков со снежным и ледниковым покровом сопровождались интенсивными фреатическими взрывами. Массовое формирование селевых потоков отмечалось с 22 апреля по 30 мая 2007 г. Они прошли по всем разработанным руслам рек восточного сектора вулкана.

Новейшее, четвертое по счёту, извержение Ключевского началось в ноябре 2008 г. Поток лавы с температурой 1000 °С спустился по Крестовскому желобу до высоты 3000 м, достигнув зоны аккумуляции ледника Эрмана. По информации Н.А. Жаринова [*личное сообщение*], сход лахара по р. Крутенкой был отмечен 9 декабря 2008 г.

В июне 2008 года нами были обследованы следы схода лахаров 2007 г. в долинах рек Киргурич и Сопочная. Следы сохранились в виде террас высотой от 2 до 5 м, различающихся по морфологии в зависимости от гранулометрического состава отложений. При преобладании в селевой массе мелкоземистой фракции, террасы имели горизонтально выровненную поверхность и по своему строению идентичны аллювиальным (рис. 12б). При отложениях крупных глыб лавы в пойме р. Сопочной остались хаотичные навалы по её берегам (рис. 12в). По своей структуре они гораздо ближе к моренным, нежели пролювиальным фациям, что значительно затрудняет их идентификацию при обследованиях. Своими характерными признаками и в первую очередь отсутствием окатанности и сортировки крупноглыбовые отложения лахаров отличаются также от однородно выраженных береговых валов мощных селевых потоков высокогорных районов без проявления вулканизма.

Побочные извержения

Исследованиями Камчатской вулканологической станции отмечены значительные изменения в динамике вулканической деятельности с 1932 г. по настоящее время. В этот период наряду с непрерывными извержениями вершинного кратера происходили серии побочных извержений. Если за предшествующие 1932 г. 212 лет не было побочных извержений, то за последующие 55 лет их зафиксировано 12 [*Хренов и др., 1991*]. Для восточного сектора Ключевского вулкана наиболее характерны катастрофичные для малых ледников Сопочного, Вло-

дава и Келля извержения побочных кратеров, значительно изменившие режим питания ледников.

Первое историческое побочное извержение на склоне вулкана произошло на высоте 400–500 м. Оно началось 25 января 1932 г. с образованием эксплозивного кратера Киргурич, из конуса которого вытек шлакоглыбовый поток. Извержение продолжалось до 25 мая, по времени охватив весь период накопления максимального снежного покрова и его интенсивного снетаяния. Таким образом, сложились благоприятные условия для образования селей под воздействием лавы и пирокластики на снежный покров. В последующем, при образовании в летний период кратеров Туйла и Биокось происходило подпруживание реки Сухой с истоками от ледника Эрмана, что также не исключало формирования селевых потоков по её руслу.

Самым крупным по геологическому воздействию из исторических побочных извержений было извержение Билукая, которое началось 7 февраля 1938 г. и продолжалось 13 месяцев. На высотах от 1900 до 1000 м по трещине длиной в 5 км возникло несколько взрывных кратеров. Излившиеся из них лавы и пирокластика достигли аккумулятивной равнины, а многочисленные селевые потоки их сопровождавшие, оставили мощные врезы в рыхлообломочных отложениях, ставшие преобладающей формой рельефа юго-восточного склона вулкана. В этом же секторе, на завершающей стадии пароксизма 1945 г., образовались побочные кратеры Крашенинникова, Заварицкого и Апахончич.

Влияние побочных извержений на подвижки ледников Сопочного и Влодава было установлено в результате сравнения аэрофотоснимков за период с 1949 по 1967 годы и непосредственных наблюдений за вулканической деятельностью [В.Н. Виноградов, 1985]. С 13 по 25 июня 1953 года в результате трещинного извержения сформировался кратер Белянкина, из которого к языку ледника Сопочного излился лавовый поток. До извержения конец ледника находился на уровне 1440 м, а его начало на 3380 м. В результате подвижки ледник разделился на две ветви и продвинулся вниз на 1 км, увеличив площадь на 0,6 км². Его поверхность полностью покрыта чехлом вулканических отложений (рис. 12г). Глубокие врезы по рекам Сопочной и Межкратерной с истоками от его разветвлённых окончаний свидетельствуют о мощных селевых проявлениях того периода. В этом же году была зафиксирована подвижка ледника Вло-

давца, в своих истоках расположенного близко от прорыва Белянкина. До извержения конец ледника находился на высоте 1960 м, а высшая точка – на конусе вулкана на высоте 3160 м. Современное положение конца ледника – 1600 м.

6 октября 1966 г. произошёл прорыв серии побочных кратеров выше конуса Белянкина. У северо-восточного окончания ледника Влодавца на высоте 1800-2100 м образовался кратер Пийпа. Трещина прорыва проходила под мёртвым льдом. При этом в леднике раскрывались трещины шириной до 8 м и глубиной до 15 м, затекание лав в которые сопровождалось мощными взрывами. Извержение продолжалось 3 месяца. По руслам рек Киргурича и Сопочной излился лавовый поток длиной 11 км. Прохождение потока лавы вызвало незначительную, порядка 130 м, подвижку ледника Сопочного. В июне и июле 1967 года в районе прорыва у ледника Влодавца произошел вторичный разогрев, который сопровождался бурным таянием снежного покрова, ледника и захороненного льда. Вместе с ледником, который продвинулся на 900 м, активизировались отдельные участки мёртвого льда. Таким образом, при побочном извержении Пийпа сложилось сочетание гляциально-вулканических факторов, способствовавшее образованию лахаров по руслам рек Киргурич и Сопочная.

В конце длительного извержения вершинного кратера Ключевской (март 1972 – октябрь 1974 гг.) в истоках ледника Богдановича на юго-западном склоне вулкана 23 августа 1974 г. произошел прорыв побочных кратеров. Сопровождавший его процесс формирования лахара непосредственно наблюдался и описан в работах В.Н. Виноградова [1985] и его коллег. При этом наибольшее внимание уделялось изучению взаимодействия лавовых потоков с ледником. Серия побочных кратеров образовалась у перевала между Ключевским и Камнем. Самым активным был нижний кратер. В нём образовалось лавовое озеро, из которого лавовый поток к 12 сентября продвинулся на 2 км от эффузивного кратера, где затормозился в результате охлаждения. Вновь поступающие порции лавы продолжали внедряться в ледник, что сопровождалось мощными фреатическими взрывами и привело к большому нагромождению скоплений остывающей лавы. Поступающая лава изливалась на ледник подушками толщиной до 20 м, которые быстро погружались в лёд. Толща ледника медленно реагировала на тепловое воздействие лавовых потоков, и его не удалось проплавить до основа-

ния в течение месяца. Только к концу сентября лавовый поток углубился и стал двигаться подо льдом. 12 октября был отмечен мощный подледный взрыв, в результате которого часть ледника протяжённостью около 700 м, вместе с обломками лавы взметнулась на высоту 500-600 м. В леднике образовался глубокий каньон, в котором со скоростью 10-15 м/с проносился поток шириной до 50 м. На его дне оставались обломки лавы с температурой до 350 °С, а также нагромождения льда.

Побочный прорыв Предсказанный произошёл 8 марта 1983 года в верховьях ледника Келля на высоте 2875 м. Его особенностью было сохранение единого эруптивного центра в течение 112 дней. На схеме В.Н. Двигало [*Хренов и др., 1991*] показаны пути схода грязевых потоков, образовавшихся во время извержения. Прорывы лавы в фирновой области ледника Келля привели к отмиранию его языка в результате отчленения от области питания. В настоящее время, по данным наших обследований в июне 2008 г., тело ледника, трансформированное в мёртвый лёд, разрушается водным потоком, разрабатывающим русло и аккумулирующим наносы на его поверхности.

Извержение Предвиденное началось 28 февраля 1987 г. после интенсивной деятельности вершинного кратера на юго-восточном склоне вулкана. По всей длине трещины, на высотах 3800–3400 м произошло излияние лавы. На схеме В.Н. Двигало показан путь грязекаменного потока, причиной которого было таяние снега. 6 марта трещина открылась ниже по склону в леднике Шмидта, что могло послужить причиной селя гляциально-вулканического генезиса [*Хренов и др., 1991*].

Таким образом, в пределах восточного сектора Ключевского вулкана сложились чрезвычайно благоприятные условия для активного развития селевых процессов. Серия побочных извержений в 20 столетии способствовала их интенсификации, поскольку образовавшиеся в то время мощные врезы в рыхлых отложениях служат очагами зарождения селей в настоящее время при снеготаянии и ливневых осадках.

В таблице 1 представлен каталог сведений о селях, которые формировались при извержениях вулкана Ключевской в период с 1737 по 2008 г.

Таблица 1. Сведения о лахарах на вулкане Ключевской.

Даты извержений	Характеристика извержения	Локализация (желоб или новый кратер)	Река, по которой лахары зафиксированы или могли проходить	Даты схода лахаров и дополнительные сведения	Источник сведений (ссылка)
<i>Вершинные извержения</i>					
25.09.1737 – весна 1738	Пароксизмальное		Нет сведений		[Крашенинников, 1755]
1945	Пароксизмальное	Крестовский желоб	Крутенькая, Киргурич	Тектонический обвал, подвижка ледника Эрмана	[Пийп, 1956]
1978–1980	Эксплозивно-эффузивное	Крестовский желоб	Крутенькая	лахары на склонах	В.Н. Двигало [Хренов и др., 1991]
1984–1987	Эксплозивно-эффузивное	Крестовский, Ушковский, Апахончичевский желоба	Крутенькая, Киргурич, Апахончич, Лавовый Ключ и др.		В.Н. Двигало [Хренов и др., 1991]
12.1988		Крестовский желоб	Крутенькая		[Федотов и Жаринов, 2007]

Селевые потоки на вулканах

30–31.07.1993		Крестовский желоб	Кру- тенькая		[Федотов и Жаринов, 2007]
7.09 – 2.10.1994	Пароксизмальное	Крестовский и Ушковский желоба	Кру- тень- кая, Киргу- рич и др.	1.10.1994. Отдель- ные рукава лахаров достиг- ли р. Камчат- ка	[Селивер- стов, 2007, Федотов и Жаринов, 2007]
17.01–3.04.2005	Экспло- зивно- эффузив- ное	Крестов- ский же- лоб	Кру- тень- кая, Киргу- рич	2 и 26.02. 2005	[Селивер- стов, 2007]
18.03 – 25.07.2007	Экспло- зивно- эффузив- ное	Крестов- ский, Ушков- ский, Апахон- чиев- ский же- лоба	Кру- тень- кая, Киргу- рич, Апа- хончик и др.	В пери- од 22.04- 24.05. 2007	[Жаринов и Демянчук, 2008] (р. Крутень- кая), наши поле- вые обсле- дования (р. Киргурич)
ноябрь 2008 – 2009	Эффу- зивное	Крестов- ский же- лоб	Кру- тенькая	8-9.12. 2008	Н.А. Жари- нов [личное сообщение]
Побочные извержения					
25.01–25.05.1932	Экспло- зивно- эффузив- ное	кратеры Туйло, Биокошь, Киргурич	Сухая, Кру- тенькая	катаст- рофиче- ское таяние снега и подпор рек Су- хой и Кру- тенькой лавовым поток	[В.Н. Вино- градов, 1985, Хре- нов и др., 1991]
7.02.1938 –	Экспло- зивно-	кратер Билукай	Каме- нистая,	Таяние снега	[В.Н. Вино- градов,

начало 1939	эффузив- ное		Глубо- кая		1985, <i>Хре- нов и др., 1991</i>
23.10. 1946	Эффу- зивное	кратер Апахон- чич	Лаво- вый Ключ	Нет сведе- ний о лахагах	<i>[В.Н. Вино- градов, 1985, Хре- нов и др., 1991]</i>
13– 25.06. 1953	Эффу- зивное	кратер Белянки- на	Правый Киргу- рич (Со- почная) , Меж- кратер- ный	подвиж- ка лед- ников Сопоч- ного и Влодав- ца	<i>[В.Н. Вино- градов, 1985, Хре- нов и др., 1991]</i>
6.10. 1966– 12.1966	Экспло- зивно- эффузив- ное	кратер Пийпа	Киргу- рич	12.10. 1966. Под- вижка ледника Влодав- ца	<i>[В.Н. Вино- градов, 1985, Хре- нов и др., 1991], наши полевые обследова- ния 2008 г.</i>
06– 07.1967	Вторич- ный ра- зогрев	кратер Пийпа	Киргу- рич	06- 07.1967. Вторич- ная под- вижка ледника Влодав- ца на 1 км, тая- ние мертвых льдов	<i>[В.Н. Вино- градов, 1985, Хре- нов и др., 1991], наши полевые обследова- ния 2008 г.</i>
23.08– 12.1974	Экспло- зивно- эффузив- ное	побочные кратеры в истоках ледника Богдано- вича	Студе- ная	подлед- ное из- верже- ние, фреати- ческий взрыв и частич- ное раз- рушение	<i>[В.Н. Вино- градов, 1985]</i>

Селевые потоки на вулканах

				ледника.	
8.03– 27.06. 1983	Эффу- зивное	кратер Предска- занный	Широ- кая, Новый	Под- вижка ледника Келля (отчле- нился от области питания и стал мертвым льдом), таяние снега	В.Н. Двига- ло [<i>Хренов и др., 1991</i>], наши поле- вые обсле- дования 2008 г.
24.02. 1987	Экспло- зивно- эффузив- ное	кратер Предви- денный	Черно- ва, Голу- бельная	бурное таяние снега на контакте с лавой	В.Н. Двига- ло [<i>Хренов и др., 1991</i>]
<i>Лахары на Ключевском при извержении других вулканов</i>					
30.03. 1956	Пароксиз- мальное	вулкан Безы- мянный	Сухая Хапи- ца, Голу- бель- ная, Черно- ва	пирок- ластиче- ские потоки и горячий пепел вызвали снего- таяние	[<i>Горишков и Богоявлен- ская, 1965</i>]

Механизм формирования водной составляющей селей гля- циально-вулканического генезиса

В результате анализа условий формирования селей при извержениях Ключевского вулкана было установлено, что основной причиной их проявления являлось катастрофическое таяние и подвижки ледников. По типу водной составляющей это соответствует гляциально-вулканическому генезису. Следует отметить, что в арсенале селевой терминологии такой генетический тип селеформирования не рассматривался. Механизм возникновения водного импульса селя в условиях сверхвысоких температур до сих пор не изучен из-за отсутствия фактического материала наблюдений. Возможный сценарий развития процес-

са (извержение – таяние – водный импульс селеформирования), разработанный нами, является результатом обобщений данных литературных источников [Цюрупа, 1985, В.Н. Виноградов, 1985, Краевая и Кураленко, 1985] и результатов наших маршрутных обследований гляциальной зоны зарождения селей.

Противостояние раскаленного потока лавы с ледником приводит к образованию перегретого пара. При контактах лавы со льдом происходит фреатический взрыв, и на высоту в несколько километров выбрасывается аэрозольный фонтан, на 90% состоящий из перегретого воздуха. Взрывы приводят к разрушению фронта противостояния лавы и ледника, что значительно расширяет зону теплообмена. Таким образом, облегчается проникновение горячего воздуха и водяного пара внутрь ледника. Завоевание лавой объема в толще льда происходит при ведущей роли промежуточного агента – конвекции и перемещения нагретого воздуха, водяного пара и воды по трещинам и дренажной системе ледника. Водяной пар способен заполнить систему трещин в зоне противостояния лавы и льда, где в процессе вытаявания возникают провалы и внутриледниковые озёра, что увеличивает теплообмен. Потоки талой воды растекаются достаточно далеко за пределы фронта противостояния по внутриледниковым и подлёдным дренам. В результате ледовое тело непрерывно пропитывается водой в течение всего цикла извержения.

Таким образом, происходит подготовка к внедрению лавы в ледник. По наблюдениям В.Н. Виноградова [1985], процесс внедрения может продолжаться в течение месяца от его начальной стадии поступления лавы на поверхность ледника до ее внедрения и подледного течения. Углубившаяся в ледник лава продолжает своё продвижение подо льдом, заполняя ранее вытаявшие пустоты и тальвеги дренажной сети, вытесняя из них воду и превращая её в пар. Это ведет к внутренним взрывам, частичному или полному разрушению ледника, и высвобождению талых вод, вызывающих сход селей гляциально-вулканического генезиса.

В механизме зарождения селей гляциально-вулканического генезиса важным фактором является накопление продуктов вулканической деятельности в леднике в процессе извержения. Продвигаясь по поверхности ледника, фронт лавового потока тормозится и образует характерные валы, т.н. подушки, которые погружаются в лед. При поступлении новых

порций раскалённого материала здесь начинается образование лавового поля. В процессе расширения оно растекается на множество рукавов, которые постоянно мигрируют и переслаиваются. В конечном итоге структура ледника преобразуется в типичный «слоеный пирог», а его поверхность покрывается сплошным каменным чехлом (рис. 12г).

Пористый вулканический материал при течении льда легко истирается и даёт огромные массы тонкодисперсного материала (до 20–40% алеврита и 10–15% пелита [Краевая и Кураленко, 1985]), который является основой транспортирующей суспензии селевого потока (рис. 13). Подобный по структуре шлейф отложений шириной от 100 до 200 м был обнаружен нами в 2008 году в котловине между массивом Лавового Шиша и языком ледника Эрмана.

Т.С. Краевая и М.П. Кураленко [1985] отмечали необычно широкое распространение водно-ледниковых отложений у подножий активных вулканов, представляющих собою «субаэральные флювиогляциальные дельты», сложенные мелкообломочными тонкослоистыми наносами с включением грубообломочных несортированных «селевых пачек». Сходные по генезису образования у края ледника Эрмана по аналогии возможно отнести к флювиогляциальным террасам, поскольку они образованы выносами водных потоков, зарождающихся в боковых ответвлениях дренажной сети ледника. Содержание в этих отложениях прослоев крупных глыб лавы является следствием схода селевых потоков при значительном увеличении расходов талых вод во время извержений. Бурному режиму многочисленных боковых потоков способствует активная разработка дренажной сети ледника не только во время извержений, но и в спокойный период вулканической деятельности (рис. 13), что наблюдалось нами при обследовании ледника Эрмана в 2008 г. Таким образом, жизнедеятельность ледника протекает в постоянной подготовке к селевому процессу, для которого наличие источников и путей сброса талых вод, вкупе с восполняемыми запасами легко подвижного рыхлообломочного материала, имеет большое значение.



Рис. 13. Флювиогляциальные и селевые террасы краевой зоны ледника Эрмана. Фото С.С. Черноморца, 29 июня 2008 г.

Сложно организованная система ледников на активных вулканах, образно говоря, является «природной фабрикой непрерывного воспроизводства селевого процесса». Весь ледник представляет собой единый селевой очаг, сочетающий в потенциале как водную, так и твёрдую составляющие селевого процесса. В этом состоит его отличие от гляциальных селевых очагов в невулканических районах, которые приурочены к моренным отложениям, обрамляющим ледники, в то время как функция последних заключается в генерации водного импульса селеформирования.

ВУЛКАН ШИВЕЛУЧ

Геолого-геоморфологическое строение

Шивелуч, самый северный из действующих вулканов Камчатки, обособленно расположен в 50–60 км от Ключевской группы. По объёму ювенильных продуктов выноса (36 млн. т в год) он уступает Ключевскому, однако 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 – 3283 м, а высшая точка действующего Молодого Шивелуча – 2800 м. Старый Шивелуч начал формироваться 60-70 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 селеактивной 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 км³ материала постройки. В конце верхнего плейстоцена (25-10 тыс. лет назад) вулканическая постройка Шивелуча была самым крупным центром оледенения на Камчатке. Площадь ледникового щита охватывала 3000 км². Он имел форму овала 50 на 80 км, распространяясь в южном направлении, поскольку на юг открывалась кальдера, служившая основной зоной аккумуляции снежно-фирновой толщи. Шивелучский ледник достигал реки Камчатки и занимал территорию современного поселка Ключи. От подножья вулкана далеко на юг распространены флювиогляциальные равнины и поля аккумулятивного холмисто-котловинного рельефа с озёрами, 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 произошло более 60, что в несколько раз чаще, чем на других вулканах Курило-Камчатского пояса. Голоценовые отложения пирокластических потоков и обвалов занимают площадь более 300 км². 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 км³ обвального и ювенильного материала, покрывавшего площади до 100-150 км² слоем мощностью до 50 м. Интенсивные пеплопады происходили на площадях в десятки и сотни квадратных километров. По руслам всех рек и ручьёв сходили мощные лахары. Такие извержения повторялись через 100-300 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 раскалённых обломочных лавин и пирокластических потоков с объёмами на порядок меньше, чем при катастрофических. В ходе каждого извержения формировались купола объёмом от 10 до 300 млн. м³. Длительность таких извержений охватывала 1944–1950, 1980–1982, 1993–1995, 2001, 2004–2005 и 2008–2009 гг.

На рис. 14 показан юго-западный сектор вулкана Шивелуч.

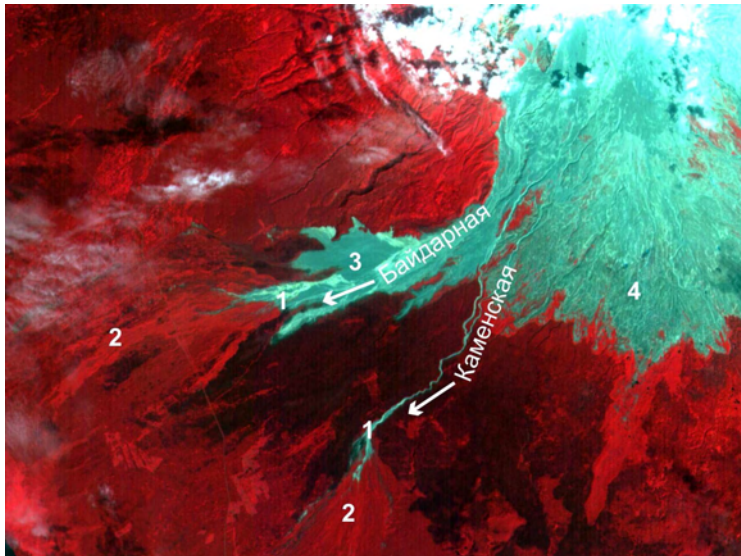


Рис. 14. Юго-западный сектор вулкана Шивелуч: 1 – отложения лахаров XX века, 2 – отложения лахаров XX века, частично по-
рошенные лесом, 3 – отложения пирокластического потока 2005 г., 4 – отложения обломочной лавины 1964 г. Космический снимок SPOT-2, 3 августа 2008 г. Снимок предоставлен ИТЦ «Скан-
Экс».

Вулканические условия формирования селей на Шивелуче

Вулканические предпосылки селевых процессов на Шивелуче рассматриваются на примерах гигантского извержения 1964 года и последующих событий 2004–2005 гг. [Белоусов и 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 объёму выброшенной пирокластики 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 языка в 15–16 км отложились на площади 98 км². Её объём составил 1,5 км³ при мощности от 3 до

150 м. Характер грубообломочных отложений был исключительно резургентный, с отсутствием стратификации и сортировки. Часть материала находилась в смёрзшемся 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 озёрами 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 её движении со скоростью 60-80 м/с и из-за последующего слабого развития эрозии на пологом пространстве её отложений. Обрушение постройки привело к снятию давления в магматической системе вулкана, и в результате фреатического взрыва произошёл выброс пепла объёмом около 0,01 км³. На заключительной стадии извержения был выброшен ювенильный пирокластический материал объёмом 0,8 км³. Раскалённая масса пирокластических потоков полностью заполнила все неровности рельефа – долины рек и ручьёв, врезы, рывины 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 [Гирина и др., 2007]. 21 мая 2004 г. сотрудниками Института вулканологии и сейсмологии 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. Измеренная в 15 см от поверхности температура отложений изменялась от 130 до 300 °С.

В 2005 году произошло два пароксизмальных извержения вулкана Молодой Шивелуч. Извержение 27 февраля было самым сильным после пароксизма 1964 г., а повторившееся 22 сентября – на порядок меньше. В июле сотрудниками Института вулканологии проводились полевые исследования отложений пирокластических потоков. Были определены их площади, объёмы и распределение температуры по глубине отложений, в дальнейшем скорректированные по спутниковому снимку от 18 марта 2005 г. [Нуждаев и др., 2005]. Протяжённость пирокластических потоков от купола вулкана достигала 28 км, а их объём на площади в 21 км² у подножья составлял 0,2 км³. На глубине 21 см от поверхности температура равнялась 67 °С. Её наибольшее значение, 420 °С, было измерено на глубине 4 м в отложениях, размытых рекой 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 отложения предыдущего потока на глубину в 40 метров и вновь полностью её заполнил (рис. 15а). Его протяжённость составила 20 км, объём 0,01 км³ при площади всего в 2 км². Температура на глубине 40-150 см варьировала от 330 до 512 °С. Отложения пирокластических потоков продолжают оставаться горячими на протяжении многих месяцев и лет после извержения, в чём мы непосредственно убедились, обнаружив вторичные фумаролы на их поверхности во время рекогносцировочных обследований в июне 2008 г.

Во всех известных в XX столетии случаях формирования лахаров на Шивелуче, их твердой составляющей являлись отложения пирокластических потоков, за счёт 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 пирокластики и последующим сходом лахаров являются обычным событием на стратовулканах. Они были широко распространены в прошлом, и представляют собой значительную опасность в будущем [Белоусов и Белоусова, 1997].

Данные о лахарах на Шивелуче помещены в таблице 2.

Таблица 2. Сведения о лахарах на вулкане Шивелуч.

Даты схода лахаров	Характеристика извержения	Река, по которой лахары зафиксированы или могли проходить	Источник сведений (ссылка)
1-2.03.1854	Пароксизмальное	Байдарная, Кабеку, Мутный. Лахары доходили до рек Камчатка и Еловка	[Горшков и Дубик, 1969]
12.11.1964	Пароксизмальное	Байдарная, Каменская, Кабеку	[Ponomareva et al., 1998]
22.04.1993	Пароксизмальное	Реки не указаны	[Горшков и Дубик, 1969]
19-20.05.2001	Экструзивное	Байдарная, Каменская, Кабеку, Бекеш	[Вулкан Шивелуч]
01.2002	Экструзивное	Байдарная, Каменская, Кабеку, Бекеш	[Вулкан Шивелуч]
9.05.2004	Экструзивно-эффузивное	Бекеш	[Вулкан Шивелуч]
27.02.2005	Пароксизмальное	Байдарная	[Гирина и др., 2007]
22.09.2005	Пароксизмальное	Байдарная	А.Н. Озеров [Пепловый..., 2004]
29.03.2007		Бекеш, Кабеку	[Нуждаев и др., 2005; Гирина и др., 2006]
6.05.2007		Бекеш, Кабеку	[Нуждаев, и др., 2005]
27.04.2009		Бекеш	[Гусева, 2007a]

В таблице 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. 15б.



Рис. 15. Вулкан Шивелуч: а) Отложения пирокластического потока 2005 года с сожженным лесом. Фото С.С. Черноморца, 24 июня 2008 г. б) Врез р. Каменская со следами прохождения лахара. Фото С.С. Черноморца, 23 июня 2008 г. в) Пирокластический поток на Шивелуче. Фото Ю.В. Демянчука (Камчатская вулканологическая станция ИВиС ДВО РАН), 11 июля 2007 г. г) Перенасыщенный наносоводный поток на р. Байдарная. Фото С.С. Черноморца, 21 июня 2008 г.

Механизм формирования водной составляющей селей нивально-вулканического генезиса

Селевые потоки вулканогенно-нивального генезиса образуются при взаимодействии продуктов вулканических извер-

жений, преимущественно пирокластических, со снежно-фирновым покровом. Они играют ведущую роль среди рельефообразующих процессов, predetermined благоприятными условиями для их формирования, как вулканическими – катастрофизм и частота проявления, так и климатическими – значительной мощностью и продолжительностью залегания снежного покрова.



Рис. 16. Отложения лахара у подножия вулкана Шивелуч. Река Каменская. Место отбора пробы № 15 (см. таблицу 3).

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 реке Большой Хапце 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 (рис. 15в). Его температура достигает 600–700 °С, а переотложенный материал продолжает оставаться горячим (до 200–500 °С) в течение нескольких лет. Поэтому очевидно, что непосредственный переход гравитационного потока пирокластики в селевой поток исключен по причине его обезвоженности. В формировании водной составляющей участвует воздушный перенос. При изначальном выбросе пирокластической массы из недр вулкана в ней 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 первозданном раскаленном состоянии воздушная пирокластика, также 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 затем из них твердых или жидких осадков происходит бурный сход снега на больших 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 объемов селевой массы. Такие лахары распространяются на десятки километров дальше, чем пирокластические потоки.

Особо опасным является образование пирокластических волн – так называемых палящих туч. Этот механизм формирования лахаров несколько отличается от вышеописанного. Отрываясь от пирокластического потока и перегоняя 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 путем подъема эруптивной колонны, а в процессе движения по поверхности снежного покрова. Такой процесс наблюдался, например, на вулкане Безымянном в 1997 г. [Белюсов и Белюсова, 1998 а].

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. [Горишков, 1957]. После обрушения постройки вулкана раскаленный поток пирокластики распространился вниз и заполнил верховья реки Сухой Хапицы. Все понижения рельефа на протяжении 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. Сухой Хапицы, заполненные раскаленным агломератом, участия не принимали. Водный импульс селеформирования был вызван бурным таянием снежного покрова, сошедшего с прилегающих склонов вулканов Ключевской и Зими́на. Выброшенная при взрыве вулкана газо-пепловая 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. Большой Хапице. На расстоянии 80 км от вулкана его язык шириной в 6 км достиг реки Камчатки. Гигантский лахар на Безымянном является яркой 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, перенасыщенные тонким мелкоземистым материалом (hyperconcentrated flow). Их плотность – более 1,5 т/м³, а характер движения близок к ламинарному (рис. 15г). 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 были обработаны в лаборатории грунтоведения геологического факультета МГУ. На рис. 17 представлен гранулометрический состав заполнителя различных типов рыхлых отложений.

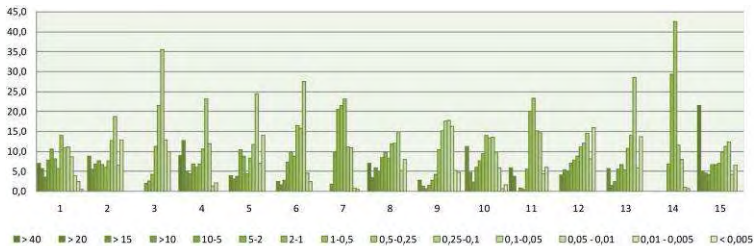


Рис. 17. Гранулометрический состав заполнителя различных типов рыхлых отложений у подножия вулканов Ключевской и Шивелуч. По горизонтальной оси – номера образцов (см. таблицу 3). По вертикальной оси – содержание фракции в процентах. В легенде указаны диапазоны размеров фракций в мм.

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

Также сложно идентифицировать лахары 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.

Таблица 3. Гранулометрический состав заполнителя различных типов отложений на вулканах Ключевской и Шивелуч (фракции мельче 5 см). См. также рис. 17.

№ пп	Вулкан	Описание образца, тип отложений	Гранулометрический состав в %, размер частиц в 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, лед- ник Сопоч- ный	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, лед- ник 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, лед- ник 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, лед- ник 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 (песчаные)	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 (песчаные)	-	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	пирокластические	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	пирокластические	-	4,1	5,3	5,1	7,0	7,8	8,9	11,1	12,1	14,5	8,1	16,0	-	-
13	Шивелуч	пирокластические	-	5,8	1,5	2,4	5,6	6,6	5,3	10,7	14,0	28,6	5,8	13,7	-	-
14	Шивелуч	пирокластические	-	-	-	-	-	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	-	-

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 Ключевский и Шивелуч, находящиеся в стадии интенсивной активности, значительно различаются по характеру извержений. 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 Ключевском вулкане 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 трём постоянным желобам Крестовскому, Ушковскому и Апахончиевскому. Сход лахаров, с частотой 1 раз в 20 лет, происходит по рекам Сухая, Крутенькая, Киргурич на северо-восточном склоне и по рекам Лавовый Ключ и Голубельная на

юго-восточном склоне вулкана. Во время *эксплозивно-эффузивных* извержений вершинного кратера излияние лавовых потоков обычно происходит только по одному Крестовскому желобу. Лахары сходят по рекам Крутенькой и Киргуричу с периодичностью 3–5 лет. При активизации *побочных* кратеров причинами селеформирования являлись подвижки ледников Влодавца, Сопочного и Келля. В период с 1932 по 1987 гг. 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 Шивелуча 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 тип, при котором происходит катастрофическое таяние снежного покрова в результате извержений. Сведения о сходе лахаров на вулкане Шивелуч до 2001 г. были эпизодическими. В XXI веке сели нивально-вулканического генезиса формировались при каждом извержении по рекам южного сектора вулкана – Байдарной, Каменистой, Бекеш и другим. Наблюдениями в 2001–2009 гг. зафиксировано не менее 8 событий. Однако фиксировались только случаи, когда происходили размыты автомобильных дорог у подножия вулкана. Реальное количество лахаров, видимо, было значительно большим.

Селевая активность на вулканах Ключевской и Шивелуч очень высока, а механизмы формирования селей недостаточно известны. Необходимо дальнейшее совершенствование методических подходов с применением новых технологий анализа (космическая съемка высокого разрешения, ГИС-картографирование и др.). В первую очередь следовало бы организовать прямые наблюдения за лахарами в реальном време-

ни. Для их детального изучения представляется целесообразным в будущем организовать у подножия Ключевского и Шивелуча долговременные стационарные исследования.

Благодарности. Авторы выражают благодарность к.г.н. О.В. Тутубалиной, И.А. Соколову, А.Ю. Баринову за участие в сборе и анализе полевого материала, составлении карт и подготовке рукописи, к.г.н. Я.Д. Муравьеву, д.г.-м.н. И.В. Мелекесцеву, к.г.-м.н. О.А. Гириной, к.т.н. Н.А. Жаринову (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН), к.г.н. Ю.А. Евтодьеву (Камчатское Метеоагентство) за ценные советы, А.А. Коневу, Ю.В. Демянчуку, М.В. Демянчук (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН), Р.В. Шелопугину (авиакомпания «Ксудач») за помощь в организации экспедиции, д.г.-м.н., проф. Е.А. Вознесенскому (геологический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова) за обработку образцов, Инженерно-технологическому центру «СканЭкс» за предоставление космических снимков, к.г.н. Д.А. Петракову, И.В. Крыленко, к.г.н. И.Н. Крыленко (географический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова), проф. С.Дж. Эвансу (Университет Уотерлу, Канада) за полезные дискуссии; д.г.-м.н. С.М. Фотиеву, Н.В. Арутюнян (Научный совет по криологии Земли РАН) за редакторскую помощь. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 07-05-00172, 09-05-00934), Программы поддержки ведущих научных школ (проект НШ-171.2008.5) и программы NATO Science for Peace (проект 982143).

ЛИТЕРАТУРА

Апрелков С.Е. О древнем извержении Авачинского вулкана и изменении русла р. Авачи. // Вопросы географии Камчатки. Вып. 2. Петропавловск-Камчатский: Дальневосточное кн. изд-во, 1964, с. 108–109.

Базанова Л.И., Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Пузанков М.Ю. Потенциальная опасность от извержений Авачинского вулкана. // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001, с. 390–407.

Базанова Л.И., Брайцева О.А., Пузанков М.Ю., Сулержицкий Л.Д. Катастрофические плинианские извержения начальной фазы формирования молодого конуса вулкана Авачинский (Камчатка). / В сб.: Вулканология и сейсмология, 2003, № 5, с. 20–40.

Балабасев Ф.Г., Каплан М.М., Антонов Ю.Г. О селевых потоках в районах современного вулканизма. // Селевые потоки. Сб. 5. Под ред. В.П. Мочалова и Т.Л. Киренской. Л.: Гидрометеозидат, 1980, с. 42–48.

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, 1998а, № 3, с. 35–38.

Белоусов А.Б., Белоусова М.Г. Отложения и последовательность событий извержения вулкана Безымянный 30 марта 60

1956 г. (Камчатка): отложения обломочной лавины. // Вулканология и сейсмология, 1998б, №1, с. 25–40.

Белоусов В., Войт Б., Белоусова М. Извержение вулкана Безымянный 1956 г. и аналогичные извержения в других районах мира: последовательности эруптивных событий, отложения и механизм. / В сб.: Проблемы эксплозивного вулканизма (к 50-летию катастрофического извержения вулкана Безымянный). Материалы первого международного симпозиума. 25–30 марта 2006 г. Отв. редактор чл.-корр. РАН Е.И. Гордеев. Петропавловск-Камчатский, 2006, с. 43–48.

ван Беммелен Р.В. Геология Индонезии. Пер. с англ. Т.М. Дембо, Е.Н. Люстиха, В.В. Хоментовского под ред. М.В. Муратова. М.: Изд-во иностранной литературы, 1957, 394 с.

Брайцева О.А., Базанова Л.И., Мелекесцев И.В., Сулержицкий Л.Д. Крупнейшие голоценовые извержения вулкана Авачинский на Камчатке (этап 7250-3700 ¹⁴С-лет назад). // Вулканология и сейсмология, 1998, № 1, с. 3–24.

Бударина О.И., Перов В.Ф. К оценке селевой опасности горных районов Камчатки. / В сб.: Проблемы противоселевых мероприятий. Алма-Ата: «Казахстан», 1981, с. 201–212.

Бударина О.И., Перов В.Ф. Карта селеопасных районов Камчатки. // Вестник Московского университета, сер. география, 1984, № 1, с.86–88.

Былинкина А.А. К исследованию сухих рек Ключевского вулкана (летом 1950 года). // Труды лаборатории вулканологии. Вып. 8. М.: Изд-во АН СССР, 1954, с. 236–242.

Виноградов В.Н. Современное оледенение районов активного вулканизма Камчатки. М.: Наука, 1975, 103 с.

Виноградов В.Н. Вулканизм и оледенение. // Гляциологические исследования. № 27. М., 1985, с. 7–25.

Виноградов В.Н., Муравьев Я.Д. Особенности развития ледников в условиях активного вулканизма. // Материалы гляциологических исследований, 1989, вып. 66, с. 93–99.

Виноградов В.Н., Муравьев Я.Д. Взаимодействие лавы и льда на Ключевском вулкане при извержении 1983 г. // Вулканология и сейсмология, 1985, № 1, с. 29–46.

Виноградов Ю.Б. О селевых явлениях на Камчатке. // Труды КазНИГМИ. Вып. 33. Вопросы изучения селей. Под ред. Х.А. Ахмеджанова. М.: Моск. отд. Гидрометеоиздата, 1969, с. 139–143.

Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Современные проблемы гидрологии. М.: Изд. центр Академия, 2008, 320 с.

Вулкан Шивелуч. / Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. <http://www.kscnet.ru/ivs/volcanoes/shivel.html>

Гирина О.А. Пирокластические отложения современных извержений андезитовых вулканов Камчатки и их инженерно-геологические особенности. / Институт вулканической геологии и геохимии ДВО РАН. Владивосток: Дальнаука, 1998, 174 с.

Гирина О.А., Демянчук Ю.В., Мельников Д.В., Ушаков С.В., Овсянников А.А., Сокоренко А.В. Пароксизмальная фаза извержения вулкана молодой Шивелуч, Камчатка. 27 февраля 2005 г. (предварительное сообщение). // Вулканология и сейсмология, 2006, №1, с. 5–23.

Гирина О.А., Ушаков С.В., Демянчук Ю.В. Пароксизмальное извержение вулкана молодой Шивелуч, Камчатка, 9 мая 2004 г. // Вестник КРАУНЦ, Науки о Земле. 2007, вып. 10, № 2, с. 65–73.

Глазырин Г.Е., Муравьев Я.Д., Виноградов В.Н. О климатическом фоне оледенения Камчатки. // Гляциологические исследования. М., 1985, вып. 27, с. 51–66.

Горшков Г.С. Извержение сопки Безымянной (Предварительное сообщение). // Бюлл. вулканологической станции, 1957, № 26, с. 19–72.

Горшков Г.С., Богоявленская Г.Е. Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения 1955–1963 гг. Отв. ред. Б.И. Пийп. М.: Наука, 1965, 170 с.

Горшков Г.С., Дубик Ю.М. Направленный взрыв на вулкане Шивелуч. / В сб.: Вулканы и извержения. М.: Наука, 1969, с. 3–37.

Гусева О. На Камчатке извержение вулкана привело к сходу грязевых потоков. РИА-Новости, 30.03.2007. 2007 а,
<http://eco.rian.ru/nature/20070330/62816182.html>

Гусева О. Со склона вулкана Шивелуч сошел грязевой поток. РИА-Новости, 7.05.2007. 2007 б,
<http://eco.rian.ru/nature/20070507/64993901.html>

Двигало В.Н., Мелекесцев И.В. Крупные современные обвалы на конусе вулкана Ключевской (по результатам ревизии последствий событий 1944–1945 и 1984–1985 гг.). // Вулканология и сейсмология, 2000, №1, с. 3–17.

Догановский А.М., Орлов В.Г. О возможности образования селей на сухих руслах вулкана Кроноцкого. // Вопросы географии Камчатки. Вып.6. Петропавловск-Камчатский, 1970, с. 88–93.

Евтодьев Ю.А. Некоторые вопросы изучения максимального стока половодья в бассейнах рек Авачи и Камчатки. // Вопросы географии Камчатки. Вып. 6, Дальневосточное кн. изд-во, Петропавловск-Камчатский, 1970, с. 37–50.

Евтодьев Ю.А. Анализ условий формирования и методика расчета максимального и годового стока рек Камчатки. Дисс. канд. геогр. наук. Л.: ЛГМИ, 1971. 131 с.

Евдотьев Ю.А. Селевая опасность горных районов Камчатки. // Гляциологические исследования. № 25. М.: Наука, 1976, с. 80–85.

Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В. Вершинное извержение вулкана Ключевской (Камчатка) в 2007 г. / В сб.: Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога, 27–29 марта 2008 г. Петропавловск-Камчатский, 2008, с. 81–89.

Заварицкий А.Н., Пийп Б.И., Горшков Г.С. Изучение вулканов Камчатки. // Труды лаборатории вулканологии. Вып. 8. М.: Изд-во АН СССР, 1954, с. 18–57.

Иванов В.В. Текущий цикл активности Ключевского вулкана 1995–2008 гг.: развитие по сейсмологическим, фото-, видео и визуальным данным. // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога, 27–29 марта 2008 г. Петропавловск-Камчатский, 2008, с. 100–109.

Краевая Т.С. Сухие реки районов Ключевской и Авачинской групп вулканов. // Вопросы географии Камчатки. Вып. 2. Петропавловск-Камчатский: Дальневосточное кн. изд-во, 1964, с. 56–62.

Краевая Т.С. Краткая характеристика селеопасных районов Камчатки. // Труды КазНИГМИ. Вып. 33. Вопросы изучения селей. Под ред. Х.А. Ахмеджанова. М.: Моск. отд. Гидрометеорологического института, 1969, с. 144–150.

Краевая Т.С. Генетические типы грубообломочных отложений стратовулканов. / Науч. ред. Е. В. Шанцер. М.: Недра, 1977, 126 с.

Краевая Т.С., Кураленко М.П. Ледниковые образования районов активного вулканизма (на примере Камчатки). // Гляциологические исследования. М.: ВИНТИ, 1985, № 27, с. 77–89.

Краевая Т.С., Олюнин В.Н. Камчатка. / В сб.: Селеопасные районы Советского Союза. М.: Изд-во Московского университета, 1976, с. 163–168.

Крашенинников С. Описание земли Камчатки. Т.1. С.-Пб.: Императорская АН, 1755, 438 с.

Купол вулкана Шивелуч на Камчатке прорезала глубокая расщелина. РИА-Новости, 28.04.2009, <http://eco.rian.ru/natural/20090428/169419270.html>

Малеев Е.Ф. Агломератовые пирокластические потоки. / В сб.: Вулканические фации Камчатки. М.: Наука, 1969, с. 5–34.

Малышев А.И. Жизнь вулкана. Екатеринбург: УрО РАН, 2000, 262 с.

Мелекесцев И.В. Вулканизм и рельефообразование. М.: Наука, 1980, 212 с.

Мелекесцев И.В. Действующие и потенциально активные вулканы Курило-Камчатской островной дуги в начале XXI в.: этапы исследований, определение термина «действующий вулкан», будущие извержения и вулканическая опасность. // Вестник КРАУНЦ, Науки о Земле. 2006, вып. 7, № 1, с. 15–35.

Мелекесцев И.В., Краевая Т.С., Брайцева О.А. Рельеф и отложения молодых вулканических районов Камчатки. М.: Наука, 1970. 104 с.

Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В. Динамика активности вулканов Мутновский и Горелый в голоцене и вулканическая опасность для прилегающих районов (по данным тефрохронологических исследований) // Вулканология и сейсмология, 1987, № 3, с. 3–18.

Мелекесцев И.В., Волынец О.Н., Ермаков В.А., Кирсанова Т.П., Масуренков Ю.П. Вулкан Шивелуч. // Действующие вулканы Камчатки. В 2 тт. Т. 1. М.: Наука, 1991, с. 84–105.

Мелекесцев И.В., Сулержицкий Л.Д., Базанова Л.И., Брайцева О.А., Флоренская Н.И. Катастрофические голоценовые лахары Авачинского и Корякского вулканов на Камчатке // Вулканология и сейсмология, 1995, № 4–5, с. 172–181.

Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В., Базанова Л.И., Пинегина Т.К., Дирксен О.В. 0–650 гг. – этап сильнейшего природного катастрофизма нашей эры на Камчатке. // Вулканология и сейсмология, 2003, № 6, с. 3–23.

Методическое руководство по комплексному изучению селей. Под ред. М.В. Чуринова и А.И. Шеко. М.: Недра, 1971. 158 с.

Неймайр М. Вулканы и землетрясения. Пер. с нем. С.П. Чернова. С.-Пб.: Типография Спб. общ. печ. дела Е. Евдокимов, 1902, 278 с.

Новейший и современный вулканизм на территории России. / Отв. ред. Н.П. Лаверов; Инт-т физики Земли им. О.Ю. Шмидта. М.: Наука, 2005. 604 с.

Нуждаев А.А., Гирина О.А., Мельников Д.В. Некоторые результаты изучения пирокластических отложений извержений 28 февраля и 22 сентября 2005 г. вулкана Молодой Шивелуч наземными и дистанционными методами. // Вестник КРАУНЦ, 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>

Пийп Б.И. О раскаленных агломератовых потоках Авачи и о типе извержений этого вулкана // Бюллетень вулканологической станции на Камчатке. 1946, № 12, с. 18–28.

Пийп Б.И. Ключевская сопка и ее извержения в 1944—1945 гг. и в прошлом. // Труды Лаборатории вулканологии. М., 1956, вып. 11, 309 с.

Письма Плиния Младшего. М.: Наука, 1984, 408 с.

Руководство по изучению селевых потоков. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 144 с.

Руководящий документ. Руководство селестокковым станциям и гидрографическим партиям. Вып. 1. Организация и проведение работ по изучению селей. РД 52.30.238-89. М.: Гидрометеоиздат, 1990. 198 с. (Госкомгидромет СССР).

Сейнова И.Б., Черноморец С.С., Тутубалина О.В., Баринов А.Ю., Соколов И.А. Условия формирования селевых потоков в районах активного вулканизма (на примере вулканов Ключевской и Шивелуч, Камчатка). // Криосфера Земли, № 2, № 3, 2010.

Селиверстов Н.И. Активизация вулкана Ключевской. // Вестник КРАУНЦ, Науки о Земле. 2007, вып. 9, № 1, с. 7–8.

Федотов С.А., Масуренков Ю.П., Святловский А.Е. Предисловие. // Действующие вулканы Камчатки. В 2 тт. Т. 1. М.: Наука, 1991, с. 5–11.

Федотов С.А., Жаринов Н.А. Об извержениях, деформациях, сейсмичности Ключевского вулкана (Камчатка) в 1986–2005 гг.

и механизме его деятельности. // Вулканология и сейсмология, 2007, № 2, с. 3–31.

Хренов А.П., Двигало В.Н., Кирсанов И.Т., Федотов С.А., Горельчик В.И., Жаринов Н.А. Вулкан Ключевской. / В кн.: Действующие вулканы Камчатки. В 2 тт. Т. 1. М.: Наука, 1991, с. 106–145.

Цюрупа А.И. Внутриледниковые извержения. // Гляциологические исследования. М., 1985, № 27, с. 67–76.

Aguilera E., M. T. Pareschi M.T., Rosi M., Zanchetta G. Risk from Lahars in the Northern Valleys of Cotopaxi Volcano (Ecuador). // Natural Hazards, 2004, vol. 33, p. 161–189.

Belousov A., Belousova M., Voight B. Multiple edifice failures, debris avalanches and associated eruptions in the Holocene history of Shiveluch volcano, Kamchatka, Russia. // Bulletin of Volcanology, 1999, vol. 61, p. 324–342.

Belousov A., Voight B., Belousova M., Petukhin A. Pyroclastic surges and flows from the 8–10 May 1997 explosive eruption of Bezymianny volcano, Kamchatka, Russia. // Bulletin of Volcanology, 2002, vol. 64, p. 455–471. DOI 10.1007/s00445-002-0222-5.

Bogoyavlenskaya G.E., Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Kiriyanov V.Yu., Dan Miller C. Catastrophic eruptions of the directed-blast type at Mount St. Helens, Bezymianny and Shiveluch volcanoes. // Journal of Geodynamics, 1985, vol. 3, p. 189–218.

Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Ponomareva V.V., Kirianov V.Yu. The caldera-forming eruption of Ksudach volcano about Cal. A.D. 240: the greatest explosive event of our era in Kamchatka, Russia. // Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1996, vol. 70, p. 49–65.

Carranza E.J.M., Castro O.T. Predicting lahar-inundation zones : Case study in West Mount Pinatubo, Philippines. // Natural Hazards, 2006, vol. 37, No. 3, p. 331–372.

Escher B.G. On the hot “lahar” (mud flow) of the valley of ten thousand Smokes (Alaska). // Proceedings Koninklijke Akademie van Wetenschappen, Amsterdam, 1922, vol. 24, p. 282–293.

Global Volcanism Program.

http://www.volcano.si.edu/world/find_regions.cfm

Griggs, R.F. The great hot mud flow of the Valley of Ten Thousand Smokes (Katmai, Alaska). // Scientific Results of the Katmai Expedition of the National Geographic Society. Paper III, The Ohio Journal of Science, 1919, vol. 19, p. 117–142.

John D.A., Sisson T.W., Breit G.N., Rye R.O., Vallance J.W. Characteristics, extent and origin of hydrothermal alteration at Mount Rainier Volcano, Cascades Arc, USA: Implications for debris-flow hazards and mineral deposits. // Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2008, Vol. 175, p. 289–314. doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.04.004

Justesen L.P.Th. Bandjir. // Geografisk Tidsskrift, 1919–1920, Bind 25, p. 228–235.
<http://www.tidsskrift.dk/visning.jsp?markup=&print=no&id=68005>.

Huggel C., Schneider D., Julio Miranda P., Delgado Granados H., Kääb A. Evaluation of ASTER and SRTM DEM data for lahar modeling: A case study on lahars from Popocatepetl Volcano, Mexico. // Journal of Volcanology and Geothermal Research, vol. 170, 2008, p. 99–110.

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. 123 pp.

Lavigne F., Thouret J.C., Voight B., Suwa H., Sumaryono A. Lahars at Merapi volcano, Central Java: an overview. // Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2000, vol. 100, p. 423–456.

Major J.J., Pierson T.C., Scott K.M. Debris flows at Mount St. Helens, Washington, USA. / M. Jacob and O. Hungr (eds), Debris-flow hazard and related phenomena. Praxis. Springer Berlin Heidelberg, 2005, p. 685–731.

Manville V., Hodgson K.A., Nairn I.A. A review of break-out floods from volcanogenic lakes in New Zealand. // New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 2007, vol. 50, p. 131–150.

Melekestsev I.V., Braitseva O.A., Ponomareva V.V. Prediction of volcanic hazards on the basis of the study of dynamics of volcanic activity in Kamchatka // Volcanic hazards assessment monitoring. IAVCEI Proceedings in volcanology. 1. Berlin-Tokyo: Springer-Verlag, 1989, p. 10–35.

Melekestsev I.V., Ponomareva V.V., Volynets O.N. Kizimen Volcano, Kamchatka – A future Mount St. Helens? // Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1995, vol. 65, p. 205–226.

Miller C.D. Potential hazards from future volcanic eruptions in California. / USGS Bulletin 1847, 1989, 17 p.

Neall V.E. Lahars as major geological hazards. // Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 1976, No. 14, p. 233–240.

Newhall C.G., Bronto S., Alloway B., Banks N.G., Bahar I., del Marmol M.A., Hadisantono R.D., Holcomb R.T., McGeehin J., Miksic J.N., Rubin M., Sayudi S.D., Sukhyar R., Andreastuti S., Tilling R.I., Torley R., Trimble D., Wirakusumah A.D. 10,000 Years of explosive eruptions of Merapi Volcano, Central Java: archaeological and modern implications. // Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2000, vol. 100, p. 9–50.

Pierson T.C. Hyperconcentrated flow – transitional process between water flow and debris flow. // M. Jacob, O. Hungr (eds.). Debris-flow Hazards and Related Phenomena. Praxis. Springer Berlin Heidelberg, 2005, p. 159–202.

Pierson T.C., Janda R.J., Thouret J.C., Borrero C.A. Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. // S.N. Williams (Editor), Nevado del Ruiz Volcano, Colombia, I. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1990, vol. 41, p. 17–66.

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. // Bulletin of Volcanology, 1998, vol. 59, p. 490–505.

Ponomareva V., Churikova T., Melekestsev I., Braitseva O., Pevzner M., Sulerzhitsky L. Late Pleistocene-Holocene volcanism on the Kamchatka Peninsula, Northwest Pacific region. // Eichelberger J., Gordeev E., Kasahara M., Izbekov P., Lees J. (Eds). Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region. American Geophysical Union Geophysical Monograph Series, 2006 a, vol.172, p. 165–198.

Ponomareva V.V., Melekestsev I.V., Dirksen O.V. Sector collapses and large landslides on Late Pleistocene–Holocene volcanoes in Kamchatka, Russia. // Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2006 б, vol. 158, p. 117–138.

Ramsey M., Dehn J. Spaceborne observations of the 2000 Bezymianny, Kamchatka eruption: the integration of high-resolution ASTER data into near real-time monitoring using AVHRR. // Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2004, vol. 135, p. 127–146.

Schmidt K.G. Die Schuttströme am Merapi auf Java nach dem Ausbruch von 1930. // De Ingenieur in Nederlandsch-Indië. Batavia, 1931, 68 pp.

ter Braake A.L. Volcanology in the Netherlands Indies. // P. Honig and F. Verdoorn (eds). Science and Scientists in the Netherlands Indies. New York: Board of the Netherland Indies, Surinam and Curacao. 1945, p. 22-35.

http://www.knaw.nl/Indonesia/Honig_Verdoorn/Honig5.pdf

Tilling R.I., Topinka L., Swanson D.A. Eruptions of Mount St. Helens: past, present, and future. / U.S. Geological Survey Special Interest Publication, 1990, 56 pp.

Thouret J.-C. Volcanic geomorphology: an overview. // Earth-Science Reviews, 1999, vol. 47, p. 95–131.

Thouret J.-C., Finizola A., Fornari M., Legueley-Padovani A., Suni J., Frechen M. Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru. // Geological Society of America Bulletin, vol. 113, 2001, p. 1593–1610.

Vallance J.W. Volcanic debris flows. // M. Jacob and O. Hungr (eds), Debris-flow hazard and related phenomena. Praxis. Springer Berlin Heidelberg, 2005, p. 247–274.

van Bemmelen R.W. The Geology of Indonesia. Vol. 1A. / In: General Geology of Indonesia and adjacent archipelagoes. Hague: Government Printing Office, 1949, 732 p.

Witham C.S. Volcanic disasters and incidents: A new database. // Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2005, vol. 148, issues 3–4, p. 191–233.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Введение	4
Терминология.....	12
Методика исследований.....	14
Геолого-геоморфологические условия формирования селей на вулканах.....	16
Ключевской вулкан	18
Геолого-геоморфологическое строение	18
Вулканические условия формирования селей на Ключевском	28
Вершинные извержения	29
Побочные извержения	32
Механизм формирования водной составляющей селей гляциально-вулканического генезиса.....	39
Вулкан Шивелуч.....	43
Геолого-геоморфологическое строение	43
Вулканические условия формирования селей на Шивелуче.	45
Механизм формирования водной составляющей селей нивально-вулканического генезиса	49
Идентификация отложений лахаров	53
Заключение.....	57
Литература.....	60

72

