

КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 511.311.21.(234.9)

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СЕЛЕВЫХ ПОТОКОВ
В РАЙОНАХ АКТИВНОГО ВУЛКАНИЗМА

(на примере вулканов Ключевской и Шивелуч, Камчатка). *Часть 1*

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

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

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

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

Представлены результаты полевых исследований в 2008 г. В результате анализа космических снимков и литературных материалов были выявлены особенности формирования вулканогенных селей (лахаров) при извержениях вулканов Ключевской и Шивелуч на Камчатке. В Части 1 реконструирована хронология вулканогенных селей на вулкане Ключевской за последние десятилетия. Составлена карта условий формирования селей восточного сектора вулкана Ключевской. Особое внимание уделено формированию водной составляющей селевых потоков на вулканах. Исследованы механизмы зарождения лахаров гляциально-вулканического генезиса.

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

DEBRIS FLOW FORMATION IN AREAS OF ACTIVE VOLCANISM
(case study of Kluchevskoy and Shiveluch volcanoes, Kamchatka). *Part 1*

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

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

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

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

We studied features of the formation of volcanic debris flows (lahars) on the basis of our field research in 2008, interpretation of satellite images, and analysis of literature on volcanic eruptions of Klyuchevskoy and Shiveluch volcanoes in Kamchatka Peninsula, Russia. In Part 1 we reconstructed the chronology of volcano-induced debris flows at Kluchevskoy volcano over the last decades and have compiled a map of debris flow formation conditions for the eastern sector of this volcano. We focused particular attention on the formation of the water component of volcano-induced debris flows. Mechanisms of lahar initiation as a result of glacial processes on volcanoes have been investigated.

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

ВВЕДЕНИЕ

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, уда-

ленных от вулканов (сокращенно – влк.) 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

Часть 2, в которой рассмотрены особенности формирования селей на вулкане Шивелуч, будет опубликована в журнале “Криосфера Земли”, № 3, 2010.

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). Некоторые исследователи полагали, что первым документально зарегистрированным лахаром был поток, накрывший город Геркуланум во время описанного Плинием Младшим извержения Везувия в 79 г. н.э. [Письма..., 1984]. Впоследствии на склонах Везувия неоднократно формировались грязевые потоки, например в 1872 г. [Неймайр, 1902]. Ф. Юнгхун описывал извержение влк. 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 влк. Бандай в Японии в 1888 г. [Неймайр, 1902], влк. 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].

Слово “лахар” имеет индонезийское (яванское) происхождение. После извержения влк. Келуд в 1919 г., при котором в результате прорыва кратерного озера погибли 5000 человек, была создана вулканологическая служба Нидерландских Восточных Индий [Braake, 1945]. Термин “лахар”, видимо, впервые был введен в научный оборот сотрудниками службы Г.Л.Л. Кеммерлингом [Kemmerling, 1921] и Б.Г. Эшером [Escher, 1922] и получил дальнейшее распространение в работах К. Шмидта [Schmidt, 1931], Р. ван Беммелена [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 (влк. Семеру) – “бузук” [Беммелен, 1957], однако эти наименования не получили широкого распространения.

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 влк. 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; Major et al., 2005; Vallance, 2005; John et al., 2008], Индонезии [Lavigne et al., 2000; Newhall et al., 2000], Перу [Thouret et al., 2001], Эквадоре [Aguilera et al., 2004], на Филиппинах [Thouret, 1999; Carranza, Castro, 2006] и в других вулканических районах.

В России вулканогенные селевые потоки исследовались при оценке извержений вулканов

Камчатки. Еще в XVIII в. 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 в. рядом исследователей [Былинкина, 1954; Краевая, 1969; Евтодьев, 1970, 1971, 1976]. Сход мощных грязевых потоков отмечался при извержении влк. Ключевской в 1945 г. [Заварицкий и др., 1954]. Слово “лахар” на русском языке стало использоваться после публикации перевода книги Р. ван Беммелена [Беммелен, 1957]. Крупнейшее селевое событие в истории России – лахар, сформировавшийся при взрыве влк. Безымянный в 1956 г. Объем отложенный лахара составил около 500 млн м³ [Горшков, 1957]. Проводилось изучение лахаров и их отложений при крупных извержениях, а также анализ отложений и оценка риска [Пийп, 1946; Апрельков, 1964; Краевая, 1964, 1977; Горшков, Богоявленская, 1965; Малеев, 1969; Догановский, Орлов, 1970; Мелекесцев и др., 1970, 1987, 1995, 2003; Краевая, Олюнин, 1976; Мелекесцев, 1980; Виноградов В.Н., 1985; Виноградов, Муравьев, 1985, 1989; Хренов и др., 1991; Брайцева и др., 1998; Двигало, Мелекесцев, 2000; Базанова и др., 2001, 2003; Bogoyavlenskaya et al., 1985; Melekestsev et al., 1989, 1995; Braitseva et al., 1996; Belousov et al., 1999, 2002; Ponomareva et al., 2006a,b]. Было уделено внимание проблеме классификации вулканогенных селей [Виноградов Ю.Б., 1969; Балабаев и др., 1980]. Проводилось мелкомасштабное картографирование селевых явлений Камчатки [Бударина, Перов, 1981, 1984].

Однако нельзя не отметить, что основные исследования селей в Советском Союзе были сосредоточены в районах, где отсутствует современный вулканизм: в Центральной Азии, на Кавказе, в Крыму, Карпатах, Южной Сибири. Поэтому специфика вулканических селей не нашла отражения в методических руководствах, разработанных в те годы. 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 озер, внутриледниковые излияния лав и катастрофически быстрое та-

яние 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. Проблема изучения вулканогенных селей остается нерешенной. 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 из аспектов извержения, второстепенным для их профессиональных интересов. Поэтому сводных обобщающих работ по лахарам в России нет. Как правило, исследователи ограничивались фиксацией события и определением зоны его распространения. Механизмы формирования лахаров и строение очагов почти никогда не попадали в сферу изучения. Вне поля интересов оставалась важнейшая проблема – формирование водной составляющей селей в условиях высокой температуры.

Цель настоящей работы – изучение особенностей формирования селей на активно действующих вулканах Ключевской и Шивелуч в зависимости от характера извержений, морфологии, геологического строения и оледенения. 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 данной статье.

ТЕРМИНОЛОГИЯ

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

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

Что касается *лахаров*, большинство зарубежных авторов относят к лахарам все селевые потоки на вулканах [Bemmelen, 1949; Neall, 1976; Lavigne et al., 2000; Major et al., 2005; Vallance, 2005]. 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 вулканах Ключевской и Шивелуч 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 статье.

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 соответствует обозначение “высокоплотный поток”, “перенасыщенный поток” или “селеподобный паводок”.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В июне–июле 2008 г. 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 влк. Ключ-

чевской. 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 влк. Ключевской масштаба 1:100 000. 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 проблеме. 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 снеготаянинном режимах содержится в фондах, публикациях и других источниках. Этот обширный, но разобщенный 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. Все это в комплексе предопределяет крайне активное развитие эрозионно-селевых процессов.

Феноменальные особенности образования селей, обусловленные активным вулканизмом, рассматриваются на типичных примерах вулканов Ключевской и Шивелуч. Последние находятся в самой крупной на Камчатке Северной группе вулканических сооружений, отличающейся преобла-

данием молодых вулканов и вулканогенно-осадочных отложений четвертичного возраста, что объясняется их расположением в зоне новейших и современных тектонических опусканий. Большую часть ее 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 влк. Шивелуч. Они относятся к существенно пирокластическим стратовулканам, конусы которых на 70–80 % сложены пирокластикой и на 20–30 % лавой [Новейший... вулканизм..., 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 материала (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” [Виноградов Ю.Б., 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 неравномерное. Их среднееголетние 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 из-за больших высот и особенностей климата, отличительной чертой которого является многоснежность зим, очень 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 [Виноградов В.Н., 1975, 1985]. Ее

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 (о Шивелуче см. Часть 2) с различными типами извержений.

ВУЛКАН КЛЮЧЕВСКОЙ

Геолого-геоморфологическое строение

Вулкан Ключевской (Ключевская сопка) (см. фотографию на обложке и рис. 1) 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, осложненный по периферии многочисленными шлаковыми конусами. Его формирование началось в голоцене (около 5000 г. до н.э.) отложениями мощных толщ лавово-пирокластического материала. В результате активной эруптивной деятельности современный конус вулкана образовался достаточно быстро и приобрел ярко выраженную конусообразную форму с плавно меняющейся 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 объема 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, из которых 12 возникли, с перерывами от 2 до 10 лет, между 1932–1987 гг. в восточном секторе вулкана.

Особо мощные пароксизмальные извержения сопровождалось сейсмотектоническими обрушениями. Один из таких обвалов произошел в январе 1945 г. В результате на северо-западном склоне вулкана возникла обширная лоткообразная структура – шарра, что явилось одной из причин под-

вижки ледника Эрмана и схода мощного лахара. По мнению И.В. Мелекесцева [2006], северо-западный сектор влк. Ключевской представляет в этом отношении большую опасность и в будущем.

Привершинная часть конуса изрезана барранкосами и осложнена вулканотектоническими 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 относительно покоя.

Особенностью эруптивной деятельности влк. Ключевской 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 влк. Ключевской значительно различаются по комплексу природных условий, определяющих процессы селеформирования.



Рис. 1. Вулкан Ключевской и очаги зарождения селей у его подножия. Фото С.С. Черноморца, 29.06.2008 г.

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 вулканами является зоной аккумуляции ледников Эрмана и Богдановича. На высотных отметках 2800–2600 м эта мощная гляциальная система полностью обрамляет западный сектор влк. Ключевской. Запасы фирна и льда в ней постоянно восполняются за счет притока от кальдерного ледника площадью более 20 км², занимающего усеченный эллипсоидный конус влк. Ушковский. 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, 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 твердой 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 Ключевский, Ушковский и Камень зарождается ледник Богдановича, узкая и длинная (14 км)

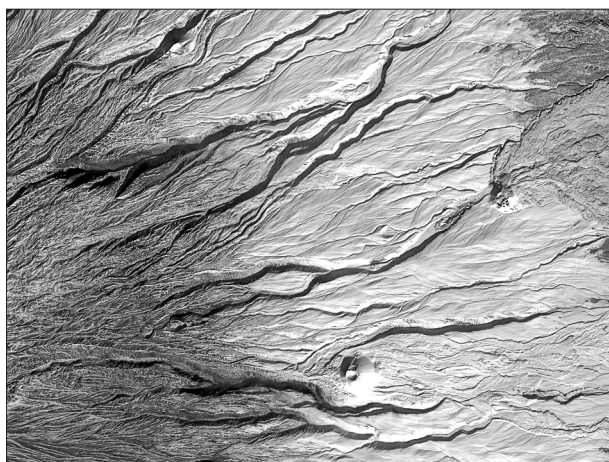


Рис. 2. Часть восточного сектора вулкана Ключевской с многочисленными врезами, образующими “селевой бедленд”. Космический снимок IRS-P5 (Cartosat-1), 11.10.2007 г. (снимок предоставлен ИТЦ “СканЭкс”).

лента которого заканчивается на высоте 1500 м. На юго-восточном склоне расположен ледник Шмидта.

Перегруженность твердым материалом и отопляющее воздействие геотермического потока являются перманентными предпосылками неустойчивого состояния ледников, способствующими подвижкам при извержениях влк. Ключевской 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 влк. Ключевской.

Восточный сектор является ареной побочных извержений (рис. 2). 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, 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. Здесь склоны ниже отметок 2800–2600 м сложены рыхлым разуплотненным 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 ее распаду на выположенной поверхности аккумулятивной равнины. Весь комплекс процессов и условий, сопутствующих их образованию, достаточно однозначно определяется высотной зональностью. При амплитуде порядка 5000 м здесь выделено пять высотных поясов с различным вкладом в процессы селеформирования (рис. 3).

1. Первый высокогорный пояс (5000–3000 м). Высокогорная привершинная часть конуса влк. Ключевской является первичной зоной зарождения горячих селевых потоков – лахаров. Покров молодого купола сложен агломератовой толщей вулканогенных образований, которая сцементирована льдом и покрыта снегом. Его крутые (от 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, раскаленных 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 извер-

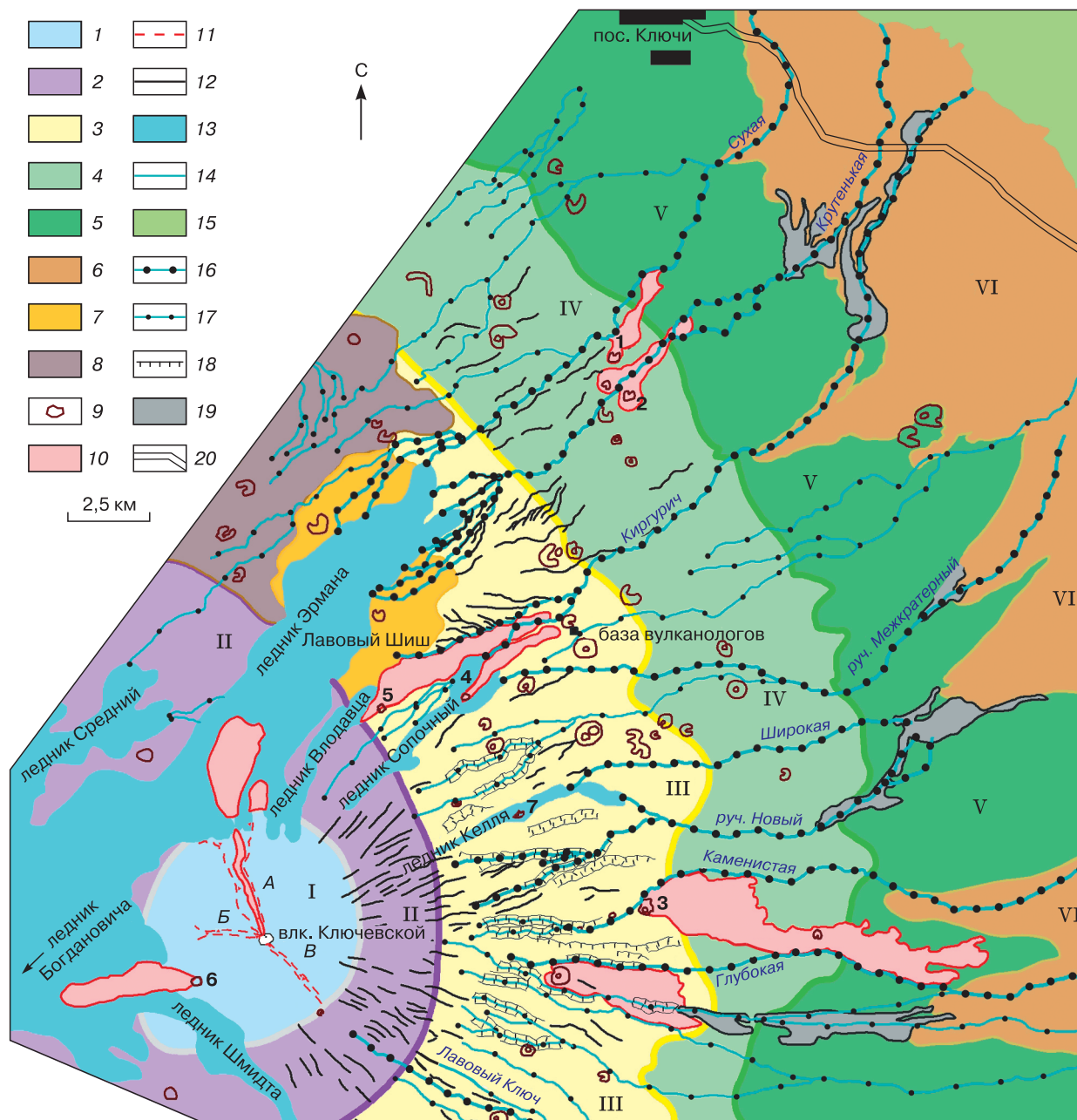


Рис. 3. Условия формирования селей в восточном секторе вулкана Ключевской.

Высотные зоны селеформирования: 1 – I зона сброса продуктов вершинных извержений (от 3000 м и выше); 2 – II зона аккумуляции ледников и снежников, концентрации сброса водного стока (1800–3000 м); 3 – III зона побочных извержений и очагов твердой составляющей селей (900–1800 м); 4 – IV зона развития транспортного селевого процесса по руслам рек (400–900 м); 5 – V зона перехода от транспортного к аккумулятивному режиму селей (200–400 м); 6 – VI зона аккумулятивных равнин и паводочных отложений рек (ниже 200 м). Вулканогенные формации: 7 – лавовые поля и платообразные поверхности раннеголоценовых образований андезитобазальтового состава типа Лавового Шиша (4 тыс. лет назад); 8 – андезитодацитовые 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 влк. Ключевской (А – Крестовский, Б – Ушковский, В – Апахончичевский); 12 – барранкосы. Гляциогидрологические формации: 13 – ледники; 14 – реки; 15 – поймы р. Камчатка. Селевые формации: 16 – пути схода вулканогенных селей по руслам рек; 17 – пути схода селей снежникового генезиса; 18 – бровки глубоких каньонов и врез в рыхлых отложениях; 19 – зоны аккумуляции современных селевых отложений. Прочие объекты: 20 – грунтовая автодорога.

жений 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 снежники 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, врезааясь в рыхлообломочную толщу, приобретают селевой режим.

3. Среднегорный пояс (1800–900 м) восточного сектора влк. Ключевской является основной селеформирующей зоной. Его особенность – побочные извержения, которые начинаются с мощных эксплозий, выбрасывающих на поверхность большой объем пирокластического материала [Хренов и др., 1991]. Вулканическая деятельность побочных прорывов определяет характер современного геологического строения района и влияет на режим оледенения, склоновые и русловые процессы, ведущими 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 легкоподвижный 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. 4, а). 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 недалеком 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 извержениями вулкана. Побочные извержения, после 300-летнего перерыва, происходили в среднегорном поясе с 1932 по 1989 г. Они провоцировали подвижки ледников и образование селей вулканогенно-гляциального генезиса. В настоящее время все ледники восточного сектора находятся в угнетенном состоянии, а ледник Келля – в стадии отмирания.

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



Рис. 4. Пути прохождения лахаров на склонах вулкана Ключевской:

а – р. Киргурич (фото И.Б. Сейновой, 27.06.2008 г.); б – эрозионный врез р. Глубокая на восточном склоне влк. Ключевской (фото с вертолета С.С. Черноморца, 02.07.2008 г.).

Сели зарождаются в истоках берущих здесь начало рек и в многочисленных притоках, врезам и промоинам, густой сетью расчлениющих склоны (см. рис. 1). 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 (см. рис. 4, б). 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, 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 андезитобазальтовыми потоками вершинных и побочных извержений влк. Ключевской [Былинкина, 1954].

6. Равнинный пояс (ниже 200 м) 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. 5, а). Для этого пояса характерен феномен так называемых “сухих” рек. В периоды интенсивного снеготаяния (май–июль) селевая суспензия заливают 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 непреходящий элемент ландшафта вулканических районов.

Вулканические условия формирования селей на Ключевском

Вулканическая деятельность Ключевской сопки проявляется сериями вершинных извержений,

разделенных периодами относительного покоя. По определению Б.И. Пийпа [1956], они именуется эруптивными циклами. Активизация вершинного кратера на влк. Ключевской сопровождается побочными извержениями. На завершающей фазе извержения вершинного кратера приобретают катастрофический пароксизмальный характер.

В результате исследований установлено, что с 1697 по 2009 г. произошло 74 события вершинных и побочных извержений.

С конца XVII в. по 1932 г. вулкан Ключевской формировался за счет 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 восемь катастрофических извержений, что дает среднюю повторяемость 1 раз в 40–50 лет. Пароксизмальные извержения сопровождаются сейсмотектоническими обвалами и раскаленными 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 г. вулкан находился в стадии покоя. Согласно долгосрочному прогнозу, современный эруптивный цикл будет продолжаться до 2013 г. [Жаринов, Демянчук, 2008].

Ниже рассматривается хронология формирования селей при вершинных и побочных извержениях влк. 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 сейсмотектоническим обвалом в верхней зоне ледника Эрмана, что явилось одной из причин его подвижки. Одновременно ледник испытывал термическое воздействие лавового потока, изливавшегося по Крестовскому же-

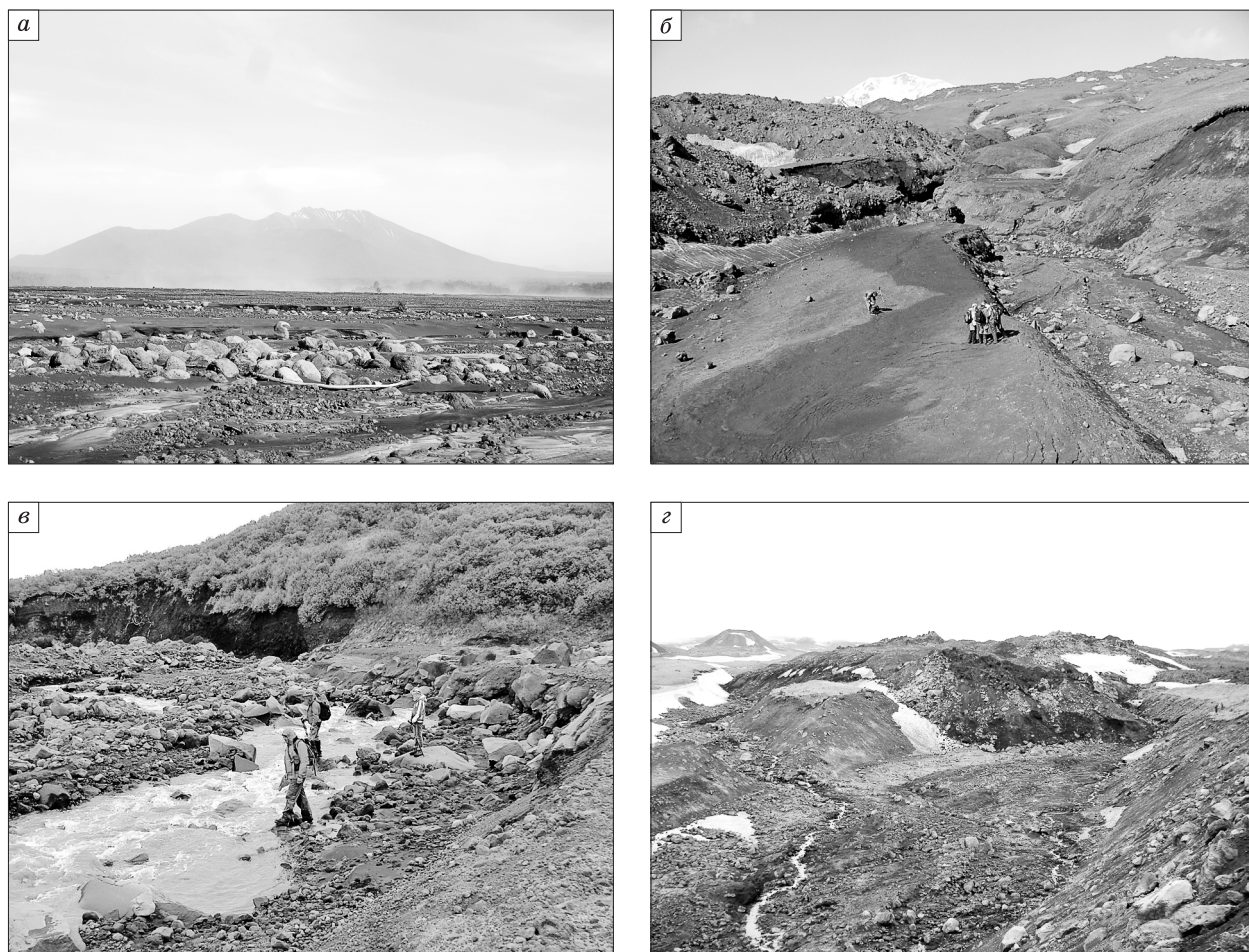


Рис. 5. Вулкан Ключевской:

а – селевые отложения в полосе аккумулятивных равнин, дельта р. Киргурич (фото С.С. Черноморца, 25.06.2008 г.);
б – селевая терраса, сложенная тонкодисперсным материалом, в долине р. Киргурич (фото И.Б. Сейновой, 29.06.2008 г.);
в – крупноглыбовые селевые террасы р. Сопочная – правого притока р. Киргурич (фото И.Б. Сейновой, 28.06.2008 г.);
г – ледник Сопочный, подвижки которого при побочных извержениях вулкана Ключевской вызывали сход лахаров (фото С.С. Черноморца, 26.06.2008 г.).

лобу. Процессы, разрушающие тело ледника при подвижках, 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 ($-33\text{ }^{\circ}\text{C}$), пронесли 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 пос. 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 пото-

ков, особенно мощных по ближайшим к леднику рекам Сухая, Крутенькая, Киргурич.

В 1978–1980 гг. произошло эксплозивно-эффузивное извержение вершинного кратера. От ряда предыдущих оно отличалось тем, что впервые после 1945 г. заполнившая чашу кратера лава стала поступать на внешний склон вулкана. При ее 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 раскаленные до 1000 °С потоки спускались до высот 3200–2800 м в ледниковый пояс вулкана. По склонам скатывались лавины раскаленных обломков. Пеплопадами захватывались площади от 10 до 500 км². 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 г., и 1 октября из вершинного кратера на высоту 12–13 км поднялась эруптивная колонна. Истечение пеплогазовой колонны происходило по всему сечению кратера. Ее 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 (2002–2009) 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 Крутенькой, Киргурич достигали р. Камчатки, 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, 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 ее 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 обоих желобах. К концу извержения (с 30 мая по 3 июня) поступление лавы наблюдалось и в Апахончичевском желобе. Непосредственные контакты раскаленных 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 счету, извержение Ключевского началось в ноябре 2008 г. Поток лавы температурой 1000 °С спустился по Крестовскому желобу до высоты 3000 м, достигнув зоны аккумуляции ледника Эрмана. По информации Н.А. Жаринова (*устное сообщение*), сход лахара по р. Крутенькой был отмечен 9 декабря 2008 г.

В июне 2008 г. 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 (см. рис. 5, б). При отложениях крупных глыб лавы в пойме р. Сопочной остались хаотичные навалы по ее берегам (см. рис. 5, в). По своей структуре они гораздо ближе к моренным, чем к 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 году 212 лет не было побочных извержений, то за последующие

55 лет их зафиксировано 12 [Хренов и др., 1991]. Для восточного сектора влк. Ключевской наиболее характерны катастрофические для малых ледников Сопочного, Влодавца 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 снеготаяния. 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 ее руслу.

Самым крупным по геологическому воздействию из исторических побочных извержений было извержение Билокая, которое началось 7 февраля 1938 г. и продолжалось 13 месяцев. На высотах от 1900 до 1000 м по трещине длиной 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 подвижку ледников Сопочного и Влодавца было установлено в результате сравнения аэрофотоснимков за период с 1949 по 1967 г. и непосредственных наблюдений за вулканической деятельностью [Виноградов В.Н., 1985]. С 13 по 25 июня 1953 г. 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 (см. рис. 5, з). Глубокие врезы по рекам Сопочная и Межкратерная с истоками от его разветвленных окончаний свидетельствуют о мощных селевых проявлениях того периода. В этом же году была зафиксирована подвижка ледника Влодавца, в своих истоках расположенного близко от прорыва Белянкина. До извержения конец ледни-

ка 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. произошел 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 мертвым 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 Киргурич и Сопочная излился лавовый поток длиной 11 км. Прохождение потока лавы вызвало незначительную (порядка 130 м) подвижку ледника Сопочного. В июне и июле 1967 г. 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 мертвого 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 г.) в истоках ледника Богдановича на юго-западном склоне вулкана 23 августа 1974 г. произошел прорыв побочных кратеров. Сопровождавший его процесс формирования лахара наблюдался непосредственно 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 нем 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 лед. Толща ледника медленно реагировала на тепловое воздействие лавовых потоков, и его не удалось проплавить до основания 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 протяженностью 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 температурой до 350 °С, а также нагромождения льда.

Побочный прорыв Предсказанный произошел 8 марта 1983 г. 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 мертвый лед, 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 влк. Ключевской сложились исключительно благоприятные условия для активного развития селевых процессов. Серия побочных извержений в XX в. способствовала их интенсификации, поскольку образовавшаяся в то время мощные врезы в рыхлых отложениях служат очагами зарождения селей в настоящее время при снеготаянии и ливневых осадках.

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

Механизм формирования водной составляющей селей гляциально-вулканического генезиса

В результате анализа условий формирования селей при извержениях влк. Ключевской установлено, что основной причиной их проявления было 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 процесса (извержение–таяние–водный импульс селеформирования), разработанный нами, является результатом обобщения данных литературных источников [Виноградов В.Н., 1985; Краевая, Кураленко, 1985; Цюрупа,

1985] и данных 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 пара. Взрывы приводят к разрушению фронта противостояния лавы и ледника, что значительно расширяет зону теплообмена. Тем самым 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 озера, что увеличивает теплообмен. Потоки талой воды растекаются достаточно далеко за пределы фронта противостояния по внутриледниковым и подледным 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 начальной стадии поступления лавы на поверхность ледника до ее внедрения и подледного течения. Углубившаяся в ледник лава продолжает свое продвижение подо льдом, заполняя ранее вытаявшие пустоты и тальвеги дренажной сети, вытесняя из них воду и превращая ее 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, так называемые подушки, которые погружаются в лед. При поступлении новых порций раскаленного материала здесь начинается образование лавового поля. В процессе расширения оно растекается на множество рукавов, которые постоянно мигрируют и переслаиваются. В конечном счете структура ледника преобразуется в типичный “слоенный пирог”, а его поверхность покрывается сплошным каменным чехлом (см. рис. 5, з).

Пористый вулканический материал при течи льда легко истирается и дает огромные массы тонкодисперсного материала (до 20–40 % алеврита и 10–15 % пелита [Краевая, Кураленко, 1985]),

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
Вершинные извержения					
	Нет сведений				
25.09.1737 – весна 1738 1945	Пароксизмальное	Крестовский желоб	Крутенская, Киргурич	Тектонический обвал, подвижка ледника Эрмана	[Крашенинников, 1755] [Пийп, 1956]
1978–1980	Эксплозивно-эффузивное	Крестовский желоб	Крутенская	Лахары на склонах	В.Н. Двигало [Хренов и др., 1991]
1984–1987	Эксплозивно-эффузивное	Крестовский, Ушковский, Апахончичевский желоба	Крутенская, Киргурич, Апахончич, Лавовый Ключ и др.		В.Н. Двигало [Хренов и др., 1991]
12.1988	Эксплозивно-эффузивное	Крестовский желоб	Крутенская		[Федотов, Жаринов, 2007]
30–31.07.1993	Эксплозивно-эффузивное	Крестовский желоб	Крутенская		[Федотов, Жаринов, 2007]
07.09–02.10.1994	Пароксизмальное	Крестовский и Ушковский желоба	Крутенская, Киргурич и др.	01.10.1994. Отдельные рукава лахаров достигли р. Камчатка	[Селиверстов, 2007]; Федотов, Жаринов, 2007]
17.01–03.04.2005	Эксплозивно-эффузивное	Крестовский желоб	Крутенская, Киргурич	02.26.02.2005	[Селиверстов, 2007]
18.03–15.07.2007	Эксплозивно-эффузивное	Крестовский, Ушковский, Апахончичевский желоба	Крутенская, Киргурич, Апахончич и др.	22.04–24.05.2007	[Жаринов, Делянчук, 2008] (р. Крутенская), наши полевые обследования (р. Киргурич)
11.2008–2009	Эффузивное	Крестовский желоб	Крутенская	08–09.12.2008	Н.А. Жаринов (устное сообщение)
Побочные извержения					
25.01–25.05.1932	Эксплозивно-эффузивное	Кратеры Гуйло, Биокось, Киргурич	Сухая, Крутенская	Катастрофическое таяние снега и подпор рек Сухой и Крутенской лавовым потоком	[Виноградов В.Н., 1985; Хренов и др., 1991]
07.02.1938 – начало 1939	Эксплозивно-эффузивное	Кратер Былокай	Каменистая, Глубокая	Таяние снега	[Виноградов В.Н., 1985; Хренов и др., 1991]
23.10.1946	Эффузивное	Кратер Апахончич	Лавовый Ключ	Нет сведений о лахарах	[Виноградов В.Н., 1985; Хренов и др., 1991]
13–25.06.1953	Эффузивное	Кратер Белянкина	Правый Киргурич (Сопочная), Межкратерный	Подвижка ледника Влодавца	[Виноградов В.Н., 1985; Хренов и др., 1991]
06.10–12.1966	Эксплозивно-эффузивное	Кратер Пийпа	Киргурич	12.10.1966.	[Виноградов В.Н., 1985; Хренов и др., 1991]
06–07.1967	Вторичный разогрев	Кратер Пийпа	Киргурич	Подвижка ледника Влодавца	[Виноградов, 1985; Хренов и др., 1991], наши полевые обследования 2008 г.
23.08–12.1974	Эксплозивно-эффузивное	Побочные кратеры в истоках ледника Богдановича	Студеная	06–07.1967. Вторичная подвижка ледника Влодавца на 1 км, таяние мертвых льдов	[Виноградов, 1985; Хренов и др., 1991], наши полевые обследования 2008 г.
08.03–27.06.1983	Эффузивное	Кратер Предсказанный	Широкая, Новый	Подледное извержение, фреатический взрыв и частичное разрушение ледника	[Виноградов В.Н., 1985]
24.02.1987	Эксплозивно-эффузивное	Кратер Предвиденный	Чернокая, Новый	Подвижка ледника Келля (отделился от области питания и стал мертвым льдом), таяние снега	В.Н. Двигало [Хренов и др., 1991], наши полевые обследования 2008 г.
			Чернова, Голубельная	Бурное таяние снега на контакте с лавой	В.Н. Двигало [Хренов и др., 1991]
Лахары на Ключевском при извержении других вулканов					
30.03.1956	Пароксизмальное	Вулкан Безымянный	Сухая Хаппа, Голубельная, Чернова	Пирокластические потоки и горячий пепел вызвали снеготаяние	[Гришков, Богоявленская, 1965]

который является основой транспортирующей суспензии селевого потока (рис. 6). Подобный по структуре шлейф отложений шириной от 100 до 200 м был обнаружен нами в 2008 г. в котловине между массивом Лавового Шиша и языком ледника Эрмана.

Т.С. Краевая и М.П. Кураленко [1985] отмечают необычно широкое распространение водноледниковых отложений у подножий активных вулканов, представляющих собой “субаэральные флювиогляциальные дельты”, сложенные мелкообломочными тонкослоистыми наносами с включением грубообломочных несортированных “селевых пачек”. Сходные по генезису образования у края ледника Эрмана по аналогии можно 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 (см. рис. 6), 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, вместе с восполняемыми запасами легкоподвижного рыхлообломочного материала, имеет важное значение.

Сложноорганизованная 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 твердую 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.

Особенности селеформирования на Шивелуче будут рассмотрены во второй части статьи.

Авторы выражают благодарность канд. геогр. наук Я.Д. Муравьеву, д-ру геол.-мин. наук И.В. Мелекесцеву, канд. геол.-мин. наук О.А. Гириной, канд. техн. наук Н.А. Жаринову (Институт вулканологии и сейсмологии РАН), канд. геогр. наук Ю.А. Евтодьеву (Камчатское Метеоагентство) за ценные советы, А.А. Коневу, Ю.В. Демянчуку, М.В. Демянчуку (Институт вулканологии и сейсмологии РАН), Р.В. Шелопугину (авиакомпания “Ксудач”) за помощь в организации экспеди-



Рис. 6. Флювиогляциальные и селевые террасы краевой зоны ледника Эрмана. Фото С.С. Черноморца, 29.06.2008 г.

ции, д-ру геол.-мин. наук, проф. Е.А. Вознесенскому (геологический факультет МГУ) за обработку образцов, Инженерно-технологическому центру “СканЭкс” за предоставление космических снимков, канд. геогр. наук Д.А. Петракову, И.В. Крыленко, канд. геогр. наук И.Н. Крыленко (географический факультет МГУ), проф. С.Дж. Эвансу (Университет Уотерлу, Канада) за полезные дискуссии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 07-05-00172, 09-05-00934, 08-05-92206 ГФЕН-а), 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 // *Вопр. географии Камчатки. Петропавловск-Камчатский, Дальневост. кн. изд-во, 1964, вып. 2, 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) // *Вулканология и сейсмология, 2003, № 5, с. 20–40.*
- Балабаев Ф.Г., Каплан М.М., Антонов Ю.Г.** О селевых потоках в районах современного вулканизма // *Селевые потоки / Под ред. В.П. Мочалова, Т.Л. Киренской. Л., Гидрометеиздат, 1980, сб. 5, с. 42–48.*
- Беммелен ван Р.В.** Геология Индонезии: Пер. с англ. / Под ред. М.В. Муратова. М., Изд-во иностр. лит., 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 ¹⁴C-лет назад) // Вулканология и сейсмология, 1998, № 1, с. 3–24.
- Бударина О.И., Перов В.Ф.** К оценке селевой опасности горных районов Камчатки // Проблемы противоселевых мероприятий. Алма-Ата, Изд-во “Казахстан”, 1981, с. 201–212.
- Бударина О.И., Перов В.Ф.** Карта селеопасных районов Камчатки // Вестн. Моск. ун-та. Сер. География, 1984, № 1, с. 86–88.
- Былинкина А.А.** К исследованию сухих рек Ключевского вулкана (летом 1950 года) // Тр. Лаб. вулканологии. М., Изд-во АН СССР, 1954, вып. 8, с. 236–242.
- Виноградов В.Н.** Современное оледенение районов активного вулканизма Камчатки. М., Наука, 1975, 103 с.
- Виноградов В.Н.** Вулканизм и оледенение // Гляциол. исслед., 1985, № 27, с. 7–25.
- 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 В.Н., Муравьев Я.Д.** Особенности развития ледников в условиях активного вулканизма // Материалы гляциол. исслед., 1989, вып. 66, с. 93–99.
- Виноградов Ю.Б.** О селевых явлениях на Камчатке // Тр. КазНИГМИ. Вып. 33: Вопросы изучения селей. М., Гидрометеоздат, 1969, с. 139–143.
- Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А.** Современные проблемы гидрологии. М., Изд. центр Академия, 2008, 320 с.
- Глазырин Г.Е., Муравьев Я.Д., Виноградов В.Н.** О климатическом фоне оледенения Камчатки // Гляциол. исслед., 1985, вып. 27, с. 51–66.
- Горшков Г.С.** Извержение сопки Безымянной (Предварительное сообщение) // Бюл. вулканол. станции, 1957, № 26, с. 19–72.
- Горшков Г.С., Богоявленская Г.Е.** Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения 1955–1963 гг. М., Наука, 1965, 170 с.
- 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 // Вопр. географии Камчатки. Петропавловск-Камчатский, Дальневост. кн. изд-во, 1970, вып. 6, с. 88–93.
- Евтодьев Ю.А.** Некоторые вопросы изучения максимального стока половодья в бассейнах рек Авачи и Камчатки // Там же, 1970, с. 37–50.
- Евтодьев Ю.А.** Анализ условий формирования и методика расчета максимального и годового стока рек Камчатки: Дис. ... канд. геогр. наук. Л., 1971, 131 с.
- Евтодьев Ю.А.** Селевая опасность горных районов Камчатки // Гляциол. исслед., 1976, № 25, с. 80–85.
- Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В.** Вершинное извержение вулкана Ключевской (Камчатка) в 2007 г. // Материалы конф., 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 // Тр. Лаб. вулканологии. М., Изд-во АН СССР, 1954, вып. 8, с. 18–57.
- Иванов В.В.** Текущий цикл активности Ключевского вулкана 1995–2008 гг.: развитие по сейсмологическим, фото-, видео и визуальным данным // Материалы конф., 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 // Вопр. географии Камчатки. Петропавловск-Камчатский, Дальневост. кн. изд-во, 1964, вып. 2, с. 56–62.
- Краевая Т.С.** Краткая характеристика селеопасных районов Камчатки // Тр. КазНИГМИ. Вып. 33: Вопросы изучения селей. М., Гидрометеоздат, 1969, с. 144–150.
- Краевая Т.С.** Генетические типы грубообломочных отложений стратовулканов. М., Недра, 1977, 126 с.
- Краевая Т.С., Кураленко М.П.** Ледниковые образования районов активного вулканизма (на примере Камчатки) // Гляциол. исслед., 1985, № 27, с. 77–89.
- Краевая Т.С., Олюнин В.Н.** Камчатка // Селеопасные районы Советского Союза. М., Изд-во Моск. ун-та, 1976, с. 163–168.
- Крашенинников С.** Описание земли Камчатки. Т. 1. СПб., Императорская АН, 1755, 438 с.
- Малеев Е.Ф.** Агломератовые пирокластические потоки // Вулканические фации Камчатки. М., Наука, 1969, с. 5–34.
- 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 // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле, 2006, вып. 7, № 1, с. 15–35.
- 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., Брайцева О.А., Пономарева В.В. и др.** 0–650 гг. – этап сильнейшего природного катастрофизма нашей эры на Камчатке // Вулканология и сейсмология, 2003, № 6, с. 3–23.
- Мелекесцев И.В., Краевая Т.С., Брайцева О.А.** Рельеф и отложения молодых вулканических районов Камчатки. М., Наука, 1970, 104 с.
- Мелекесцев И.В., Сулержицкий Л.Д., Базанова Л.И. и др.** Катастрофические голоценовые лахары Авачинского и Корякского вулканов на Камчатке // Вулканология и сейсмология, 1995, № 4–5, с. 172–181.
- Неймайр М.** Вулканы и землетрясения: Пер. с нем. С.П. Чернова. СПб., Тип. СПб. общ. печ. дела Е. Евдокимова, 1902, 278 с.
- Новейший и современный вулканизм на территории России /** Отв. ред. Н.П. Лаверов. М., Наука, 2005, 604 с.
- Пийп Б.И.** О раскаленных агломератовых потоках Авачи и о типе извержений этого вулкана // Бюл. вулканол. станции на Камчатке, 1946, № 12, с. 18–28.
- Пийп Б.И.** Ключевская сопка и ее извержения в 1944–1945 гг. и в прошлом // Тр. Лаб. вулканологии. М., 1956, вып. 11, 309 с.
- Письма Плиния Младшего.** М., Наука, 1984, 408 с.
- Селиверстов Н.И.** Активизация вулкана Ключевской // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле, 2007, вып. 9, № 1, с. 7–8.
- 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.
- Федотов С.А., Масуренков Ю.П., Святловский А.Е.** Предисловие // Действующие вулканы Камчатки: В 2-х т. М., Наука, 1991, т. 1, с. 5–11.
- Хренов А.П., Двигаго В.Н., Кирсанов И.Т. и др.** Вулкан Ключевской // Действующие вулканы Камчатки: В 2-х т. М., Наука, 1991, т. 1, с. 106–145.
- Цюрупа А.И.** Внутриледниковые извержения // Гляциол. исслед., 1985, № 27, с. 67–76.
- Aguilera E., 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 // Bull. Volcanol., 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 // Bull. Volcanol., 2002, vol. 64, p. 455–471. DOI 10.1007/s00445-002-0222-5.
- Bemmelen van R.W.** The Geology of Indonesia // General Geology of Indonesia and adjacent archipelagoes. Hague, Govern. Print. Office, 1949, vol. 1A, 732 p.
- Bogoyavlenskaya G.E., Braitseva O.A., Melekestsev I.V. et al.** Catastrophic eruptions of the directed-blast type at Mount St. Helens, Bezymianny and Shiveluch volcanoes // J. Geodyn., 1985, vol. 3, p. 189–218.
- Braake ter A.L.** Volcanology in the Netherlands Indies // Science and Scientists in the Netherlands Indies. N.Y., Board of the Netherland Indies, Surinam and Curacao, 1945, p. 22–35.
- Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Ponomareva V.V., Korianov V.Yu.** The caldera-forming eruption of Ksudach volcano about Cal. A.D. 240: the greatest explosive event of our era in Kamchatka, Russia // J. Volcanol. and Geotherm. Res., 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) // Proc. Koninklijke Akad. Wetenschap., Amsterdam, 1922, vol. 24, p. 282–293.
- Griggs R.F.** The great hot mud flow of the Valley of Ten Thousand Smokes (Katmai, Alaska) // Sci. Results of the Katmai Expedition of the Nat. Geograph. Soc. Pap. III, The Ohio J. Sci., 1919, vol. 19, p. 117–142.
- John D.A., Sisson T.W., Breit G.N. et al.** Characteristics, extent and origin of hydrothermal alteration at Mount Rainier Volcano, Cascades Arc, USA: Implications for debris-flow hazards and mineral deposits // J. Volcanol. and Geotherm. Res., 2008, vol. 175, p. 289–314. doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.04.004.
- Justesen L.P.Th.** Bandjir // Geografisk Tidsskrift, 1919–1920, Bd 25, p. 228–235. (<http://www.tidsskrift.dk/visning.jsp?markup=&print=no&id=68005>).
- Kemmerling G.L.L.** De uitbarsting van den G. Keloet in den nacht van den 19^{den} op den 20^{sten} mei 1919. Weltevreden, Landsdrukkerij, 1921, 121 p.
- Lavigne F., Thouret J.C., Voight B. et al.** Lahars at Merapi volcano, Central Java: an overview // J. Volcanol. and Geotherm. Res., 2000, vol. 100, p. 423–456.
- Major J.J., Pierson T.C., Scott K.M.** Debris flows at Mount St. Helens, Washington, USA // 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 J. Geol. and Geophys., 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 Proc. in volcanol. 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? // J. Volcanol. and Geotherm. Res., 1995, vol. 65, p. 205–226.
- Miller C.D.** Potential hazards from future volcanic eruptions in California // US Geol. Surv. Bull. 1847, 1989, 17 p.
- Neall V.E.** Lahars as major geological hazards // Bull. Intern. Assoc. Eng. Geol., 1976, No. 14, p. 233–240.
- Newhall C.G., Bronto S., Alloway B. et al.** 10,000 Years of explosive eruptions of Merapi Volcano, Central Java: archaeological and modern implications // J. Volcanol. and Geotherm. Res., 2000, vol. 100, p. 9–50.
- Pierson T.C.** Hyperconcentrated flow – transitional process between water flow and debris flow // Debris-flow Hazards and Related Phenomena / Ed. by M. Jacob, O. Hungr. 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 // J. Volcanol. and Geotherm. Res., 1990, vol. 41, p. 17–66.
- Ponomareva V., Churikova T., Melekestsev I. et al.** Late Pleistocene-Holocene volcanism on the Kamchatka Peninsula, Northwest Pacific region // Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region. Amer. Geophys. Union Geophys. Monogr. Ser., 2006a, 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 // J. Volcanol. and Geotherm. Res., 2006b, vol. 158, p. 117–138.
- Schmidt K.G.** Die Schuttströme am Merapi auf Java nach dem Ausbruch von 1930 // De Ingenieur in Nederlandsch-Indië. Batavia, 1931, 68 p.
- Tilling R.I., Topinka L., Swanson D.A.** Eruptions of Mount St. Helens: past, present, and future // U.S. Geol. Surv. Spec. Interest Publ., 1990, 56 p.
- Thouret J.-C.** Volcanic geomorphology: an overview // Earth-Sci. Rev., 1999, vol. 47, p. 95–131.
- Thouret J.-C., Finizola A., Fornari M. et al.** Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru // Geol. Soc. Amer. Bull., 2001, vol. 113, p. 1593–1610.
- Vallance J.W.** Volcanic debris flows // Debris-flow hazard and related phenomena / Ed. by M. Jacob, O. Hungr. Praxis, Springer Berlin Heidelberg, 2005, p. 247–274.
- Witham C.S.** Volcanic disasters and incidents: A new database // J. Volcanol. and Geotherm. Res., 2005, vol. 148, iss. 3–4, p. 191–233.

Поступила в редакцию
30 сентября 2009 г.