

ФОРМИРОВАНИЕ ВОДНОГО СТОКА ЛАХАРОВ НА АКТИВНЫХ ВУЛКАНАХ С ОЛЕДЕНЕНИЕМ

И.Б. Сейнова¹, С.С. Черноморец¹, М.Д. Докукин², Д.А. Петраков¹, Е.А. Савернюк¹,
А.А. Лукашов¹, Е.А. Белоусова¹

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

²Высокогорный геофизический институт,
360030, Нальчик, просп. Ленина, 2, Кабардино-Балкарская республика, Россия

Оледенение и снежный покров на вулканах относятся к числу главных источников водной составляющей лахаров. На основе анализа общедоступных баз данных по вулканизму, современному оледенению и снежному покрову выделено 144 вулкана с современным оледенением, 226 вулканов с устойчивым снежным покровом и 298 вулканов, на которых устойчивый снежный покров не формируется. Составлена схема, иллюстрирующая распространение вулканов разных типов. Проанализированы данные исследований лахаров с вулканов, покрытых снегом и ледниками. На основе анализа сведений об извержениях вулканов Редаут (Аляска) в 1989–1990 гг. и Невадо-дель-Руис (Колумбия) в 1985 г. предложены вероятные механизмы трансформации вулканических процессов (извержений) в гидрологические (лахары). Установлено, что при взаимодействии пирокластических потоков со снежным покровом таяние происходит преимущественно за счет конвективного перемешивания пирокластики и снега. При действии движущихся пирокластических потоков на ледники таяние объясняется главным образом интенсивным турбулентным теплообменом между пирокластикой и льдом. При остановке пирокластических потоков интенсивность таяния падает более чем на порядок.

Лахар, водоснежный поток, нивально-гляциальная зона, пароксизмальное извержение, тephра, пирокластический поток, лавовый поток, термодинамические процессы, фреатический взрыв, вулкан

FORMATION OF WATER FLOW IN LAHARS FROM ACTIVE GLACIER-CLAD VOLCANOES

I.B. Seynova¹, S.S. Chernomorets¹, M.D. Dokukin², D.A. Petrakov¹, E.A. Savernyuk¹,
A.A. Lukashov¹, E.A. Belousova¹

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

²High-Mountain Geophysical Institute, 2, Lenina prosp., Nalchik, 360030, Kabardino-Balkaria Republic, Russia

Glaciers and snow cover on volcanoes are among main sources of water content in lahars. Review of open databases on volcanoes, modern glaciers and snow cover allowed us to identify 144 glacier-clad volcanoes as well as 226 volcanoes with and 298 volcanoes without annual snow cover. We compiled a sketch map which illustrates the global distribution of volcanoes covered with ice and snow and analyzed available reports on lahars from such volcanoes. Evidence on eruptions of Redoubt (Alaska, 1989–1990) and Nevado del Ruiz (Colombia, 1985) volcanoes made basis for a plausible model explaining the transformation of volcanic (eruption) to hydrological (lahar) processes. Interaction of pyroclastic flow with snow and ice which causes their melting occurs by the mechanisms of convective mixing and rapid turbulent heat exchange, respectively. The melting rate at turbulent heat transfer is at least ten times faster than that of static melting under eruption products.

Lahar, slush flow, nival-glacial zone, paroxysmal eruption, tephra, pyroclastic flow, lava flow, thermodynamic processes, phreatic blast, volcano

ВВЕДЕНИЕ

Лахары, образующиеся на активных вулканах, несущих ледники, находятся в ряду самых опасных процессов, связанных с вулканической деятельностью. Самым трагичным из них в XX в. был сход в 1985 г. лахара при извержении покрытого льдом вулкана Невадо-дель-Руис в Колумбии, когда погибли 23 тысячи жителей городов Армеро и Чинчина [Lowe et al., 1986; Pierson et al., 1990]. Характерно, что магнитуда самого изверже-

ния была относительно невелика, а его катастрофические последствия были вызваны исключительно сходом лахаров, жидкий компонент которых был сформирован за счет таяния снега и льда.

Катастрофические лахары регулярно образуются при извержениях вулканов, покрытых снегом и ледниками. Наличие снежного покрова или ледников – одно из важных условий формирования лахаров на Камчатке и в других районах. Не-

смотря на высокую частоту формирования лахаров на вулканах, покрытых снегом и ледниками, механизм трансформации извержений в лахары пока не до конца понятен.

Целью работы стал анализ механизмов формирования жидкого стока лахаров при взаимодействии продуктов извержения со снегом и льдом. Для этого были обобщены результаты исследований на отдельных вулканах, покрытых снегом и льдом, составлена база данных и схема, иллюстрирующая распространение вулканов с современным оледенением и устойчивым снежным покровом, на основе опубликованных данных выявлены закономерности формирования жидкого стока лахаров при извержениях вулканов Редаут (Аляска, США) в 1989–1990 гг. и Невадо-дель-Руис (Колумбия) в 1985 г.

ВУЛКАНИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЛАХАРОВ

Результаты мониторинга вулканической деятельности дают возможность установления факторов, влияющих на формирование лахаров в нивально-гляциальной зоне. Воздействие раскаленных продуктов извержения на снег и лед изучалось в разных работах [Walder, 1992, 2000; Huggel et al., 2007; Thouret et al., 2007], однако детали продуцирования водного стока лахаров в этих условиях остаются слабо исследованными. Для обобщения и формализации полученных заключений проведена целенаправленная выборка из известных публикаций по:

1) глобальному обзору известных за исторический период случаев схода лахаров при извержениях вулканов Тихоокеанского “Огненного кольца”, Исландии, Италии, Африки, анализу условий образования лахаров на 40 вулканах мира [Crandell, 1971; Major, Newhall, 1989];

2) систематизации факторов образования лахара при извержении дацито-андезитового вулкана Невадо-дель-Руис с трагическими последствиями для населения и подобных катастрофических событий на вулканах с оледенением [Pierson et al., 1990].

В настоящей статье не затрагивается случай формирования лахаров при подледных извержениях на вулканах, покрытых ледниками полностью. Это явление развито в Исландии и имеет местное название “йокульхлауп” (jökulhlaup). Такие явления ранее изучены [Björnsson, 1991, 2003; Tómasson, 1996; Russell et al., 2006], они обладают особыми свойствами и могут быть предметом рассмотрения в отдельной статье. Ниже рассматривается образование лахаров на вулканах, частично покрытых ледниками.

Формирование водного стока лахаров в нивально-гляциальной зоне вулканов происходит в результате последовательных процессов преоб-

разования потоков изверженного материала при взаимодействии с ледниковым покровом [Thouret et al., 2007]. Путем обзора 108 известных в мире событий сходов лахаров выявлен вклад вулканических факторов, их обуславливающих: пирокластические потоки в 42 случаях; подледные извержения в 38 случаях (в данной статье не рассматриваются); лавовые потоки в 6 случаях поверхностного извержения; разрушение кратерных озер в 2 случаях. В 20 случаях генезис формирования лахаров не установлен.

Степень реальной опасности схода лахаров при поверхностных извержениях оценивалась по частоте проявления их трагических последствий в населенных районах. Установлено, что самым существенным фактором развития катастрофических событий являются пирокластические потоки (ПП), воздействующие на снежно-ледовый покров при извержениях плинианского типа андезитовых вулканов (в 42 случаях из известных 108 событий в мире) [Major, Newhall, 1989]. Их разрушительный энергетический потенциал обусловлен высокой скоростью гравитационного переноса измельченной и пульверизированной магмы по поверхности вулканической постройки с охватом воздушного пространства над ней.

В результате анализа поверхностного излияния лавовых потоков выявлен сход лахаров (в 6 случаях из 108). Лавовые потоки образуются при извержениях стромболианского типа базальтовых вулканов. В отличие от пирокластических, они характеризуются продолжительным излиянием лавы с концентрацией на крутых склонах по локальным желобам. По мнению исследователей, воздействие лавы на поверхность ледников не могло привести к образованию больших объемов водного стока по причине замедленного таяния из-за значительных затрат тепла на плавление льда [Pistolesi et al., 2013; Rivera et al., 2015]. Следует отметить, что роль термодинамических процессов, способствующих переходу от поверхностного воздействия к внедрению лавы в ледовый покров и тем самым увеличению количества водного стока, не учитывалась в силу отсутствия соответствующих наблюдений.

На вулкане Ключевской сход лахаров при поверхностном извержении лавовых потоков был зафиксирован в 18 случаях, не вошедших в мировой каталог. Хронология лахаров на Ключевском приведена в работах [Сейнова и др., 2010; Черноморец, Сейнова, 2010]. Максимальные объемы выносов твердого материала оценивались в 100 млн м³, и это без учета потока суспензии, преобладающей в объеме лахаров [Муравьев, Клименко, 2014; Belousov et al., 2011]. Механизм формирования водного стока лахара при катастрофическом извержении влк. Ключевской будет рассмотрен в отдельной статье.

Историческими рекордами отмечены единичные случаи образования лахаров при косо направленных взрывах вулканов в результате осаждения на снежно-ледовый покров горячей тефры: Котопахи (Эквадор) в 1877 г., Ключевской в 1945 г., Безымянный (Камчатка) в 1956 г., Сент-Хеленс (США) в 1980 г. [Puijn, 1956; Горшков, 1957; Муравьев, Клименко, 2014; Waite et al., 1983; Pistolesi et al., 2014]. Следует отметить, что на Камчатке максимальный лахар объемом 500 млн м³ сформировался при интенсивном таянии снежного покрова в результате осаждения тефры, выброшенной взрывом влк. Безымянный на окружающие склоны вулканов Ключевской и Зиминых [Белоусов и др., 2006]. На отдельных вулканах такие процессы повторяются через сотни и тысячи лет. Но, как правило, тефра выпадает в охлажденном состоянии из вертикальных эруптивных колонн, достигающих большой высоты, что исключает таяние снега и образование лахаров [Manville et al., 2000].

ДЕЙСТВУЮЩИЕ ВУЛКАНЫ МИРА СО СНЕЖНЫМ ПОКРОВЫМ И ЛЕДНИКАМИ

Роль снега и льда на вулканах важна с точки зрения механизмов формирования лахаров. Представляет интерес распределение вулканов, покрытых снегом и ледниками.

В работе [Waite et al., 2015] помечены голоценовые вулканы, покрытые ледниками, на фоне схемы вулканов мира из [Global..., 2013]. Авторы пользовались базой данных по ледникам GLIMS. Однако они не проводили дешифрирование всех вулканов, также не анализировался снежный покров на вулканах. Между тем механизмы зарождения лахаров на вулканах существенно различаются. Нивально-вулканические механизмы характерны для таяния снежного покрова при сходе ПП, гляциально-вулканические – для таяния ледников при истечении лавы и сходе ПП.

Хотя большая часть действующих вулканов мира не имеет снежного покрова и ледников и не может порождать лахары нивально-гляциального характера, выделяются области, в которых такие процессы имеют высокую активность. Авторами были проанализированы действующие вулканы мира на предмет устойчивого снежного покрова и (или) ледников на их склонах или вершинах. Результаты отражены на схеме “Снег и лед как факторы формирования лахаров на действующих вулканах мира”. Она позволяет оценить встречаемость лахаров нивальных и гляциальных механизмов формирования.

Для составления схемы авторы использовали базы данных по вулканам [Global..., 2013], ледникам [Arendt et al., 2015], карты снежного покрова [Атлас..., 1997], наземные фотографии из разных источников, а также в отдельных случаях климатические данные для окрестностей конкретного

вулкана. После сопоставления баз данных было проведено дешифрирование вулканов по космическим снимкам высокого разрешения из открытых источников (Google, Bing, Yandex).

В базе данных Смитсоновского института [Global..., 2013] содержатся сведения о более чем 1500 наземных вулканах. Важно было определить возрастной критерий даты последнего извержения для отбора вулканов. По этому вопросу нет единого мнения. Так, база данных [Global..., 2013] включает все голоценовые вулканы. Другой подход состоит в том, что действующим признается вулкан, для которого известны исторические извержения или исторически документированные извержения, а также проявления фумарольной или сольфатарной активности. По мнению И.В. Мелекесцева и соавт. [2001], такая трактовка затрудняет сравнение вулканов, поскольку в разных регионах мира длительность наблюдений за вулканическими извержениями может различаться в несколько раз. Поэтому было предложено называть “действующими” те вулканы, извержения которых происходили не ранее 3500 лет назад [Мелекесцев и др., 2001]. Этот критерий использовался в настоящей работе. В базу данных были отобраны действующие надводные вулканы, дата последнего извержения которых составляет не более 3500 лет.

Анализ показал, что этим условиям удовлетворяют 668 вулканов. Предварительные результаты картографирования были опубликованы в работе [Белоусова, 2016], затем материал был дополнен и уточнен.

На рис. 1 приведена схема “Распространение вулканов со снежным покровом и ледниками” с врезками на Аляску, северную часть Анд и Камчатку. На ней показаны вулканы без устойчивого снежного покрова, с устойчивым снежным покровом, а также со снежным покровом и ледниками. Схема составлена с использованием программного обеспечения ArcGIS 10.4 в системе координат WGS 1984 в проекции Natural Earth.

В отдельных случаях данные дешифрирования ледников и снежного покрова не совпадали с информацией, имеющейся в опубликованных базах данных [Arendt et al., 2015] и работах по оледенению [Singh et al., 2011]. Так, для малоизученных в ледниковом отношении вулканов Алеутских островов (Танага, Такаванга, Кыска, Карлайл, Кливленд, Угашик-Пеулик и др.) решение о включении или не включении в список принималось по наличию дешифровочных признаков ледников.

Кроме того, по некоторым вулканам имеются несовпадающие данные о возрасте последнего извержения. Так, для вулкана Казбек в использованной авторами базе данных [Global..., 2013] приведена дата последнего извержения 750 г. до н.э. Однако, по радиоуглеродным датировкам Тбилисского университета и ИГЕМ РАН, последнее из-

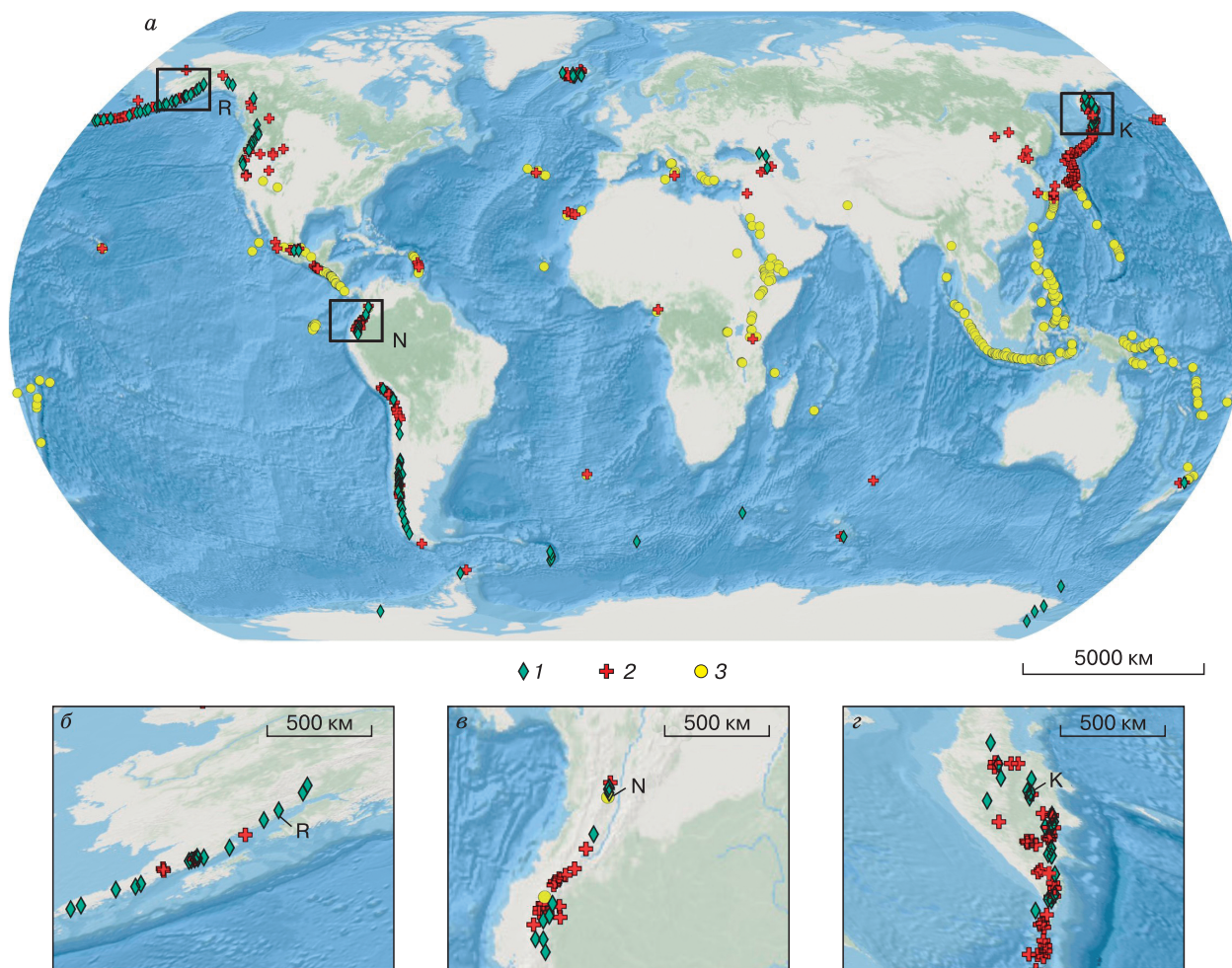


Рис. 1. Действующие вулканы мира со снежным покровом и ледниками:

a – мир в целом, *б* – Аляска, *в* – северная часть Анд, *г* – Камчатка и северная часть Курильских островов; 1 – вулканы с ледниками, 2 – вулканы с устойчивым снежным покровом, 3 – вулканы без устойчивого снежного покрова; R – Редаут, N – Невадо-дель-Руис, K – Ключевской. Проекция Natural Earth.

вержение на Казбекском массиве произошло около 6000 лет назад, при этом центром извержения была не покрытая ледниками вершина Казбека, а побочный конус Малый Ткаршети, находящийся ниже зоны современного оледенения [Бурчуладзе и др., 1976; Чернышев и др., 2002; Lebedev et al., 2014]. В то же время активно обсуждалась роль вулканического прогрева и фумарольной активности в формировании Кармадонской ледниковой катастрофы 2002 г. [Муравьев, 2005] и Девдоракского обвала 2014 г. [Черноморец, 2014]. В связи с этим было принято решение оставить Казбек в списке действующих вулканов с оледенением.

Некоторые вулканы Камчатки (например, Алней, влк. Горного Института) обычно не включаются в список действующих камчатскими вулканологами [Действующие вулканы..., 1991; Мелекесцев и др., 2001]. Однако они удовлетворяют ус-

ловиям для включения в таблицу, если исходить из даты последнего извержения.

При отборе наземных вулканов учитывалось также то, что отдельные подводные извержения приводили к временному появлению вулканических аппаратов на поверхности, а затем к разрушению их надводных частей абразионными процессами. Авторами были оставлены в списках только те вулканы, надводные части которых существуют в настоящий момент.

Если наличие ледников на вулкане, за исключением отдельных случаев, можно установить довольно точно, то наличие снежного покрова на нем имеет менее точные границы. Авторы старались выделить вулканы, на которых устойчивый снежный покров образуется практически ежегодно. В качестве базового критерия для отнесения вулкана к типу, на котором формируется устойчи-

вый снежный покров, использовались карты максимальных снегозапасов из [Атлас..., 1997], и во второй тип включались вулканы, где снегозапас, необходимый для формирования водной составляющей лахара, был не менее 25 мм в водном эквиваленте. Например, по изолинии 25 мм были разделены по типам вулканы в южной Японии (авторы карты снегозапасов Т.Г. Глазовская и А.Ф. Глазовский). При отсутствии карт или в сомнительных случаях авторы использовали климатические данные с ближайших к вулкану метеостанций. В частности, этот способ уточнения применялся для некоторых вулканов Центральной Америки и океанических регионов (Азорские острова). Также авторы пытались получить подтверждение сделанных выводов путем поиска фотографий из различных источников, отображающих наличие снега и ледников на соответствующем вулкане.

Из 668 вулканов, показанных на схеме (рис. 1), 298 (44 %) не имеют устойчивого снежного покрова, 226 (34 %) периодически покрываются снегом, а 144 (22 %) имеют оледенение. Анализ схемы позволяет выделить две закономерности распределения вулканов с ледниками и снежным покровом. С одной стороны, наблюдается очевидная широтная климатическая зональность: от экватора к по-

лярным областям растёт количество вулканов – сначала со снежным покровом, а затем и с ледниками. Ледники на вулканах распространены на Камчатке, Аляске, на западе Северной и Южной Америки, в Антарктике, Исландии и на ряде островов высоких широт. С другой стороны, прослеживается высотная поясность: наиболее высокие вулканы могут нести ледники даже в экваториальных областях (например, Невадо-дель-Руис в Андах).

Распределение вулканов, несущих оледенение, по регионам представлено в таблице. Под наличием ледников понималось присутствие их в вершинной части, на склонах и у подножия вулкана.

Отдельные примеры вулканов с оледенением приведены на рис. 2. Снимки сделаны с Международной космической станции.

Тип вулкана также имеет значение. Наибольшая опасность лахаров возникает на стратовулканах. Из 144 вулканов, покрытых ледниками, 118 вулканов (82 %) относятся к этому типу. Остальные относятся к щитовым, подледным, кальдерам и другим типам.

Наибольшее количество вулканов с ледниками находится (полностью или частично, так как некоторые вулканы расположены на границе двух стран) на территории США (41 шт.), Чили (37 шт.), России (24 шт.).

Действующие вулканы мира, несущие ледники – потенциальные объекты для формирования лахаров гляциального типа

Вулканический район	Вулканы с оледенением	
	Кол-во	Наименование
Камчатка и Курилы	21	Авачинский, Алаид, Алней, Высокий, Гамчен, Горного Института, Желтовский, Жупановский, Ичинский, Камбальный, Ключевской, Кошелева, Корякский, Крашенинникова, Кроноцкий, Мутновский, Северный, Тауншиц, Толбачик, Ушковский, Шивелуч
Аляска	31	Акутан, Аниакчак, Атка, Большой Ситкин, Вениаминова, Вестдал, Врангеля, Всевидова, Горелый, Григгс, Дана, Илиamna, Катмай, Коровин, Купреянова, Магейк, Макушина, Мартин, Павлова, Редаут, Сноуи-Маунтин, Спурр, Такаванга, Танага, Тридент, Форпик, Хайес, Черчилль, Чигинагак, Шишалдина, Янтарный
Канада, запад США и Мексика	14	Адамс, Бейкер, Джефферсон, Глейшер-Пик, Лассен-Пик, Миджер, Орисаба, Попокатепетль, Рейнир, Сент-Хеленс, Три Сестры, Худ, Шаста, Эдзиза
Анды, северная часть (Колумбия, Эквадор, Перу)	11	Антисана, Каямбе, Котопахы, Невадо-дель-Руис, Невадо-дель-Уила, Невадо-дель-Толима, Сабанкая, Сангай, Санта-Исабель, Тунгурауа, Чимборасо
Анды, южная часть (Аргентина, Чили, Боливия)	39	Агилера, Антильянка, Антуко, Ареналес, Вильяррика, Вьедма, Дескабесадос-Гранде, Гуальятири, Кальбуко, Кальяки, Кетрупилян, Копауэ, Ланин, Лаутаро, Лонкимай, Льюльяльяко, Льяйма, Майпо, Мака, Мелимою, Ментолат, Мичинмауида, Монте-Бёрней, Мочо-Чошуэнко, Невадос-де-Чильян, Осорно, Охос-дель-Саладо, Паринакота, Планчон-Петероа, Пуеуэ-Кордон-Каулле, Пунтиагудо-Кордон-Сенисос, Реклюс, Сан-Хосе, Серро-Хадсон, Сольипульи, Тингирика, Тромен, Тупунгатито, Яте
Южные части Атлантического, Индийского и Тихого океанов (включая Новую Зеландию)	11	Бакл, Бристол, Буве, Десепшен, Кандлмас, Марион-Айленд, Монтэгийо, Руапеху, Саутерн-Туле, Сондерс, Херд
Антарктида	4	Мельбурн, Плеяды, Хадсон Маунтинс, Эрбус
Кавказ	3	Арапат, Казбек, Эльбрус
Исландия	10	Баурдарбунга, Гекла, Гримсвётн, Катла, Кверкфьедль, Лаунгйёкюдль, Снайфедльс, Торвайёкюдль, Эйяфьятлаёкюдль, Эрайвайёкюдль
<i>Всего</i>	<i>144</i>	

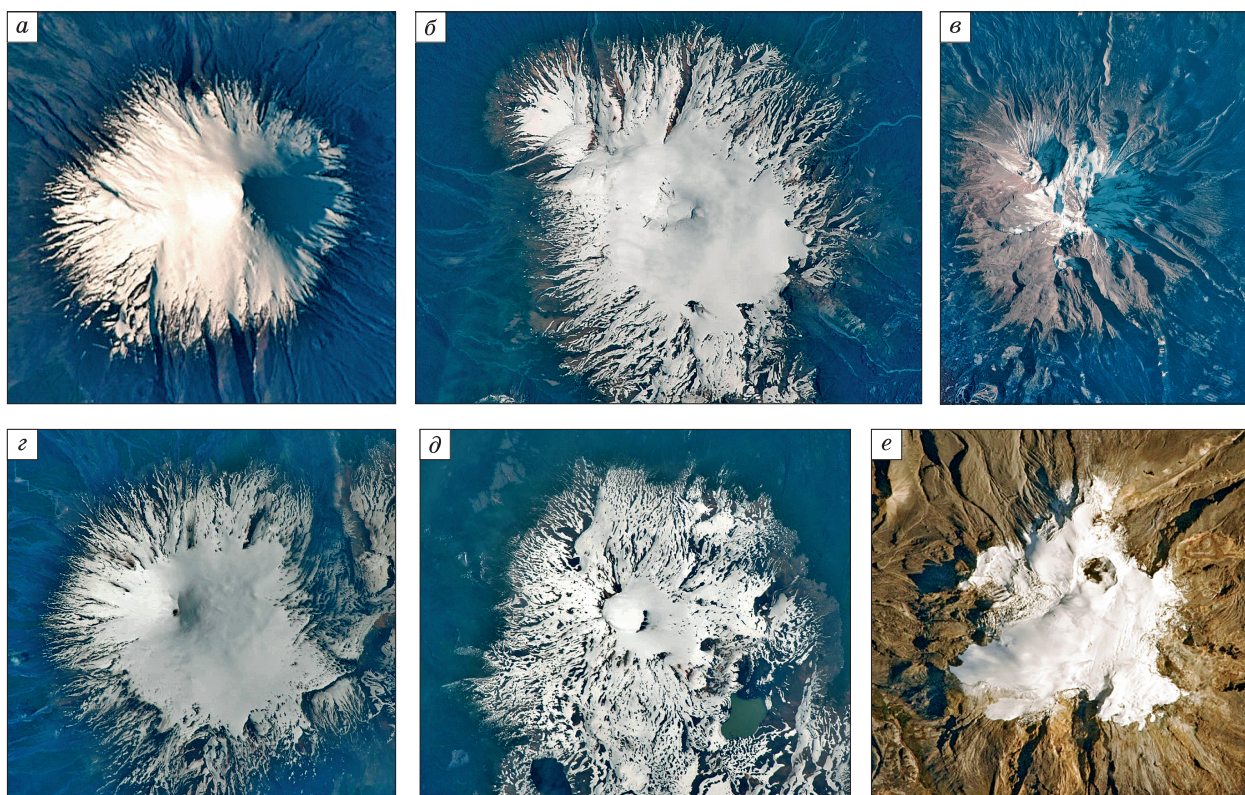


Рис. 2. Примеры действующих вулканов с оледенением:

a – Осорно (Чили); *б* – Мочо-Чошуэнко (Чили); *в* – Шаста (США); *г* – Вильяррика (Чили); *д* – Кетрупильян (Чили); *е* – Невадо-дель-Руис (Колумбия). Снимки сделаны с Международной космической станции: *a–д* – 16 и 21 ноября 2013 г. космонавтом С.Н. Рязанским (37-я экспедиция) в рамках программы “Ураган”, предоставлены С.Н. Рязанским; *е* – 23 апреля 2010 г. участниками 23-й экспедиции, предоставлены NASA.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВУЛКАНО-ГЛЯЦИАЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В МЕХАНИЗМЕ ФОРМИРОВАНИЯ ВОДНОГО СТОКА ЛАХАРОВ

Примером выявления закономерностей формирования водного стока лахаров при извержении вулканов, несущих ледники, стали исследования условий формирования катастрофического лахара 13 ноября 1985 г. в Колумбии [Lowe *et al.*, 1986; Pierson *et al.*, 1990; Thouret, 1990; Thouret *et al.*, 2007]. Зародившись на ледниковом куполе вулкана Невадо-дель-Руис, в истоках рек Асуфрадо и Лагунильяс, лахар прошел путь в 65 км до города Армеро за 2 часа с начала извержения. На основе материала из опубликованных работ авторами составлена схема путей движения лахара (рис. 3).

От первой волны “чистой и холодной” воды пострадали районы вблизи селезащитного канала, а через 10 мин на город обрушился катастрофический грязекаменный поток. В течение 20 минут (с 23 ч 35 мин до 23 ч 55 мин) волнами высотой до 5 м была затоплена основная часть города. Заключительная водокаменная фаза селевого процесса, пощадившая лишь остатки его кварталов, продол-

жалась всю ночь 14 ноября. Последствия селя в Армеро показаны на рис. 4. Одновременно лахары прошли по рекам Чинчина и Гуали, достигнув го-

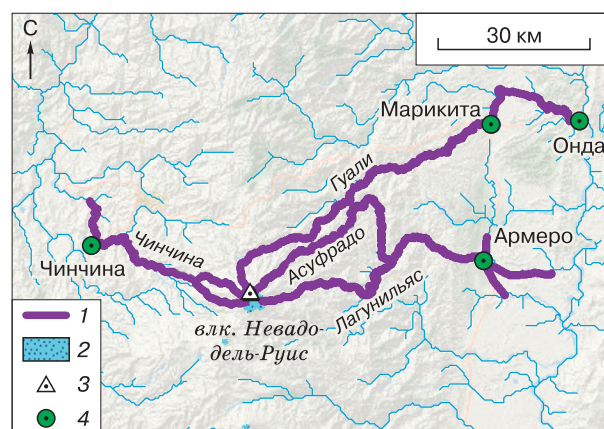


Рис. 3. Схема лахаров, сошедших с вулкана Невадо-дель-Руис 13 ноября 1985 г.

1 – пути лахаров; 2 – ледники; 3 – вершина вулкана; 4 – населенные пункты.



Рис. 4. Город Армеро на конусе выноса р. Лагунильяс был погребен под отложениями лахара 13 ноября 1985 г.

Справа – уцелевшая часть кварталов г. Армеро [Pierson et al., 1990].

родов Марикита в 78 км от вулкана и Онда в 96 км. В г. Чинчина (в 43 км) были разрушены сотни домов и погибли около 2 тыс. человек [Pierson et al., 1990].

Вершина влк. Невадо-дель-Руис (Руис) высотой 5389 м перед извержением была покрыта ледниками площадью 25 км² [Thouret, 1990]. Извержение вулкана началось с взрыва в 20 ч 08 мин с выбросом в стратосферу эруптивной колонны. При ее обрушении образовались ПП с объемом раскаленного материала 10 млн м³, что соответствует ординарному рангу проявления вулканической деятельности плининского типа. Таяние снега и льда под их воздействием привело к одновременной потере 10 % объема ледяной шапки вулкана и образованию 90 млн м³ талых вод, что явилось причиной массового схода лахаров на реках его северо-восточного склона. По мнению Т. Пирсона и соавт. [Pierson et al., 1990], “ключом к парадоксу” проявления крупнейших селевых катастроф при ординарных извержениях служит воздействие на снежно-ледовый покров продуктов вулканической деятельности, наиболее опасные из которых – пирокластические потоки. Действующими факторами в системе ПП являются составляющие ее наземные потоки тяжелой фракции и приземные волны летучего пирокластического материала, различающиеся механизмом вулcano-гляциального взаимодействия, формирующего водный сток лахаров.

ПРИЗЕМНЫЕ ПИРОКЛАСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

Пирокластическим волнам принадлежит первостепенная роль в образовании водной составля-

ющей стока лахаров. В течение первых 20 минут извержения влк. Невадо-дель-Руис под воздействием приземных пирокластических волн (ПВ) был сброшен весь снежный покров с ледников его северо-восточного склона. В результате в истоках рек Асуфрадо и Лагунильяс образовались водоснежные потоки объемом 6–7 млн м³, которые трансформировались в первую волну “чистой и холодной воды” лахара [Thouret, 1990]. Роль ПВ в образовании водоснежных потоков – предтечей грязекаменных лахаров – была установлена также при извержениях на вулканах Сент-Хеленс (США) в 1980–1983 гг., Котопахи (Эквадор) в 1995–1996 гг. [Waite, 1989; Pistolesi et al., 2013]. При взрыве влк. Сент-Хеленс в мае 1980 г. водоснежные потоки, устремившиеся по врезам и оврагам в русла рек, трансформировались в катастрофический лахар объемом до 10 млн м³ на р. Тутл [Fairchild, 1987]. Формирование водной составляющей стока лахара в ходе извержений влк. Шивелуч (Камчатка) в апреле 2012 г. происходило при интенсивном таянии снежного покрова под воздействием приземной взвеси пирокластических волн [Сейнова и др., 2014].

Полевыми и экспериментальными исследованиями было установлено, что кинетическая энергия и тепло ПВ низкой плотности приводит к сублимации и разрыхлению снежной толщи на глубину менее 2 м. Неустойчивость выделяющегося при этом пара способствует конвективному перемешиванию пирокластического материала со снегом до образования водоснежной суспензии. Дальнейшее ее внедрение в плотные снежно-фирновые толщи приводит к сдвигу и массовому сходу мокрых лавин и водоснежных потоков [Fairchild, 1987; Manville et al., 2000]. При сбросе с поверхности ледников в русла рек водоснежные потоки (slush flow) преобразуются в грязекаменные волны лахаров (snow slurry lahars), значительно увеличиваясь в объеме [Waite et al., 1983; Pierson, 1985; Scott, 1988; Waite, 1989; Pierson et al., 1990; Cronin et al., 1996].

НАЗЕМНЫЕ ПИРОКЛАСТИЧЕСКИЕ ПОТОКИ

Наземные пирокластические потоки имеют непосредственный контакт с ледниковой поверхностью после сброса с него снежного покрова под воздействием ПВ. Оврагообразующее и абразивное воздействие наземных потоков пирокластического материала на ледовый покров вызывает наибольший водный сток лахаров [Waite, 1989]. Расчеты по результатам полевых обследований после схода катастрофического лахара 13 ноября 1985 г. показали, что 80 % из 43 млн м³ его водного стока составляли талые ледниковые воды.

На оледенелой поверхности вулканического конуса влк. Невадо-дель-Руис раскаленные ПП

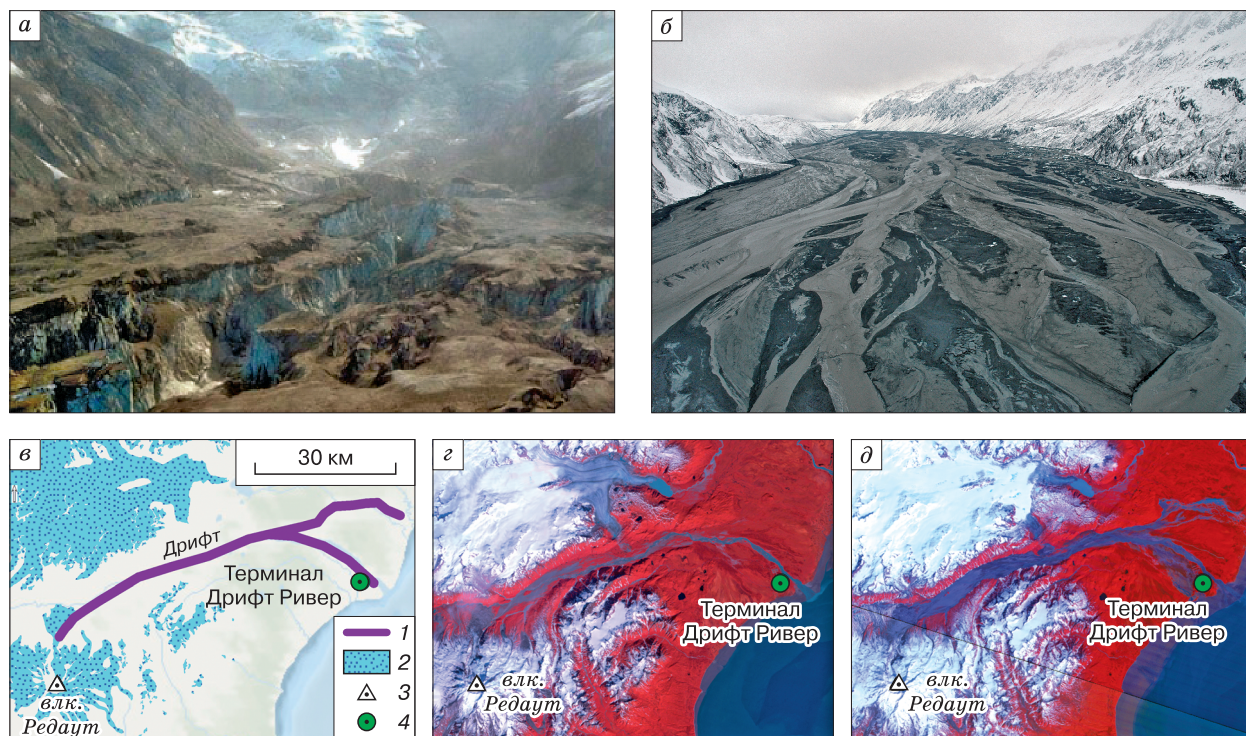


Рис. 5. Лахары при извержениях вулкана Редаут (Аляска, США):

а – ледовый каньон, образовавшийся в зоне зарождения лахара в результате воздействия пирокластического потока на ледник при извержении 1989–1990 гг. Фото Т. Миллера, Геологическая служба США, апрель 1990 г. [Roach et al., 1996]; б – зона отложения лахаров 1989–1990 гг. и 2009 г. в долине р. Дрифт. Фото Р.Г. МакГимси, 23.03.2009 г. [Massive..., 2009]; в – схема (1 – путь лахаров, 2 – ледники, 3 – вершина вулкана, 4 – промышленный объект); г – вулкан перед извержением на космическом снимке Landsat-5 от 21.08.1987 г.; д – вулкан после извержения на космическом снимке Landsat-4 от 30.06.1992 г.

образовали каналы шириной до 100 м и глубиной 2–4 м. Широкий сектор их распространения означал кратковременность воздействия на снежно-ледовый покров. В результате еще в пределах ледников раскаленный вулканический материал трансформировался в смесь воды с камнями, песком и пеплом. Образовавшиеся грязекаменные смеси составили катастрофическую грязекаменную фазу лахара. Таким же образом и при извержении вулканов Вильяррика (Чили, 1877 г.) и Редаут (Аляска, 1989 г.) ПП “пропиливали” в ледниках каналы глубиной до 50 м [Roach et al., 1996; Rivera et al., 2015] (рис. 5, а). Долина р. Дрифт со следами лахаров показана на рис. 5, б. Схема лахаров при извержении Редаута в 1989–1990 гг. приведена на рис. 5, в. На рис. 5, г, д даны космические снимки до и после извержения.

В механизме воздействия наземной части ПП на ледник решающее значение имеет *турбулентный* процесс переноса тепла его раскаленной смеси за счет поперечных пульсаций скорости его движения. За счет турбулентности значительно расширяется поверхность контактов горячей пирокластики со снегом и льдом и обеспечивается

проникновение тепла в тело ледника. В результате интенсивного перемешивания перенос теплоты и вещества происходит гораздо активнее, чем в статических условиях теплопередачи. Экспериментально установлено, что скорость плавления льда при турбулентной теплопередаче в 60 раз превышает таяние под покровом отложений продуктов извержения. В итоге увеличивается пропускная способность дренажной сети, и за счет включения внутриледниковых вод возрастает объем водного стока. Термодинамической эрозии ПП достаточно для производства десятков миллионов кубических метров талой воды в течение нескольких минут [Pierson et al., 1990; Thouret et al., 2007].

СТАТИЧЕСКОЕ ПЛАВЛЕНИЕ ЛЬДА ПОД ОТЛОЖЕНИЯМИ ПРОДУКТОВ ИЗВЕРЖЕНИЯ

Плавление льда в зоне отложений магматического материала проявляется медленнее по сравнению с термодинамическим воздействием в ходе его движения. Пассивная теплоотдача от покрова раскаленного материала к подстилающей поверхности ледника, по данным экспериментальных ис-

следований, может генерировать слой таяния 33–46 мм за 30 мин. Образование водного стока посткатастрофической фазы лахара с влк. Невадо-дель-Руис в течение ночных часов 14 ноября 1985 г. происходило в результате статического плавления на пологих участках ледников, покрытых остаточными отложениями горячей пирокластики [Pierson *et al.*, 1990].

Суммарный объем водного стока, образовавшегося при воздействии продуктов извержения на снежно-ледовый покров влк. Невадо-дель-Руис, составил 43.6 млн м³, если суммировать приведенные в [Pierson *et al.*, 1990] данные подсчетов по отдельным долинам. Объем лахаров увеличился за счет эрозионного размыва в руслах рек и составил 70–190 млн м³ [Huggel *et al.*, 2007], значительно превысив исходный водный импульс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа общедоступных баз данных по вулканизму, современному оледенению и снежному покрову выделено 144 вулкана с современным оледенением, 226 вулканов с устойчивым снежным покровом и 298 вулканов, на которых устойчивый снежный покров не формируется.

В результате анализа исследований катастрофических лахаров при поверхностных извержениях вулканов мира с оледенением выявлены следующие особенности формирования талого водного стока в результате вулcano-гляциального взаимодействия:

- таяние снега при конвективном взаимодействии приземных волн летучего пирокластического материала и неостывшей тефры со снежным покровом;
- разрушение и таяние льда в результате термодинамического воздействия наземных пирокластических потоков на ледниковый покров;
- таяние ледников в результате термодинамического воздействия лавовых потоков на ледниковый покров;
- таяние ледников в результате теплопередачи от поверхностных отложений продуктов извержения.

Составленная схема расположения вулканов мира с оледенением и снежным покровом позволяет очертить круг объектов для изучения лахаров, связанных с таянием льда и снега.

Литература

- Атлас** снежно-ледовых ресурсов Мира. Т. 2. Кн. 1 / В.М. Котляков (ред.). М., ИГ РАН, 1997, 392 с.
- Kotlakov, V.M. (Ed.), 1997. World Atlas of Snow and Ice Resources. Volume 2. Book 1. Institute of Geology, Moscow, 392 pp. (in Russian)
- Белюсов А.Б., Войт Б., Белоусова М.Г.** Извержение вулкана Безымянный 1956 г. и аналогичные извержения в других районах мира: последовательности эруптивных событий, отложения и механизм // *Материалы Междуна- роп. симп. “Проблемы эксплозивного вулканизма”*. Петропавловск-Камчатский, ИВиС ДВО РАН, 2006, с. 46–49.
- Belousov, A.B., Voight, B., Belousova, M.G., 2006. The 1956 eruption of Bezymianny and similar events worldwide: eruptive sequences, deposits, and mechanisms, in: *Problems of Explosive Volcanism. Proc. Intern. Symp., Institute of Volcanology and Seismology, Petropavlovsk-Kamchatskiy*, pp. 46–49. (in Russian)
- Белоусова Е.А.** Снег и лед на вулканах Мира как факторы формирования лахаров // *Материалы Междуна- роп. науч. форума “ЛОМОНОСОВ-2016”* / Отв. ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов. [Электрон. ресурс]. М., МАКС Пресс, 2016. – URL: https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2016/data/8344/uid104227_report.pdf (дата обращения: 02.06.2016).
- Belousova, E.A., 2016. Snow and Ice on Volcanoes of the World as Lahar Formation Factors, in: *Aleshkovskiy, I.A., Andriyanov, A.V., Antipov, E.A. (Eds.), Proc. Intern. Youth Forum LOMONOSOV-2016. MAKS Press, Moscow. [Electronic Resource] URL: https://lomonosovmsu.ru/archive/Lomonosov_2016/data/8344/uid104227_report.pdf* (submittal date: 02.06.2016).
- Бурчуладзе А.А., Джанелидзе Ч.Г., Тогонидзе Г.И.** Применение радиоуглеродного метода для решения некоторых вопросов палеогеографии плейстоцена и голоцена Грузии // *Актуальные вопросы современной геохронологии*. М., Наука, 1976, с. 238–243.
- Burchuladze, A.A., Dzhaneldidze, Ch.G., Togonidze, G.I., 1976. Radiocarbon dating for some problems of the Pleistocene and Holocene paleogeography of Georgia, in: *Actual Problems of Present Geochronology*, Nauka, Moscow, pp. 238–243. (in Russian)
- Горшков Г.С.** Извержение сопки Безымянной (предварительное сообщение) // *Бюл. Вулканолог. станции*, 1957, № 26, с. 19–72.
- Gorshkov, G.S., 1957. Eruption of Bezymianny volcano (preliminary report). *Bul. Volcanol. Station* 26, 19–72.
- Действующие вулканы Камчатки**. В 2 т. Т. 1 / Под ред. С.А. Федотова, Ю.П. Масуренкова. М., Наука, 1991, 302 с.
- Fedotov, S.A., Masurenkov, Yu.P. (Eds.), 1991. *Active Volcanoes of Kamchatka. Volume 1*. Nauka, Moscow, 302 pp. (in Russian)
- Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В.** Новый подход к определению понятия “действующий вулкан” // *Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы*. Петропавловск-Камчатский, ИВиС ДВО РАН, 2001, с. 428–440.
- Melekestsev, I.V., Braitseva, O.A., Ponomareva, V.V., 2001. A new approach to the definition of the term of “active volcano”, in: *Geodynamics and Volcanism of the Kurile-Kamchatka Islands Arc System*, Institute of Volcanology and Seismology, Petropavlovsk-Kamchatskiy, pp. 428–440. (in Russian)
- Муравьев Я.Д.** Газовое извержение в цирке – возможная причина развития подвижки ледника Колка по катастрофическому сценарию // *Материалы гляциол. исслед.*, 2005, вып. 98, с. 44–55.
- Muraviev, Ya.D., 2005. Gas outburst in Kolka glacier cirque as a possible trigger of catastrophic surges scenario. *Material. Glaciol. Issled.* 98, 44–55.
- Муравьев Я.Д., Клименко Е.С.** Вулcano-гляциальное взаимодействие: ГИС-приложения к оценке лахароопасности (на примере Камчатки) // *Лед и снег*, 2014, № 4 (128), с. 32–42.
- Muraviev, Ya.D., Klimenko, E.S., 2014. Volcano-glacial interaction: GIS applications to the assessment of lahar hazards (case of Kamchatka). *Lyod i Sneg* 54 (4), 32–42.

- Пийп Б.И.** Ключевская сопка и ее извержения в 1944–1945 гг. и в прошлом // Тр. Лаборатории вулканологии. М., 1956, вып. 11, 310 с.
- Piyp, B.I., 1956. Kluchevskoy and its eruptions in 1944–1945 and in the past. Proc. Laboratory Volcanol. Issue 11, 310 pp. (in Russian)
- Сейнова И.Б., Черноморец С.С., Демянчук Ю.В.** Эндогенный механизм формирования лахаров на андезитовых вулканах (на примере вулкана Шивелуч, Камчатка) // Геориск, 2014, № 4, с. 44–54.
- Seynova, I.B., Chernomorets, S.S., Demiyanchuk, Yu.V., 2014. Endogenic mechanism of lahar formation on andesitic volcanoes (by the example of the Shiveluch volcano, Kamchatka). Georisk, No. 4, 44–54.
- 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). Ч. 1 // Криосфера Земли, 2010, т. XIV, № 2, с. 29–45.
- Seynova, I.B., Chernomorets, S.S., Tutubalina, O.V., Barinov, A.Yu., Sokolov, I.A., 2010. Debris flow formation in areas of active volcanism (case study of Kluchevskoy and Shiveluch volcanoes, Kamchatka). Part 1. Earth's Cryosphere XIV (2), 29–45. (in Russian)
- Черноморец С.С.** Селевые потоки на вулканах / С.С. Черноморец, И.Б. Сейнова. М., УНЦ ДО, 2010, 72 с.
- Chernomorets, S.S., Seynova, I.B., 2010. Debris Flows on Volcanoes. UNC DO, Moscow, 72 pp. (in Russian)
- Черноморец С.С.** Новый “Казбекский завал” 17 мая 2014 года // Природа, 2014, № 7, с. 67–72.
- Chernomorets, S.S., 2014. A new “Kazbek blockage” 17 May 2014. Priroda, No. 7, 67–72.
- Чернышев И.В., Лебедев В.А., Бубнов С.Н. и др.** Изотопная геохронология извержений четвертичных вулканов Большого Кавказа // Геохимия, 2002, № 11, с. 1151–1156.
- Chernyshev, I.V., Lebedev, V.A., Bubnov, S.N., 2002. Eruptions of Quaternary volcanoes in Great Caucasus: isotope geochronology. Geokhimiya, No. 11, 1151–1156.
- Arendt, A., Bliss, A., Bolch, T., et al.** Randolph glacier inventory – A dataset of Global Glacier Outlines: Version 5.0. 2015 / Global Land Ice Measurements from Space, Boulder Colorado, USA. Digital Media, 2015 [Электрон. ресурс]. – URL: <http://www.glims.org/RGI/randolph50.html> (дата обращения: 01.06.2016).
- Belousov, A., Behncke, B., Belousova, M.** Generation of pyroclastic flows by explosive interaction of lava flows with ice/water-saturated substrate // J. Volcanol. and Geothermal Res., 2011, vol. 202, p. 60–72, DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2011.01.004.
- Björnsson, H.** Jökulhlaups in Iceland: prediction, characteristics and simulation // Ann. Glaciol., 1991, vol. 16, p. 95–106.
- Björnsson, H.** Subglacial lakes and jökulhlaups in Iceland // Global and Planetary Change, 2003, vol. 35, iss. 3–4, p. 255–271, DOI: 10.1016/S0921-8181(02)00130-3.
- Crandell, D.R.** Postglacial lahars from Mount Rainier volcano, Washington // U.S. Geol. Survey Prof. Pap. 677, 1971, 75 p.
- Cronin, S.J., Neall, V.E., Lecointre, J.A., Palmer, A.S.** Unusual “snow slurry” lahars from Ruapehu volcano, New Zealand, September 1995 // Geology, 1996, vol. 24, No. 12, p. 1107–1110.
- Fairchild, L.H.** The importance of lahar initiation processes // Rev. Eng. Geology, 1987, vol. 7, p. 51–62, DOI: 10.1130/REG7-p51.
- Global Volcanism Program.** Volcanoes of the World, v. 4.4.1 / E. Venzke (ed.). Smithsonian Institution [Электрон. ресурс]. 2013. – URL: <http://dx.doi.org/10.5479/si.GVP.VOTW4>
- http://volcano.si.edu/list_volcano_holocene.cfm (дата обращения: 01.06.2016).
- Huggel, C., Ceballos, J.L., Pulgarín, B., et al.** Review and reassessment of hazards owing to volcano-glacier interactions in Colombia // Ann. Glaciol., 2007, vol. 45, p. 128–136.
- Lebedev, V.A., Parfenov, A.V., Vashakidze, G.T., Chernyshev, I.V., Gabarashvili, Q.A.** Major events in evolution of the Kazbek neovolcanic center, Greater Caucasus: isotope-geochronological data // Dokl. Earth Sci., 2014, vol. 458, pt 1, p. 1092–1098.
- Lowe, D.R., Williams, S.N., Leigh, H., et al.** Lahars initiated by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia // Nature, 1986, vol. 324 (6092), p. 51–53, DOI:10.1038/324051a0.
- Major, J.J., Newhall, C.G.** Snow and ice perturbation during historical volcanic eruptions and the formation of lahars and floods. A global review // Bull. Volcanol., 1989, vol. 52, vol. 1, p. 1–27.
- Manville, V., Hodgson, K.A., Houghton, B.F., Keys, J.R.H., White, J.D.L.** Tephra, snow and water: complex sedimentary responses at an active snow-capped stratovolcano, Ruapehu, New Zealand // Bull. Volcanol., 2000, vol. 62, p. 278–293.
- Massive flooding in Drift Valley from the eruption of Redoubt Volcano** // Alaska Volcano Observatory, 2009 [Электрон. ресурс]. – URL: <https://avo.alaska.edu/images/image.php?id=16995> (дата обращения: 01.06.2016).
- Pierson, T.C.** Initiation and flow behavior of the 1980 Pine Creek and Muddy River lahars, Mount St. Helens, Washington // Geol. Soc. of America Bull., 1985, vol. 96, p. 1056–1069, DOI: 10.1130/0016-7606(1985)96<1056:IAFBOT>2.0.CO;2.
- 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 Geothermal Res., 1990, vol. 41, p. 17–66.
- Pistolesi, M., Cioni, R., Rosi, M., Cashman, K., Rossotti, A., Aguilera, E.** Evidence for lahar-triggering mechanism in complex stratigraphic sequences: the post-twelfth century eruptive activity of Cotopaxi volcano, Ecuador // Bull. Volcanol., 2013, vol. 75, No. 3, p. 1–18, DOI: 10.1007/s00445-013-0698-1.
- Pistolesi, M., Cioni, R., Rosi, M., Aguilera, E.** Lahar hazard assessment in the southern drainage system of Cotopaxi volcano, Ecuador: Results from multiscale lahar simulations // Geomorphology, 2014, vol. 207, p. 51–63, DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.10.026.
- Rivera, A., Zamora, R., Uribe, J., Wendt, A., Oberreuter, J., Cisternas, S., Gimeno, F., Clavero, J.** Recent changes in total ice volume on Volcán Villarrica, Southern Chile // Nat. Hazards, 2015, vol. 75, iss. 1, p. 33–55, DOI: 10-1007/s 11069-014-1306-1.
- Roach, A.L., Neal, C.A., McGimsey, R.G.** Photographs of the 1989-90 eruptions of Redoubt Volcano, Alaska // U.S. Geol. Survey, 1996, Open-File Rep. OF 96-689, 30 p.
- Russell, A.J., Roberts, M.J., Fay, H., Marren, P.M., Cassidy, N.J., Tweed, F.S., Harris, T.** Icelandic jökulhlaup impacts: Implications for ice-sheet hydrology, sediment transfer and geomorphology // Geomorphology, 2006, vol. 75, iss. 1–2, p. 33–64, DOI: 10.1016/j.geomorph.2005.05.018.
- Scott, K.M.** Origins, behavior, and sedimentology of lahars and lahar-runout flows in the Toutle-Cowlitz river system // U.S. Geol. Survey Prof. Pap. 1447a, 1988, 74 p.
- Singh, V.P., Singh, P., Haritashya, U.K. (eds.).** Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers. Berlin etc., Springer Science+Business Media B.V., Springer Netherlands, 2011, 1253 p.

Thouret, J.C. Effects of the November 13, 1985 eruption on the snowpack and ice cap of Nevado del Ruiz volcano, Columbia // J. Volcan. Geotherm. Res., 1990, vol. 41, No. 1–4, p. 177–201.

Thouret, J.C., Ramírez, J.C., Gibert-Malengreau, B., Vargas, C.A., Naranjo, J.L., Vandemeulebrouck, J., Valla, F., Funk, M. Volcano-glacier interactions on composite cones and lahar generation: Nevado del Ruiz, Colombia, case study // Ann. Glaciol., 2007, vol. 45, p. 115–127.

Tómasson, H. The Jökulhlaup from Katla in 1918 // Ann. Glaciol., 1996, vol. 22, No. 1, p. 249–254(6).

Waite, R.B. Swift snowmelt and floods (lahars) caused by great pyroclastic surge at Mount St. Helens volcano, Washington, 18 May 1980 // Bull. Volcanol., 1989, vol. 52, p. 138–157.

Waite, R.B., Edwards, B.R., Fountain, A.G. Ice-clad volcanoes // Chapter 15 in: The High-Mountain Cryosphere /

C. Huggel, M. Carey, J.J. Clague, A. Kääb (eds.). Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2015, p. 272–294.

Waite, R.B. Jr., Pierson, T.C., MacLeod, N.S., Janda, R.J., Voight, B., Holcomb, R.T. Eruption-triggered avalanches, flood and lahar at Mount St. Helens – effects of winter snowpack // Science, 1983, vol. 221, No. 4618, p. 1394–1397.

Walder, J.S. Movement of pyroclastic flows over “snow” // An experimental and theoretical study [abs.]: Eos (Trans., Amer. Geophys. Union), 1992, vol. 73, No. 43 (suppl.), p. 612.

Walder, J.S. Pyroclast/snow interactions and thermally driven slurry formation. Pt 1: Theory for monodisperse grain beds // Bull. Volcanol., 2000, vol. 62, No. 2, p. 105–118.

*Поступила в редакцию
2 июня 2016 г.*