

## СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛЕДНИКИ

УДК 551.324.05

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-3(72-82)

**ФОРМИРОВАНИЕ ВОДНОГО СТОКА ЭКСТРЕМАЛЬНОГО ЛАХАРА ПРИ ПАРОКСИЗМАЛЬНОМ ИЗВЕРЖЕНИИ ВУЛКАНА КЛЮЧЕВСКОЙ В 1945 ГОДУ****И.Б. Сейнова<sup>1</sup>, С.С. Черноморец<sup>1</sup>, М.Д. Докукин<sup>2</sup>, Д.А. Петраков<sup>1</sup>, Е.А. Савернюк<sup>1</sup>,  
А.А. Лукашов<sup>1</sup>, Е.А. Белоусова<sup>1</sup>**<sup>1</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; devdorak@gmail.com*<sup>2</sup> *Высокогорный геофизический институт,  
360030, Нальчик, пр. Ленина, 2, Кабардино-Балкарская Республика, Россия*

При пароксизмальном извержении вулкана Ключевской 1 января 1945 г. произошло таяние льда и снега, в результате чего сформировался мощный лахар. На основе анализа публикаций, архивных материалов и собственных полевых наблюдений составлена схема отложений продуктов извержения в зоне оледенения, в которой формировался водный сток лахаров. Обобщены факторы и механизмы вулканогляциального взаимодействия, в том числе формирования катастрофических лахаров на других вулканах мира, несущих ледники. Разработана феноменологическая модель образования водной составляющей лахара экстремального объема при пароксизмальных извержениях вулкана Ключевской. Объем талого стока в зоне зарождения лахара оценен авторами в 59 млн м<sup>3</sup>, а полный объем лахара 1945 г. мог находиться в пределах 237–355 млн м<sup>3</sup>.

*Лахар, сель, водоснежный поток, нивально-гляциальная зона, пароксизмальное извержение, тефра, пирокластический поток, лавовый поток, термодинамические процессы, фреатический взрыв, вулкан Ключевской, Камчатка*

**FORMATION OF WATER RUNOFF IN THE LAHAR DURING  
THE 1945 PAROXYSMAL ERUPTION OF KLYUCHEVSKOY VOLCANO****I.B. Seynova<sup>1</sup>, S.S. Chernomorets<sup>1</sup>, M.D. Dokukin<sup>2</sup>, D.A. Petrakov<sup>1</sup>, E.A. Savernyuk<sup>1</sup>,  
A.A. Lukashov<sup>1</sup>, E.A. Belousova<sup>1</sup>**<sup>1</sup> *Lomonosov Moscow State University, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; devdorak@gmail.com*<sup>2</sup> *High-Mountain Geophysical Institute, 2, Lenina prosp., Nalchik, Kabardino-Balkaria Republic, 360030, Russia*

A high-magnitude lahar was caused by ice and snow melting during the paroxysmal eruption of Klyuchevskoy volcano on the January 1 of 1945. The distribution of erupted masses within the glacier-covered zone, where the lahar water phase originated, has been mapped using our own field observations, with reference to published and archive data. Review of factors and mechanisms responsible for volcano-glacier interactions and related lahar hazard, for Klyuchevskoy and other glacier-clad volcanoes in the world, made basis for a phenomenological model. The model explains the formation of extremely voluminous water flows in lahars during paroxysmal eruptions for the case of Klyuchevskoy volcano. According to our rough estimates, the meltwater runoff from the lahar initiation zone during the event of 1945 reached 59 million m<sup>3</sup>, and the total volume of the lahar could vary from 237 to 355 million cubic meters.

*Lahar, debris flow, slush flow, nival-glacial zone, paroxysmal eruption, tephra, pyroclastic flow, lava flow, thermodynamic processes, phreatomagmatic blast, Klyuchevskoy volcano, Kamchatka*

**ВВЕДЕНИЕ**

Лахары, образующиеся на активных вулканах, несущих ледники, находятся в ряду самых опасных процессов вулканической деятельности. На Камчатке и Курилах все активные вулканы покрываются устойчивым снежным покровом, из них 21 несет на себе современные ледники. Основная масса льда сконцентрирована в пределах Ключевской группы вулканов. Все русла рек и временных водотоков в этом районе являются либо активными, ли-

бо потенциальными путями схода лахаров протяженностью от 30 до 80 км. Особенно мощные лахары сходят по рекам Киргурич, Крутеньякая, Сухая, Студеная, которые берут начало от ледников Эрмана и Богдановича (рис. 1) [Черноморец, Сейнова, 2010; Муравьев, Клименко, 2014; Муравьев А.Я., Муравьев Я.Д., 2016; Belousov et al., 2011].

Высокая вулканическая активность в сочетании с обширным оледенением и обильным снеж-

ным покровом делает этот район одним из важных для исследований лахаров нивально-гляциально-го генезиса.

Открытая в 1935 г. в пос. Ключи Камчатская вулканологическая станция стала базой для фундаментальных исследований Ключевской группы вулканов. Сведения о вулкане Ключевской содержатся в монографии [Действующие вулканы..., 1991]. Случаи схода лахаров на влк. Ключевской за 80 лет наблюдений зафиксированы в работах [Пийп, 1956; Виноградов, Муравьев, 1989; Двигало, Мелекесцев, 2000; Белоусов и др., 2006; Федотов, Жаринов, 2007; Жаринов, Демянчук, 2009, 2015; Сейнова и др., 2010; Муравьев, Клименко, 2014].

Лахар, сошедший во время кульминации извержения 1 января 1945 г., был самым крупным из зафиксированных лахаров на влк. Ключевской в XX в. [Пийп, 1956; Муравьев, Саламатин, 1993; Двигало, Мелекесцев, 2000]. Его сход не вызвал катастрофических последствий для населения только потому, что разгрузка селевой массы произошла в стороне от пос. Ключи. По наблюдениям Б.И. Пийпа, поток продолжался от 1 до 2 сут при температуре воздуха  $-32^{\circ}\text{C}$  (1 января) и  $-25^{\circ}\text{C}$  (2 января). В ходе извержения растаяли ледники у северо-западного подножия вулкана [Пийп, 1956].

Задача настоящей работы заключается в реконструкции кульминационной фазы извержения 01.01.1945 г. и формирования водного стока лахара вследствие таяния снежного и ледникового покровов. Представляется важным сопоставить результаты исследований лахара на влк. Ключевской и катастрофических лахаров на вулканах мира с оледенением, анализ которых представлен в [Сейнова и др., 2017].

Водный сток, формирующийся в процессе вулcano-гляциального взаимодействия, определяет объемы и разрушительную силу лахаров – селей вулканического генезиса. Это явление до сих пор не описано с точки зрения физических основ [Thouret et al., 2007]. В практике изучения причинно-следственных зависимостей в механизме формирования катастрофических лахаров принят следующий подход.

1. Реконструкция прошедших селевых катастроф с использованием материалов полевых исследований, публикаций, исторических и современных карт, аэрофото- и космических снимков.

2. Мониторинг вулканической деятельности в реальном времени [Муравьев, Клименко, 2014; Major, Newhall, 1989; Huggel et al., 2007].

В основе реконструкции формирования талого стока экстремального лахара в границах нивально-гляциальной зоны его зарождения на влк. Ключевской – интерпретация характера кульминационной фазы извержения 01.01.1945 г. [Пийп, 1956] с целью установления роли вулкани-



Рис. 1. Сход лахара по леднику Эрмана при излиянии лавы по Крестовскому желобу вулкана Ключевской (фото Ю.В. Демянчука, 16.02.2005 г.).

ческих факторов в триггерном процессе лахарообразования и границ арены их взаимодействия со снегом и льдом.

По аналогии с описаниями трансформации пирокластических и лавовых потоков в лахары [Pierson et al., 1990; Thouret et al., 2007] построена феноменологическая модель формирования лахара максимального объема на влк. Ключевской. На этапах создания моделей описание отдельного локального процесса имеет важное теоретическое и прикладное значение для обоснования в дальнейшем адекватных математических аппроксимаций и вычислений [Виноградов, Виноградова, 2010].

Авторы провели три цикла полевых исследований в зоне прохождения лахара 1945 года: 25–30.06.2008 г., 06–13.08.2011 г. и 12–16.08.2013 г. Мы были свидетелями начала одного из вершинных извержений 15–16 августа 2013 г.

В работе использованы отсканированные аэрофотоснимки 1949 г. (участок склона вулкана и окончания ледников Эрмана, Влодавца и Сопочный), 1967 г. (участок окончания ледника Эрмана) и космические снимки (КН-9 Hexagon – 28.06.1975, Ресурс ДК-1 – 02.06.2007, SPOT 6 – 22.08.2012, Канопус-В 1 – 17.09.2014, 22.02.2016) на район влк. Ключевской и ледника Эрмана. Кроме снимков использованы: топографическая карта 1935 г. масштаба 1:30 000 на участок окончания ледника Эрмана и карты Генерального штаба масштаба 1:100 000 (листы О-57-141, О-57-142, N-57-9, N-57-60), составленные по материалам съемки 1976 и 1979 гг. За основу для привязки материалов был взят ортотрансформированный снимок SPOT 6 от 22.08.2012 г. Все снимки взаимно увязаны и приведены к единой системе координат WGS 84, проекция Универсальная прямоугольная Меркатора, зона 57N. Материалы обрабатывались в программе ArcGIS 10.

## ВУЛКАНИЧЕСКИЕ И ГЛЯЦИАЛЬНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ФОРМИРОВАНИЯ ЛАХАРОВ НА ВУЛКАНЕ КЛЮЧЕВСКОЙ

Условия формирования лахаров зависят от вулканической деятельности, определяющей характер взаимодействия продуктов извержения со снегом и льдом. Механизмы образования лахаров зависят от параметров и морфологии постройки и от нивально-гляциальной системы.

### Характер вулканической деятельности

Стратовулкан Ключевской – самый высокий из действующих в настоящее время вулканов Евразии (средняя высота 4750 м) и один из самых активных в пределах Тихоокеанского “Огненного кольца”. Его постройка, с почти идеальной формой крутосклонного конуса, сложена пирокластическими отложениями и лавой, сцементированными льдом [Действующие вулканы..., 1991].

Базальтовый и андезитобазальтовый состав его магмы определяет характер вулканической деятельности и связанные с этим факторы образования лахаров. Основным типом извержений является стромболианский взрывно-эффузивный, при котором наблюдаются взрывы с выбросами раздробленной пульверизированной магмы и излияния потоков лавы на поверхность ледников. При взаимодействии лавовых потоков со льдом происходят фреатомагматические взрывы и формируются лахары [Озеров и др., 1996; Федотов, Жаринов, 2007]. В случаях усиления вулканической активности до уровня пароксизмальной проявляется кратковременная разрядка субплинианского типа со сходом потоков пирокластического материала [Пуйт, 1956; Belousov et al., 2011]. Высокоскоростной сброс и переотложение материала пирокластических потоков в нивально-гляциальной зоне служат основной причиной схода катастрофических лахаров в мире при плинианском типе извержений. Роль пирокластических потоков как действующего фактора в механизме формирования водного стока лахара на кульминационной фазе извержения базальтового вулкана Ключевской рассматривается впервые.

К настоящему времени имеются данные о 18 крупных вершинных (терминальных) извержениях с максимальным объемом 100 млн м<sup>3</sup>. Из них за период с 1697 по 2016 г. зафиксировано 10 случаев пароксизмальных извержений. Разрушительные процессы расчленения постройки вулкана мощными врезами отмечены в 1737(?), 1829, 1945 гг. [Жаринов, Демянчук, 2009, 2015].

У вулкана Ключевской не было существенного ослабления или прекращения активности. Слабые и умеренные по силе извержения объемом

изверженного материала до 10 млн м<sup>3</sup> повторялись в среднем через 5 лет, мощные (до 100 млн м<sup>3</sup>) – через 30 лет. В XXI в. умеренные вершинные извержения отмечались в 2003–2005, 2007–2009, 2012, 2013, 2016, 2017 гг. Из них лахара не было в 2003 г. при взрывном типе извержения. Высокая частота извержений и малые колебания продуктивности указывают на то, что характер активности вулкана существенно не меняется [Melekestsev, 2006]. Временной период проявления катастрофических процессов, аналогичных 1945 г., составляет от 68 до 96 лет [Муравьев, Саламатин, 1993].

### Изменение гляциальной системы под воздействием извержений

Извержения вулкана обусловили своеобразие зоны его оледенения. Она состоит из ледяного пояса конуса вулкана и шлейфа пассивных льдов у подножия, пронизанных активными ледниками (рис. 2, а, б). Верхняя часть не несет оледенения и состоит из падающих под углом 40° пачек периклинального залегания, в которых слои рыхлого пирокластического материала чередуются с фирном и линзами льда.

Ледяным поясом мощностью 50–60 м крутосклонный конус вулкана скован в диапазоне высот от 4000–3500 до 2700–2000 м. Активные ледники, спускающиеся к его подножию, обрамляются массивами погребенных льдов мощностью 20–30 м. Основным фактором эволюции оледенения является вулканизм [Виноградов, Муравьев, 1989].

Оледенение вулкана отличается большой изменчивостью. Извержения приводят к активизации (ледник Эрмана в 1945 г.), подвижкам (ледники Сопочный в 1953 г., Владавца в 1967–1968 гг.) и отмиранию ледников (ледник Келля в 1980 г.). Всего, по нашим данным, с 1949 по 2016 г. длина ледника Эрмана после подвижки в 1945 г. увеличилась на 3.3 км (с 18.2 до 21.5 км). Площадь современного ледника 30.3 км<sup>2</sup>, вместе с пассивными льдами она составляет 40.6 км<sup>2</sup> [Докукин и др., 2017].

Во время извержений на поверхность ледников выпадает обильная пирокластика. В связи с этим доля обломочного материала в теле ледников достигает десятков процентов. Содержащийся в леднике непрочный пористый пирокластический материал (пепел, лапилли, шлаки, шлаковые бомбы) легко крошится и преобразуется в значительные массы тонкоистертого материала, формирующего грязевую суспензию лахаров [Краевая, Кураленко, 1985]. Таким образом, гляциальная система влк. Ключевской включает в себе практически неисчерпаемые запасы как водной, так и твердой составляющих лахаров.

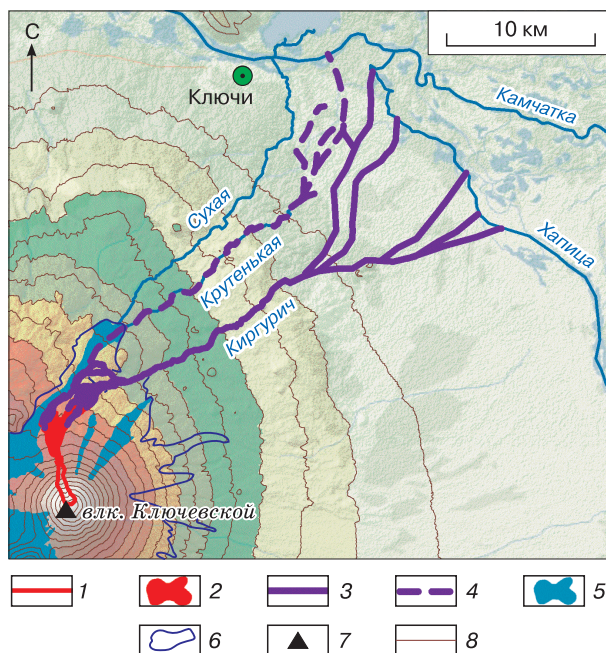


**Рис. 2. Активная и пассивная зоны ледника Эрмана и отложения лахаров:**

*a* – на переднем плане – участок размыва лахарами отложенных продуктов извержения на поверхности погребенных льдов пассивной зоны, на заднем плане – активная зона ледника Эрмана (фото Д.А. Петракова, 17.08.2013 г.); *б* – врезы и отложения лахаров в пассивной зоне погребенного ледника Эрмана (фото С.С. Черноморца, 14.08.2013 г.); *в* – крупноглыбовые отложения лахаров в долине р. Киргурич (фото И.Б. Сейновой, 16.08.2013 г.).

**ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ВОДНОГО СТОКА ЛАХАРА 1945 ГОДА**

“Громадный поток талой воды вечером 1 января 1945 г. устремился вниз по реке Киргурич и примерно в 35 км от места зарождения и в 10 км на восток от Ключей впал в р. Камчатку. Шум этого потока... стал слышен в Ключах вскоре по окончании пароксизмального извержения... на расстоянии не менее 15 км и ...продолжал течь весь день 2 января при морозе 25°... Проезжая через пески Киргурич 6 января, мы застали здесь только толстые полосы льда. По-видимому, несколько позже спада главной массы талых вод, ...не столь насыщенной пеплом и песком, по тому же направлению скатились и типичные кашеобразные грязевые потоки. Языками они расплзлись в стороны по лесу у начала равнинной части подошвы вулкана и остановились, не дойдя 2–3 км до зимней дороги из Ключей в Камаки. Эти отложения, спустя пять месяцев после извержения... представляли черные, насыщенные водой и поэтому топкие кашеобразные массы пепла и песка... Вверх по течению они соединялись в более мощные нагромождения, становились по составу грубее и, судя по направлению..., представляли только слабые ответвления от общего потока, ринувшегося вниз по руслу Киргурича” [Пуйн, 1956, с. 157]. Отложения в долине Киргурич показаны на рис. 2, в.



**Рис. 3. Схема лахаров при извержении вулкана Ключевской в 1945 г.:**

1 – Крестовский желоб; 2 – отложения лавовых и пирокластических потоков в гляциальной зоне влк. Ключевской при его извержении в 1945 г.; 3 – пути схода лахаров 1945 г. [Пуйн, 1956]; 4 – предполагаемые пути схода лахаров 1945 г.; 5 – ледники; 6 – граница гляциально-перигляциальной зоны; 7 – кратер влк. Ключевской; 8 – изогипсы (через 200 м).

Действующие вулканические факторы формирования водного стока экстремального лахара устанавливались на основе анализа визуальных наблюдений Б.И. Пийпа за ходом извержения и последствиями его воздействия на нивально-гляциальную систему, собственных полевых исследований авторов, дешифрирования аэрофотоснимков 1949 г.

Схема лахаров при извержении вулкана Ключевской в 1945 г. представлена на рис. 3.

#### **Вулкано-гляциальное взаимодействие на стадии кульминации извержения**

Фаза кульминации вулканической деятельности влк. Ключевской сопровождалась непревзойденными по масштабам в XX в. воздействиями на его постройку и ледниковую систему. “Северо-западный склон вулкана был прорезан огромным ущельем, которое... спускалось до пологой части конуса против Средней сопки... на расстояние примерно 4 км и оканчивалось на высоте около 2700 м... В широком вырезе развороченного гребня кратера виднелся куполообразный холм, из которого в русло шарра выливалась раскаленная лава... От устья новой шарра... до высоты примерно 2000 м появилось огромное поле мощного отложения горячих лавин” [Пийп, 1956, с. 152–154].

Кульминация извержения наблюдалась из пос. Ключи с 4 часов 40 минут 1 января 1945 г. и продолжалась до 20 часов. По словам Б.И. Пийпа, над кратером косо взвился вверх мощный столб эксплозии. Наклоненный на 20–25° к северо-западу, своей вершиной он вонзился в огромную массу газов, поднимающихся таким же наклонным столбом из кратера на высоту в 7–10 км. От основания колоссальной колонны на северо-запад простиралась темная завеса пеплопада [Пийп, 1956]. По склону до высоты 3000 м поднимались парогазовые облака, окутывающие на всех уровнях конус вулкана. Их мгновенный рост был следствием сублимации при осаждении на снежный покров горячей тефры. Общий объем ее отложений составлял порядка 0,06 км<sup>3</sup> [Озеров и др., 1996]. Воздействие смеси пара, вулканических газов с пеплом и лапиллями на снегофирновую толщу привело к таянию и образованию первых волн лахара. Пласты льда, образовавшиеся после застывания этих волн, были обнаружены в 10 км от пос. Ключи.

В 5 часов 30 минут произошел подъем газопеплового облака, удаленного вниз по склону от кратера, что объясняется обвалом в результате внедрения продуктов извержения в оледенелую толщу Крестовского желоба, отмеченное фреатомагматическими взрывами [Двигалю, Мелекесцев, 2000].

С 11 часов 30 минут взрывная деятельность вулкана усилилась до такой степени, что ее сейс-

мические воздействия стали ощутимыми в пос. Ключи [Пийп, 1956]. Очевидно, с этого времени началось воздействие лавовых потоков на ледники у подножия вулкана, что продолжалось до 20 часов, до окончания кульминации. Вторичные фреатомагматические взрывы по частоте и энергетическому потенциалу воздействия на окружающую территорию значительно превышали эксплозии из вершинного кратера [Озеров и др., 1996; Belousov et al., 2011]. Разрушение ледников с большим содержанием моренного материала при направленном воздействии мощной энергии взрывов способствовало интенсификации их таяния и значительному увеличению водоотдачи, образующей грязекаменные волны лахара.

Влияние факторов вулкано-гляциального взаимодействия на закономерности формирования водного стока лахаров проявляется по-разному в зависимости от типа вулканической деятельности, определяющей физические свойства продуктов извержения. И если стромболианский тип с извержением лавовых потоков базальтового состава является закономерным для Ключевского, то для выяснения роли пирокластических потоков как действующего фактора в формировании водного стока необходимо привести дополнительные обоснования. Наблюдавшийся Б.И. Пийпом взрыв с выбросом изверженного материала под углом 25° к горизонту, разрушение части постройки вулкана (Крестовский желоб) и образование “залежи раскаленных лавин” соответствует субплинианскому типу, при котором пирокластические потоки являются закономерным процессом. В связи с этим термин Б.И. Пийпа “раскаленные лавины” можно обоснованно отнести к реальному эпизоду проявления пирокластических потоков при пароксизме извержения 1 января. Сход пирокластических потоков происходил также при пароксизмальном извержении 1994 г., отмечен и при ординарных извержениях в 1925, 1987, 2005, 2007 гг. (рис. 4) [Belousov et al., 2011].

#### **Характер отложений пирокластических и лавовых потоков**

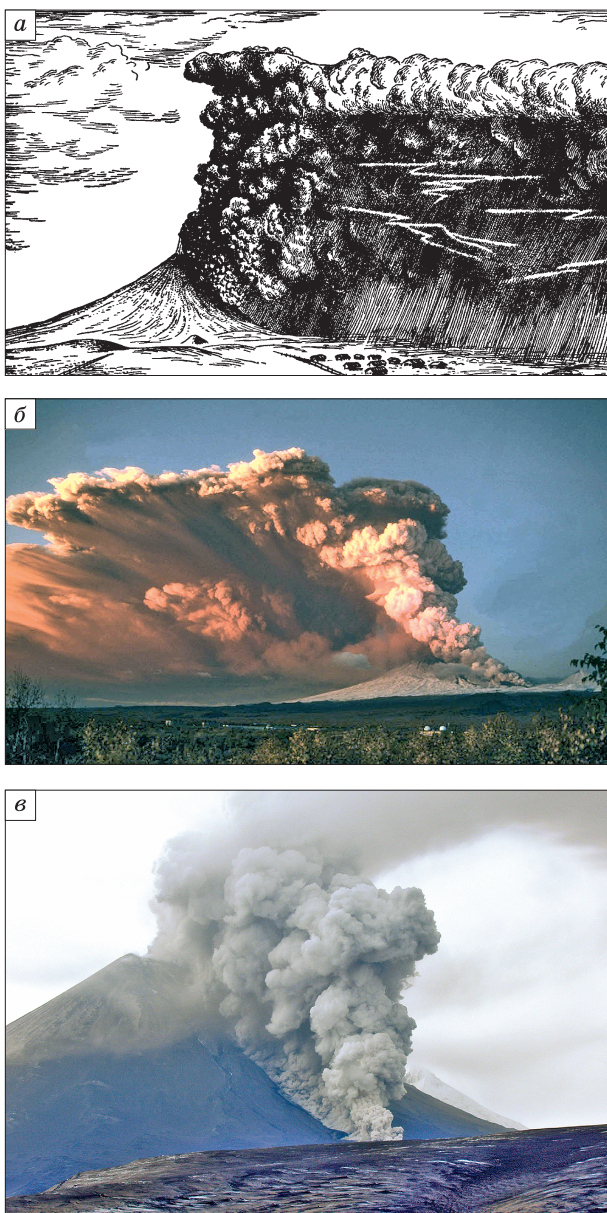
На основании исследований Б.И. Пийпа и геоморфологического анализа аэрофото- и космических снимков авторами выполнена реконструкция последствий вулканической деятельности влк. Ключевской на кульминационной фазе извержения в 1945 г., послуживших причиной формирования экстремального лахара.

Полученные данные легли в основу картосхемы последствий извержения влк. Ключевской в 1945 г. (рис. 5).

Аккумулятивные отложения продуктов извержения 1945 г. были идентифицированы ниже устья Крестовского желоба, на высотах 2700–1900 м в северо-западном секторе влк. Ключев-

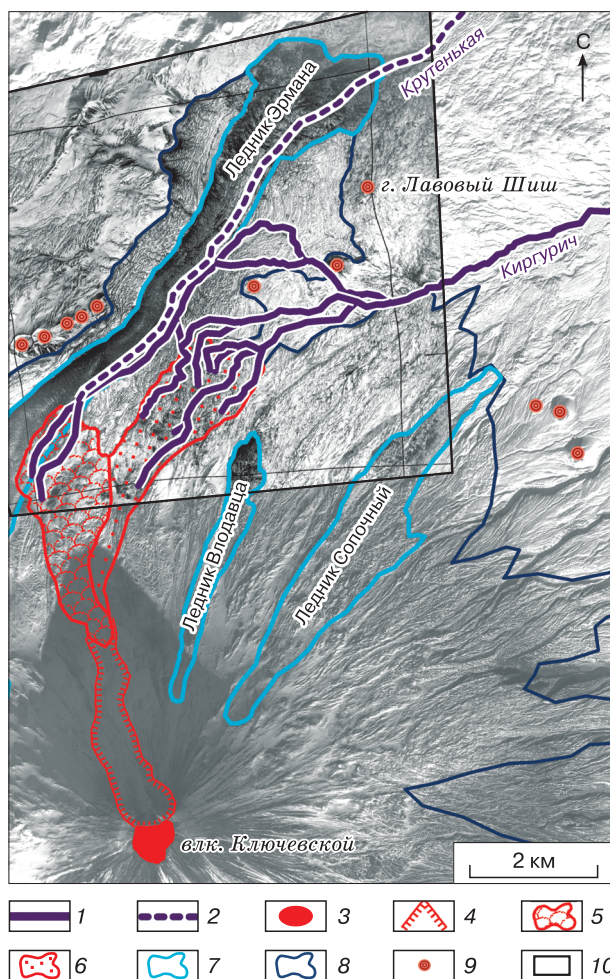
ской, в результате дешифрирования аэрофотоснимков 1949 г. Границы площади их распространения устанавливались по отличиям от застывших потоков лавы с четкими статичными формами, морен и активных участков ледников. По космоснимкам за период 1975–2016 гг. прослеживались изменения формы и мезорельефа выявленных образований в сравнении с их современным состоянием. За этот период произошло смещение части

рыхлообломочных отложений в результате возрождения и активизации ледника, погребенного под их чехлом 01.01.1945 г. Эти изменения касаются правой лопасти продуктов извержения, которая, по определению Пийпа, состояла из “залежи горячих лавин” (см. рис. 5, контур 6). В первые дни после извержения над поверхностью погребенного ими ледника столбы пара поднимались на высоту 600–800 м, что свидетельствовало о высокой температуре и газонасыщенности материала. Выбросы паров, постепенно уменьшаясь, наблю-



**Рис. 4. Сход пирокластических потоков на ледник Эрмана при извержениях вулкана Ключевской:**

а – 1945 г. (рисунки Б.И. Пийпа [1956]); б – 1994 г. (фото А.Б. Белоусова, 01.10.1994 г. (<http://www.belousov.pro/kluch951.jpg>)); в – 2005 г. (фото А. Лобашевского, 09.03.2005 г.).



**Рис. 5. Последствия извержения вулкана Ключевской в 1945 г.:**

1 – пути лахаров 1945 г., описанные в [Пийпа, 1956] и уверенно дешифрируемые на снимках; 2 – пути лахаров 1945 г. (предполагаемые); 3 – кратер влк. Ключевской; 4 – Крестовский желоб; 5 – лавовый поток 1945 г. (с участием пирокластики); 6 – пирокластические отложения 1945 г.; 7 – ледники; 8 – граница гляциально-перигляциальной зоны; 9 – кратеры побочных извержений; 10 – граница аэрофотоснимка 1949 г. Подложка – космический снимок IRS P5 (11.10.2007 г.) и трансформированный аэрофотоснимок 1949 г. на участок ледника Эрмана и зоны формирования лахара.

дались в течение 2.5 месяцев, что типично для пирокластических отложений [Pийн, 1956].

Левая “лопата” продуктов извержения за длительный период почти не изменилась (см. рис. 5, контур 5). Все положительные и отрицательные формы мезорельефа на ее поверхности остались на своих местах. По форме и особенностям эволюции она представляет затвердевший на месте растаявших ледников массив лавового поля с долей пирокластике. На аэрофотоснимке 1949 г. конечная часть массива выглядит взброшенной на ледник Эрмана. Образование высоких обрывов в леднике по периферии массива, обнаруженных Б.И. Пийном в августе 1945 г., объяснялось впадением “горячих масс” лавовых потоков, протекавших одновременно с интенсивной взрывной деятельностью в течение 6 ч 1 января. Образование вторичных фреатомагматических взрывов в результате воздействия потоков лавы влк. Ключевской на снежно-ледовый покров характерно для стромболианского типа извержений базальтовых вулканов с оледенением. Взрывы возникают в результате гравитационного коллапса при повышении порового и гидростатического давления во фронтальных частях лавовых потоков. Распадаясь, коллапсирующая лава производит большой объем газопирокластической смеси, утяжеленная часть которой спускается по склонам в виде пирокластических потоков [Belousov et al., 2011]. При извержениях влк. Ключевской фреатомагматические взрывы являются предвестниками схода лахаров [Виноградов, 1985; Озеров и др., 1996; Двигало, Мелекесцев, 2000; Белоусов и др., 2006; Жаринев, Демянчук, 2015].

Таким образом, выявлены факторы и критические параметры, определившие формирование водного стока экстремального лахара: характер и

продолжительность вулканической деятельности, площадь контактов горячих продуктов извержения со снежно-ледовым массивом. Однако при имеющейся неопределенности характеристик и отсутствии физических обоснований закономерностей вулкано-гляциального взаимодействия складываются разные представления о механизме продуцирования талого стока при пароксизме извержения влк. Ключевской в 1945 г. [Муравьев, Саламатин, 1993; Двигало, Мелекесцев, 2000; Melekestsev, 2006; Belousov et al., 2011]. Один из подходов к решению проблемы – проведение аналогии с результатами исследований формирования водного стока катастрофических лахаров на вулканах с оледенением Редаут (Аляска), Сент-Хеленс (Вашингтон, США), Котопахи (Эквадор), Невадо-дель-Руис (Колумбия) и др. [Сейнова и др., 2017].

Путем обобщения опубликованной информации [Major, Newhall, 1989; Waitt, 1989; Pierson et al., 1990; Manville et al., 2000; Thouret et al., 2007; Pistolesi et al., 2014] и данных реконструкции кульминационной фазы извержения Ключевского стратовулкана установлены факторы формирования водного стока катастрофических лахаров, общие для всех вулканов мира с оледенением.

1. Воздействие тefры и пирокластических волн на снежный покров при пароксизмальных взрывах с разрушением постройки стратовулканов: Котопахи 1877 г., Шивелуч 1854 г., Ключевской 1945 г., Безымянный 1956 г., Сент-Хеленс 1980 г., Руапеху 1995 г.

2. Воздействие пирокластических потоков на снежно-ледовый покров при плинианском типе извержений: Котопахи 1877 г., Ключевской 1945, 1994 гг., Сент-Хеленс 1980 г., Невадо-дель-Руис 1985 г., Редаут 1990 г.

#### Вклад отдельных механизмов вулкано-гляциального взаимодействия в формирование лахара 1945 г.

Механизм таяния	Площадь воздействия, км <sup>2</sup>	Расчетный слой таяния, м вод. экв.	Расчетный объем, млн м <sup>3</sup>
Таяние снега при осадении горячей тefры на снежный покров	15.0	0.4	6
Таяние льда при воздействии пирокластического материала в Крестовском желобе	0.4	20.0	8
Таяние ледников у подножия вулканической постройки вследствие корразии и плавления под воздействием пирокластических потоков	4.0	5.85	23.4
Статическое плавление льда, покрытого отложениями пирокластике	4.0	0.952	3.8
Воздействие лавовых потоков на ледники	3.0	6.0	18
<b>Всего по зоне зарождения</b>			<b>59</b>
Увеличение объема лахара в зоне погребенных льдов и в долинах рек	От 4 до 6 раз		
<b>Итого для лахара 1 января 1945 г.</b>			<b>237–355</b>

Примечание. Учитывая невысокую точность значений, итоговые цифры округлены до целых миллионов кубических метров.

3. Воздействие лавовых потоков на ледники при стромболианском типе извержений: Ключевской 1945, 1984 и другие годы, Льяйма 1945 г., Вильяррика 1948, 1984 г.

“Ключом” к образованию водного импульса селевых катастроф является взаимодействие продуктов извержения со снегом и льдом, влияющее на интенсивность и объемы таяния на вулканах с оледенением [Pийн, 1956; Муравьев, Клименко, 2014; Pierson et al., 1990; Thouret et al., 2007].

Проявление триады ведущих факторов вулканогляциального взаимодействия обеспечило образование колоссального объема водного стока лахара.

Результаты расчетов вклада отдельных механизмов в таяние приведены в таблице. Обобщенное описание закономерностей формирования стока талых вод в процессе вулканогляциального взаимодействия представлено в феноменологической модели.

### ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ВОДНОГО СТОКА ЛАХАРА

#### Воздействие горячей тефры на снежный покров

Массированное выпадение тяжелой горячей тефры на снежный покров ледников влк. Ключевской, сопровождавшееся “мгновенным” ростом парогазовых облаков, привело к интенсивному таянию и образованию водного стока первых волн экстремального лахара [Pийн, 1956]. Известны аналогичные случаи формирования катастрофических лахаров при взрывах вулканов Безымянный, Котопахи, Сент-Хеленс [Горшков, 1957; Waitt, 1989; Pistolesi et al., 2014].

В результате полевых и экспериментальных исследований установлено, что тепло продуктов извержения низкой плотности приводит к сублимации и разрыхлению снежной толщи на глубину до 2 м. Выделение пара в снежной толще способствует развитию *термодинамической конвекции*, ведущей к перемешиванию и насыщению снега водой до состояния водоснежной суспензии. Последующее внедрение такой суспензии в плотные слои фирна приводит к сдвигу и образованию лавин и водоснежных потоков. Массовый сход водоснежных потоков способен удалить весь снег с поверхности ледников и инициировать мощный лахар или наводнение в зимнее время. При взрыве стратовулкана Сент-Хеленс в 1980 г. общий объем водоснежных потоков и лавин, сброшенных в реки с заснеженных склонов и ледников, достигал 100 млн м<sup>3</sup> [Manville et al., 2000]. На Камчатке крупнейший лахар по р. Сухая Хапица объемом 500 млн м<sup>3</sup> образовался в результате таяния снега на склонах соседних вулканов под воздействием “песка направленного взрыва” стратовулкана Безымянный в 1956 г. [Горшков, 1957].

Таяние снега при осаждении горячей тефры на снежный покров на площади ~15 км<sup>2</sup> в бассейне р. Киргурич послужило причиной образования первых волн лахара. На поверхности влк. Ключевской толщина накопления снега за зимний сезон в среднем составляет от 2 до 8 м во врезках и долинах рек, что соответствует 1000–2000 мм в водном эквиваленте [Муравьев, Клименко, 2014]. В среднем при таянии слоя в 1 м снега и фирна перелетывающих снежников общей плотностью до 400 кг/м<sup>3</sup> с поверхности водосбора Киргурича [Виноградов, Муравьев, 1985] объем талой воды при осаждении тефры мог достигать 6 млн м<sup>3</sup>.

#### Воздействие пирокластических потоков на ледники

На последующем этапе извержения, с 5:30 до 11:30 1 января 1945 г., масса раскаленной смеси пирокластических потоков в процессе высокоскоростного сброса по Крестовскому желобу перекрыла поверхность ледников в северо-западном секторе Ключевского (см. рис. 3). В результате основной очаг формирования грязекаменных волн экстремального лахара сосредоточился в истоках р. Киргурич.

В процессе формирования талых вод катастрофических лахаров определяющую роль играет *турбулентное движение* раскаленной смеси пирокластических потоков, обеспечивающее высокоэнергетическое эрозивное и абразивное воздействие на поверхность ледников. В отдельных случаях врезки в ледниках вулканов Котопахи, Редаут и Ключевской достигали глубины 50 м и ширины до 100 м. Тематические исследования на вулканах Котопахи и Невадо-дель-Руис использовались при верификации расчетных величин таяния, полученных на основе данных экспериментов и моделирования. По экспериментальным данным, при турбулентном режиме воздействия скорость плавления льда составляла 0.3–0.9 мм/с, а при пассивном плавлении 0.015–0.03 мм/с. Это согласуется с фактическими данными по удалению слоя снега и льда на вулканах: в диапазоне 2.3–8.2 м в разных секторах влк. Невадо-дель-Руис и 4–8 м на влк. Котопахи [Thouret et al., 2007; Pistolesi et al., 2014]. Термодинамической эрозии и корразии в процессе движения наземной части пирокластических потоков по поверхности ледников достаточно для производства десятков миллионов кубометров талой воды в течение десятков минут. По данным измерений по следам схода лахара при ординарном извержении влк. Невадо-дель-Руис в 1985 г., объем воды от льда, растаявшего в течение 20–90 мин на площади 4.7 км<sup>2</sup>, составлял от 22 до 43 млн м<sup>3</sup>. При катастрофическом извержении Котопахи в 1877 г. с площади 13.9 км<sup>2</sup> он достигал 110 млн м<sup>3</sup> [Waitt, 1989; Pierson et al., 1990; Thouret et al., 2007].



Если предположить, что в момент кульминации извержения влк. Ключевской механизм воздействия пирокластических потоков на ледники был аналогичен установленному на вулканах Невадо-дель-Руис и Котопахи, то можно оценить максимальный объем растаявшего льда в гляциальной зоне. При допустимой скорости таяния в крутосклонном Крестовском желобе 0.9 мм/с, за 6 часов эрозионного воздействия высокоскоростных турбулентных потоков пирокластического материала из его пределов мог быть удален слой льда около 20 м. Объем талых вод из образовавшегося желоба длиной 4 км и шириной в среднем 100 м [Двиало, Мелекесцев, 2000] мог составить 8 млн м<sup>3</sup>.

На выположенных склонах подножия вулкана пирокластические потоки радиально растекались по поверхности ледников. Это сопровождалось сменой эрозионного механизма на абразивную обработку ледового покрова. Если принять, что скорость плавления при таком механизме снизилась до 0.3 мм/с, то слой удаленной за 6 ч толщи с подвергавшейся абразивному воздействию площади 4 км<sup>2</sup> составлял 6–7 м (примем для расчетов среднее значение 6.5 м). Тогда максимальный объем талых вод (при плотности 900 кг/м<sup>3</sup>) мог достигать 23.4 млн м<sup>3</sup>.

После этапа эрозионно-абразивного воздействия потоков раскаленной пирокластической смеси последовал этап статического плавления льда, покрытого отложениями пирокластике. Статическое плавление широко распространено при воздействии продуктов извержения на ледниковый покров. *Теплопередача* от горячей толщи отложений к подстилающей поверхности льда может генерировать слой талой воды в 33–56 мм за 30 мин при скорости статичного плавления 0.015–0.03 мм/с [Major, Newhall, 1989; Thouret et al., 2007]. С 11:30 до 20:00 1 января при таянии льда со скоростью 112 мм/ч с площади ледника 4 км<sup>2</sup> могло образоваться 3.8 млн м<sup>3</sup> стока талых вод.

#### **Воздействие лавовых потоков на ледники**

Продолжавшееся с 11:30 до 20:00 1 января 1945 г. взаимодействие лавовых потоков со снежно-ледовым массивом привело к необратимым процессам в гляциальной зоне влк. Ключевской. “Из существовавших на этом месте ледников и морен первые растаяли, а вторые были засыпаны” [Пийп, 1956, с. 153]. Произошло также вытаивание краевой зоны и подвижка крупного ледника Эрмана.

При излиянии лавовых потоков на ледниковый покров влк. Ключевской исследователи отмечали образование лавовых озер и полей с валами напора, быстрый рост которых сопровождался се-

риями мощных фреатомагматических взрывов, предшествующих сходу лахаров. Парогазовые облака поднимались на высоту 10 км, а тепловая энергия достигала  $3 \cdot 10^8$  кВт [Жаринов, Демянчук, 2015; Belousov et al., 2011]. Мощные фреатические взрывы нарушают сплошность ледников, что увеличивает площадь контактов с продуктами извержения и интенсивность таяния ледяного массива. В результате фреатических взрывов и протаивания льда, подушки лавы толщиной по 15–20 м быстро погружались в лед [Виноградов, 1985]. Проникновение тепла нагретого газа, талой воды по трещинам и расколам способствует внедрению лавы в глубь ледника. Таким образом, таяние и образование водного стока происходит не только на поверхности, но и *внутри ледника, на контактах внедрившихся лав со льдом, что приводит к цепной реакции разрушения и к увеличению объемов водного стока за счет включения внутриледниковых вод.*

На современном этапе вулканической деятельности Ключевского механизма взаимодействия лавовых потоков с ледниками является значимым процессом образования лахаров. При истечении лавы по Крестовскому желобу на ледники у подножия влк. Ключевской фреатомагматические взрывы сопровождаются сходом турбулентных пирокластических потоков, что нарушает режим статичности, тем самым увеличивая скорость плавления [Belousov et al., 2011]. Наблюдениями В.Н. Виноградова за процессом формирования лавового поля на поверхности ледника Богдановича установлено, что толща ледника в 50–100 м была проплавлена лавой за 17 сут, с 12–13 до конца сентября 1974 г., что в среднем по площади составляло от 3 до 6 м в сутки [Виноградов, 1985]. На катастрофическом этапе кульминации извержения влк. Ключевской в 1945 г. площадь воздействия потоков лавы на поверхность ледников составила 3 км<sup>2</sup>. Поскольку лахар 1945 г. продолжался примерно сутки, последующее медленное таяние ледников под воздействием лавы при расчете для лахара 1 января не учитывается. В среднем, при принятой по аналогии с ледником Богдановича толщине растаявшего льда до 6 м, объем водного стока можно оценить в 18 млн м<sup>3</sup>.

По ориентировочной оценке, объем талого водного стока в зоне зарождения лахара 1 января 1945 г. составляет порядка 59 млн м<sup>3</sup> (см. таблицу). Далее горячие минерализованные воды пропиливали глубокие каньоны в ледниках, смешивались с рыхлым материалом и водой в зоне погребенных льдов и долинах рек. По оценкам, полученным для извержений других вулканов, объем лахаров ниже зоны зарождения возрастает в 4–6 раз [Huggel et al., 2007]. Увеличение указанного расчетного объема в 4–6 раз дает оценку суммарного объема лахара 1945 г. в интервале от 237

до 355 млн м<sup>3</sup>. Учитывая допущения, принятые в расчетах, оценка с погрешностью до миллиона кубометров вряд ли является точной. В любом случае, суммарный объем лахара составлял первые сотни миллионов кубических метров, что делает его одним из наиболее крупных лахаров, зафиксированных в мире.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При пароксизмальном извержении вулкана Ключевской 1 января 1945 г. произошло таяние льда и снега, в результате чего сформировался мощный лахар. На основе анализа публикаций, архивных материалов и собственных полевых наблюдений составлена схема отложений продуктов извержения в зоне оледенения, в которой происходило формирование водного стока лахаров. Обобщены факторы и механизмы вулканогляциального взаимодействия, в том числе формирование катастрофических лахаров на других вулканах мира, несущих ледники. Разработана феноменологическая модель образования водной составляющей лахара экстремального объема при пароксизмальных извержениях влк. Ключевской. Обоснована недооцениваемая ранее роль фреатоматматических взрывов и пирокластических потоков как значимых факторов в формировании водного стока лахара.

Объем талого стока в зоне зарождения лахара оценен авторами в 59 млн м<sup>3</sup>, а полный объем лахара 1945 г. мог составить, по расчетным данным, от 237 до 355 млн м<sup>3</sup>.

Данный подход может быть использован при анализе крупных лахаров нивально-вулканического и гляциально-вулканического типов как на Ключевском, так и на других вулканах мира. Принимая во внимание сложность прямых измерений параметров лахара во время извержения, принятый подход позволяет выполнить оценку на основе фактических данных, полученных после извержения. В зависимости от типа извержения и структуры нивально-гляциальной системы вулкана при расчете водного стока должен быть учтен набор факторов и механизмов формирования конкретного лахара.

*Авторы выражают благодарность Ю.В. Демянчику и Н.И. Жаринову (Камчатская вулканологическая станция Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН) за содействие в организации полевых работ и консультации, А.Я. Муравьеву (Институт географии РАН) за предоставление аэрофотоснимков и карты 1935 г., специалистам ФГБУ НИЦ "Планета" А.А. Невскому, Н.И. Абросимову, В.В. Асмусу за предоставленные космические снимки Канопус-В1, а также И.В. Мелекесцеву (Институт вулканологии и сейсмологии*

*ДВО РАН) и анонимному рецензенту за полезное обсуждение результатов.*

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 14-05-00768, 15-05-08694).*

### Литература

- Белоусов 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 междунар. симпозиума "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 Bezymyanny 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)
- Виноградов В.Н.** Вулканизм и оледенение // *Гляциол. исслед.*, 1985, № 27, с. 7–25.
- Vinogradov, V.N., 1985. Volcanism and glaciation. *Glaciol. Issled.*, No. 27, 7–25.
- Виноградов В.Н., Муравьев Я.Д.** Режим ледников вулканических районов Камчатки // Там же, с. 36–50.
- Vinogradov, V.N., Muraviev, Ya.D., 1985. The regime of glaciers in volcanic provinces of Kamchatka. *Glaciol. Issled.*, No. 27, 36–50.
- Виноградов В.Н., Муравьев Я.Д.** Особенности развития ледников в условиях активного вулканизма // *Материалы гляциол. исслед.*, 1989, вып. 66, с. 93–99.
- Vinogradov, V.N., Muraviev, Ya.D., 1989. Evolution of glaciers in the conditions of active volcanism. *Data Glaciol. Stud.* 66, 93–99.
- Виноградов Ю.Б.** Математическое моделирование в гидрологии / Ю.Б. Виноградов, Т.А. Виноградова. М., Академия, 2010, 298 с.
- Vinogradov, Yu.B., Vinogradova, T.A., 2010. *Mathematical Modeling in Hydrology. Akademia, Moscow*, 298 pp. (in Russian)
- Горшков Г.С.** Извержение сопки Безымянной (предварительное сообщение) // *Бюл. вулканол. станции*, 1957, № 26, с. 19–72.
- Gorshkov, G.S., 1957. Eruption of Bezymyanny volcano (preliminary report). *Bul. Volcanol. Station* 26, 19–72.
- 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.
- Dvigalo, V.N., Melekestsev, I.V., 2000. Recent large-scale downfalls on the cone of Klyuchevskoi Volcano: a revision of the consequences of the events of 1944–1945, 1984–1985, and 1994. *Volcanol. Seismol.* 22 (1), 1–23.
- Действующие вулканы Камчатки: В 2 т. / Под ред. С. Федотова, Ю. Масуренкова. М., Наука, 1991, т. 1, 302 с.**
- Fedotov, S.A., Masurenkov, Yu.P. (Eds.), 1991. *Active Volcanoes of Kamchatka. Volume 1. Nauka, Moscow*, 302 pp. (in Russian)
- Докукин М.Д., Сейнова И.Б., Савернюк Е.А., Черногорец С.С.** О наступании ледников в условиях вулканической деятельности вулкана Ключевской (Камчатка) // *Лед и снег*, 2017, т. 57, № 1, с. 10–24.
- Dokukin, M.D., Seynova, I.B., Savernyuk, E.A., Chernomoretz, S.S., 2017. On advancing of glaciers during activity of Klyuchevskoy volcano (Kamchatka). *Ice and Snow (Led i Sneg)* 57 (1), 10–24.

- Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В.** Извержение вершинного кратера вулкана Ключевской (Камчатка) в феврале–июле 2007 г. // Вулканология и сейсмология, 2009, № 3, с. 38–49.  
Zharinov, N.A., Demyanchuk, Yu.V., 2009. The February–July 2007 eruption of the summit crater of Klyuchevskoi volcano, Kamchatka. J. Volcanol. Seismol. 3 (3), 179–190.
- Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В.** Вершинные извержения вулкана Ключевской (Камчатка) в 2003–2013 гг. // Материалы ежегодной конф., посвящ. Дню вулканолога “Вулканизм и связанные с ним процессы”. Петропавловск-Камчатский, ИВиС ДВО РАН, 2015, с. 46–55.  
Zharinov, N.A., Demyanchuk, Yu.V., 2015. Summit eruption of Klyuchevskoy volcano (Kamchatka) in 2003–2013. Volcanism and Related Processes, Proc. Annual Conf. Celebrating Volcanologist Day. IVis DVO RAN, Petropavlovsk-Kamchatsky, pp. 46–55. (in Russian)
- Краевая Т.С., Кураленко М.П.** Ледниковые образования районов активного вулканизма (на примере Камчатки) // Гляциол. исслед., 1985, № 27, с. 77–89.  
Kraevaya, T.S., Kuralenko, M.P., 1985. Glacial deposits in areas of active volcanism (case of Kamchatka). Glaciol. Issled., No. 27, 77–89.
- Муравьев А.Я., Муравьев Я.Д.** Колебания ледников Ключевской группы вулканов во второй половине XX–начале XXI века // Лед и снег, 2016, т. 56, № 4, с. 480–492.  
Muraviev, A.Yu., Muraviev, Yu.D., 2016. Fluctuations of glaciers of the Klyuchevskaya group of volcanoes in the 20th–21st centuries. Ice and Snow (Led i Sneg) 56 (4), 480–492.
- Муравьев Я.Д., Клименко Е.С.** Вулкано-гляциальное взаимодействие: ГИС-приложения к оценке лахароопасности (на примере Камчатки) // Лед и снег, 2014, т. 54, № 4, с. 32–42.  
Muraviev, Ya.D., Klimenko, E.S., 2014. GIS applications to the assessment of lahar hazards (case study of Kamchatka). Ice and Snow (Led i Sneg) 54 (4), 32–42.
- Муравьев Я.Д., Саламатин А.Н.** Прогнозная оценка динамики ледниковых масс в вулканотектонических желобах Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология, 1993, № 4, с. 43–53.  
Muraviev, Yu.D., Salamatin, A.N., 1994. Predictive evaluation of the dynamics of glacial masses in volcano-tectonic chutes of the Klyuchevskoi volcano. Volcanol. Seismol. 15 (4), 431–442.
- Озеров А.Ю., Карпов Г.А., Дрознин В.А. и др.** Динамика извержения Ключевского вулкана 7 сентября–2 октября 1994 г. (Камчатка) // Вулканология и сейсмология, 1996, № 5, с. 3–16.  
Ozerov, A.Yu., Karpov, G.A., Droznin, V.A., Dvigalo, V.N., Demyanchuk, Yu.V., Ivanov, V.V., Belousov, A.B., Firstov, P.P., Gavrilov, V.A., Yashchuk, V.V., Okrugina, A.M., 1997. The September 7 – October 2, 1994 eruption of Klyuchevskoy volcano, Kamchatka. Volcanol. Seismol. 18, 501–516.
- Пийп Б.И.** Ключевская сопка и ее извержения в 1944–1945 гг. и в прошлом // Тр. Лаборатории вулканологии. М., 1956, вып. 11, 310 с.  
Piip, B.I., 1956. Klyuchevskaya sopka and its eruptions in 1944–1945 and in the past. Transactions of the Laboratory of Volcanology 11, 1–310. (in Russian)
- 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). Часть 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 Klyuchevskoy and Shiveluch volcanoes, Kamchatka). Part 1. Earth's Cryosphere XIV (2), 29–45.
- Сейнова И.Б., Черноморец С.С., Докукин М.Д., Петраков Д.А., Савернюк Е.А., Лукашов А.А., Белоусова Е.А.** Формирование водного стока лахаров на активных вулканах с оледенением // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 6, с. 118–128.  
Seynova, I.B., Chernomorets, S.S., Dokukin, M.D., Petrakov, D.A., Savernyuk, T.A., Lukashov, A.A., Belousova, E.A., 2017. Formation of water flow in lahars from active glacier-clad volcanoes. Earth's Cryosphere XXI (6), 103–111.
- Федотов С.А., Жаринов Н.А.** Об извержениях, деформациях, сейсмичности вулкана Ключевской (Камчатка) в 1986–2005 гг. и механизме его деятельности // Вулканология и сейсмология, 2007, № 2, с. 3–31.  
Fedotov, S.A., Zharinov, N.A., 2007. On the eruptions, deformation, and seismicity of Klyuchevskoy Volcano, Kamchatka in 1986–2005 and the mechanisms of its activity. J. Volcanol. Seismol. 1 (2), 71–97.
- 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. ESC PHSE, Moscow, 72 pp. (in Russian)
- 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.
- 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.
- 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, p. 1–27.
- Manville, V., Hodgson, K.A., Houghton, B.F., et al.** Tephra, snow and water: complex sedimentary responses at an active snow-capped stratovolcano, Ruapehu, New Zealand // Bull. Volcanol., 2000, vol. 62, p. 278–293.
- Melekestsev, I.V.** Large modern collapses on the active volcanoes of Kamchatka: causes and mechanism of formation // Landslides from massive rock slope failure. S.G. Evans et al. (eds). Dordrecht, Springer, 2006, p. 431–444.
- 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, No. 1–4, p. 17–66.
- 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.
- Thouret, J.C., Ramírez, J.C., Gibert-Malengreau, B., et al.** Volcano-glacier interactions on composite cones and lahar generation: Nevado del Ruiz, Colombia, case study // Ann. Glaciol., 2007, vol. 45, p. 115–127.
- Waitt, 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.

Поступила в редакцию  
2 июня 2016 г.