

УДК 551.432.7:551.435.1

© 2018 г. Е.В. ЛЕБЕДЕВА

**ЦЕПОЧКИ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В РЕЧНЫХ ДОЛИНАХ ВУЛКАНИЧЕСКИХ РЕГИОНОВ***Институт географии РАН, Москва, Россия**E-mail: Ekaterina.Lebedeva@gmail.com*

Поступила в редакцию 27.03.2018

В долинах рек вулканических регионов помимо экзогенных причин катализатором катастрофических процессов являются эндогенные факторы – в первую очередь, извержения, которые часто вызывают сходы вулканических селей – лахаров, обусловленных таянием покрывающих вулканы ледников, снега или выпадением ливневых осадков непосредственно после извержения. Эта последовательность катастрофических событий “извержение – сход вулканического селя” достаточно распространена и хорошо изучена, но при детальном рассмотрении очевидно, что образование грязекаменных потоков в долинах вулканически активных регионов обусловлено весьма разнообразными причинами и в этой цепочке может быть задействовано еще много факторов и агентов. Часто извержение провоцирует серию из 2–3 взаимосвязанных и последовательно развивающихся катастроф, т.е. формируется каскад катастрофических процессов. Опираясь на конкретные примеры, выделены и рассмотрены 15 цепочек катастрофических процессов в долинах вулканических регионов, обусловленных разноплановой вулканической деятельностью и сопутствующими событиями – сейсмическими толчками, изменением топографии местности, гидротермальной активностью, эрозией. Завершающими звеньями цепочек, как правило, являются сходы селей, причем иногда неоднократные. Их формирование обусловлено размывом водотоками поступившего в долины рыхлого материала или же прорывами плотин возникших подпрудных озер. Время реализации всех событий подобной цепочки может превышать несколько десятилетий и даже столетий.

Ключевые слова: лавовый поток, пирокластический материал, выполнение долины, подпрудное озеро, сель, перестройка речной сети.

DOI: 10.7868/S0435428118040041

**SEQUENCES OF CATASTROPHIC GEOMORPHIC PROCESSES
IN THE RIVER VALLEYS OF VOLCANIC REGIONS**

E.V. LEBEDEVA

*Institute of Geography RAS, Moscow, Russia**E-mail: Ekaterina.Lebedeva@gmail.com*

Summary

In the river valleys of volcanic regions, in addition to exogenous causes, endogenous factors – primarily eruptions – are the catalyst of catastrophic processes, which are often cause volcanic mudflows – lahars, conditioned by the melting of glaciers covering the volcanoes, snow, or rainfalls that happen immediately after the eruption. This sequence of catastrophic events – “eruption – volcanic mudflow” – is quite common and well studied, but it’s obvious from detailed consideration that the formation of mudflow in the valleys of volcanically active regions is due to very diverse sources and many factors and agents can be involved in this chain. The eruption often provokes series of 2–3 interrelated and sequentially developing catastrophes, i.e. a cascade of

catastrophic processes is formed. On the base of the existing examples, 15 chains of catastrophic processes in the valleys of volcanic regions are considered that are caused by diverse volcanic activity and accompanying events – seismic shocks, changes in topography of the terrain, hydrothermal activity and erosion. The final event of the chains, as a rule, is mudflow descent, that may occur repeatedly. Their formation is due to the erosion of loose material that filled the valleys or breakthroughs of the dams of the emerged pond lakes. The time for the realization of all the events of such a chain may continue through a few decades, or even centuries.

Keywords: lava flow, pyroclastic material, valley filling up, pond lake, lahar, river network reorganization.

Введение

Катастрофические геоморфологические процессы в речных долинах вулканических регионов, как и в долинах невулканических территорий, могут быть обусловлены различными природными причинами: паводками, связанными с выпадением аномального количества осадков, дружным снеготаянием, прорывом подпрудных озер, сформировавшихся при перегораживании долин телами оползней или обвалов и т.п. Однако помимо экзогенных причин в пределах территорий современной вулканической активности катализатором катастрофических процессов в речных долинах могут быть эндогенные факторы – в первую очередь извержения. Последние часто вызывают сходы катастрофических вулканических селей – лахаров, обусловленных таянием покрывающих вулканы ледников или снега. К их числу относится и печально знаменитый лахар, сформировавшийся при извержении влк. Руис в Колумбии в 1985 г. и унесший 23 тыс. жизней [1].

Согласно обобщающей работе Ж.-К. Туре [2], в городах и поселках, находящихся не далее 200 км от активных или потенциально активных вулканов – т.е. в зонах их непосредственного влияния, в настоящее время проживает более 200 млн человек. Очевидно, что большинство этих населенных пунктов располагаются если не в речных долинах, то в непосредственной близости от них. Приведенные ученым статистические материалы свидетельствуют о том, что в 17% случаев гибель людей при извержениях связана со сходом лахаров, наиболее часто приуроченных именно к речным долинам, а в 27% – со сходом пирокластических потоков, также достигающих максимальной мощности в понижениях рельефа. Поэтому на картах опасности (рис. 1) речные долины и прилегающие к ним зоны, как правило, выделяют как наиболее уязвимые участки даже при значительном удалении от вулканов (см. карты для влк. Авачинский, Менделеева, Мерапи и др. [3–5]). Однако многие детали этого вопроса еще недостаточно изучены и в целом нуждаются в дальнейшей проработке.

Последовательность катастрофических событий “извержение – сход вулканического селя”, безусловно, распространена и довольно хорошо изучена [6]. Например, при рассмотрении 12 сценариев потенциальных извержений различного типа и последующего развития возможных катастрофических процессов на склонах влк. Везувий А. Нери с коллегами в 8 случаях прогнозирует сход лахаров [2]. Общепринято различать первичные (или горячие) сели – непосредственно следующие за извержением – и вторичные (или холодные), которые могут формироваться и спустя несколько десятилетий после него. Впрочем, при наличии благоприятных условий (значительная крутизна склонов, обилие рыхлого материала и др.) сели могут сходить и со склонов уже потухших вулканов.

При детальном рассмотрении катастрофических процессов в долинах рек вулканических территорий становится очевидным, что причины формирования селей здесь достаточно разнообразны, да и сам спектр опасных явлений весьма широк. Часто эндогенное событие – извержение – провоцирует не только еще одно эндо- или экзогенное катастрофическое событие, а серию взаимосвязанных и последовательно развивающихся катастроф, т.е. формируется каскад опасных разрушительных процессов.

Задача данной работы – анализ причин, условий, последовательности и масштабов реализации опасных явлений в пределах речных долин вулканических регионов, что важно для прогноза и разработки мер по защите населения от эндогеннообусловленных

VOLCANIC HAZARD MAP BEFORE THE 2010 ERUPTION

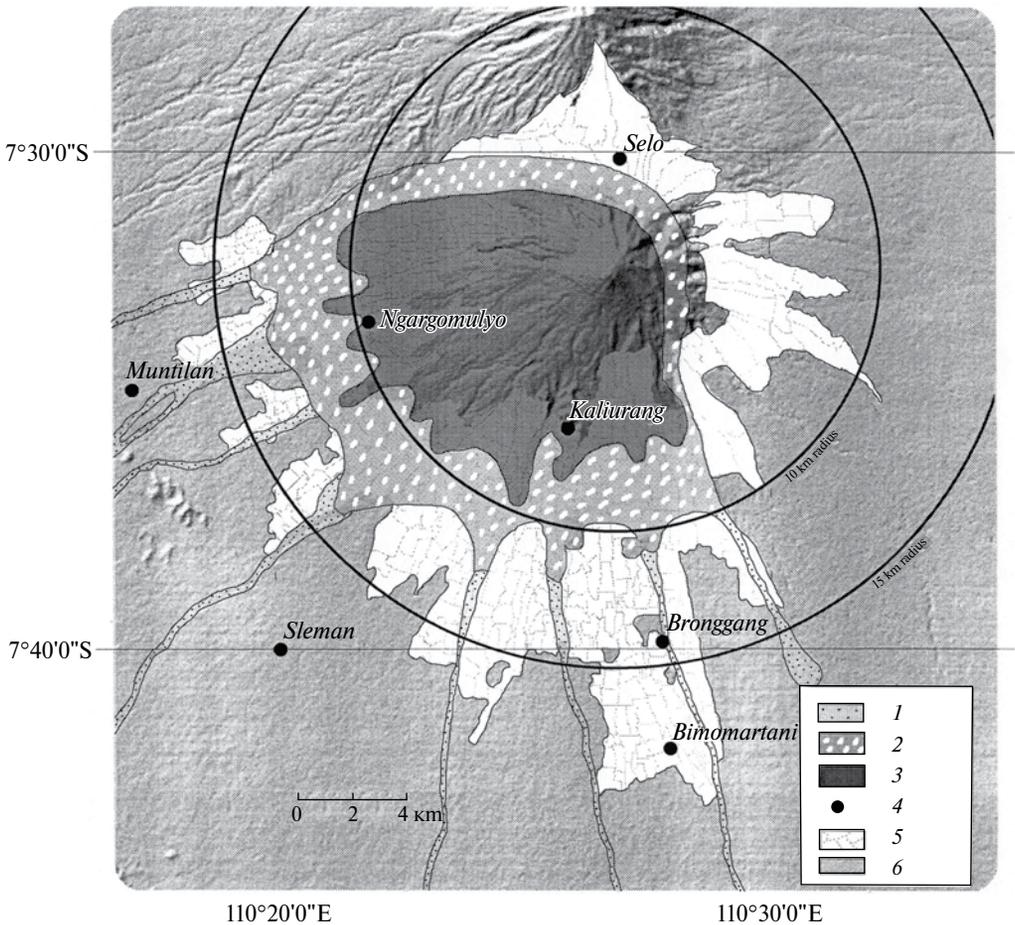


Рис. 1. Фрагмент карты опасности вулкана Мерапи [5]

Зоны воздействия вулкана: 1 – долины рек, берущих начало на вулкане, доминируют сход лахаров и паводки, возможно воздействие пирокластических потоков и наводнений, 2 – преимущественно подножие ЮЗ сектора вулкана, доминируют сход пирокластических потоков, раскаленных лавин и лахаров, выбросы токсических газов, 3 – склоны вулкана, частое воздействие пирокластических и лавовых потоков, камнепадов, выбросы токсических газов, в радиусе 2 км от жерла – формирование экструзивных куполов; 4 – населенные пункты; 5 – сельскохозяйственные угодья; 6 – леса

катастроф. На конкретных примерах, полученных в результате собственных полевых наблюдений в вулканических областях России и мира и по данным анализа литературного материала, выделены возможные сценарии развития – варианты последовательностей катастрофических событий в речных долинах (таблица). При этом рассматривался характер эндогенного фактора и особенности его проявления, наличие дополнительных геолого-геоморфологических, гидрологических и климатических (оледенение) условий.

Цепочки катастрофических событий в долинах рек вулканических регионов

Речные долины вулканических территорий нередко берут начало на склонах вулканических конусов, и в верховьях они представляют собой эрозионные ложбины – барранкосы. Когда речные долины закладываются по зонам разломов, к которым приурочены

самостоятельные центры извержения — небольшие щитовые вулканы, то последние оказываются непосредственно внутри самой долины. Подобные явления можно наблюдать, например, в верховьях рек Бол. и Мал. Енисей, Жом-Болок в Южно-Байкальской вулканической области [7, 8], Бол. Анюй на Северо-Востоке [9] и др.

И в том, и в другом случае *эффузивное извержение* может приводить к *заполнению долины реки лавовым потоком*, причем иногда на десятки и первые сотни километров. Самыми протяженными считаются базальтовые потоки среднеплейстоценового возраста, которые достигают 160–170 км: это Ундара (Квинсленд, Австралия) и Пампас Ондуладас (Мендоса, Аргентина) [10]. Протяженность лавовой “реки” в долине Мал. Енисея еще больше — 175 км при ширине до 1.5 км и объеме 40–50 км³ [8]. Самым молодым базальтовым потоком сопоставимой длины (около 140 км) является Тьёрса в Исландии, он сформировался в голоцене. Хорошо изучен и лавовый поток Жом-Болок (возраст около 7 тыс.л.н.) [11, 12]: его длина 70 км при ширине до 2 км и мощности до 150 м. Наблюдения за современными извержениями на Гавайях и в Восточно-Африканской рифтовой зоне (Конго) показали, что скорость потоков лавы может достигать 40 и даже 100 км/час [2].

В условиях глубоко расчлененного рельефа лавовые потоки, как правило, заполняют речные долины, а на более выровненных участках направление их движения может не всюду совпадать с ориентировкой долин: здесь *лавы могут перегораживать днища плоскодонных слабоврезанных форм*, перекрывать низкие водоразделы, формируя своеобразные плотины, “запирающие” или отжимающие водоток, в результате чего меняется положение его русла. Подобное явление описано на участке долины р. Колорадо (провинция Мендоса, Аргентина), где поток Эль Корково 840 тыс.л.н. перегородил русловые понижения, впоследствии водоток сформировал новый врез примерно в 1 км к югу относительно его прежнего положения [13].

В морфологически четко выраженных долинах может наблюдаться либо полное, либо частичное их заполнение лавой с подпруживанием как основной реки, так и ее притоков. В результате вытеснения реки из долины и частичного затопления боковых долин формируются подпрудные озера, глубина которых может достигать десятков метров — в зависимости от величины исходного расчленения рельефа и мощности лавы. Например, в приустьевых частях притоков Мал. Енисея существовали озера глубиной до 50–70 м. Изучение разрезов лавовых толщ (рис. 2), выполняющих долину этой реки, свидетельствует о достаточно широком распространении в ее пределах и в долинах притоков подпрудных озер, изливания в которые сопровождалось образованием шаровых лав и гиалокластитов [8].

Озера в бассейне р. Жом-Болок (крупнейшее из которых — Хара-Нур площадью более 33 км²) и, соответственно, образовавшие их притоки в настоящее время имеют подлавовый сток [14, 15]. При отсутствии такого стока события могут развиваться по несколько иным сценариям. Например, сформировавшееся озеро через сниженный участок водораздела переливается в соседнюю долину или даже речной бассейн [16]. Может произойти и полное или частичное эрозионное разрушение (пропиливание) лавовой плотины [10, 17]. В любом случае интенсивное протекание процесса эрозии (врезания) через какое-то время вызывает сход селя (или селей) по той или иной долине.

Эксплозивные извержения более многообразны по своим последствиям. Практически каждое из них сопровождается *выбросом значительных объемов пирокластического материала*. При крупных эксплозиях выносятся более 50 км³ пирокластики, а при суперкрупных — более 300 км³, но последние относительно редки (1 раз в 20 тыс.л.) и, как правило, в результате них образуются покровы игнимбритов¹, перекрывающие исходный рельеф

¹ Не все отечественные исследователи, в отличие от зарубежных, относят эти образования к пирокластике, считая скорее эффузивами, но в нашем случае это не имеет принципиального значения, скорее важна их устойчивость к эрозии, которая может колебаться в широких пределах, но, как правило, ниже, чем у эффузивов.

Катастрофические процессы в долинах рек вулканических регионов, обусловленные эндогенными факторами

Эндогенный фактор	Дополнительные условия	Последовательность катастрофических событий			Конкретный пример
		1	2	3	
Извержение (эффузивное или эксплзивное)	Наличие горно-долинных ледников (а), снежного покрова (б) или выпадение обильных осадков (в)	Сход вулканических седел – лахаров	–	–	а) влк. Руис (1985), Колумбия б) влк. Безымянный (1956), Камчатка в) влк. Чайтен (2009), Чили
	Наличие полупокровного или покровного оледенения	Формирование подледного озера, проседание поверхности льда	Сход йокульгаула (вулканогенного ледникового паводка)	Плановые перестройки речной сети	влк. Гримсвётн (1996), Катла (1918) Исландия
	Наличие озера рядом с центром извержения	Возникновение цунами в озере и/или его выплеск	Сход селя по долине, дремирующей озера	–	–
Извержение эффузивное	Движение лавового потока по долине	Заполнение долины лавой	Загопление вышележащего участка долины и долин притоков	Прорыв/перелив ПО* – сход селей	Р. Мал. Енисей (Южно-Байкальская вулканическая область) р. Квита, Исландия
	Движение лавового потока поперек простирания долины	Создание лавовой плотины	Загопление вышележащего участка долины	Прорыв ПО – сход селя	Р. Колорадо (Мендоса, Аргентина) Р. Джида (Забайкалье)
Извержение эксплзивное	Обрушение привершинной части вулканического конуса	Создание плотины из обломков вулканического конуса	Загопление участка долины/ повышение уровня озера	Прорыв ПО – сход селя	Р. Теплая – конус Штубеля (1907), Камчатка
	Одностороннее разрушение конуса – направленный взрыв	Формирование обломочной лавины	Заполнение долины/ долин – аккумуляция ПМ*	Размыв ПМ – формирование селей	Влк. Безымянный (1956), Шивелуч (1964), Камчатка Сент-Хеленс (1980), США
			Создание плотин – формирование ПО	Прорыв ПО – сход селя	Влк. Спсар, Аляска
Сход ПП*	Заполнение долины ПМ	Размыв ПМ – формирование селей	Подпрудживание притоков, образование ПО	Прорыв ПО – сход селя	Влк. Шивелуч (2010), Камчатка Влк. Шивелуч (2010), Камчатка

	Формирование ППМ*	Накопление ПМ мощностью более 1м в районе извержения	Смещение ПМ со склонов и заполнение днищ долин	Сход селей при выпадении осадков и снеготаянии	Конус Штубеля (1907), Камчатка
Вулкано-тектоническая деятельность	Формирование кальдеры обрушения	Уничтожение участка речной долины, частичное заполнение ее ПМ	Усиление врезания на вышележащем отрезке, сход селей	—	Волотоки кальеры Ксудач
	Изменение уклонов поверхности: рост купола в бассейне реки, формирование просядок и трещин	Заполнение долин ПМ (в т.ч. игнимбритами)	Создание плотин – формирование ПО	Прорыв ПО – сход селя	Влк. Нумазавако, Япония
Сейсмические события, сопровождающие извержение или не связанные с ним	Изменение продольного профиля реки – затопление участка долины	Изменение продольного профиля реки – затопление участка долины	Перелив возникшего озера – сход селя	—	Руч. Лагерный в кальере Ксудач
	Наличие зоны повышенной трещиноватости, гидротермальной проработки и увлажнения	Массовое смешение грунта со склона в долину (оползень, оползень-сплыв) с ее перегораживанием	Сход селя из смешенного материала	Затопление части долины, формирование ПО, при его прорыве – сход селя	Долина р. Гейзерной (2007)
	Разрушение стенки кратерного озера	Разрушение стенки кратерного озера	Сход селя	—	Влк. Агуа, Гватемала (1541)

Примечание: *ПО – подпрудное озеро, ПМ – пирокластический материал, ПП – пирокластический поток, ППМ – покров пирокластического материала.

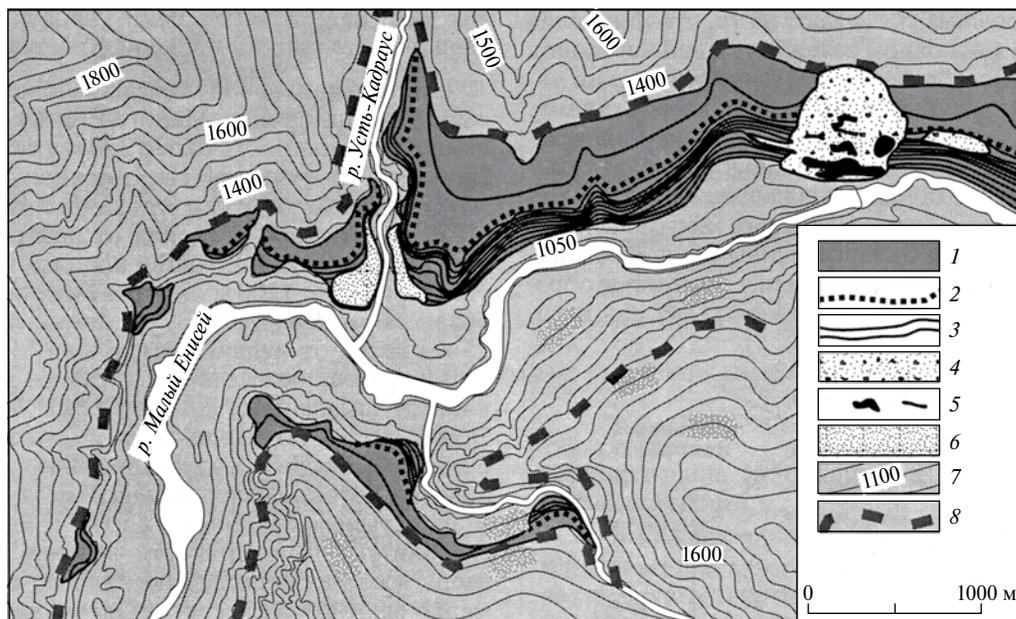


Рис. 2. Лавовый поток в долине р. Мал. Енисей со следами существования подпрудного озера в устье р. Усть-Кадраус [8]

1 – лавы; 2 – кромка лавовой террасы; 3 – границы лавовых потоков; вулканическая жерловина: 4 – бомбовые и шлаковые образования, 5 – штоки и дайки; 6 – продукты излияний в подпрудное озеро – вулканомиктовые пески, гравелиты и гялокластиты; 7 – горизонталы; 8 – предполагаемые контуры доэрозионной “лавовой реки”

и формирующие равнины площадью сотни и тысячи км². Чаше происходят относительно небольшие извержения, но практически мгновенные изменения топографии местности в результате них также могут быть весьма существенными. Например, при извержении конуса Штубеля (Камчатка) в 1907 г. было выброшено от 1.5 до 2 км³ пирокластического материала. Мощность сформировавшегося покрова тефры составила от 0.5 до 3 м как в непосредственной близости от центра извержения в пределах кальдеры Ксудач, так и на расстоянии в первые десятки км от него по направлению доминировавших в момент извержения ветров [18]. Вулкан Безымянный в конце 1950-х гг. выбросил до 3 км³ тефры, покрывшей слоем до 40 м более 70 км² и до 40 см почти 500 км² [19, 20]. При эксплозиях обломки весом в несколько тонн могут быть выброшены на расстояние до 300 м от жерла вулкана, измеряемые килограммами – на 3–6 км [2], а более мелкие – до 20 км [21]. При мощности пепла более 30–40 см покровы пирокластического материала вызывают усыхание или гибель растительности [22], что приводит и к изменению характера эрозионных и склоновых процессов [23, 24]. Меняется топография местности, в том числе уклоны поверхности, свойства субстрата. Погребение речных долин и разделяющих реки водоразделов слоем пирокластического материала может приводить к перестройкам и перезаложению речной сети, т.к. новые врезы формируются уже с учетом новой топографии и могут не совпадать с прежними долинами.

Выпавший при извержении *пирокластический материал* характеризуется высокой пористостью и, соответственно, легкостью, поэтому он может активно переноситься как ветром, так и водой, и *постепенно концентрируется* в понижениях рельефа и, в первую очередь, *в днищах долин*. Обильные осадки или снеготаяние вызывают сходы селей (твердая составляющая более 60%) или гиперконцентрированных потоков (твердая

составляющая 20–60%), которые постепенно перемещают пирокластический материал вниз по течению. Так, при извержении влк. Безымянный 30 марта 1956 г. выброшенная пирокластика вызвала активное таяние снега, в результате чего в долине р. Сухой Хапицы и на склоне Ключевского вулкана образовались грязевые потоки протяженностью до 75–80 км [25].

Отложения лахаров накапливаются преимущественно у подножия вулканов, однако протяженность потоков может быть достаточно велика и достигать 185 (влк. Келуд, Индонезия, 1919 г.) и даже 300 км (влк. Котопахи, Эквадор, 1877 г.) [2]. Следы лахаров зафиксированы на склонах большинства действующих вулканов мира, для которых характерны эксплозии (рис. 3а): например, на влк. Котопахи установлено 22 таких события, прошедших только в течение XVI–XIX вв. [26–28], имеются сведения о 20 гляциально-вулканических селях на склонах

влк. Ключевского в период с 1737 по 2008 гг., на влк. Шивелуч с 1854 по 2009 гг. зафиксировано 11 этапов формирования крупных нивально-вулканических селей, которые сходили по долинам его южного склона (рр. Кабеку, Бекеш, Байдарная, Каменская и др.) [6]. При извержении небольшого вулкана Чайтен (Чили) в 2008–2009 гг. сошли 3 лахара, от одного из которых в мае 2009 г. пострадал и одноименный город (рис. 3б). Наблюдения за долинами, окружающими влк. Пинатубо, показали, что опасность таких явлений сохраняется в их днищах в течение десятилетий после извержения [2].

Нередко эксплозии сопровождаются не только выбросом пирокластики, но и частичным разрушением вулканического конуса. При взрыве привершинной части даже небольшого вулкана происходит разброс крупных глыб и прилежащие долины (или долина) могут быть перегорожены плотиной из грубообломочного материала. Формируется подпрудное озеро или повышается уровень существовавшего там ранее водоема, что, например, наблюдалось в 1907 г. в истоке р. Теплой (кальдера Ксудач, Камчатка). При последующем прорыве такой дамбы сход селя практически неизбежен: мощный конус выноса в устье реки подтверждает это.

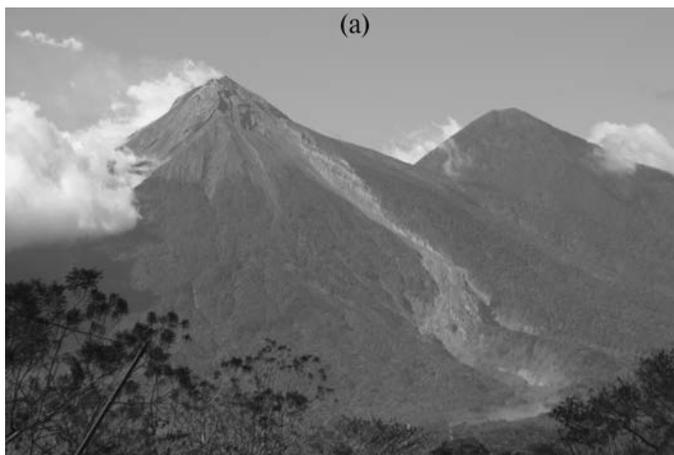


Рис. 3. Следы лахара на склоне влк. Фуэго (Гватемала, 2013 г.) (а) и город Чайтен, разрушенный в результате схода лахаров в мае 2009 г. (Чили, 2010 г.) (б). Здесь и далее фото автора

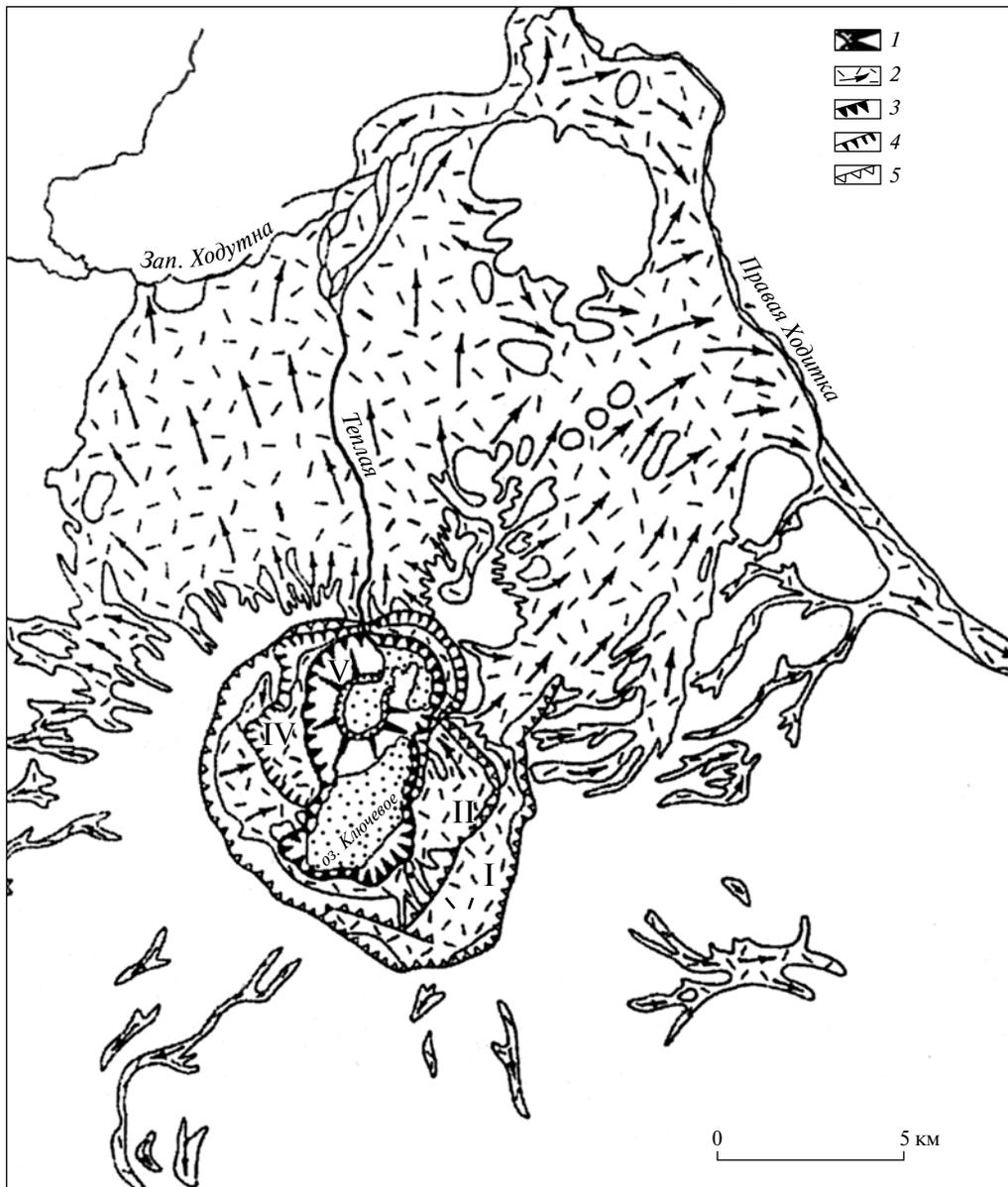


Рис. 4. Пирокластические потоки извержения влк. Ксудач ок. 290 г.н.э. (по [30])

1 – Зап. Ходутка; 2 – пирокластические потоки и направление их движения; уступы кальдер и их номера: 3 – V, 4 – IV, 5 – I и II

Одностороннее разрушение вулканического конуса при извержении – так называемый *направленный взрыв* нередко сопровождается формированием *обломочной лавины*. Это приводит к отложению обломочного материала различной крупности на той части склона, куда был ориентирован взрыв. По данным [21], при взрыве обломки могут быть отброшены на расстояние до 29–30 км. Крупная обломочная лавина проходит до 85 км от места обрушения конуса и перекрывает площадь от 100 до 1000 км² [2]. При этом *резургентный материал* (обломки разрушенного конуса) может как целиком заполнять долины рек на протяженных участках, так и создавать там *плотины*. Первый случай

наблюдался, например, при извержении влк. Безымянного (Камчатка) в 1956 г., когда долины его восточного склона были заполнены на расстоянии нескольких километров [19]. При повторном врезании водотоков там сформировались мощные сели, которые вынесли обломочный материал на правобережье р. Камчатки [25]. На Аляске обломочная лавина привела к формированию серии плотин и созданию ряда подпрудных водоемов в долине р. Чакачатна [29]. Сход лавины при извержении влк. Шивелуч в 1964 г. обусловил междолинную перестройку: р. Кабеку присоединила параллельный водоток, блокированный крупными фрагментами лавины.

При эксплозивных извержениях наиболее тяжелая часть эруптивной колонны может формировать *пирокластические потоки (ПП)*, которые представляют собой смесь раскаленных (нередко выше 600–700 °С) глыб, пепла и вулканических газов. Со скоростью иногда более 100 м/сек [2] они спускаются от жерла по склону вулкана, следуя преимущественно по долинам рек, дренирующих постройку. В некоторых случаях ПП могут распространяться и вверх по долинам, переваливая через хребты, ограничивающие кальдеры, что было, например, реконструировано [30] для последнего кальдерообразующего извержения влк. Ксудач 1725 л.н. (рис. 4). В результате происходит выполнение долин пирокластическим материалом, а при последующем врезании водотоков в рыхлую толщу пирокластики и ее размыве – сход селей. Площади участков, подвергшихся воздействию ПП, могут составлять десятки и сотни квадратных километров: при извержении Шивелуча 1964 г. они достигли 45.5 км² [31]. В последующие годы потоки неоднократно сходили по долинам рек южного склона вулкана и их протяженность составляла от 8 до 28 км [32]. Известно, однако, что длина их может достигать и 100 км [2, 21].

Попадая в долину, *пирокластический поток заполняет ее днище*, формирует выпуклый поперечный профиль, аналогично лавовому. На влк. Шивелуч мощность отложений ПП колеблется от 2–5 м до 40–50 м [31–33]. Отложения ПП могут быть как несцементированными, так и спекшимися – игнимбриты и пемзы. Соответственно, первые легче разрушаются под воздействием эрозии и селей, но и вторые редко обладают высокой прочностью и на их поверхностях часто образуются бедленды, хотя изначально потоки пемзы и игнимбритов формируют равнины, перекрывая исходный рельеф.

Отложения пирокластического потока, как и лавового, *могут перегораживать устья притоков реки с формированием в них подпрудных озер*, с той лишь разницей, что эти образования более недолговечны и прорыв плотины из пирокластики с последующим сходом селя может произойти в ближайшие годы после извержения. Подобные явления наблюдаются, например, в водотоках южного склона влк. Шивелуч (Камчатка) [33]. В связи с перегруженностью водотоков рыхлым пирокластическим материалом темпы накопления отложений в таких озерах весьма высоки: так, за 3 года в подпрудном озере на правом притоке р. Сух. Бекеш накопилась толща горизонтально-слоистых песков мощностью более 6–7 м. Озера, подпруженные игнимбритами, более долговечны и масштабны, их глубины могут достигать 100 м [34].

И.Б. Сейнова с соавторами [35] рассматривают пирокластические потоки как триггерный механизм зарождения лахаров, т.к. за период вулканической активности Шивелуча в 1964–2013 гг. сходу лахаров всегда предшествовало извержение пирокластических потоков. При извержении влк. Пик Сарычева на о-ве Матуа (Курилы) в 2009 г. сформировавшиеся 8 ПП впоследствии дали начало 7 лахарам различной протяженности [36]. Лахары регулярно образуются и после извержений влк. Мерапи (Индонезия), которые также сопровождаются формированием ПП. Из 18 наиболее крупных водотоков, берущих начало на вулкане, 10 многократно подвергались сходам лахаров [5]. Исследования отложений ПП на вулкане Сент-Хеленс показали также, что во время своего движения ПП оказывают эродирующее воздействие на субстрат, особенно когда они спускаются по ложбинам на крутых участках вулканических склонов [37].

После крупного извержения, сопровождавшегося выбросом пирокластики, сток наносов в реках вулканических регионов может возрастать на несколько порядков, что

хорошо видно на графиках для рр. Камчатка и Толбачик [38]. По данным [2], после извержения влк. Сент-Хеленс в 1980 г. годовая величина твердого стока рек прилегающей территории, например, выросла в 500 раз, но и 20 лет спустя годовой сток взвешенных наносов в 100 раз превышал величину такового до извержения. Таким образом, долины рек, стекающих с вулканов, перегружены обломочным материалом разной размерности и водотоки вынуждены перемывать большие объемы пирокластического материала, в т.ч. и переотложенного лахарами.

Наличие больших объемов воды в жидкой или твердой фазе в непосредственной близости от центра извержения оказывает значительное влияние на поствулканические процессы прилегающей территории². Если извержение происходит в озере (например, в кальдере или в подпрудном водоеме в долине) *или в непосредственной близости от него*, неважно, является ли это событие надводным или подводным, в любом случае оно сопровождается выплеском озера, что приводит к сходу селя со склонов или по долине, которая вытекает из данного водоема. Следы таких явлений прослеживаются, например, по долине р. Теплой (влк. Ксудач, Камчатка) и в ряде других рек, берущих начало в вулканических озерах.

В случае покровного оледенения, когда *извержение идет под мощным слоем льда*, формируются гигантские по масштабам потоки талых ледниковых вод — йокульлаупы. В настоящее время они наблюдаются в Исландии, хотя в периоды четвертичных похолоданий, видимо, имели место и на Камчатке, и в Восточно-Тувинском лавовом нагорье, и в других вулканических регионах умеренных широт [39]. При подледном извержении происходит просадка протаявшего льда, формирование подледного водоема с последующим его прорывом и выносом громадных объемов ледяного и обломочного материала на значительные расстояния, в т.ч. и по долинам рек. Большое количество вовлеченной в процесс воды приводит к гигантским масштабам данного явления: в частности, протяженность потоков, их скорость, количество переносимого материала увеличиваются на порядки по сравнению с обычными лахарами. Так, извержение влк. Катла (Исландия) под ледником Мирдальсйёкюдль в 1918 г. привело к возникновению йокульлаупа объемом до 8 км³ и затоплению территории в 600–800 км². Глубина таких потоков может составлять от 20 до 70 м, а ширина до 8–9 км. Естественно, речные долины не в состоянии их канализовать, но в процессе движения потоков идет значительная трансформация рельефа, и впоследствии часто происходят масштабные перестройки речной сети: так, например, после извержения подледного вулкана Гримсвётн в 1861 г. русло р. Скейдараур сместилось на 13 км к западу [40–42].

Многие извержения сопровождаются **вулcano-тектоническими явлениями**: образуются трещины, происходят деформации земной поверхности, измеряемые метрами, — как опускания, так и поднятия отдельных участков, реже формируются *кальдеры обрушения*. Изменение топографии местности приводит к деформации продольного профиля долин, плановым смещениям речной сети или ее перестройкам. Такие примеры описаны нами ранее в кальдерном комплексе Ксудач: это и переформирования приустьевых частей долин при образовании кальдеры обрушения 1725 л.н. (датировка по [43]), и перестройки водотоков в результате роста конуса Штюбеля [23, 24]. Перестройки речной сети, сопровождающие вулканическую деятельность или вызванные таковой, также, по сути, являются катастрофами разного масштаба и часто сопровождаются прорывами или переливами сформировавшихся подпрудных озер и, соответственно, сходами селей.

Даже при слабых **сейсмических событиях**, которые часто сопровождают извержения или происходят независимо от последних, в зонах повышенной трещиноватости и гидротермальной проработки могут произойти значительные по масштабам геоморфологические катастрофы. В первую очередь это касается долин в *зонах развития гидротермальных процессов*. В бортах таких врезов породы трещиноватые, интенсивно гидротермально

² В силу тематики данной статьи мы рассматриваем лишь извержения на суше.

проработаны, нередко в результате химического выветривания превращены в глины и значительно обводнены. Они могут легко смещаться, формируя масштабные оползни или оползни-сплывы даже при слабых сейсмических событиях (рис. 5). Перегораживание долин смещенными массами приводит к подпруживанию рек и сходу селей, как это наблюдалось, например, в долине р. Гейзерной (Камчатка) в 2007 г. [44–47]. Сам оползень-сплыв разрушил ряд построек, а сформировавшееся озеро затопило часть долины вместе с гейзерами. Судя по морфологии долины водотока, подобное явление случалось там неоднократно. Следы оползневых цирков хорошо видны на бортах и других рек зон развития гидротермальных процессов, например, в районе влк. Мутновский.

В результате слабых сейсмических событий может происходить и *разрушение стенок кратерных озер* по зонам трещиноватости, что также провоцирует сход селей.

Кроме того, совокупность таких факторов, как наличие толщ трещиноватых, слабосвязанных или гидротермально измененных слабостойких пород, сейсмические толчки и/или выпадение обильных осадков, способствует развитию катастрофических процессов в вулканических регионах и после завершения активной стадии извержений. Например, обломочные лавины или иные формы обвалов и массового смещения материала на склонах, в т.ч. сели, формируются не только во время извержений, как это было на Шивелуче и Сент-Хеленс, но и после, что наблюдалось на вулканах Паринакота (Чили), Шапта (Калифорния, США), Касита (Никарагуа) и др. [2].

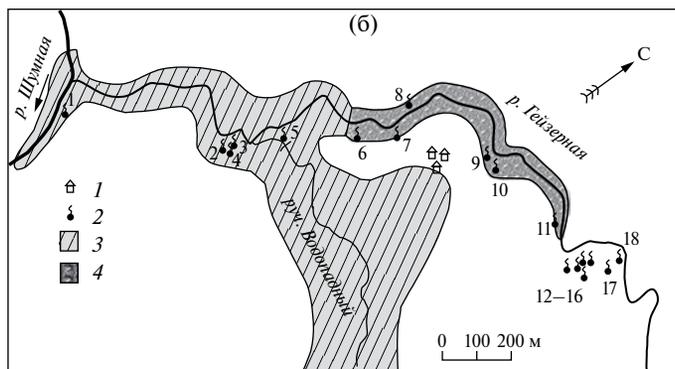
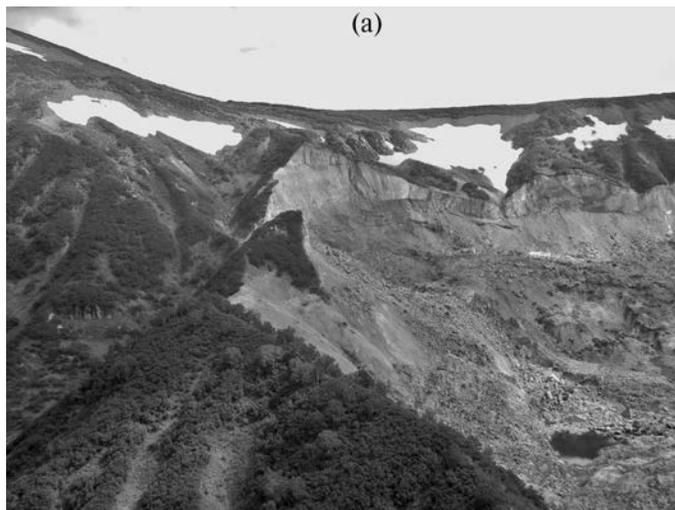


Рис. 5. Стенка срыва (а) и схема положения оползня-сплыва (б), перекрывшего долину р. Гейзерной в 2007 г. (составлена В.Л. Леоновым [47]) 1 – турбаза, 2 – гейзеры, 3 – оползень-сплыв, 4 – подпрудное озеро. Цифрами обозначены затопленные и восстанавливающиеся гейзеры

Заключение

Речные долины вулканических регионов периодически служат зонами быстрой эндогеннообусловленной аккумуляции ювенильного и резургентного материала в результате эффузивных или эксплозивных извержений, вулканотектонических или гидротермальных процессов (излияние лав, выброс пироклаستيку, обрушение или взрыв вулканических конусов, оползание слабостойких гидротермально проработанных пород

и др.). В результате долины на различных по протяженности участках заполняются разным по составу и свойствам вулканическим материалом, при этом аккумуляция распространяется преимущественно от верхних звеньев речной сети вниз. Одновременно долины являются и путями (коридорами) интенсивного и также, как правило, импульсного, скачкообразного перемещения этого материала различными агентами. Наиболее часто это происходит в результате схода вулканических селей непосредственно после извержения при таянии ледников, снега или в результате обильных осадков, но иногда долины представляют собой арену реализации цепочек из 2–3 катастрофических событий, завершающими звеньями которых также могут быть (причем иногда неоднократные) сходы селей, которые принято называть вторичными лахарами. Наблюдения показывают, что время реализации всех событий подобной цепочки может превышать несколько десятилетий и даже столетий [2].

В результате рассмотрения последствий катастрофических процессов, обусловленных вулканической деятельностью, которые нам удалось наблюдать в различных регионах или которые описаны в литературе, нами были выделены возможные цепочки катастрофических геоморфологических событий в речных долинах. Их анализ показал, что основными геоморфологическими факторами, провоцирующими катастрофические события в долинах рек, являются: быстрая аккумуляция там вулканического материала, смещения рыхлых толщ, изменения уклонов поверхности, активная эрозия. Формирование селей, импульсно перемещающих материал вниз по долинам, обусловлено размывом водотоками поступившего в долины рыхлого материала при выпадении осадков и таянии снега/льда или же прорывами плотин возникших в долинах подпруженных озер. И тут нельзя не согласиться с С.С. Черноморцем и И.Б. Сейновой [6] в том, что селевые потоки обычно “являются завершающей стадией в цепи катастрофических процессов при извержениях” (с. 57). Вулканические отложения в долинах водотоков подвергаются переработке и перемещению и иными экзогенными процессами – аллювиальными, эоловыми, мерзлотными, но эти процессы реже носят столь ярко выраженный катастрофический характер [33].

Таким образом, особая опасность и уязвимость долин рек вулканических территорий обусловлена большими объемами поступающего туда и перемещаемого по ним материала, высокими скоростями эндо- и экзогенных процессов на сопредельных территориях, активной деятельностью самих текучих вод, которая провоцирует широкий спектр катастрофических событий и активно влияет на ход процессов рельефообразования.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-05-00967), сбор материала осуществлен в рамках Госзадания ИГ РАН.

Acknowledgments. This work was supported by the RFBR (project No. 18-05-00967), data were collected on the topic of the State Administration of the IG RAS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Witham C.S.* Volcanic disasters and incidents: A new database // *Journ. of Volcanology and Geothermal Research*. 2005. Vol. 148. Iss. 3–4. P. 191–233.
2. *Thouret J.-C.* Volcanic hazards and risks: a geomorphological perspective // *Geomorphological hazards and disaster prevention*. N.-Y.: Cambridge Univ. Press, 2010. P. 13–32.
3. Опасные природные процессы Дальневосточного региона России / Под ред. В.В. Разумова, А.П. Притворова. М.: Дизайн. Информация. Картография, 2008. 342 с.
4. Атлас Курильских островов / Гл. ред. Н.Н. Комедчиков. М.: Дизайн. Информация. Картография, 2009. 486 с.
5. The Atlas of Merapi volcano. F. Lavigne, J. Morin, Surono (Eds.) 1st Edition. Paris. 2015. 64 p.

6. *Черноморец С.С., Сейнова И.Б.* Селевые потоки на вулканах. Уч. пособие. М.: УНЦ ДО, 2010. 72 с.
7. *Ярмолюк В.В., Лебедев В.И., Сугоракова А.М., Брагин В.Ю., Литасов Ю.Д., Прудников С.Т., Аракелянц М.М., Лебедев В.А., Иванов В.Г., Козловский А.М.* Восточно-Гувинский ареал новейшего вулканизма Центральной Азии: этапы, продукты и характер вулканической активности // *Вулканология и сейсмология*. 2001. № 3. С. 3–32.
8. *Ярмолюк В.В., Козловский А.М., Кудряшова Е.А., Лебедев В.И., Сугоракова А.М.* Крупнейшие долинные излияния в кайнозое Азии: особенности строения, состава и условия формирования “лавовой реки” долины Малого Енисея // *Вулканология и сейсмология*. 2004. № 4. С. 3–20.
9. *Певзнер М.М., Герцев Д.О., Федоров П.И., Романенко Ф.А., Куцева Ю.В.* Анюйский вулкан на Чукотке: возраст, строение, особенности состава пород и извержения // *Литология и полезные ископаемые*. 2017. № 1. С. 25–59.
10. *Лебедева Е.В.* Влияние лавовых потоков на строение долин и развитие речной сети // *Геоморфология*. 2016. № 3. С. 78–91.
11. *Ivanov A.V., Arzhannikov S.G., Demonterova E.I., Arzhannikova A.V., and Orlova L.A.* Jom-Bolok Holocene volcanic field in the East Sayan Mts., Siberia, Russia: structure, style of eruptions, magma compositions, and radiocarbon dating // *Bul. of Volcanol.* 2011. Vol. 73. P. 1279–1294.
12. *Аржанников С.Г., Иванов А.В., Аржанникова А.В., Демонтерова Е.И.* Долина вулканов в Восточном Саяне // *Планета*. 2014. № 5/6. С. 67–83.
13. *Bernardi M.I., Bertotto G.W., Jalowitzki T.L.R., Orihashi Y., and Ponce A.D.* Emplacement history and inflation evidence of a long basaltic lava flow located in Southern Payenia Volcanic Province, Argentina // *Journ. of Volcanology and Geothermal Research*. 2015. Vol. 293. P. 46–56.
14. *Сковитина Т.М.* Плотинные озера Саяно-Байкальской Становой горной области // *Геоморфология*. 2002. № 3. С. 79–88.
15. *Щетников А.А.* Озера Окинского плоскогорья // *Геоморфология*. 2002. № 3. С. 88–95.
16. *Короткий А.М.* Причины и механизмы перестроек речной сети и их влияние на геоморфологические процессы в Приморье // *Геоморфология*. 2010. № 2. С. 78–91.
17. *Базаров Д.Б., Антощенко-Оленев И.В.* Селенгинское среднегорье и Джидинский горный район // *Нагорья Прибайкалья и Забайкалья*. М.: Наука, 1974. С. 163–209.
18. *Мелекесцев И.В., Сулержицкий Л.Д.* Вулкан Ксудач (Камчатка) за последние 10 тыс. лет // *Вулканология и сейсмология*. 1987. № 4. С. 28–39.
19. *Виноградов В.Н.* О влиянии вулканизма на снежный покров и ледники // *Вопр. географии Камчатки*. 1967. Вып. 5. С. 88–94.
20. *Мелекесцев И.В.* Особенности некоторых рельефообразующих процессов молодых вулканических районов (на примере Камчатки) // *Вопр. географии Камчатки*. 1967. Вып. 5. С. 80–87.
21. *Пономарева В.В.* Крупнейшие эксплозивные вулканические извержения и применение их тефры для датирования и корреляции форм рельефа и отложений: Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. М.: ИГ РАН, 2010. 50 с.
22. *Гришин С.Ю.* Крупнейшие вулканические извержения XX столетия на Камчатке и Курильских островах и их влияние на растительность // *Изв. РГО*. 2003. Т. 135. Вып. 3. С. 19–28.
23. *Лебедева Е.В.* Кальдера вулкана Ксудач (Камчатка): современные процессы рельефообразования и особенности строения долинной сети // *Геоморфология*. 2017. № 3. С. 60–75.
24. *Лебедева Е.В.* Озера кальдерного комплекса Ксудач (Камчатка): береговые процессы и колебания уровня // *Геоморфология*. 2017. № 4. С. 35–49.
25. *Горшков Г.С.* Извержение сопки Безымянной // *Бюл. вулкан. станции на Камчатке*. 1956. № 26. 41 с.
26. *Tilling R.I.* Volcanism and associated hazards: the Andean perspective // *Advances in Geosciences*. 2009. No. 22. P. 125–137.
27. *Лебедева Е.В., Михалев Д.В., Кладовщикова М.Е.* Опасные и катастрофические процессы южноамериканских Анд // *Геоморфологи*. Вып. 5. Новые решения старых проблем. М.: Медиа-ПРЕСС, 2014. С. 43–56.

28. Лебедева Е. В., Михалев Д. В., Шварев С. В. Геоморфологическая напряженность центрального сектора горной системы Анд // Геоморфология. 2015. № 2. С. 77–88.
29. Waythomas S.F. Formation and failure of volcanic debris dams in the Chakachatna River valley associated with eruptions of the Spurr volcanic complex, Alaska // Geomorphology. 2001. Vol. 39. Iss. 3–4. P. 111–129.
30. Брайцева О. А., Мелекесцев И. В., Пономарева В. В., Кирьянов В. Ю. Крупнейшее эксплозивное извержение нашей эры на Камчатке — кальдерообразующее извержение в Ксудач 1700–1800 ¹⁴С-лет назад // Вулканология и сейсмология. 1995. № 2. С. 30–49.
31. Belousov A., Belousova M., and Voight B. Multiple edifice failures, debris avalanches and associated eruptions in the Holocene history of Shiveluch volcano, Kamchatka, Russia // Bull. Volcanol. 1999. Vol. 61. P. 324–342.
32. Мелекесцев И. В., Волинец О. Н., Ермаков В. А., Кирсанова Т. П., Масуренков Ю. П. Вулкан Шивелуч // Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука, 1991. Т. 1. С. 84–105.
33. Лебедева Е. В. Влияние выбросов пирокластического материала на морфологию долин и развитие речной сети (на примере вулканов Северной группы, Камчатка) // Геоморфология. 2016. № 4. С. 56–69.
34. Kataoka K.S., Urabe A., Manville V., and Kajiyama A. Breakout flood from an ignimbrite-dammed valley after the 5 Ka Numazawako eruption, northeast Japan // Geological Society of America Bull. 2008. Vol. 120. Iss. 9/10. P. 1233–1247.
35. 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.
36. Рыбин А. В., Дегтерев А. В., Разжигаева Н. Г., Ганзей К. С., Чибисова М. В. Активные вулканы Курильских островов: вулкан Пик Сарычева. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2012. 80 с.
37. Brand B.D., Bendaña S., Self S., and Pollock N. Topographic controls on pyroclastic density current dynamics: Insight from 18 May 1980 deposits at Mount St. Helens, Washington (USA) // Journ. of Volcanology and Geothermal Research. 2016. Vol. 321. P. 1–17.
38. Куксина Л. В., Чалов С. Р. Сток взвешенных наносов рек территорий современного вулканизма Камчатки // География и природные ресурсы. 2012. № 1. С. 103–110.
39. Мелекесцев И. В. Вулканизм и рельеф // Пробл. эндогенного рельефообразования. М.: Наука, 1976. С. 350–398.
40. Заботкин П. П. Субгляциальные извержения // Уч. зап. МОПИ. 1951. Т. XVII. Вып. 5. С. 182–192.
41. Galeczka I., Eiriksdottir E.S., Hardardottir J., Oelkers E.H., Torssander P., and Gislason S.R. The effect of the 2002 glacial flood on dissolved and suspended chemical fluxes in the Skaftariver, Iceland // Journ. of Volcanology and Geothermal Research. 2015. Vol. 301. P. 253–276.
42. Gudmundsson A.T. Living Earth — Outline of the geology of Iceland. Reykjavik: Forlagid, 2013. 408 p.
43. Pendea I.F., Ponomareva V.V., Bourgeois J., Zubrow E.B., Portnyagin M.V., Ponkratova I., Harmsen H., and Korosec G. Late Glacial to Holocene paleoenvironmental change on the northwestern Pacific seaboard, Kamchatka Peninsula (Russia) // Quaternary Science Reviews. 2017. Vol. 157. P. 14–28.
44. Кугаенко Ю. А., Салтыков В. А., Синецын В. И. Сейсмические наблюдения в Долине Гейзеров // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. Вып. 10. № 2. С. 171–172.
45. Леонов В. Л. Геологические предпосылки и возможность прогноза оползня, произошедшего 3 июня 2007 г. в Долине гейзеров, Камчатка // Пробл. комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Первая региональная научно-техническая конференция. 2007. С. 19–27.
46. Леонов А. В. Систематизация названий основных объектов в районе Долины Гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка) // Вестн. КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2012. Вып. 19. № 1. С. 215–230.
47. Пинегина Т. К., Делемень И. Ф., Дроздин В. А., Калачева Е. Г., Чирков С. А., Мелекесцев И. В., Двигало В. Н., Леонов В. Л., Селиверстов Н. И. Камчатская долина гейзеров после катастрофы 3 июня 2007 г. // Вестн. ДВО РАН. 2008. № 1. С. 33–44.

REFERENCES

1. Witham C.S. Volcanic disasters and incidents: A new database. *Journ. of Volcanology and Geothermal Research*. 2005. Vol. 148. Iss. 3–4. P. 191–233.
2. Thouret J.-C. Volcanic hazards and risks: a geomorphological perspective, in *Geomorphological hazards and disaster prevention*. N.-Y.: Cambridge Univ. Press, 2010. P. 13–32.
3. *Opasnyye prirodnyye protsessy Dal'nevostochnogo regiona Rossii* (Hazardous natural processes of the Russian Far East). V.V. Razumov, A.P. Pritvorov Eds. M.: Design. Informatsiya. Kartografiya (Publ.), 2008. 342 p.
4. *Atlas Kuril'skikh ostrovov* (The Atlas of Kuril Islands). N.N. Komedchikov Ed.M.: Design. Informatsiya. Kartografiya (Publ.), 2009. 486 p.
5. *The Atlas of Merapi volcano*. F. Lavigne, J. Morin, Surono (Eds.) 1st Edition. Paris. 2015. 64 p.
6. Chernomorets S.S. and Seynova I.B. *Selevyye potoki na vulkanakh* (Debris flows on volcanoes). A Tutorial. M.: ESC PHSE (Publ.), 2010. 72 p.
7. Yarmolyuk V.V., Lebedev V.I., Sugorakova A.M., Bragin V. Yu., Litasov Yu.D., Prudnikov S.T., Arkelyants M.M., Lebedev V.A., Ivanov V.G., and Kozlovskii A.M. The Eastern Tuva region of recent volcanism in Central Asia: periods, products and types of volcanic activity. *Vulkanologiya i seismologiya*. 2001. No. 3. P. 3–32. (in Russ.)
8. Yarmolyuk V.V., Kozlovskii A.M., Kudryashova E.A., Lebedev V.I., and Sugorakova A.M. Major valley lava flows in Asia during Cenozoic time: structure, composition, and the environment of the “lava river” forming in the Lesser Enisey R. valley. *Vulkanologiya i seismologiya*. 2004. No. 4. P. 3–20. (in Russ.)
9. Pevzner M.M., Gertsev D.O., Fedorov P.I., Romanenko F.A., and Kusheva Yu.V. Anyuisky volcano in Chukotka: age, structure, rock composition and eruption. *Litologiya i poleznyye iskopayemye*. 2017. No. 1. P. 25–59. (in Russ.)
10. Lebedeva E.V. Impact of the lava flows on the structure of valleys and development of the river network. *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2016. No. 3. P. 78–91. (in Russ.)
11. Ivanov A.V., Arzhannikov S.G., Demonterova E.I., Arzhannikova A.V., and Orlova L.A. Jom-Bolok Holocene volcanic field in the East Sayan Mts., Siberia, Russia: structure, style of eruptions, magma compositions, and radiocarbon dating. *Bull. of Volcanol.* 2011. Vol. 73. P. 1279–1294.
12. Arzhannikov S.G., Ivanov A.V., Arzhannikova A.V., and Demonterova E.I. Valley of volcanics in the East Sayan Mts. *Planeta*. 2014. No. 5/6. P. 67–83. (in Russ.)
13. Bernardi M.I., Bertotto G.W., Jalowitzki T.L.R., Orihashi Y., and Ponce A.D. Emplacement history and inflation evidence of a long basaltic lava flow located in Southern Payenia Volcanic Province, Argentina. *Journ. of Volcanology and Geothermal Research*. 2015. No. 293. P. 46–56.
14. Skovitina T.M. The barrier lakes of the Sayan-Baikal Mountain Region. *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2002. No. 3. P. 79–88. (in Russ.)
15. Schetnikov A.A. The lakes of the Okinsk Table-Land. *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2002. No. 3. P. 88–95. (in Russ.)
16. Korotky A.M. Reconfiguration of the river system in the Primorye: causes, mechanisms, influence on geomorphologic processes. *Geomorphology RAS*. 2010. No. 2. P. 78–91. (in Russ.)
17. Bazarov D.B. and Antoschenko-Olenev I.V. The Selenga middle mountains and the Djindinsky mountain region, in *Nagor'ya Priбайkal'ya i Zabaykal'ya* (Highlands of Baikal and Transbaikalia). Moscow: Nauka (Publ.), 1974. P. 163–209.
18. Melekestsev I.V. and Sulerzhitskii L.D. Ksudach volcano (Kamchatka) during last 10000 yr. *Vulkanologiya i seismologiya*. 1987. No. 4. P. 28–39. (in Russ.)
19. Vinogradov V.N. On the influence of volcanism on snowpack and glaciers. *Iss. of Kamchatka geography*. Petropavlovsk-Kamchatsky: Dalnevostochnoe Book Publishers, 1967. Iss. 5. P. 88–94. (in Russ.)
20. Melekestsev I.V. The features some of the relief-forming processes of young volcanic areas (Kamchatka as an example). *Iss. of Kamchatka geography*. Petropavlovsk-Kamchatsky: Dalnevostochnoe Book Publishers, 1967. Iss. 5. P. 80–87. (in Russ.)
21. Ponomareva V.V. *Krupneyshie eksplozivnyye vulkanicheskie izverzheniya i primenenie ikh tefry dlya datirovaniya i korrelyatsii form rel'efa i otlozheniy* (The largest explosive volcanic eruptions and the use of

- their tephra for dating and correlation of relief forms and sediments). Author's abstract. dis. ... Doctor Geographer. Science. Moscow: IG RAS, 2010. 50 p.
22. Grishin S.Yu. The largest volcanic eruption of the twentieth century, in Kamchatka and the Kuril Islands, and their impact on vegetation. *Izv. RGO*. 2003. Vol. 135. Iss. 3. P. 19–28. (in Russ.)
 23. Lebedeva E.V. Caldera Ksudach (Kamchatka): modern relief formation processes and features of the river network structure. *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2017. No. 3. P. 60–75. (in Russ.)
 24. Lebedeva E.V. Lakes of the Ksudach caldera complex (Kamchatka): coastal processes and the level fluctuation. *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2017. No. 4. P. 35–49. (in Russ.)
 25. Gorshkov G.S. Eruption of Bezymiannyi volcano. *Volcanology Bull. AS USSR*. 1956. No. 26. 41 p. (in Russ.)
 26. Tilling R.I. Volcanism and associated hazards: the Andean perspective. *Advances in Geosciences*. 2009. No. 22. P. 125–137.
 27. Lebedeva E.V., Mikhalev D.V., Novoa J.E., and Kladoschikova M.E. Geomorphological hazard and disasters in the South American Andes. *Geography. Environment. Sustainability*. 2014. No. 1. P. 80–98.
 28. Lebedeva E.V., Mikhalev D.V., and Shvarev S.V. Geomorphological tension of the Central Andes. *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2015. No. 2. P. 77–88. (in Russ.)
 29. Waythomas S.F. Formation and failure of volcanic debris dams in the Chakachatna River valley associated with eruptions of the Spurr volcanic complex, Alaska. *Geomorphology*. 2001. Vol. 39. Iss. 3–4. P. 111–129.
 30. Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Ponomareva V.V., and Kirianov V. Yu. The caldera-forming eruption of Ksudach volcano about 1700–1800 ¹⁴C-yr. BP – the greatest explosive event of our era in Kamchatka. *Vulkanologiya i seismologiya*. 1995. No. 2. P. 30–49. (in Russ.)
 31. Belousov A., Belousova M., and Voight B. Multiple edifice failures, debris avalanches and associated eruptions in the Holocene history of Shiveluch volcano, Kamchatka, Russia. *Bull. Volcanol.* 1999. Vol. 61. P. 324–342. (in Russ.)
 32. Melekestsev I.V., Volynets O.N., Yermakov V.A., Kirsanova T.P., and Masurenkov Yu.P. Shiveluch volcano, in *Aktivnyye vulkany Kamchatki* (Active volcanoes of Kamchatka). M.: Nauka (Publ.), 1991. Vol. 1. P. 84–105.
 33. Lebedeva E.V. Influence of pyroclastic emission on valley morphology and river network development: the case study of the Northern group volcanoes, Kamchatka. *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2016. No. 4. P. 56–69. (in Russ.)
 34. Kataoka K.S., Urabe A., Manville V., and Kajiyama A. Breakout flood from an ignimbrite-dammed valley after the 5 Ka Numazawako eruption, northeast Japan. *Geological Society of America Bull.* 2008. Vol. 120. Iss. 9/10. P. 1233–1247.
 35. Seinova I.B., Chernomorets S.S., and Demiyanchuk Yu.V. Endogenic mechanism of lahar formation on andesitic volcanoes (by the example of the Shiveluch Volcano, Kamchatka). *GeoRisk*. 2014. No. 4. P. 44–54. (in Russ.)
 36. Rybin A.V., Degterev A.V., Razjigaeva N.G., Ganzey K.S., and Chibisova M.V. *Aktivnyye vulkany Kuril'skikh ostrovov: vulkan Pik Sarycheva* (Active volcanoes of the Kuril Islands: Sarychev Peak volcano). Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG DVO RAS, 2012. 80 p.
 37. Brand B.D., Bendaña S., Self S., and Pollock N. Topographic controls on pyroclastic density current dynamics: Insight from 18 May 1980 deposits at Mount St. Helens, Washington (USA). *Journ. of Volcanology and Geothermal Research*. 2016. No. 321. P. 1–17.
 38. Kuksina L.V. and Chalov S.R. The suspended sediment discharge of the rivers running along territories of contemporary volcanism in Kamchatka. *Geography and Natural Resources*. 2012. No. 1. P. 103–110. (in Russ.)
 39. Melekestsev I.V. Volcanism and Relief, in *Problemy endogennogo rel'yefoobrazovaniya* (Problems of endogenous relief formation). Moscow: Nauka (Publ.), 1976. P. 350–398.
 40. Zobotkin P.P. Subglacial eruptions. *Uchenye zapiski MOPI*. 1951. Vol. XVII. Iss. 5. P. 182–192. (in Russ.)
 41. Galeczka I., Eiriksdottir E.S., Hardardottir J., Oelkers E.H., Torssander P., and Gislason S.R. The effect of the 2002 glacial flood on dissolved and suspended chemical fluxes in the Skaftariver, Iceland. *Journ. of Volcanology and Geothermal Research*. 2015. No. 301. P. 253–276.
 42. Gudmundsson A.T. Living Earth – Outline of the geology of Iceland. Reykjavik: Forlagid, 2013. 408 p.

43. Pendea I.F., Ponomareva V.V., Bourgeois J., Zubrow E.B., Portnyagin M.V., Ponkratova I., Harm-
sen H., and Korosec G. Late Glacial to Holocene paleoenvironmental change on the northwestern Pa-
cific seaboard, Kamchatka Peninsula (Russia). *Quaternary Science Reviews*. 2017. Vol. 157. P. 14–28.
44. Kugayenko Yu.A., Saltykov V.A., and Sinitsyn V.I. Seismic observations in the Valley of Geysers. *Vestnik
KRAUNTS. Nauki o Zemle*, 2007. No. 2. Iss. 10. P. 171–172. (in Russ.)
45. Leonov V.L. Geological preconditions and the possibility of forecasting a landslide that took place on
June 3, 2007 in the Valley of Geysers, Kamchatka, in *Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa
Dal'nego Vostoka Rossii* (Problems of Complex Geophysical Monitoring of the Far East of Russia). The
1st regional scientific and technical conference. 2007. P. 19–27.
46. Leonov A.V. Systematization of the names of the main objects in the Valley of Geysers (Kronotsky Re-
serve, Kamchatka). *Vestnik KRAUNTS. Ser. Earth Sciences*. 2012. Iss. 19. No. 1. P. 215–230. (in Russ.)
47. Pinegina T.K., Delemen' I.F., Droznin V.A., Kalacheva E.G., Chirkov S.A., Melekestsev I.V., Dviga-
lo V.N., Leonov V.L., and Seliverstov N.I. Kamchatka Valley of Geysers after the catastrophe on 3 June
2007. *Vestnik DVO RAN*. 2008. No. 1. P. 33–44. (in Russ.)