

УДК 551.435.1:551.432.7

© 2019 г. Е.В. ЛЕБЕДЕВА

**ВИДЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ И ПОСТВУЛКАНИЧЕСКОЙ  
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ФЛЮВИАЛЬНЫЙ РЕЛЬЕФ**

*Институт географии РАН, Москва, Россия  
E-mail: Ekaterina.lebedeva@gmail.com*

Поступила в редакцию 12.02.2019

После доработки 16.04.2019

Принята к печати 11.06.2019

Выявлены характерные черты речной сети, строения и функционирования долин, находящихся под воздействием эффузивного и эксплозивного вулканизма, вулcano-тектонических явлений, газогидротермальной активности и грязевого вулканизма. Установлено, что в пределах потоков и покровов эффузивов формирование новых русел может происходить не только за счет попятной эрозии, но и в результате обрушения кровли приповерхностных лавоводов, по которым активно идет подземный (подлавовый) сток. На участках доминирования эксплозивной деятельности эрозийные формы становятся зонами аккумуляции вулканического материала, который постепенно перерабатывается селевыми, аллювиальными, эоловыми и др. процессами. Для них характерны высокая скорость эрозии, большой объем твердого стока, значительная роль дефляции в преобразовании флювиального рельефа. Вулcano-тектоническая деятельность меняет плановое положение и морфологию долин, приводя к изменению направления течения и к многочисленным перестройкам речной сети, в результате чего долины современных водотоков часто состоят из разновозрастных фрагментов. В долинах гидротермальных зон активны склоновые процессы, что приводит к формированию в них не только натечных, но и многочисленных оползневых террас. Грязевулканические процессы периодически приводят к выполнению и перегораживанию долин сопочной брежцией, что сказывается как на составе аллювия водотоков, так и на морфологии долин.

**Ключевые слова:** речная долина, лавовый поток, лахар, пирокластические отложения, подпрудное озеро, кальдера, гидротермальная деятельность, оползень, грязевой вулканизм.

<https://doi.org/10.31857/S0435-42812019449-66>

**IMPACT OF VOLCANIC AND POST VOLCANIC ACTIVITY ON FLUVIAL RELIEF****E.V. LEBEDEVA**

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

Received 12.02.2019

Revised 16.04.2019

Accepted 11.06.2019

## Summary

The characteristic features of the river network, the structure and functioning of the valleys affected by effusive and explosive volcanism, volcano-tectonic phenomena, gas hydrothermal activity and mud volcanism are revealed. It has been established that within flows and covers of effusives, the formation of new streams' channels can occur not only due to backward erosion, but also as a result of the collapse of the roof of the near-surface lava tubes, which are actively used by underground runoff. A high erosion rate, a large volume of solid runoff, and a significant role of deflation in the transformation of the fluvial relief are characteristic for regions of domination of explosive activity. There valleys become zones of accumulation of volcanic material, which is gradually processed by mudflow, alluvial, aeolian and other processes. Volcanic-tectonic activity changes the rivers position, direction of streams and morphology of the valleys, leading to numerous reorganizations of the river network, as a result of which the valleys of modern watercourses often consist of uneven-age fragments. Valleys of hydrothermal zones are characterized by the active development of slope processes, which leads to the formation in them not only of sinter terraces, but also numerous landslide ones. Mud volcanic processes periodically lead to the filling and blocking of the valleys with mud breccia flows, which affects both the composition of the alluvium of watercourses and the morphology of the valleys.

**Keywords:** river valley, lava flow, lahar, pyroclastic deposits, dam lake, caldera, hydrothermal activity, landslide, mud volcanism.

## Введение

Рельеф, формирующийся текучими водами, подвержен быстрым изменениям. Флювиальный рельеф вулканических регионов находится еще и в условиях активного и весьма быстро меняющегося эндогенного воздействия. При проведенном ранее анализе флювиального рельефа разных вулканических регионов [1–3 и др.] установлено, что вулканические извержения, вулкано-тектонические деформации поверхности, газогидротермальная деятельность и грязевулканическая активность<sup>1</sup> оказывают весьма существенное воздействие как на развитие долинной сети, так и на ее заложение. При этом непосредственно вулканическая деятельность может влиять на долины, удаленные на несколько десятков и даже первые сотни километров от центров извержения.

Детали и особенности развития флювиального рельефа областей доминирования вулканизма различного типа и связанных с ним явлений изучены мало. Анализ публикаций по вулканическим регионам свидетельствует о том, что сведения об этом как в отечественной, так и в зарубежной научной литературе весьма отрывочны, разрознены и не систематизированы. Хорошо известно, что в зонах развития стратовулканов, как правило, доминирует радиальный — центробежный рисунок речной сети, который сохраняется даже после разрушения самих конусов [4]; общепризнанна постепенная инверсия вулканического рельефа в случае заполнения долин лавовыми потоками [4, 5], безводность вулканических плато и каньонообразное строение имеющихся там долин. Однако в большинстве случаев речные долины рассматриваются исследователями лишь с точки зрения схода там селей и аккумуляции выносимого ими материала [6–8].

Более детально вопросы флювиальной деятельности на участках развития молодого и современного вулканизма Камчатки были затронуты в ряде работ камчатских геоморфологов И. В. Мелекесцева, Т. С. Краевой и О. А. Брайцевой. В монографии [9] они рассматривались преимущественно в контексте особенностей формирования вулканогенно-пролювиальных равнин у подножия вулканических конусов с доминированием эксплозивной деятельности. Исследователями описано широкое развитие “сухих” — безводных большую часть года — рек на Камчатке и частый сход по ним вулканических селей — лахаров. И. В. Мелекесцев подчеркивал, что гидросеть активных вулканических регионов весьма молода и подвержена частым перестройкам [10]. Наиболее детально

<sup>1</sup> Мы включили в работу рассмотрение грязевого вулканизма, т. к. этот эндогенный процесс, морфологически во многом схожий с вулканизмом магматическим, встречается в зонах современной вулканической и поствулканической активности.

вопросы влияния плейстоцен-голоценового эффузивного и эксплозивного вулканизма на развитие речных долин были рассмотрены в работе Т. С. Краевой [11]. Изучение долин в районе Эльбруса позволило исследователю рассмотреть широкий спектр примеров воздействия вулканизма на речные долины и выделить в качестве особого генетического типа отложенный вулканогфлювиальные образования, дать характеристику их фаций на участках доминирования эксплозий, описать долинные игнимбриты и многочисленные следы спущенных подпрудных озер.

Цель данной статьи — анализ и сравнение воздействия различных типов вулканических и поствулканических процессов и явлений<sup>2</sup> на морфологию и особенности развития речных долин. В исследовании использованы результаты полевых наблюдений автора в разных вулканических регионах мира, а также данные, имеющиеся в геологической и геоморфологической литературе. Собрано и рассмотрено большое количество примеров эндогенного воздействия и их геоморфологических последствий. Опираясь преимущественно на территории современного и молодого вулканизма, мы, тем не менее, не стали ограничивать себя строгими временными рамками: анализ кайнозойской истории расширяет список примеров возможного воздействия вулканизма на флювиальный рельеф и показывает тенденции эволюции последнего.

Изучение процессов флювиального рельефообразования вулканических регионов позволяет лучше понять и прогнозировать опасные явления, которые часто связаны именно с речными долинами [12]. Актуальность этих исследований возрастает в последнее время и в связи с увеличением плотности населения в вулканических регионах [13].

### Типы вулканических процессов и флювиальный рельеф

Эрозионные врезы вулканических областей периодически являются местами быстрой эндогеннообусловленной аккумуляции ювенильного и резургентного<sup>3</sup> материала эффузивных или эксплозивных извержений. Он поступает туда при излияниях лав, выбросах пирокластики, обрушениях или взрывах вулканических конусов, оползаниях слабостойких гидротермально проработанных пород, выполнении долин сопочной брекчией и др. Протяженные участки врезов заполняются разным по составу и свойствам вулканическим материалом, при этом аккумуляция нередко распространяется от верхних звеньев речной сети вниз. Одновременно речные долины служат путями интенсивного перемещения этого материала различными агентами. Воздействие вулканических и поствулканических процессов весьма разнообразное и многоплановое. Естественно, что различается и реакция на это речной сети, и морфология речных долин, и особенности их функционирования, т. е. в каждом случае формируется своеобразный флювиальный рельеф. Собранные нами данные обобщены в таблице, однако они нуждаются в комментариях.

**Эффузивный вулканизм.** Влияние лавовых потоков на речную сеть может быть достаточно многоплановым, и это детально было разобрано нами ранее [1]. Здесь мы хотели остановиться на общих вопросах и вновь полученных материалах. При масштабных излияниях на месте расчлененного эрозионного рельефа формируется лавовое плато, при более локальных — происходит выполнение долин лавовым потоком или их перегораживание. В любом случае весьма важным фактором является строение лав, в частности — наличие в них туннелей-лавоводов иногда значительной протяженности, что делает возможным формирование в пределах потоков эффузивов подлавового и внутривлавового стока. Следы таких явлений достаточно многочисленны — они отмечаются как на равнинных терри-

<sup>2</sup> Вулканические события часто носят комплексный характер, и извержение считается эффузивным или эксплозивным лишь по доминированию того или иного процесса. Так, трещинные излияния лав, например, как правило, в той или иной мере сопровождаются выбросами пирокластического материала, тектоническими просадками и газогидротермальной активностью, а при мощных эксплозиях совсем нередки излияния лав, разрушения вулканических конусов и др. Мы постарались охарактеризовать влияние разных видов активности в отдельности, чтобы показать специфику вклада каждого из них в формирование флювиального рельефа.

<sup>3</sup> Резургентный материал — обломки вулканической постройки.



Рис. 1. Отмостка из обломков лав (зачаточный аллювий) — формирующаяся пойма в среднем течении р. Жом-Болок (Восточный Саян, 2018 г. — здесь и далее, где не отмечено особо, фото автора)

Современное русло реки сформировалось в результате постепенного разрушения бортов и кровли подземных лавовых туннелей потоками воды. Причем сначала происходило образование цепочек проточных (русловых) озер (и такие участки еще сохранились в долине), а только затем хорошо выраженного русла с порогами в местах выхода более прочных лав.

В паводки при подъеме воды на 1–2 м и более прирусловая часть лавового потока (перепады высот которого на отдельных участках достигают 3–5 м) в среднем и нижнем течении реки затапливается, и идет дальнейшее активное разрушение кровли туннелей с формированием новых цепочек уже не русловых, а “пойменных” озер. В межень соединяющие их протоки осушаются, но в озерах по-прежнему наблюдается течение воды, что свидетельствует о сохранении внутрилавового стока в долине и при доминировании поверхностного, сконцентрированного в русле. В протоках, соединяющих эти пойменные озера, формируется отмостка из слабоокатанных (до 1 класса) обломков лав, которые могут рассматриваться как “зачаточный” аллювий (рис. 1).

Поперечный профиль днщ долин, выполненных лавой, обычно выпуклый, но с участками провалов в местах обрушения приповерхностных лавовых туннелей. Новые врезы на поверхности лавовых покровов образуются не только в их краевых частях — на контакте с менее устойчивыми породами, но и в эмбриональных долинах — ориентированных вниз по склонам понижениях между языками лав, а также в трещинах, которые способствуют концентрации подлавового стока [1]. Но в связи с тем, что эрозия в лавах идет медленно, быстрее всего новые русла формируются на месте лавоводов в результате обрушения их кровли.

Продольный профиль рек невыработанный, без характерного прогиба, даже в случае, если лава заполнила уже существовавшую долину [14], часто ступенчатый. При перегораживании водотоков лавовыми плотинами, подпрудные озера, возникающие выше по течению, существуют долго, но при этом, как правило, идет активный дренаж и через плотину, и под ней, как это, например, происходит в Кроноцком озере или в межозерной перемычке кальдеры Ксудач. После разрушения плотины на ее месте сохраняются водопад, пороги или сужение долины.

Водопады в принципе характерны для долин, сформированных в лавах. Вулканическая Исландия, например, насчитывает несколько сотен водопадов, высоты которых достигают почти 200 м [17]. Так на развитие долин (помимо других особенностей территории) влияет литологический фактор: в местах выхода прочных эффузивов попятная и глубинная эрозия реки снижается на порядки. Лавовые покровы становятся местным

ториях, так и в горах (Австралия, Исландия, Гавайи, Камчатка и мн. др. регионы). В некоторых случаях (Исландия, Курильские о-ва) водоток функционирует непосредственно под толщей лавы, заполнившей его долину [1].

На разных участках долины р. Жом-Болок<sup>4</sup> в Восточном Саяне, например, можно наблюдать и вновь сформированное русло в позднеплейстоценовом лавовом потоке, и подлавовый и внутрилавовый сток одновременно. Базальтовые лавы, заполнившие днище этой троговой долины около 13 тыс. л. н. [14–16], отличаются большим количеством лавовых туннелей значительной протяженности, которые активно используют текущие воды: в верхнем течении долины идет подлавовый и внутрилавовый сток по туннелям, поверхностный сток появляется только ниже оз. Бурсуты-Нур.

<sup>4</sup> или Жомболок — на разных топографических картах написание различается.

базисом для вышележащей части бассейна реки. Это обусловлено и прочностью, и структурой эффузивов, и невыработанностью продольного профиля рек в виду их молодости и эндогенной активности территорий. Часто пороги и водопады приурочены к дистальным концам разновозрастных лавовых потоков, к участкам наиболее прочных и менее газонасыщенных лав, труднее поддающихся разрушению.

**Эксплозивный вулканизм** затрагивает наиболее значительные по площади территории. При выбросе пирокластического материала<sup>5</sup>, объем которого может достигать нескольких кубических километров за одно извержение, площадь его распространения измеряется тысячами квадратных километров [18]. Поблизости от центра извержения может сформироваться пирокластическая равнина с мощностью отложений в десятки метров, на удалении — маломощный покров пепла. Нас в первую очередь интересуют участки, где выпадают или переотложение пирокластического материала влияет на ход рельефообразующих процессов. Например, при извержении вулкана Безымянного в 1956—1961 гг. территория, покрытая слоем тефры<sup>6</sup> мощностью до 30—40 см, составила около 500 км<sup>2</sup> [19]. Но при сносе рыхлого вулканогенного материала со склонов и водоразделов в долины слой пирокластики в отрицательных формах рельефа будет более мощным. Так, по наблюдениям австралийского геоморфолога М. Вильямса (устное сообщение), 10—15-сантиметровый слой пепла вулкана Тоба (Суматра), выпавший на водоразделах севера Индии во время извержения 74 тыс. л. н., при смыве в долины водотоков заполнил их на 2—4 м. Такой объем осадочного материала не может не сказаться на морфологии и функционировании эрозионных форм (таблица).

Дальнейшее смещение рыхлого материала вниз по долинам происходит, как правило, в виде вулканических селей — лахаров, в конечной точке которых формируются верообразные конусы выноса. Так, с октября 2010 по май 2011 г. во время многофазного извержения вулкана Мерапи (Индонезия) по его склонам сошло до 240 лахаров (устное сообщение проф. Э. Готье, Франция). Серии последовательных конусов выноса осложняют продольный профиль долин небольшими (первые метры) ступенями. Обилие рыхлого материала в днищах эрозионных форм приводит к тому, что в отдельные периоды там преобладает подземный сток.

Но вулканический материал выпадает не только в виде более или менее равномерного чехла вокруг мест извержения. На склонах вулканов могут формироваться пирокластические потоки<sup>7</sup>, которые со скоростью до 250 км/час [18] спускаются от жерла вулкана вниз по склонам. Площади участков, подвергшихся их воздействию, могут достигать сотни квадратных километров, но часто они концентрируются в долинах рек, дренирующих вулканическую постройку. Иногда формирование таких потоков связано не только с выбросом эруптивного материала, но и с частичным обрушением вулканического конуса, сопровождающим извержение. Попадая в долину, пирокластический поток заполняет ее дно целиком и приобретает выпуклый поперечный профиль, аналогично лавовому. При обильных осадках и таянии снега и льда из материала потоков, также, как и из тефры, выпавшей на склонах, формируются лахары. При большой мощности осадков пирокластика спекается, и могут формироваться более прочные игнимбриты<sup>8</sup>, в т. ч. и долинные [11].

Таким образом, реки, стекающие с вулканов, где доминирует эксплозивная деятельность, вынуждены перемывать большие объемы пирокластического материала, что определяет особые черты их водного режима, транспорта наносов и морфологии русел. С эксплозиями связаны максимальные среднегодовые значения модуля твердого стока на Земле — до 10<sup>3</sup>—10<sup>6</sup> т с км<sup>2</sup> в год [8]. Благодаря малой плотности пород, их высокой по-

<sup>5</sup> Пирокластические отложения формируются в результате эксплозивной деятельности вулканов, при трещинных извержениях и образовании мааров. К ним могут быть также отнесены различные агломератовые и туфовые накопления, отложения пирокластических потоков и, с некоторой долей условности, — игнимбриты.

<sup>6</sup> Собирательный термин для отложений материала, выброшенного в воздух вулканом.

<sup>7</sup> Пирокластические потоки представляют собой смесь раскаленных (нередко более 600—700°С) глыб, пепла и вулканических газов.

<sup>8</sup> Обломочная порода, обладающая признаками как лав, так и пирокластических образований, состоит преимущественно из спекшихся пепловых частиц.

Воздействие вулканических и поствулканических процессов и явлений на морфологию и развитие речных долин

		Виды вулканического и поствулканического воздействия					
Характер флювиального рельефа и особенности речных долин	Вулканические процессы		Вулкано-тектонические явления		Поствулканические процессы		
	эффузивный вулканизм	эксплозивный вулканизм	образование депрессий	возникновение трещин	газогидротермальная деятельность	грязевого вулканизм	
Рисунок эрозионной сети	На склонах вулканов — центробежный, на участках активной разломной тектоники — ортогональный	На склонах вулканов — центробежный, по периферии м. б. дугообразные участки	Центростремительный	Ортогональный	На склонах вулканов — центробежный	На склонах вулканов — центробежный, по периферии вулканов — дугообразные участки	
Плановые очертания долин	На участках активной разломной тектоники — резкие изгибы долин	Иногда четковидное (сужения в местах переторазживания ПП*)	Часто резкие изгибы долин	Резкие, иногда зигзагообразные изгибы долин	Четковидные (расширения в местах наиболее активных проявлений ГД*)	Иногда четковидные (сужения в местах переторазживания потоками СБ*)	
Продольный профиль долин	Обычно ступенчатый — с порогами, водопадами (метры — десятки м); уступы часто совпадают с концами разновозрастных потоков лав	С небольшими перегибами и уступами (1–3 м) в результате формирования серии конусов выноса рыхлого ПМ* вдоль по долине	Уступы (первые метры) и перегибы могут соответствовать границам разновозрастных кальдер	С уступами и водопадами (метры — десятки м)	Ступенчатый, с формированием хемогенных террас-уступов (до 1–3 м) в русле (отложение травертинов, кремнистых туфов, окислов железа и др. на быстринах)	Часто слабовыпуклый (зависит от активности выброса СБ)	
Поперечный профиль долин	При выполнении долины лавами — выпуклое днище, с провалами в местах обрушения туннелей. Каньонообразный профиль на участках активного врезания	При выполнении долины ППМ* — выпуклое днище, в местах формирования КВ* лахаров современное русло может находиться выше окружающей территории. У рек, обрамляющих вулканы, — часто асимметричный	V- и U-образный	Каньонообразный	U- и корытообразный, активные склоновые процессы (оползни, сльвы)	V- и U-образный, у рек, обрамляющих вулканы — часто асимметричный, активные склоновые процессы	

Виды вулканического и поствулканического воздействия						
Характер флювиального рельефа и особенности речных долин	Вулканические процессы		Вулкано-тектонические явления		Поствулканические процессы	
	эффузивный вулканизм	эксплозивный вулканизм	образование депрессий	возникновение трещин	газогидротермальная деятельность	грязевой вулканизм
Террасовый комплекс	Погребенный, при врезании формируются локальные эрозионные террасы в лавах	Погребенный, при врезании формируются серии локальных эрозионных террас	Различается на участках долин в пределах разновозрастных кальдер	На участках развития трещин обычно отсутствует, редко — эрозионные террасы	Локальные оползневые и натечные террасы	Террасы перекрыты шлейфами СБ или выработаны в СБ, локальные оползневые террасы
Характер аллювия	Слабоокаатанный материал эффузивов, “зачаточный” аллювий, мелленая переработка обломочного материала	Обилие пемзы, которая легко оглаживается и окатывается, обладает высокой плавучестью и переносится на значительные расстояния, много горелой древесины. После извержения твердый сток увеличивается в десятки-сотни раз	Обилие пирокластического материала. После извержения твердый сток увеличивается в десятки-сотни раз	Слабоокаатанный материал эффузивов	Сильно измененные обломки пород, обилие тонкого глинистого материала, часто отложения сцементированы, покрыты натечными образованиями. На быстринах идет формирование фестонов, натечных террас, русловых лотков	Значительное участие СБ, но меньше % глины и алевроита — они выносятся при переотложении. После излияний СБ твердый сток увеличивается
Заложение новых врезов	По лавовым туннелям, по трещинам, по “эмбриональным” лавовым долинам, по краям потока или вне его	В долинах — по краям пирокластических потоков, на равнинах — с учетом формирующегося эолового рельефа	По направлению к более молодым и глубоким кальдерам, по трещинам	По трещинам	От мест выхода термальных вод	По трещинам рассыхания сопочной брекции свежих грязевых потоков на склонах вулкана

Характер флювиального рельефа и особенности речных долин	Виды вулканического и поствулканического воздействия					
	Вулканические процессы		Вулкано-тектонические явления		Поствулканические процессы	
	эффузивный вулканизм	эксплозивный вулканизм	образование депрессий	возникновение трещин	газогидротермальная деятельность	грязевой вулканизм
Развитие участка долины выше зоны активного воздействия (при перегораживании долины)	Формируется длительно существующий подпруднный водоем, часто со стоком под и внутри лавовой плотины. При спуске озера на месте плотины остается сужение долины и/или перегиб ее продольного профиля	Формируется подпруднный водоем, который быстро заполняется влекомым ПМ, плотина существует до 1–2 лет (за исключением плотин из спешшегося ПМ (“долинные игнибриты”))	В депрессии — формирование озер, перестройки речной сети. Если перегораживание потоком (покровом) рыхлого ПМ, то формируется эфемерное подпруднное озеро, если игнибритами — более длительно живущие и глубокие водоемы	К трещинам приурочены водопады, озера, резкие повороты долин	Часть оползни формируют кратко живущие подпрудные водоемы, после прорыва на месте плотины остается сужение долины	Формируется подпруднный водоем, но плотина быстро разрушается
Влияние на склоновые и эрозионные процессы	При бронировании склонов и водоразделов — уменьшение сноса обломочного материала в долину	При образовании покровов ПМ — активизация сноса рыхлого ПМ в долину	При образовании покровов спешшегося ПМ — формирование бедлендов в толщах спешшейся пирокластики	Концентрация стока идет по трещинам, эффект зависит от их ориентировки	Активный снос тонкого материала со склонов в долину	Активный снос материала СБ со склонов в долину
Особенности эволюции рельефа	Инверсия рельефа — заполненные лавой долины становятся водоразделами	Рыхлый ПМ легко размывается и постепенно выносится из долины, накапливаясь в депрессиях	На участках развития спешшейся пирокластики формируются бедленды с V-образными врезами и пилообразными гребнями	Зигзагообразное строение долин	Глинистый материал легко размывается и выносится. Редкие случаи сохранности наиболее прочных натечных образований	Редкие случаи сохранности древних грязевых холмов, следов заполнения СБ погребенных долин

\* *Примечание:* ПМ — пирокластический материал, ППМ — поток пирокластического материала, ГГД — газогидротермальная деятельность, СБ — почная брекчия, КВ — конус выноса.

датливости размыву, достаточно большим уклонам долин в верховьях (до 15–30°) и, соответственно, высоким скоростям потоков (1–10 м/с), водотоки даже при малых значениях расходов воды способны переносить большое количество взвешенного материала [19]. Мутность потоков в весовом эквиваленте может составлять  $10^4$  мг/л, а размеры перемешаемых в них частиц при расходе воды всего  $0.1 \text{ м}^3/\text{с}$  достигают 5 см [20]. При этом от 70 до 100% суммарного водного стока в долинах Камчатки, перегруженных пирокластикой, фильтруется в подрусловые горизонты, что приводит к прерывистому характеру поверхностного стока как на протяжении долин, так и во времени<sup>9</sup>. В результате этого и образуются т.н. “сухие” реки. Суточные колебания стока наносов даже вне активизации вулканической активности и без экстремальных осадков составляют на Камчатке десятки тысяч мг/л, что соответствует их 100-кратному изменению. В пределах лахаровых долин наблюдаются и исключительно высокие темпы переотложения материала — до 11.3 т/сут [20].

Изменения водности и стока наносов сопровождаются русловыми переформированиями: осередкованная многоруканность таких рек очень изменчива во времени. Частый сход лахаров вызывает много изменений и в морфологии долин: меняются их поперечный и продольный профили, формируются локальные террасы и др. Днища таких рек, как правило, заняты преимущественно поймой, лишены растительности, иногда с участками мертвого леса, занесенного плохо сортированным вулканическим материалом мощностью 1–3 м (а иногда и более) с включением достаточно крупных валунов и глыб, которые могут залегать в виде отмокши поверх тонкого материала. Отложения в днище плохо сортированы и промыты, их состав чрезвычайно изменчив по простиранию: несортированный лахаровый материал чередуется с линзами лучше промытого аллювиального (рис. 2). Из-за обилия выносимого селями рыхлого материала центральная часть днища становится выпуклой, и русло реки смещается к одной из сторон или же водоток разбивается на рукава, прижимающиеся к противоположным бортам. Изменяется и продольный профиль реки: в тех местах, где останавливаются языки лахаров, наблюдается выполаживание тальвега или даже слабый обратный уклон, увеличивается многоруканность, образуются небольшие озерки и заболоченные участки. По бортам долины формируются локальные террасы, отмечаются “заплески” лахарового материала на залесенные низкие террасы, иногда в виде достаточно протяженных “прочесов”. Отложения террас также представляют собой переслаивание аллювиальных и лахаровых отложений, иногда перемытых.

Эрозия пирокластического чехла идет чрезвычайно быстро — на отдельных участках она может измеряться метрами в год. Например, одна из долин на влк. Ключевской углубилась за год на 5–6 м [9]. Обобщенные данные по различным вулканическим регионам мира, свидетельствуют, что средние показатели ее скорости на склонах и водоразделах в первые два года после выпадения тefры составляют 25–100 мм/год, но в течение 5 лет после извержения она снижается до 1–5 мм/год. При этом величина модуля твердого стока в водосборных бассейнах может оставаться высокой ( $1.1\text{--}2.7 \times 10^5 \text{ м}^3/\text{км}^2$ ) в тече-



Рис. 2. Днище долины р. Кабеку: чередование пирокластики, переотложенной лахаром (Л) и перемытой рекой (А). При перемытии пирокластики из нее выносятся наиболее тонкая глинистая составляющая, поэтому аллювий более сыпуч и, в отличие от отложений лахаров, практически не оставляет следов на коре деревьев (Камчатка, 2013 г.)

<sup>9</sup> По данным камчатских гидрогеологов (устное сообщение И. В. Мелекесцева), вода фильтруется и на большие глубины — в десятки и даже сотни метров, где формируются подземные бассейны пресной воды.

ние десятилетий [8]. В подпрудных водоемах активно идет аккумуляция, они быстро заполняются сносимой пирокластикой.

Конусы выноса лахаров нередко приводят к отклонению русел рек, в которые впадают лахаровые водотоки. Это хорошо видно на примере долины р. Камчатка. Иногда лахары или пирокластические потоки полностью перегораживают долины, но возникающие при этом подпрудные озера существуют недолго: месяцы — первые годы, т. к. плотины из рыхлого материала быстро разрушаются. Дамбы из спекшейся пирокластики разрушаются несколько медленнее, а сложенные игнимбритами — еще более прочные. В последнем случае подпрудные озера в долинах могут достигать значительной глубины (до 100 м) и существовать длительное время [21].

Так как сток в долинах сухих рек сезонный, а днище, как правило, перекрыто тонкой пирокластикой, то там активно развиваются эоловые процессы. Подвержен эоловой переработке и пирокластический чехол на склонах и водоразделах, что обуславливает своеобразие заложения там эрозионной сети: сток концентрируется преимущественно в междюнных понижениях, где и формируются новые промоины, при смещении эоловых форм — смещаются и ложбины стока [2].

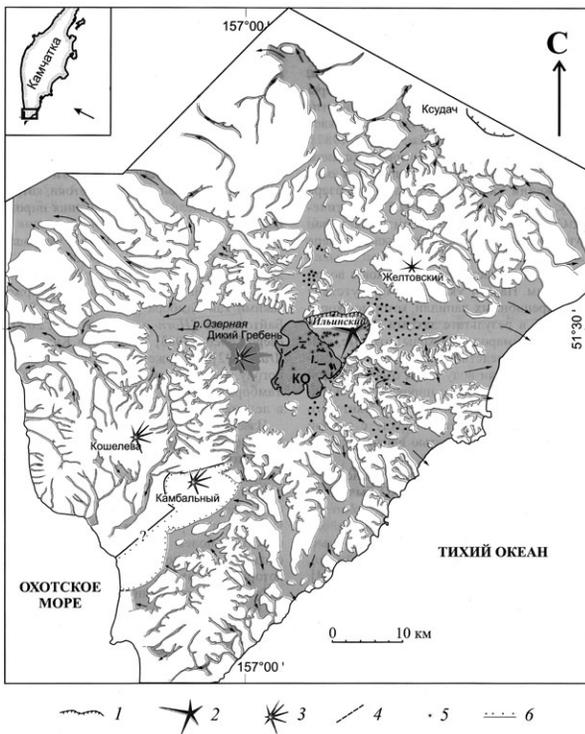


Рис. 3. Реконструкция пирокластических потоков извержения Курильского озера (Камчатка) 8500 л. н., заполнивших речные долины (по [22])

Серая заливка — пирокластические потоки, стрелки — направления их движения, черные точки — распространение темно-серого туфа, КО — Курильское озеро.

1 — бровки кальдер, 2 — современный вулкан Ильинский, 3 — другие посткальдерные вулканы, 4 — подводные разломы, ограничивающие кальдеру Курильского озера, 5 — моногенные конусы и лавовые купола, 6 — граница обломочной лавины вулкана Камбального, перекрывающей пирокластические потоки извержения Курильского озера

### Особенности воздействия вулcano-тектонических явлений на флювиальный рельеф

Вулcano-тектонические явления достаточно разнообразны, но мы остановимся на двух основных их типах: образовании *депрессий* и *трещин* (таблица), т. к. возникновение этих отрицательных форм рельефа часто приводит к перехвату речного стока и к масштабным перестройкам речной сети, в некоторых случаях реки могут менять и направление своего течения. Просадочные вулканические депрессии и кальдеры обрушения концентрируют сток и нередко заняты озерами: это оз. Курильское и озерная система Ксудач на Камчатке, озера Горячее и Кипящее в кальдере Головина на о-ве Кунашир, оз. Таупо в Новой Зеландии, оз. Атитлан в Гватемале и мн. др.

Исследования в окрестностях оз. Курильского, проведенные И. В. Мелекесцевым и В. В. Пономаревым с коллегами [22], показали, что после кальдерообразующего извержения 8500 л. н. прилежащие речные долины были целиком заполнены пирокластическими потоками, что хорошо видно на приведенной реконструкции (рис. 3).

По оценке специалистов всего было выброшено 140–170 км<sup>3</sup> пирокластики. По большинству долин сошли также водно-пемзовые потоки, которые вынесли пемзу за пределы распространения пирокластических потоков. Впоследствии густая сеть эрозионных форм на многих участках сформировала в толще спекшейся пирокластики бедленды (на некоторых участках это густая сеть врезов глубиной до 30–40 м — см. рис. 4). В кальдерном комплексе Ксудач, включающем 5 разновозрастных кальдер, современная речная сеть состоит из разновозрастных фрагментов. После каждого извержения реки меняли свое направление согласно вновь сформированному рельефу — ориентируясь на возникшую кальдеру. В результате современные долины основных внутрикальдерных водотоков имеют изломанную в плане форму, обусловленную сложной историей вулcano-тектонической активности [3, 23], а на их продольных профилях местами сохранились перегибы, соответствующие границам разновозрастных депрессий.

Влияют на перестройки и конфигурацию речной сети и многочисленные трещины, образование которых происходит во время крупных извержений и может сопровождаться некоторым растяжением или, напротив, сжатием, а также смещением по вертикали. На склонах вулкана Ключевского ширина таких трещин достигает нескольких десятков метров, глубина 10–15 м, протяженность — до первых км. Несколько юго-западнее него поверхность вулканических плато Удинского и Хапичинского долов разбита многочисленными уступами высотой до 100–150 м и протяженностью до десятков км, здесь же встречаются микрограбены и микрогорсты шириной до 1–1.5 км и глубиной до нескольких десятков метров [9]. На отдельных участках трещины и микрограбены используются водотоками.

Одной из самых протяженных (75 км) и хорошо выраженных в рельефе является трещина Эльдгья в Исландии, сформировавшаяся в 934 г. [24]. В настоящее время трещина преобразовалась в протяженный ров — тектоническую долину, которая на 8-километровом участке достигает глубины 270 м при ширине до 600 м (рис. 5). Этот вулканический ров перехватывает и концентрирует сток прилежащей территории. Река Ниидри Офера падает по его западной стенке двухступенчатым водопадом и далее использует участок трещины в качестве своей долины.

Наличие трещин имеет большое значение как для морфологии долин и специфики водопадов, так и для ориентировки водотоков или их участков. В частности, с системой трещин, возникших еще 150–180 млн л. н. на стадии формирования базальтового плато, связано формирование зигзагообразного каньона р. Замбези ниже водопада Виктория (рис. 6) глубиной до 250 м и протяженностью до 200 км [25, 26].

На склонах вулканов при или после извержения нередко формируются обломочные лавины [27, 28]. Их образованию, помимо сейсмических толчков, способствует сочетание ряда факторов: присутствие толщ пирокластических или гидротермально измененных слабостойких пород, выпадение обильных осадков. После схода обломочных лавин



Рис. 4. Густое эрозионное расчленения отложенных пирокластических потоков между вулканами Ильинский и Желтовский, на горизонте — Курильское озеро (Камчатка, 2016 г.)



Рис. 5. Перехваты речных долин тектонической трещиной Эльдгья (Исландия), на переднем плане — водопад р. Ниидри Офера (фото Google Earth)

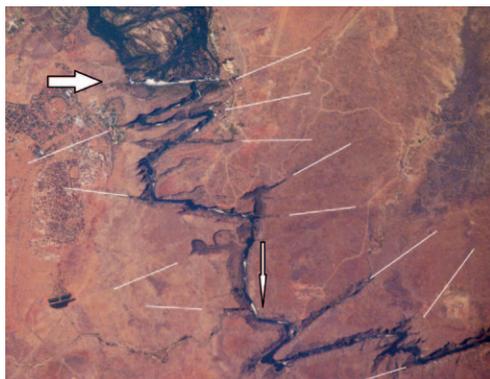


Рис. 6. Плановые очертания каньона р. Замбези (фото Google Earth). Тонкая стрелка — направление течения реки, жирная стрелка — водопад Виктория, белые линии — направления трещин в базальтах

званной водой характерно формирование русловых лотков, натечных террас, фестонов и других специфических форм как непосредственно в самом русле, так и в днище долины. В русле это происходит, как правило, на участках с быстрым течением, где идет насыщение воды кислородом и в результате химических реакций происходит переход растворимых соединений в нерастворимую форму и выпадение их в осадок. Подобное явление может наблюдаться и на геохимических барьерах: при слиянии водотоков или их впадении в водоемы с другим химическим составом воды. Все это приводит к цементации аллювиальных отложений, к формированию плотных корок в русле и на поверхности поймы или террас. В зависимости от состава данные образования могут быть как достаточно стойкими во времени (например, окислы и гидроокислы железа), так и довольно быстро разрушаться при обезвоживании (травертины, кремнистые туфы, гейзериты).

Но этим воздействие не ограничивается. Хорошо известен оползень, перегородивший долину р. Гейзерной в 2007 г. (рис. 7). Оползень сформировался, вероятно, при воздействии сейсмических толчков небольшой силы, в ослабленной зоне, где в результате глубокой гидротермальной проработки коренные породы изменены до глин и значительно обводнены [29–31]. Подобные явления в долинах, проходящих по гидротермальным зонам весьма часты: оползневые тела на их бортах мы можем наблюдать



Рис. 7. Оползень 2007 г. на левом борту р. Гейзерной (фото В. Л. Леонова, 2008)

также могут происходить междолинные перестройки речной сети и формироваться подпрудные водоемы.

### Поствулканические процессы и флювиальный рельеф

**Газогидротермальная деятельность** нередко сопровождает вулканическую, но также может сохраняться и после ее затухания. Водотоки, формирующиеся на участках гидротермальной активности, подвергаются весьма специфическому химическому и термальному воздействию, в результате чего их воды становятся высокоминерализованными. По нашим наблюдениям в различных вулканических регионах, они иногда напоминают реки и ручьи карстовых районов. Для водотоков гидротермальных зон с высокоминерализованной водой характерно формирование русловых лотков, натечных террас, фестонов и других специфических форм как непосредственно в самом русле, так и в днище долины.

В русле это происходит, как правило, на участках с быстрым течением, где идет насыщение воды кислородом и в результате химических реакций происходит переход растворимых соединений в нерастворимую форму и выпадение их в осадок. Подобное явление может наблюдаться и на геохимических барьерах: при слиянии водотоков или их впадении в водоемы с другим химическим составом воды. Все это приводит к цементации аллювиальных отложений, к формированию плотных корок в русле и на поверхности поймы или террас. В зависимости от состава данные образования могут быть как достаточно стойкими во времени (например, окислы и гидроокислы железа), так и довольно быстро разрушаться при обезвоживании (травертины, кремнистые туфы, гейзериты).

Но этим воздействие не ограничивается. Хорошо известен оползень, перегородивший долину р. Гейзерной в 2007 г. (рис. 7). Оползень сформировался, вероятно, при воздействии сейсмических толчков небольшой силы, в ослабленной зоне, где в результате глубокой гидротермальной проработки коренные породы изменены до глин и значительно обводнены [29–31]. Подобные явления в долинах, проходящих по гидротермальным зонам весьма часты: оползневые тела на их бортах мы можем наблюдать

практически повсеместно. Не всегда они порождают сели, но часто формируют локальные оползневые террасы — прекрасный пример тому можно наблюдать в долине р. Кипящая речка (о-в Итуруп), в бассейне р. Фальшивой (Камчатка) и мн. др. (рис. 8.). Собственно и в самой долине Гейзерной в 2014 и 2017 гг. выше по течению реки сошли еще 2 оползня. Оползень 2014 г. породил сель, который частично разрушил плотину 2007 г., в результате чего озеро оказалось спущенным [32]. В.Л. Леонов в долине р. Сестренка (также правого притока р. Шумной, как и р. Гейзерная) обнаружил следы более древнего мощного оползня (рис. 9), запрудившего эту долину в начале голоце-

на; в результате там образовался водоем примерно такого же размера, как и озеро, сформировавшееся в 2007 г. в долине р. Гейзерной [30].

Хороший пример эрозионных форм зон гидротермальной активности являются собой речные долины ЮЗ склона вулкана Баранского (о-в Итуруп, Курильские о-ва), т. к. практически в каждой из них отмечается по 1–2 и более зон газогидротермальных и гидротермальных проявлений. Для таких участков характерно расширение долины, которая в целом приобретает четковидное строение (таблица), что обусловлено активизацией склоновых процессов (оплывание, оползание) с формированием иногда достаточно крупных оползневых террас. Похожую морфологию могут иметь и натечные террасы, формирующиеся в местах выхода сильно минерализованных термальных вод. При затухании гидротермальной деятельности и зарастании таких оползневых тел и натечных образований они могут быть приняты за фрагменты обычных речных террас.

**Грязевой вулканизм** характерен как для вулканических регионов, так и для авулканических. В какой-то мере он является аналогом вулканизма магматического, однако, грязевые вулканы извергают на дневную поверхность в разной степени разжиженные осадочные породы — сопочную брекчию. В отдельных случаях грязевой вулканизм может быть составной частью вулканизма магматического — “кипение” грязевых масс наблюдается в кратерах вулканов на о-ве Уайт (Новая Зеландия), Сольфатара (Флегрейские поля, Италия); часто он проявляется на поствулканической стадии, сопровождается газогидротермальную деятельность. Но даже в геологическом плане грязевой вулканизм изучен наиболее слабо<sup>10</sup>; но напрямую нас эти вопросы не касаются.

И. С. Новиков [36], изучая кайнозойский грязевой вулканизм в Израиле, установил, что сопочная брекчия крупных грязевых вулканов также может выполнять и перекрывать речные долины, в т. ч. вызывая трансформацию речной сети. На территории России наиболее хорошо исследованы грязевые вулканы Крыма и Тамани, но они отличаются относительно небольшими



Рис. 8. Оползневая терраса, на которой находится группа людей в долине правого притока р. Фальшивой (подножие влк. Мутновский, 2016 г.)

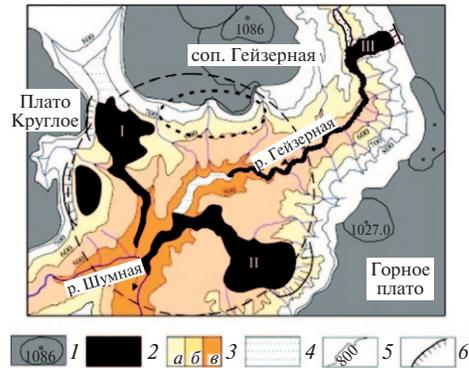


Рис. 9. Схема оползней, сформировавшихся в нижнем течении рек Сестренка и Гейзерная (по [30] с дополнениями)

1 — высокие плато и экструзии, формирующие борта наиболее расчлененного участка; 2 — оползни (I — на р. Сестренка, II — на р. Гейзерная 2007 г., III — там же 2014 г.); 3 — участки с глубиной вреза: а — 200–300 м, б — 300–400 м, в — 400–500 м; 4 — подпрудные озера; 5 — изогипсы; б — стенки отрыва оползней. Пунктирный круг — место, где произошло наиболее глубокое врезание рек в толщу отложений, заполняющих Узон-Гейзерную депрессию. Пунктирный овал — место, где по [30] возможно формирование оползней в будущем

<sup>10</sup> В научной литературе существуют дискуссии [33–35] по поводу природы этого явления и классификации его отдельных проявлений, но недостаточная изученность не позволяет пока решить данные вопросы однозначно.



*Рис. 10.* Южно-Сахалинский грязевой вулкан: на переднем плане грязевой язык излияния 2001 г., спускающийся в долину р. Алат, с формирующейся на нем эрозионной сетью. Светлые изометричные пятна — современные поля грифонов, на заднем плане (белая стрелка) — долина притока р. Путы, периодически заполнявшаяся сопочной брекчией. Пунктиром показано положение современного водораздела между бассейном Путы и Алата. Фото с квадрокоптера Р. В. Жаркова (2018 г.)

с постепенным формированием дугообразного в плане рисунка долины.

В долинах водотоков, стекающих с ЮСГВ, сохранились следы периодического их выполнения сопочной брекчией, что привело к погребению аллювиальных отложений. На склонах этих долин преобладают процессы оползания сопочной брекчий и формируются небольшие оползневые тела. В результате выбросов грязевого вулкана и в зависимости от ориентировки потоков периодически смещаются междолинные и межбассейновые (Алат — Пута) водоразделы. Первичная эрозионная сеть на склонах ЮСГВ закладывается по трещинам, возникающим при высыхании брекчий, которые концентрируют сток и постепенно формируют систему ложбин временных водотоков (рис. 10). После излияния сопочной брекчий твердый сток в прилежащих к вулкану долинах увеличивается, а также происходит трансформация аллювия водотоков — обогащение его тонким глинистым материалом. По периферии Пугачевского грязевого вулкана реки имеют хорошо выраженный дугообразный рисунок [38, 39], там также есть следы смещения междолинных водоразделов.

## Выводы

Проведенные исследования в пределах различных вулканических регионов позволяют обосновать ряд закономерностей экзогенного морфогенеза, обусловленных разноплановым эндогенным воздействием на разнопорядковую долинную сеть (таблица). Каждый вид вулканической деятельности по-своему влияет на морфологию долин, их продольный и поперечный профили, характер аллювия, террасовый комплекс и др., в результате чего долины рек, оказавшиеся под воздействием разных типов эндогенной активности, приобретают специфические черты, отличаются особенностями своего заложения, характером перестроек разнопорядковой речной сети, эволюцией флювиального рельефа.

Выявлены особенности взаимодействия водотоков и покровов вулканического материала различного состава. В частности, установлено, что в пределах потоков эффузивов новые русла могут формироваться не только за счет попятной эрозии, но и в результа-

размерами. Крупные грязевые вулканы — Южно-Сахалинский (ЮСГВ) и Пугачевский — изучены геологами на о-ве Сахалин [37]. В непосредственной близости от Южно-Сахалинского вулкана находятся речные бассейны Путы и Алата (притоков р. Сусуи), на примере которых можно проследить влияние грязевого вулканизма на развитие речных долин. Здесь продукты грязевулканической деятельности (потоки сопочной брекчий) периодически попадают непосредственно в долины водотоков, как дренирующих склоны вулкана, так и опоясывающих его подножие. В первом случае они заполняют врезы, а во втором — перегораживают, формируя временные подпрудные озера (таблица). Следы такого явления, произошедшего зимой-весной 2001 г. в долине р. Алат, еще хорошо видны в рельефе. Террасы на обращенном к вулкану борту долины реки перекрываются отложениями потоков сопочной брекчий, в результате чего они трансформируются в пологонаклонные поверхности. В итоге отмечается смещение русла р. Алат в сторону от вулкана

те обрушения кровли приповерхностных лавоводов, по которым идет активный подлавовый сток. На участках влияния эксплозивной деятельности в эрозионных формах аккумулируется преимущественно рыхлый вулканический материал; для таких территорий характерны высокая скорость эрозии и большой объем твердого стока. Активная вулканотектоническая деятельность способна резко менять плановое положение и направление течения водотоков, в результате чего речные долины могут состоять из разновозрастных фрагментов. В долинах гидротермальных зон активно развиваются склоновые процессы, что является причиной формирования в них не только натечных террас, но и многочисленных оползневых. Грязевулканические процессы периодически приводят к выполнению долин сопочной брекчией, что сказывается как на морфологии последних, так и на составе аллювия водотоков. Для всех рек вулканических регионов характерно периодическое формирование подпрудных водоемов.

**Благодарности.** Статья подготовлена по данным исследований при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-05-00967), синтез материалов для таблицы проводился в рамках темы ГЗ ИГ РАН (№ 0148-2019-0005).

**Acknowledgment.** The article was prepared according to the research data with the financial support of the RFBR (Project No. 18-05-00967); the synthesis of materials for the table was carried out as a part of the Scientific Research Plan of the IG RAS (No. 0148-2019-0005).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лебедева Е. В.* Влияние лавовых потоков на строение долин и развитие речной сети // Геоморфология. 2016. № 3. С. 78-91.
2. *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.
3. *Лебедева Е. В.* Кальдера вулкана Ксудач (Камчатка) современные процессы рельефообразования и особенности строения долинной сети // Геоморфология. 2017. № 3. С. 60-75.
4. *Шукин И. С.* Общая геоморфология. Т. 2. М.: Изд-во МГУ, 1964. 562 с.
5. *Landscapes and landforms of Ethiopia.* World Geomorphological Landscapes / Ed. P. Billi. Springer Science+Busin. Media Dordrecht, 2015. 406 p.
6. *Tilling R. I.* Volcanism and associated hazards: the Andean perspective // *Advances in Geosciences.* 2009. No. 22. P. 125-137.
7. *Черноморец С. С., Сейнова И. Б.* Селевые потоки на вулканах. Уч. пособие. М.: УНЦ ДО, 2010. 72 с.
8. *Thouret J.-C.* Volcanic hazards and risks: a geomorphological perspective // *Geomorphological hazards and disaster prevention.* N.-Y.: Cambridge Univ. Press, 2010. P. 13-32.
9. *Мелекесцев И. В., Краевая Т. С., Брайцева О. А.* Рельеф и отложения молодых вулканических районов Камчатки. М.: Наука, 1970. 104 с.
10. *Мелекесцев И. В.* Вулканизм и рельефообразование. М.: Наука, 1980. 212 с.
11. *Краевая Т. С.* Генетические типы плейстоцен-голоценовых и современных грубообломочных образований Эльбруса // *Вулканология и сейсмология.* 1985. № 6. С. 20-32.
12. *Лебедева Е. В.* Цепочки катастрофических геоморфологических процессов в речных долинах вулканических регионов // *Геоморфология.* 2018. № 4. С. 36-52.
13. *Geomorphological hazards and disaster prevention.* Ed. Alcántara-Ayala I., Goudie A. Cambridge: University Press. 2010. 291 p.
14. *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.
15. *Аржанников С. Г., Иванов А. В., Аржанникова А. В., Демонтерова Е. И.* Долина вулканов в Восточном Саяне // *Планета.* 2014. № 5/6. С. 67-83.
16. *Аржанников С. Г., Иванов А. В., Аржанникова А. В., Демонтерова Е. И., Жоливе М., Воронин В. И., Буянтуев В. А., Осколков В. А.* Возраст жомболокского лавового поля (Восточный Саян) по дендрохронологическим и радиоуглеродным данным // *Геология и геофизика.* 2017. Т. 58. № 1. С. 27-47.
17. *Gudmundsson A. T.* Living Earth — Outline of the geology of Iceland. Reykjavik: Forlagid, 2013. 408 p.

18. Пономарева В. В. Крупнейшие эксплозивные вулканические извержения и применение их тейфры для датирования и корреляции форм рельефа и отложений. Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. М.: ИГ РАН, 2010. 48 с.
19. Мелекесцев И. В. Особенности некоторых рельефообразующих процессов молодых вулканических районов (на примере Камчатки) // Вопр. географии Камчатки. 1967. Вып. 5. С. 80-87.
20. Чалов С. Р., Дыпленков А. С. Сток наносов малых рек районов современного вулканизма (р. Сухая Елизовская, Камчатка) // Геоморфология. 2017. № 1. С. 104-116.
21. 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. No. 9/10. P. 1233-1247.
22. Пономарева В. В., Мелекесцев И. В., Базанова Л. И., Биндеман И. Н., Леонов В. Л., Сулержицкий Л. Д. Вулканические катастрофы на Камчатке в среднем плейстоцене — голоцене // Экстремальные природные явления и катастрофы. Т. 1. Оценка и пути снижения негативных последствий экстремальных природных явлений. М.: ИФЗ РАН, 2010. С. 219-238.
23. Лебедева Е. В. Озера кальдерного комплекса Ксудач (Камчатка): береговые процессы и колебания уровня // Геоморфология. 2017. № 4. С. 35-49.
24. Guttormsson H. Vatnajokull National Park — a guidebook. Vinir Vatnajokuls. 2011. 129 p.
25. King L. C. South African Scenery. Edinburg and London: Oliver&Boyd, 1963. 308 p.
26. Moore A. E., Cotterill F. P. D., Broderick T., and Plowes D. "Landscape evolution in Zimbabwe from the Permian to present, with implications for kimberlite prospecting" (PDF). South African Journal of Geology. Geological Society of South Africa. 2009. 112:82. doi:10.2113/gssaj.112.1.65
27. Новоа Херес Х. Э. Массовые движения грунта на склонах и их влияние на морфогенез западных Анд (Чили) // Геоморфология. 2013. № 2. С. 81-96.
28. 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.
29. Кузнецко Ю. А., Салтыков В. А., Сеницын В. И. Сейсмические наблюдения в Долине Гейзеров // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. Вып. 10. № 2. С. 171-172.
30. Леонов В. Л. Геологические предпосылки и возможность прогноза оползня, произошедшего 3 июня 2007 г. в Долине гейзеров, Камчатка // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России / I регион. научно-техн. конф. 2007. С. 19-27.
31. 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.
32. Атлас долины реки Гейзерной в Кроноцком заповеднике / Ред. Завадская А. В. М.: КРАСАНД, 2017. 88 с.
33. Mazzini A. and Etiope G. Mud volcanism: An updated review // Earth-Science Reviews. 2017. Vol. 168. P. 81-112.
34. Procesi V., Ciotoli G., Mazzini A., and Etiope G. Sediment-hosted geothermal systems: review and first global mapping. Geophysical Research Abstracts. EGU General Assembly 2019. Vol. 21. EGU2019-2325.
35. Еришов В. В., Никитенко О. А., Перстнева Ю. А., Бондаренко Д. Д., Устюгов Г. В. К вопросу о геохимических особенностях грязевых вулканов и осадочно-гидротермальных систем // Геодинамические процессы и природные катастрофы / Тез. III Всерос. науч. конф. с междунар. участием, г. Южно-Сахалинск, 27-31 мая 2019 г. Ю-Сахалинск: ИМГиГ, 2019. С. 114.
36. Новиков И. С. Древние грязевулканические формы рельефа южного Леванта // Геоморфология. 2011. № 2. С. 90-102.
37. Мельников О. А., Еришов В. В. Грязевой (газоводолитокластитовый) вулканизм острова Сахалин: история, результаты и перспективы исследований // Вестн. ДВО РАН. 2010. № 6. С. 87-Александров С. М. Остров Сахалин. М.: Наука, 1984. 184 с.
38. Мишурицкий Д. В., Еришов В. В., Жарков Р. В., Козлов Д. Н., Копанина А. В., Лебедева Е. В., Абдуллаева И. В., Власова И. И., Михалев Д. В. Геолого-геоморфологические и ландшафтно-экологические особенности Пугачевского грязевого вулкана как основа для организации и информационного сопровождения туристического маршрута // Геосистемы переходных зон. 2018. Т. 2. № 4. С. 398-408.

## REFERENCES

1. Lebedeva E. V. *Vliyaniye lavovykh potokov na stroenie dolin i razvitiye rechnoi seti.* (The influence of lava flows on the structure of valleys and development of the river network). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2016. No. 3. P. 78-91. (in Russ.)

2. Lebedeva E. V. *Vliyaniye vybrosov piroklasticheskogo materiala na morfologiyu dolin i razvitiye rechnoi seti (na primere vulkanov Severnoi gruppy, Kamchatka)* (The influence of pyroclastic emission on valley morphology and river network development (the case study of the volcanoes of the Northern group, Kamchatka)). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2016. No. 4. P. 56-69. (in Russ.)
3. Lebedeva E. V. *Kal'dera vulkana Ksudach (Kamchatka) sovremennyye processy rel'efoobrazovaniya i osobennosti stroeniya dolinnoi seti* (Caldera Ksudach (Kamchatka): modern geomorphological processes and features of the river network structure). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2017. No. 3. P. 60-75. (in Russ.)
4. Shchukin I. S. *Obshchaya geomorfologiya* (General geomorphology). Vol. 2. M.: Izd-vo MGU, 1964. 562 p.
5. *Landscapes and landforms of Ethiopia*. World Geomorphological Landscapes. Ed. P. Billi. Springer Science+Busin. Media Dordrecht. 2015. 406 p.
6. Tilling R. I. Volcanism and associated hazards: the Andean perspective. *Advances in Geosciences*. 2009. No. 22. P. 125-137.
7. Chernomorets S. S. and Seynova I. B. *Selevye potoki na vulkanakh*. (Debris flows on volcanoes). M.: UNC DO, 2010. 72 p.
8. Thouret J.-C. Volcanic hazards and risks: a geomorphological perspective. *Geomorphological hazards and disaster prevention*. N.-Y.: Cambridge Univ. Press, 2010. P. 13-32.
9. Melekestsev I. V., Kraevaya T. S., and Braytseva O. A. *Rel'yef i otlozheniya molodykh vulkanicheskikh rayonov Kamchatki* (Relief and sediments of the young volcanic regions of Kamchatka). M.: Nauka, 1970. 104 p.
10. Melekestsev I. V. *Vulkanizm i rel'yefoobrazovaniye* (Volcanism and Relief formation). M.: Nauka, 1980. 212 p.
11. Kraevaya T. S. *Geneticheskie tipy pleistocen-golocenovykh i sovremennykh grubooblomochnykh obrazovaniy El'brusa* (Genetic types of the Pleistocene-Holocene and modern coarse clastic formations of Elbrus). *Vulkanologiya i seismologiya*. 1985. No. 6. P. 20-32. (in Russ.)
12. Lebedeva E. V. *Tsepochki katastroficheskikh geomorfologicheskikh processov v rechnykh dolinakh vulkanicheskikh rayonov* (Sequences of catastrophic geomorphological processes in the river valleys of volcanic regions). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2018. No. 4. P. 36-52. (in Russ.)
13. *Geomorphological hazards and disaster prevention*. Ed. Alcántara-Ayala I., Goudie A. Cambridge: University Press. 2010. 291 p.
14. Ivanov A. V., Arzhannikov S. G., Demonterova E. I., Arzhannikova A. V., and Orlova L. A. Jombolok 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.
15. Arzhannikov S. G., Ivanov A. V., Arzhannikova A. V., and Demonterova E. I. *Dolina vulkanov v Vostochnom Sayane* (Valley of volcanoes in the East Sayan Mts.). *Planeta*. 2014. No. 5/6. P. 67-83. (in Russ.)
16. Arzhannikov S. G., Ivanov A. V., Arzhannikova A. V., Demonterova E. I., Jolivet M., Voronin V. I., Buyantuev V. A., and Oskolkov V. A. *Vozrast zhombolokskogo lavovogo polya (Vostochnyi Sayan) po dendrokronologicheskim i radiouglerodnym dannym*. (Age of the Jombolok lava field (East Sayan Mts.): evidence from dendrochronology and radiocarbon dating). *Geologiya i geofizika*. 2017. Vol. 58. No. 1. P. 20-36. (in Russ.)
17. Gudmundsson A. T. *Living Earth — Outline of the geology of Iceland*. Reykjavik. Forlagid, 2013. 408 p.
18. Ponomareva V. V. *Krupneishie eksplozivnye vulkanicheskie izverzheniya i primeneniye ikh tefry dlya datirovaniya i korrelyatsii form rel'efa i otlozhenii* (The largest explosive volcanic eruptions and the use of their tephra for dating and correlation of landforms and sediments). Abstract of Ph. D. thesis. M.: IG RAN, 2010. 50 p.
19. Melekestsev I. V. *Osobennosti nekotorykh rel'efoobrazuyushchikh processov molodykh vulkanicheskikh rayonov (na primere Kamchatki)*. (The features of some geomorphological processes of young volcanic areas (evidence from Kamchatka)) *Vopr. geografii Kamchatki*. Petropavlovsk-Kamchatsky: Dalnevostochnoe Book Publishers, 1967. No. 5. P. 80-87. (in Russ.)
20. Chalov S. R. and Tsyplenkov A. S. *Stok nanosov malyykh rek raionov sovremennogo vulkanizma (r. Sukhaya Elizovskaya, Kamchatka)* (Sediment yield of small rivers in the areas of active volcanism (River Sukhaya Elizovskaya, Kamchatka)). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2017. No. 1. P. 104-116. (in Russ.)
21. 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. No. 9/10. P. 1233-1247.
22. Ponomareva V. V., Melekestsev I. V., Bazanova L. B., Bindeman I. N., Leonov V. L., and Sulerzhitskii L. D. *Vulkanicheskie katastrofy na Kamchatke v srednem pleistocene — golocene. V: Ekstremal'nye prirodnye yavleniya i katastrofy. T. 1. Otsenka i puti snizheniya negativnykh posledstviy ekstremal'nykh*

- prirodnnykh yavlenii* (Volcanic disasters of Kamchatka in the Middle Pleistocene-Holocene. In: Extreme natural phenomena and disasters. Vol. 1. Assessment and ways to reduce the negative effects of extreme natural phenomena). M.: IFZ RAN, 2010. P. 219-238 (in Russ.)
23. Lebedeva E. V. *Ozera kal'dernogo kompleksa Ksudach (Kamchatka): beregovoye processy i kolebaniya urovnya* (Lakes of caldera Ksudach (Kamchatka): coastal processes and level fluctuations. *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2017. No. 4. P. 35-49. (in Russ.)
  24. Guttormsson H. Vatnajökull National Park — a guidebook. Vinir Vatnajökuls, 2011. 129 p.
  25. King L. C. *South African Scenery*. Edinburg and London: Oliver&Boyd, 1963. 308 p.
  26. Moore A. E., Cotterill F. P. D., Broderick T., and Plowes D. Landscape evolution in Zimbabwe from the Permian to present, with implications for kimberlite prospecting. *South African Journal of Geology. Geological Society of South Africa*. 2009. 112: 82.
  27. Novoa Jerez J. E. *Massovye dvizheniya grunta na sklonakh i ikh vliyanie na morfogenez zapadnykh And (Chili)* (Mass substrate movements on slopes and their influence on the morphogenesis of the Western Andes (Chile)). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2013. No. 2. P. 81-96. (in Russ.)
  28. 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.
  29. Kugayenko Yu. A., Saltykov V. A., and Sinitsyn V. I. *Seismicheskie nablyudeniya v Doline geizerov* (Seismic observations in the Valley of Geysers). *Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle*. 2007. Vol. 10. No. 2. P. 171-172. (in Russ.)
  30. Leonov V. L. *Geologicheskie predposylki i vozmozhnost' prognoza opolznya, proizoshedshego 3 iyunya 2007 g. v Doline geizerov, Kamchatka* (Geological preconditions and the possibility of forecasting a landslide that took place on June 3, 2007 in the Valley of Geysers, Kamchatka). *Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa Dal'nego Vostoka Rossii*. The first regional scientific and technical conference. 2007. P. 19-27. (in Russ.)
  31. Peregina T. K., Delemen I. F., Droznin V. A., Kalacheva E. G., Chirkov S. A., Melekestsev I. V., Dvigalo V. N., Leonov V. L., and Seliverstov N. I. *Kamchatskaya Dolina geizerov posle katastrofy 3 iyunya 2007 g.* (Kamchatka Valley of Geysers after the disaster took place on 3 June 2007). *Vestnik DVO RAN*. 2008. No. 1. P. 33-44. (in Russ.)
  32. *Atlas doliny reki Geizernoi v Kronotskom zapovednike* (Atlas of the River Geysernaya valley in Kronotskiy Reserve). M.: KRASAND, 2017. 88 p.
  33. Mazzini A. and Etiope G. Mud volcanism: An updated review. *Earth-Science Reviews*. 2017. Vol. 168. P. 81-112.
  34. Procesi V., Ciotoli G., Mazzini A., and Etiope G. Sediment-hosted geothermal systems: review and first global mapping. *Geophysical Research Abstracts*. EGU General Assembly 2019. Vol. 21. EGU 2019-2325.
  35. Ershov V. V., Nikitenko O. A., Perstneva Yu. A., Bondarenko D. D., and Ustyugov G. V. *K voprosu o geokhimicheskikh osobennostyakh gryazevykh vulkanov i osadochno-gidrotermal'nykh sistem. Geodinamicheskie processy i prirodnye katastrofy. Tezisy III Vseros. nauchn. konf. s mezhd. uchastiem, g. Yuzhno-Sakhalinsk, 27-31 maya 2019 g.* (On the issue of geochemical features of mud volcanoes and sedimentary-hydrothermal systems. In: Geodynamic processes and natural disasters. Abstracts of III All-Russian scientific conf. with int. participation. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGiG, 2019). P. 114. (in Russ.)
  36. Novikov I. S. *Drevnie gryazevulkanicheskie formy rel'efa yuzhnogo Levanta* (Ancient mud-volcanic landforms of the South Levant). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2011. No. 2. P. 90-102. (in Russ.)
  37. Mel'nikov O. A. and Ershov V. V. The mud (gas-water-lithoclast) volcanism of Sakhalin Island: history, results and prospects of research. *Vestnik DVO RAN*. 2010. No. 6. P. 87-94. (in Russ.)
  38. Aleksandrov S. M. *Ostrov Sakhalin* (Sakhalin Island). M.: Nauka, 1984. 184 p.
  39. Mishurinskii D. V., Ershov V. V., Zharkov R. V., Kopanina A. V., Kozlov D. N., Lebedeva E. V., Abdullaeva I. V., Vlasova I. I., and Mikhalev D. V. *Geologo-geomorfologicheskie i landshafino-ekologicheskie osobennosti Pugachevskogo gryazevogo vulkana kak osnova dlya organizatsii i informatsionnogo soprovozhdeniya turisticheskogo marshruta* (Geological-geomorphological and landscape-ecological features of the Pugachevo Mud Volcano as a basis for organization and information support of the tourist route). *Geosistemy perekhodnykh zon*. 2018. Vol. 2. No. 4. P. 398-408. (in Russ.)