

**АККУМУЛЯТИВНЫЕ ФОРМЫ РЕЛЬЕФА В ДОЛИНАХ
С ГАЗОГИДРОТЕРМАЛЬНЫМИ ПРОЯВЛЕНИЯМИ
(НА ПРИМЕРЕ ВОДОТОКОВ РЯДА ВУЛКАНИЧЕСКИХ МАССИВОВ
КУРИЛО-КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА)**

© 2022 г. **Е. В. Лебедева^{1,*}, Р. В. Жарков^{2,**}**

¹*Институт географии РАН, Москва, Россия*

²*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия*

**E-mail: Ekaterina.lebedeva@gmail.com*

***E-mail: rafael_zharkov@mail.ru*

Поступила в редакцию 03.09.2021 г.

После доработки 25.09.2021 г.

Принята к публикации 11.10.2021 г.

В долинах водотоков геотермальных зон, где отмечены проявления газогидротермальной активности, процессы рельефообразования сопровождаются химическим и термальным воздействием. Установлено, что в таких долинах 1) происходит формирование специфических аккумулятивных форм микро- и мезорельефа как в руслах, так и на бортах; 2) идет вторичная проработка гидротермальными растворами аллювиальных отложений и коренных пород, которая вызывает кардинальное изменение как их свойств, так и особенностей протекания флювиальных процессов; 3) активизируются склоновые процессы, сопровождающиеся формированием оползневых тел и обвальных масс, благодаря чему в днищах идет аккумуляция смещенного склонового материала с последующим его переотложением селями. Проведена типизация форм аккумулятивного рельефа, образование которых связано с газогидротермальной активностью, в пределах речных долин 4 вулканических массивов: на Курильских о-вах (вулкан Менделеева на о-ве Кунашир и Баранского на о-ве Итуруп) и Камчатке (вулкан Мутновский и Узон-Гейзерная кальдера). Выделены основные формы аккумулятивного микро- и мезорельефа, связанные с различными проявлениями газогидротермальной активности; дана их характеристика, описаны морфометрические параметры. Типичными процессами в долинах геотермальных зон являются не только образование разнообразных натечных форм и цементация отложений поймы и террас в местах выхода минерализованных термальных вод, но и формирование иногда достаточно крупных оползневых псевдотеррас и перекораживание водотоков плотинами, сложенными склоновым и селевым материалом. Под воздействием кислых растворов может происходить активное выветривание коренных пород и валунно-галечного материала до глин. Нередко отложения поймы и террас, морфологически выглядящие как типичный аллювий, на деле представляют собой глинистую массу и легко размываются поверхностными водами. При затухании газогидротермальной деятельности оползневые тела и натечные формы зарастают и морфологически похожи на обычные речные террасы.

Ключевые слова: газогидротермы, вулканизм, гидротермальные растворы, оползневые процессы, флювиальный рельеф, цементация, выветривание

DOI: 10.31857/S0435428122010096

ВВЕДЕНИЕ

В долинах рек территорий современного вулканизма часто встречаются участки активных газогидротермальных проявлений, которые сопровождают вулканическую деятельность, но также могут сохраняться и после ее затухания. Растворы термальных источников и парогазовые выбросы серных фумарол (сульфатары¹) интенсивно изме-

няют как вмещающие породы, так и окружающие ландшафты в целом. Изучению геологического и гидрогеологического строения геотермальных зон, характера гидротермальных проявлений, особенностей преобразования горных пород в условиях газогидротермального воздействия посвящено значительное количество работ [1–15 и мн. др.].

Местоположения выходов термальных вод и сульфатар в пределах вулканических построек, как правило, определены системами радиальных и кольцевых разломов. Речные долины на скло-

¹ *Сульфатары* – выходы нагретого до 100°C (и более) пара с содержанием углекислого газа, азота, сернистого газа, сероводорода, метана и др.

нах вулканов и у их подножий также обычно приурочены к зонам разломов, поэтому газогидротермальные проявления часто наблюдаются в днищах эрозионных врезов. Однако к настоящему моменту опубликовано мало работ по строению и развитию подобных долин, влияние газогидротерм на формирование флювиального рельефа изучено плохо. Цель данной статьи — на примере долин водотоков на склонах ряда вулканов Курильских островов и Камчатки провести типизацию форм аккумулятивного рельефа в условиях проявлений газогидротермальной активности, а также определить влияние последней на характер геоморфологических процессов в долинах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование базируется на результатах полевых наблюдений, опробования аллювиальных отложений, вод термальных источников и грязевых котлов в долинах водотоков на склонах вулканов Баранского (о-в Итуруп), Менделеева (о-в Кунашир), а также в пределах Восточного вулканического пояса Камчатки — в бассейнах рек Фальшивой (склоны вулкана Мутновский), Шумной и Гейзерной (Узон-Гейзерная кальдера). Проводился отбор как руслового и пойменного аллювия, так и фрагментов новообразований (натеков и корок), а также коренных пород различной степени измененности с последующим анализом образцов на элементный состав (силикатный и рентгенофлуоресцентный анализы). Кроме этого, проведено комплексное физико-химическое исследование парогазовых выходов, термальных источников и грязевых котлов, расположенных в указанных выше долинах. В ходе полевых работ с помощью портативного GPS-приемника устанавливались координаты основных объектов исследований; для определения значений pH и Eh использовался портативный pH-метр «HANNA-Ni9025»; замеры температуры проводили электронным термометром с термопреобразователем КТХА 01.02Р (точность измерения термопары составляет 0.1°C). Для последующих лабораторных исследований физико-химических характеристик объектов отбирались пробы газов, воды и грязевой массы. Анализы выполнены в лабораториях ИЗК СО РАН (Иркутск), ДВГИ и ТОИ ДВО РАН, ОАО «Приморгеология» (Владивосток), ИВиС ДВО РАН (Петропавловск-Камчатский), ИМГиГ ДВО РАН (Южно-Сахалинск), ИГЕМ РАН (Москва). Собственные исследования дополнены материалами из имеющихся литературных источников.

При характеристике гидрохимических типов вод термальных источников использовалась типизация из работы [15], в которой рассматривались Южные Курилы (южная группа островов

Курильского архипелага), но все основные закономерности характерны и для других областей активного вулканизма. В ней гидротермы источников характеризуются по кислотности-щелочности раствора, газовому составу и содержанию основных макроэлементов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. ТИПИЗАЦИЯ АККУМУЛЯТИВНЫХ ФОРМ РЕЛЬЕФА В ДОЛИНАХ ВОДОТОКОВ С ГАЗОГИДРОТЕРМАЛЬНЫМИ ПРОЯВЛЕНИЯМИ

Особенности морфологии долин и форм флювиального рельефа на склонах вышеперечисленных вулканических массивов (рис. 1), характеристики выветривания и вторичных изменений галечного материала, химического состава термальных вод и новообразований, слагающих аккумулятивные формы рельефа, обобщены в табл. 1. Впервые проведена типизация форм аккумулятивного рельефа в речных долинах ряда вулканических массивов Курило-Камчатского региона в условиях проявлений газогидротермальной активности, а также определено влияние последней на геоморфологические процессы.

В исследованных районах присутствуют *парогазовые выходы* (сульфатары, мофетты), *грязевые котлы* и *термальные источники*. На участках высокой активизации газогидротермальной деятельности — сульфатарных полях, как правило, наблюдаются все перечисленные типы. При удалении от центра вулканических построек и угасании вулканической активности встречаются в основном разнообразные по физико-химическим свойствам термальные источники. Нередко водотоки, дренирующие склоны вулканов, берут начало именно с сульфатарных полей или же пересекают их. Таким образом, в пределах эрозионных врезов и днищ долин могут наблюдаться не только выходы термальных вод, но и сульфатары и грязевые котлы.

Нами выделено 4 группы форм рельефа (см. табл. 1), обязанные своим возникновением преимущественно парогазовым выходам (1), разгрузке термальных вод различного состава (3), а также их специфическому взаимодействию с вмещающими породами (2 и 4).

1. Формы рельефа, связанные с парогазовыми выходами. Вокруг сульфатар формируются *сублиматы в виде щеток кристаллов*, химический состав которых определяется составом выходящих парогазовых струй — преимущественно углекислого (более 90%), с некоторым содержанием SO₂, H₂S, HCl и др. Осаждение преимущественно самородной серы происходит в результате резкого снижения температуры и давления; часто сублиматы образуют хорошо ограненные кристаллы

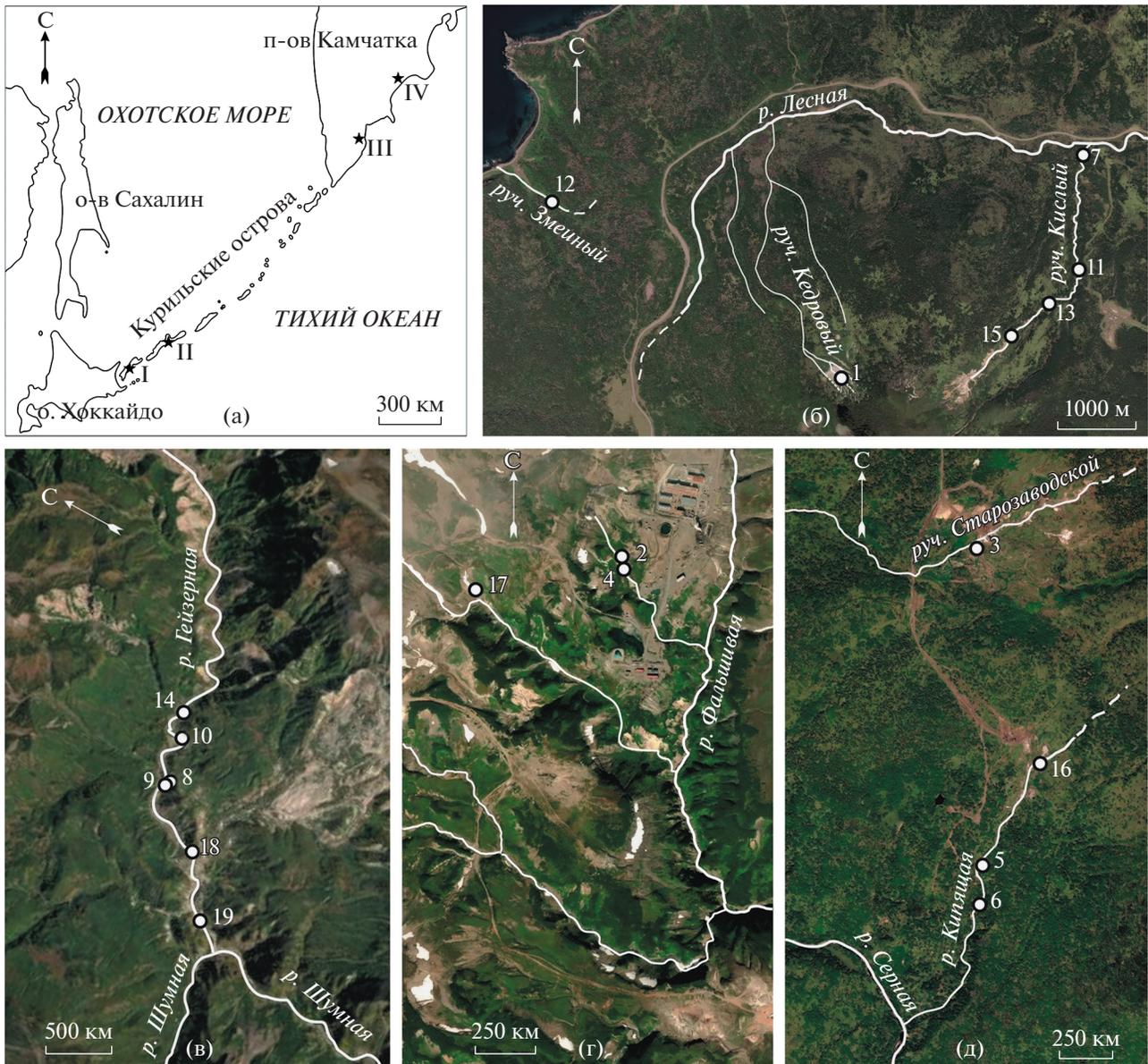


Рис. 1. Схемы расположения объектов исследования и конкретных примеров аккумулятивных форм рельефа в долинах с газогидротермальными проявлениями.

(а) – *Вулканические массивы*: I – Менделеева (о-в Кунашир), II – Баранского (о-в Итуруп), III – Мутновский (Камчатка), IV – Узон-Гейзерная кальдера (Камчатка). *Бассейны рек*: (б) – Лесной и руч. Змеиногот (вулкан Менделеева); (в) – Гейзерной (Узон-Гейзерная кальдера); (г) – Фальшивой (вулкан Мутновский); (д) – Серной (вулкан Баранского). Цифры 1–19 соответствуют номерам конкретных примеров аккумулятивных форм, рассмотренных в табл. 1.

размером до 1 см, редко больше. В результате вокруг долго живущих сольфатар образуются специфические конусообразные постройки, высота которых иногда достигает 1–2 м, а диаметр основания – до 1.5–2 м, редко – 5 м (рис. 2). При отсутствии явно выраженных трещин газы могут выходить на так называемых площадках парения, где на поверхности – вокруг небольших трещин – также отлагаются сублиматы. В случае высокого содержания сернистого газа – это преимущественно кристаллы серы желтого цвета с приме-

сью различных минералов. Если площадки парения располагаются непосредственно вблизи водотока – на пойме, прирусловом склоне, то ниже по течению на бортах долины мы нередко можем обнаружить высыпки серы – следы серных паводков во время дождей или снеготаяния. Серный налет отмечается на поверхности валунно-галечного материала в днище, обогащенные серой прослойки встречаются и в составе пойменного аллювия.

Таблица 1. Характеристика аккумулятивных форм микро- и мезорельефа в долинах водотоков с газогидротермальными проявлениями

Тип газо-гидротермальных проявлений	Конкретный пример					
	Характеристика форм рельефа и их компле ксов, положение в долине	Локализация	Водоток, вулкан, номер конкретного примера	Газогидротермы	Состав и характер вод (газов), минерализация (М)	Состав и характер отложений и новообразований
1. Выходы сольфатарных газов	Характеристика форм рельефа и их компле ксов, положение в долине	I–IV	Руч. Кедровый, вулкан Менделеева (1)	Сольфатара на СЗ СП*	Т до 100–130°C, отмечались потоки расплавленной серы [15], в газовом составе преобладают углекислый газ (81%) и сероводород (14.5%) [16]	Слоистые отложения и щетки кристаллов самородной серы
2. Грязевые котлы	Понижения (0.5–7 м в диаметре) с грязевой массой различной консистенции на пойме и террасах, окруженные небольшими <i>грязевыми валиками</i> , реже <i>потоками</i> , иногда с <i>грязевыми вулканчиками</i> высотой первые десятки сантиметров	I–IV	Верховья р. Фальшивой, вулкан Мутновский (2)	Грязевой котел, Дачные ист. **, Северная группа	Т до 95°C, грязевой отжим имеет рН = 3.5, сульфатный натриево-магниевый-кальциевый состав, М 4.2 г/л	Измененные доглин и обводненные породы
3. Термальные источники	<i>Русловые лотки</i> – желобообразные участки русел протяженностью первые метры, шириной 0.2–1.0 м на быстринах, порогах, в сужениях, сформированные выпадающими в осадок новообразованными соединениями	I–IV	Верховья р. Фальшивой, вулкан Мутновский (4)	Дачные ист.	Т до 60°C, рН = 3–6, сульфатно-гидрокарбонатные кальциевонариевые	Кремнистые туфы с окислами и гидроокислами Fe и Mn
			Р. Кипящая, вулкан Баранского (5)	Русло р. Кипящей, среднее течение, в 450 м ниже ист. Голубые Озера	Т до 40°C, рН = 1.4, кремнистые сульфатно-хлоридные кальциевонариевые речные воды, М 4 г/л [15]	Слоистые кремнистые туфы (SiO ₂ – 36–74%, ок-ток*** Fe до 30%)
	<i>Фестоны</i> – ступенчато расположенные на порожисто-водопадных участках русла площадки размером 0.5–1.0 м с округлым краем, нередко окаймленные небольшим валиком высотой 1–3 см	II, IV	Р. Кипящая, вулкан Баранского (6)	Русло р. Кипящей, среднее течение, 250 м ниже водопада	Т до 40°C, рН = 1.4, кремнистые сульфатно-хлоридные кальциевонариевые речные воды, М 4 г/л [15]	Слоистые отложения кремнистого туфа (SiO ₂ до 93%)

Таблица 1. Продолжение

Тип газогидротермальных проявлений	Характеристика форм рельефа и их комплексов, положение в долине	Локализация	Конкретный пример			
			Водоток, вулкан, номер конкретного примера	Газогидротермы	Состав и характер вод (газов), минерализация (М)	Состав и характер отложений и новообразований
	<i>Бронированные ступени</i> – покрытые плотной коркой ступени водопадов, иногда с эвразионными котлами диаметром 0.1–0.5 м	I–IV	Руч. Кислый, вулкан Менделеева (7)	Русло руч. Кислого, нижнее течение	Длительная разгрузка слабощелочных кремнистых хлоридных натриевых гидротерм прекратилась более 100 лет назад [17]; современный выход схожих гидротерм (ист. Дикие Ванны, Приустьевая группа ист.) имеет Т до 32°C, рН = 6.6–7.2, хлоридный натриевый состав, М 0.6 г/л [15]	Слоистые отложения кремнистого туфа (SiO ₂ – 79–86%, ок-ток Fe – 3.5–6%)
	<i>Конусовидные или изометричные постройки</i> вокруг термальных источников и гейзеров, высота и диаметр которых могут достигать от десятков сантиметров до нескольких метров	III, IV	Р. Гейзерная, Узон-Гейзерная кальдера (8)	Гейзер Большой, Гейзерное ТП ****	Т до 100°C, рН 8.4–9.2, хлоридный натриевый состав, М 1.8–2.2 г/л [10]	Слоистые отложения кремнистого туфа
	<i>Плаци</i> – наточные горизонтальные или наклонные покровы, обрамляющие постройки термальных источников и гейзеров, площадью до 100 м ²	III, IV	Р. Гейзерная, Узон-Гейзерная кальдера (9)	Гейзерное ТП	Т до 70–90°C, рН 8.4–9.2, хлоридный натриевый состав, М 1.8–2.2 г/л [10]	Слоистые отложения кремнистого туфа
	<i>Стенки</i> – субвертикальные уступы террас и борта долины ниже выхода термальных источников, покрытые натечными корками различной мощности, площадью от первых м ² до их десятков	II–IV	Р. Гейзерная, Узон-Гейзерная кальдера (10)	Витраж, Гейзерное ТП	Т до 70–90°C, рН 8.4–9.2, хлоридный натриевый состав, М 1.8–2.2 г/л [10]	Слоистые отложения кремнистого туфа

Таблица 1. Продолжение

Тип газогидротермальных проявлений	Характеристика форм рельефа и их комплексов, положение в долине	Локализация	Конкретный пример			
			Водоток, вулкан, номер конкретного примера	Газогидротермы	Состав и характер вод (газов), минерализация (М)	Состав и характер отложений и новообразований
	<i>Натечные террасы</i> – террасовидные поверхности, образованные отложениями термальных вод в местах выхода источников в бортах долины, площадью от первых м ² до их десятков	I, II, IV	Руч. Кислый, вулкан Менделеева (11)	Ист. Купальный, Нижняя группа	Т до 92°С, рН = 1.6–1.8, хлоридно-сульфатный натриевый состав, М 4.0 г/л [15]	Слоистые натечные образования ярозита (SiO ₂ 33%, ок-гок Fe 23%, SO ₃ 14%)
			Руч. Змеиный, вулкан Менделеева (12)	Столбовские	Т до 82°С, рН = 6.7–7.0, хлоридно-сульфатный натриевый состав, М 2.6 г/л [15]	Слоистые натечные образования (SiO ₂ до 42%, CaO 21–52%, Al ₂ O ₃ до 12%, ок-гок Fe до 7%)
	<i>Фрагменты аккумулятивных и цокольных террас различной высоты и площади</i>	I–IV	Руч. Кислый, вулкан Менделеева (13)	Верхняя группа	Т = 75–99°С, рН = 2.3–2.7, сульфатные со сложным катионным составом, М до 0.8 г/л [15]	Корка (SiO ₂ 70%, Al ₂ O ₃ до 15%, ок-гок Fe до 3%, S до 2%)
			Р. Гейзерная, Узон-Гейзерная кальдера (14)	Гейзерное ТП	Хлоридные натриевые [10]	Цемент (SiO ₂ 59–63%, Fe ₂ O ₃ 5–6%, SO ₃ до 3%)
	аллювий которых прочно <i>сцементирован</i> в цоколе или по всей толще	II–IV	Руч. Кислый, вулкан Менделеева (15)	Верхняя группа	Т = 75–99°С, рН=2.3–2.7, сульфатные со сложным катионным составом, М до 0.8 г/л [15]	Цемент (SiO ₂ 27%, S 29%, ок-гок Fe 36%)
			Р. Кипящая, вулкан Баранского (16)	Ист. на СП в верховьях р. Кипящей	Т до 98–105°С, рН = 1.7–2.6, сульфатные со сложным катионным составом, М 0.7 г/л [15, 18]	Гидротермально измененные породы

Таблица 1. Окончание

Тип газогидротермальных проявлений	Характеристика форм рельефа и их комплексов, положение в долине	Локализация	Конкретный пример			
			Водоток, вулкан, номер конкретного примера	Газогидротермы	Состав и характер вод (газов), минерализация (М)	Состав и характер отложений и новообразований
4. Газогидротермальные проявления на склонах долины и у их подножий	<i>Оползневые террасы</i> на бортах долины	I–IV	Верховья р. Фальшивой, вулкан Мутновский (17)	Дачные ист.	Газогидротермы различного состава на бортах и в днище долины	Раздробленные и смещенные гидротермально измененные породы
	<i>Плотины</i> , перегородивающие русло реки, сформированные преимущественно склоновым и селевым материалом, или их фрагменты. Высота плотин может достигать 50 м, протяженность ~0,6 км	II–IV	Р. Гейзерная, Узон-Гейзерная кальдера (18)	Гейзерное и Верхнегейзерное ТП		
	<i>Селевые валь</i> и их фрагменты, <i>конусы и покровы селевого материала</i> на террасах в днище долины и ее притоков	I, II, IV	Р. Гейзерная, Узон-Гейзерная кальдера (19)	Гейзерное и Верхнегейзерное ТП		

Локализация: склоны вулканов – I – Менделеева (о-в Кунашир), II – Баранского (о-в Итуруп), III – Мутновский (Камчатка), IV – Узон-Гейзерной кальдеры (Камчатка); СП* – сольфатарное поле, ист. ** – источник (и); ок-гок*** – окислы и гидроокислы; ТП *** – термальное поле. Цифры в скобках соответствуют номерам на рис. 1, (б–г).



Рис. 2. Конусовидная постройка сольфатары в эрозионной ложбине на СЗ сольфатарном поле вулкана Менделеева (исток правого притока р. Лесной, о-в Кунашир, 2015 г. Здесь и далее, где не указано иное, фото Е.В. Лебедевой).

2. Формы рельефа, обусловленные деятельностью грязевых котлов. Грязевые котлы — воронки и небольшие котловины (как правило, первые метры в диаметре), заполненные жидкой глини-

стой массой, представляющей собой смесь поверхностных вод с конденсатами пара и вулканических газов и глинистыми частицами гидротермально измененных пород, — наблюдаются в пределах речных долин достаточно часто. Химический состав отжима грязевой массы, как правило, аналогичен составу вод окружающих термальных источников. Чаще всего на сольфатарных полях и термальных площадках встречаются кислые сульфатные со сложным катионным составом грязевые котлы с температурой грязевой массы до 100°C [14, 15, 19, 20]. Нередко они располагаются на пойме. Соответственно, при половодье или в период дождей там может происходить вынос глинистого материала водными потоками. В некоторых случаях они приурочены к низким террасам водотоков, но, например, в долине р. Гейзерной они находятся на террасовидной поверхности с отметками около 30 м над урезом реки. Обычно грязевые котлы, диаметр которых колеблется, как правило, от 0.5 до 7 м, обрамлены *валиками глинистого материала* высотой первые десятки см и шириной от 0.5 до 1.5 м; иногда по их периферии прослеживаются отложения *потоков глинистых масс* протяженностью первые метры, реже — десятки метров (рис. 3, а). На некоторых участках котлов с густой грязевой массой или в непосредственной близости от них встречаются небольшие группы *грязевых вулканчиков* высотой первые десятки сантиметров (рис. 3, б).

3. Формы рельефа, созданные при участии вод термальных источников. Непосредственно к руслам рек приурочены три типа аккумулятивных образований, связанных с поступлением в русло минерализованных вод: *русловые лотки, фестоны и бронированные ступени водопадов (1)*. Из форм микрорельефа наиболее широко распространены *русловые лотки* — желобообразные участки русла,

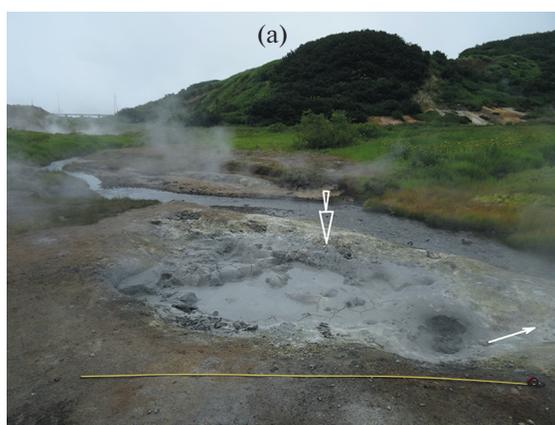


Рис. 3. Формы грязевого рельефа на пойме в верховьях р. Фальшивой (Дачные источники, вулкан Мутновский, Камчатка, 2016 г.).

(а) — небольшие грязевые котлы: тонкая стрелка показывает направление течения грязевого потока, толстая — положение грязевого вала, отделяющего котел от русла ручья (фото Р.В. Жаркова); (б) — грязевой вулканчик.



Рис. 4. Аккумулятивные образования в руслах.

(а) – *русловые лотки* (среднее течение р. Кипящая (вулкан Баранского, о-в Итуруп, 2018 г.); стрелка показывает направление течения); (б) – *бронированные ступени водопада* (нижнее течение руч. Кислый (вулкан Менделеева, о-в Кунашир, 2019 г.). В эвразийском котле (выделен кружком) видно слоистое строение и мощность (около 10 см) корки бронирования.

сформированные слоистыми образованиями на быстринах, порогах и на участках сужений (рис. 4, а). Их протяженность составляет первые метры, а ширина – от 0.2 до 1.0 м. Они были встречены практически во всех долинах исследуемых водотоков с гидротермальными проявлениями – и на Курильских островах, и на Камчатке; различались лишь их состав и морфология – где-то формируется более четко выраженный желоб, где-то – менее.

Фестоны – площадки размером 0.4–0.7 м, нередко с дугообразным краем, иногда окаймленные небольшим валиком, ступенчато расположенные на порожиисто-водопадных участках русла. На исследуемой территории они были встречены нами в среднем течении долины р. Кипящей (вулкан Баранского, о-в Итуруп) – примерно в 700 м ниже по течению от термальных источников Голубые Озера, определяющих геохимический облик реки. Судя по результатам силикатного анализа, фестоны здесь сформировались в результате отложения кремнистого туфа (до 93%). Подобные “зачаточные” формы отмечены и в ручейках на термальных полях в бассейне р. Гейзерной. Часто фестоны наблюдаются и в водотоках карстовых регионов в результате выпадения известкового туфа.

Наиболее ярко выраженный пример *бронирования ступеней водопадов* наблюдался в нижней части долины руч. Кислого (вулкан Менделеева, о-в Кунашир). На фоне покрытых плотной коричневой коркой пяти ступеней хорошо выделяются более светлые эвразийские котлы диаметром до 0.1–0.5 м и глубиной до полуметра, с окатанным галечным и мелкогалунным материалом на дне и небольшие русловые лотки. Исследования [17] показали, что на этом участ-

ке долины ручья была длительная разгрузка слабощелочных кремнистых хлоридных натриевых гидротерм, которая прекратилась более 100 лет назад. В настоящее время ниже по долине, на правом берегу р. Лесной, находятся схожие, но менее минерализованные и обогащенные кремнеземом гидротермы. Пресные (минерализация 0.6 г/л) воды источника Дикие Ванны (Приустьевая группа источников) имеют температуру до 32°C, pH = 6.6–7.2, хлоридный натриевый состав [15]. Результаты геохимического анализа показали, что бронирование ступеней произошло за счет отложения кремнистого туфа (SiO₂ – 79–86%) с участием окислов и гидроокислов железа (3–6%). Мощность корки бронирования колеблется от 5 до 10 см. Бронирование сливов водопадов наблюдается и в долине р. Гейзерной (водопады Игрушка, Тройной и др.), и р. Кипящей (о-в Итуруп), но столь хорошо выраженные ступени встречаются редко (рис. 4, б).

Следующую группу аккумулятивных образований составляют *плащи, стенки и натечные террасы* (2), формирование которых происходит в прибортовых частях долин. Все это натечные образования, возникающие близ источников и гейзеров в результате изливания или высачивания минерализованных термальных вод.

Плащи и стенки, сложенные разноцветным гейзеритом, наиболее широко представлены в долине р. Гейзерной на участке Гейзерного термального поля, где доминируют хлоридные натриевые источники с минерализацией 1.8–2.2 г/л. Здесь вокруг долгоживущих термальных источников и гейзеров формируются также *конусовидные или изометричные постройки* из гейзерита – плотного слоистого кремнеземистого агломерата. Их высота может достигать 1–2 м и более. Один



Рис. 5. Натечные образования в прибортовых частях долин.

(а) — *гейзеритовая постройка* (ограничена крупным пунктиром) и обрамляющий ее *плащ* (мелкий пунктир) гейзера Большой. Стрелка указывает на отложенный рекой окатанный материал; (б) — *натечная стенка* “Витраж” (бассейн р. Гейзерной, Камчатка, 2021 г.); (в) — *натечная терраса* (Столбовские источники, руч. Змеиный, вулкан Менделеева, о-в Кунашир, 2015 г.).

из гейзеров в Долине так и называется — Розовый конус, его постройка имеет высоту около 8 м при основании 2 м. Крупные постройки нередко обрамлены натечными субгоризонтальными или наклонными образованиями — так называемыми *плащами*², которые перекрывают прилегающие к ним участки в виде панциря-покрова (рис. 5, а), сложенного гейзеритом. Например, вокруг гейзера Тройного площадь такого покрова (плаща) превышала 100 м², но, к сожалению, после схода селя 2007 г. он был разрушен и погребен под его осадками [10].

Гейзеритовые *стенки* представляют собой крутые (иногда субвертикальные) уступы террас или участки бортов долины ниже выхода термальных источников, покрытые натечными корками различной мощности; их площадь иногда достигает нескольких десятков квадратных метров. Самая большая из них в исследуемом регионе — так называемый Витраж (рис. 5, б).

Одними из наиболее крупных образований в долинах рек с гидротермальными проявлениями могут быть *натечные террасы* — террасовидные поверхности, образованные отложениями термальных вод в местах их выхода в бортах долины. Например, в районе источников Маммот Спрингс в кальдере Йеллоустон размеры таких террас достигают сотен квадратных метров, однако на исследуемой территории они, как правило, совсем не велики. Хорошие примеры наблюдаются на склонах вулкана Менделеева: в долине руч. Кислого в местах выходов источников Нижней группы (источник Купальный) и в долине руч. Змеиноного у Столбовских термальных источников.

² В зарубежной литературе чаще используется термин “щит”, что обусловлено преимущественным положением гейзеров на выровненных участках, а не на склонах долины, как в рассматриваемом регионе.

В первом случае термальные воды в среднем течении долины руч. Кислого (на абс. высоте около 120–130 м) разгружаются на пойме и в уступе 5-метровой террасы преимущественно у левого борта. Их воды относятся к ультракислым (рН 1.6–2.1) азотным хлоридно-сульфатным натриевым термам, содержащим до 140–250 мг/л SiO₂ при общей минерализации 2.5–4.0 г/л [15, 16, 21]. Натечная терраса высотой около 1.5 м и протяженностью до 10–15 м, сложенная кремнеземом (33%), окислами и гидроокислами Fe (23%) и SO₃ (14%), сформировалась у подножия 5-метровой надпойменной террасы. Местами среди натечных образований встречается галечно-мелковалунный материал, поставляемый сюда водотоком в паводки.

Температура Столбовских термальных источников, которые выходят вдоль левого борта руч. Змеиноного (о-в Кунашир) в его среднем течении, составляет около 80°C, почва над ними прогрета до 40–60°C. Нейтральные (рН 6.7–7.0) азотные хлоридно-сульфатные натриевые гидротермы выходят здесь через небольшие грифоны, стенки которых покрыты белоснежным налетом серы, образующейся в результате деятельности серобактерий [15, 21], окисляющих газообразные соединения серы (H₂S и SO₂). Восходящие гидротермы помимо серосодержащих соединений несут к поверхности восстановленные формы железа и марганца, которые, попадая в кислородсодержащие рыхлые горизонты, окисляются и осаждаются в виде окислов и гидроокислов [22, 23]. На месте основного выхода воды сформировалась небольшая натечная терраса высотой в центральной части около 1.5 м над урезом, выше и ниже по течению ее поверхность снижается до 0.5 м, общая протяженность 7–10 м (рис. 5, в). Сложены натечные образования кремнеземом — до 42%, от 21 до 52% составляет CaO, окислы и гидроокислы Fe — до 7%, а алюминия — до 12%.

В рассматриваемых долинах повсеместно встречаются фрагменты *пойменных и надпойменных террас*, покрытые слоистыми *корками новообразований* и/или сложенные аллювиальными отложениями, проработанными гидротермальными процессами (рис. 6), и их эрозионные останцы различных размеров в руслах. Причем прослеживается *два типа проработки аллювия минерализованными водами*. Чаще наблюдается прочная *цементация* аллювиальных отложений, как правило, железистыми и железомарганцевыми растворами. Цементированный железистыми растворами аллювий вскрывается, например, и в уступах низких террас р. Гейзерной, а также в ее русле в виде небольших останцов высотой 1–1.2 м и порогов (рис. 7 а, б). В составе цемента доминирует кремнезем (59–63%), 5–6% составляют окислы железа. На участке Верхней группы источников в долине руч. Кислого (о-в Кунашир) останец в русле, имеющий высоту около 1 и 1.5 м в диаметре сложен плохо окатанным галечно-валунным материалом аллювиально-пролювиального или селевого генезиса. Здесь на протяжении около 200 м вдоль русла ручья располагаются несколько десятков небольших гидротермальных выходов с температурой до 99°C; в цементе эрозионного останца наряду с окислами и гидроокислами Fe (36%) почти 30% составляют сера и 27% SiO₂. По составу воды этих источников пресные (минерализация до 0.8 г/л), кислые (рН 2.3–2.7) углекислые сульфатные со сложным катионным составом [15, 21].

На некоторых участках мы можем также увидеть разрезы террас или поймы, в которых гравийно-галечный материал хорошо сохраняет свою структуру. Визуально иногда отмечается лишь некоторое обесцвечивание обломков породы. Однако фактически вся толща превращена в гидротермальную глину, легко режется лопатой и, соответственно, размывается водой.



Рис. 6. Характер выветривания галечного материала в водотоках на склонах вулкана Менделеева (руч. Валентины, о-в Кунашир, 2019 г.).

4. Формы рельефа, обусловленные газогидротермальными проявлениями на склонах долин и у подножий. Для долин с развитием газогидротермальных проявлений типично активное протекание склоновых процессов, и на их бортах повсеместно встречаются *оползневые террасы* (рис. 8). На склонах долины руч. Кислого (вулкан Менделеева) в его верховьях, например, нами зафиксировано до 4 ярусов подобных террас, представляющих собой крупные блоки сползших гидротермально проработанных пород. Многочисленные оползни встречены и в долинах руч. Валентины (там же), р. Кипящей (вулкан Баранского), Фальшивой

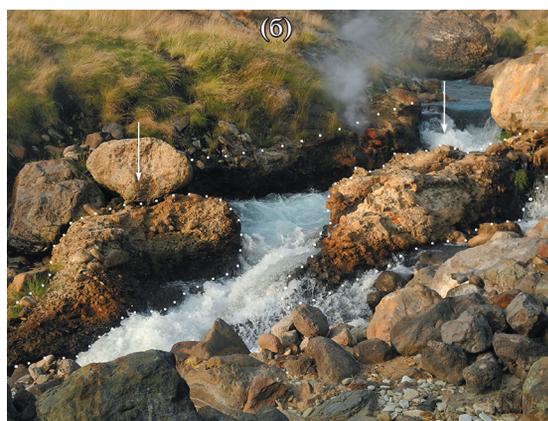


Рис. 7. Пороги в русле р. Гейзерной на месте выходов цементированных аллювиальных отложений — (а, б). Участки цементации материала обрамлены светлым пунктиром (Камчатка, 2021 г.).



Рис. 8. Оползневые террасы на бортах долины правого притока р. Фальшивой (вулкан Мутновский, Камчатка, 2016 г.).

(вулкан Мутновский). Наблюдения, проведенные в долине р. Гейзерной, также со всей очевидностью показывают, что для ее бортов характерно активное развитие разнообразных гравитационных склоновых процессов [24–26], которые нередко трансформируются в сели.

В днищах долин идет накопление смещенного в результате оползней и обвалов склонового материала с периодическим перегораживанием долин (рис. 9) и образованием временных *плотин* и подпрудных водоемов, в которых аккумулируются наносы реки. Дальнейшее переотложение склонового и аллювиального материала происходит при разрушении этих плотин также с формированием селей. Хотя в настоящее время подобный подпрудный водоем существует лишь в долине р. Гейзерной, однако и в других рассматриваемых долинах обнаружены селевые отложения, а иногда и фрагменты разрушенных плотин (например, верховья р. Фальшивой). Часто встречаются как *селевые валы* из переотложенного склонового материала (руч. Старозаводской, вулкан Баранского; руч. Кислый, вулкан Менделеева), так и фрагменты селевых *конусов выноса* (р. Шумная, Узон-Гейзерная кальдера) и *покровы* селевого материала различной мощности. Например, зафиксированная высота заплеска селя в долине р. Гейзерной при событии 2014 г., составила на поворотах долины не менее 40 м [27], соответственно селевыми отложениями были перекрыты и все нижележащие уровни террас и склоны.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ. ОСОБЕННОСТИ РЕЛЬЕФООБРАЗОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ГАЗОГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ

Геотермальные зоны являются геосистемами, в формировании которых активно участвует эндогенная энергия. На участках, где отмечены проявления газогидротермальной активности, процессы рельефообразования сопровождаются химическим и термальным воздействием. Из-за постоянного прогрева грунтов трансформация вещества идет круглогодично и, соответственно, достаточно активно. Наиболее динамичны эти процессы в пределах сольфатарных полей и по их периферии, где в течение длительного времени на литогенную основу воздействуют агрессивные газы и растворы в условиях повышенных температур, что приводит к изменению состава рыхлых отложений и коренных пород. Следовательно, меняется и характер экзогенных процессов. Непосредственно около сольфатар и в местах выходов гидротерм почвенно-растительный покров отсутствует, а по периферии участков активной гидротермально-сольфатарной деятельности типичны прогретые почвы – термоземы [27]. Лишенный растительности увлажненный глинистый субстрат легко поддается эрозии, нередко здесь формируются участки бедленда. Также активизируются гравитационные процессы на склонах, все это приводит к более активной дену-



Рис. 9. Частично размывтая плотина в днище долины р. Гейзерной, сложенная материалом обвала и селя 2007 г. (Камчатка, 2021 г.). Толстой стрелкой показано направление течения реки.

дании. В первой половине XX века к естественным процессам добавилось антропогенное воздействие, связанное с разработкой серосодержащих пород. На Кунашире, например, добыча и вывоз пород частично изменили морфологию участков сольфатарных полей вулканов Менделеева и Головнина.

Химический состав газогидротерм и механизм его формирования в вулканических областях давно привлекали внимание исследователей, поскольку они отражают с определенной долей приближения состояние и степень активности вулкана, а также параметры гидротермального резервуара [5, 14, 21, 28–33 и мн. др.]. Вариации состава и иных характеристик растворов определяются взаимодействием *газ–вода–порода* [5]. Установлено, что термальные источники, расположенные на ограниченной территории, нередко имеют контрастные физико-химические параметры. Среди растворенных ионов доминируют хлориды, сульфаты, гидрокарбонаты главным образом щелочных и щелочноземельных элементов. Минерализация гидротерм варьирует в широких пределах — от пресных (менее 1 г/л) до высокоминерализованных (до 500 г/л), причем, как и водородный показатель (рН), который может колебаться от 0.1 до 10 [34]. Метеорные (инфильтрационные) воды — основной источник питания гидротерм, как подземных, так и выходов на поверхность в виде термальных источников.

Важным фактором формирования вулканических терм служит вещественный состав вмещающих толщ, по которым они циркулируют, выщелачивая целый ряд минералов и микроэлементов. Многими исследователями [15, 31, 33 и др.] подчеркивается значительное влияние газов (CO_2 , H_2S , SO_2 , N_2 , O_2 , HCl , CH_4 и др.) на химический состав и значение рН гидротерм.

Для некоторых вулканов Южных Курил отмечено [15], что с удалением от вулканических центров происходит смена гидрохимических типов вод термальных источников: от кислых, углекислых сульфатных на сольфатарных полях до нейтральных азотных, хлоридных натриевых по периферии вулканов. Для данного региона было предложено выделять 4 типа связанных с термами *ландшафтов*: 1) сольфатарных полей и верховьев рек и ручьев; 2) долин средних течений рек и ручьев; 3) долин нижних течений рек и ручьев; 4) ландшафты побережья. С точки зрения особенностей формирования флювиального рельефа на участках гидротермальных проявлений, такой подход и такие градации не всегда применимы. Например, сольфатарные поля, действительно, чаще всего находятся в верхних звеньях водотоков, но иногда они могут располагаться и в средних звеньях долин, и на побережье. Для формирования аккумулятивного рельефа наибольшее значение имеют состав вод термальных источников, их минерализация и наличие *геохимических*

*барьеров*³, где происходит выпадение из раствора тех или иных химических соединений с формированием микро- и мезоформ.

Так, при выходе газогидротерм на поверхность параметры среды (температура, давление) резко меняются, в результате чего осаждаются как отдельные химические элементы, так и их соединения: например, вокруг сольфатар – осадение серы, вокруг гейзеров – кремнистого туфа (гейзерита). Подобные барьеры возникают и при смешении вод различного химического состава и кислотности, и при изменении скорости течения. На геохимические барьеры в руслах рек исследуемой территории нередко указывают участки интенсивного окрашивания русловых отложений, также там формируется рассмотренный выше аккумулятивный микрорельеф, сформированный выпадающими в осадок новообразованными соединениями. Например, все три типа описанных аккумулятивных образований в руслах рек, – лотки, фестоны и бронированные ступени водопадов, возникают на участках быстрин, где идет насыщение воды кислородом. Активному их формированию способствует высокое содержание в термальных водах растворенных элементов. Так, например, подсчитано [8], что воды руч. Кислого на склоне вулкана Менделеева выносят ежегодно в р. Лесную до 706 кг Si, 258 кг Fe, 190 кг Al, 90 кг Zn, 42 кг Mn. Общий измеренный гидротермальный вынос хлора и сульфатов с вулкана Менделеева оценивается [16] в 7.8 и 11.6 т/сутки соответственно. Существование геохимических барьеров также приводит к формированию субаэральные натечные образований, плотных корок на поверхностях поймы и террас, к цементации аллювиальных отложений.

Результаты проведенных анализов (табл. 1) показали, что новообразования могут быть сложены преимущественно кремнеземом (SiO₂ 36–74%), так и окислами и гидроокислами Fe (до 30% и более), иногда карбонатами. Их стойкость и прочность во многом зависит именно от этого: отложения, насыщенные окислами и гидроокислами железа, как правило, более стойкие во времени, а сформированные кремнистыми и карбонатными соединениями – довольно быстро разрушаются. Деграция кремнистых русловых лотков, например, нередко начинается уже при смещении водного потока и прекращении поступления новых порций кремнезема: на таких участках они легко крошатся даже при слабом физическом воздействии.

³ Геохимические барьеры – участки, где на коротком расстоянии одна устойчивая обстановка сменяется другой и, как следствие, происходит резкое уменьшение интенсивности миграции отдельных химических элементов, в результате чего их концентрация резко увеличивается.

Вышеописанные натечные формы имеют слоистое строение, что свидетельствует о некой цикличности их роста, которая обычно носит сезонный характер. Скорости роста натечных форм зависят от активности процесса осаждения новообразованных минералов и нерастворимых соединений. В Курило-Камчатском регионе эти процессы изучены весьма слабо: единичная датировка по ¹⁴C погребенной в гейзерите ветки кедрового стланика свидетельствует о том, что скорость формирования гейзеритового покрова в долине р. Гейзерной (гейзер Тройной) составляла около 0.4 мм/год; наблюдения за современными процессами показывают скорость около 0.1 мм/год [10]. Также темпы аккумуляции оцениваются в 1–2 мм/год [27]. Соответственно, крупные постройки в Долине гейзеров ориентировочно имеют возраст 800–1000 лет. Датировок же по иным аккумулятивным гидротермальным образованиям рассматриваемого региона в настоящее время нет. В то же время в кальдере Йеллоустон возраст постройки гейзера Касл (Castle) высотой около 5 м с основанием (щитом) площадью более 400 м² по находкам пыльцы оценен примерно как 5.5–11 тыс. лет [35]. Очевидно, что в случае разрушения восстанавливаются подобные постройки очень медленно.

Хрупкие натечные формы также достаточно редко сохраняются при захоронении, обычно они быстро разрушаются после завершения активной гидротермальной деятельности. Находки палеозон развития гидротермальных процессов с ископаемыми гейзеритовыми и травертиновыми натечными образованиями и их датировки на территории России немногочисленны [36, 37]. Важные шаги в направлении изучения палеоформ сделаны специалистами Новой Зеландии и США с использованием масс-спектрометрии [38–40].

Формирование и трансформация аллювиальных отложений. Необходимо отметить, что аллювиальные отложения на исследуемой территории формируются в результате размыва и переработки уже в той или иной мере гидротермально измененных вулканогенных и вулканогенно-осадочных пород как в коренном залегании, так и смещенных и переработанных ледниковыми, склоновыми, селевыми процессами, а также хемогенных осадков термальных вод. И в процессе перемещения в русле водотока, и при отложении и захоронении валунно-галечный материал подвергается агрессивному воздействию термальных вод и продолжает выветриваться, что хорошо видно на примере анализа валунной составляющей аллювия и селевого материала в днище долины р. Кипящей, дренирующей склоны вулкана Баранского (о-в Итуруп) [41].

Проведенный нами анализ галечного материала из водотоков о-ва Кунашир (р. Лесная, ручьи Кислый и Валентины) также показал, что там доминирует выветрелый (иногда до состояния сапролита) и проработанный гидротермальными растворами материал: содержание измененной гальки составляет 43–96%. Глубина проработки обломочного материала (корка выветривания) часто достигает 2 см и более (рис. 6).

Изучив особенности проработки пород гидротермальными растворами на склонах вулканов Камчатки и Курильских островов, Ю.В. Фролова и соавт. [11] отмечают, что химическое выветривание там может идти различными путями. Термальные воды разной температуры, состава, кислотности (щелочности), воздействуя на вмещающие породы, приводят к значительным преобразованиям их минерального состава и структуры порового пространства, в результате которых физико-механические свойства пород нередко кардинально меняются: скальные массивы превращаются в дисперсные грунты или наоборот. При преобразовании скальных массивов или галечно-валунных отложений в глинистые толщи последние наследуют цвет и структуру исходных пород или осадков, но при этом приобретают пластические свойства, происходит снижение их плотности (иногда вдвое), возрастают пористость и гигроскопическая влажность. Исследования непосредственно в долине р. Гейзерной показали, что трансформация туфов в глины сопровождается снижением удельного сцепления пород на один-два порядка, угла их внутреннего трения – в 2–3 раза, что создает предпосылки для дальнейшей активизации обвально-оползневых процессов на склонах [12, 13].

На участках, где гидротермальная активность проявляется в виде высокотемпературных источников, участки склонов, фрагменты террас и поймы часто, наоборот, более устойчивы, так как обломочный материал и коренные породы сцементированы там осадками горячих кремнийсодержащих вод нередко с участием соединений железа и серы (табл. 1). Достаточно часто при изучении подобных фрагментов террас или их останцов оказывается, что новообразованный цемент является более твердым, чем выветрелый гидротермальными процессами галечный материал, который он скрепляет: при ударе галька распадается на мелкие обломки, а цемент сохраняет прочность.

Склоновые процессы и селевая аккумуляция в долинах. Гидротермально измененные породы, превращенные в глины, легко размываются поверхностными водами, иногда в местах их выхода формируются участки бедленда, но чаще проис-

ходят сплывы и оползни (рис. 8). Пластичные увлажненные глины – идеальный субстрат для образования многочисленных смещений на склонах, в результате чего на бортах долин появляются локальные разноуровневые псевдотеррасы. В итоге сами врезы значительно расширяются на участках газогидротермальных проявлений, поэтому в плане они приобретают четковидную форму [26, 42]. Подобные очертания долин весьма характерны для водотоков геотермальных зон.

Процесс селеформирования в долинах с гидротермальными проявлениями более детально был рассмотрен нами ранее [26, 43], также как и цепочки взаимосвязанных катастрофических процессов, приводящих к возникновению и последующему спуску подпрудных водоемов [44]. Несмотря на обычно небольшие размеры и геологическую молодость рассматриваемых долин, заложившихся на склонах позднеплейстоцен-голоценовых вулканических построек – судя по характеру строения вскрываемых в их бортах грубообломочных толщ – селевая активность, видимо, была характерна для всех этапов их развития, что связано не только с газогидротермальной, но и с эруптивной деятельностью вулканов, также с крутизной продольного профиля водотоков и обилием обломочного материала, поступающего в русла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В геоморфологическом отношении долины водотоков с газогидротермальными проявлениями значительно отличаются от долин без таковых. В результате сложного взаимодействия с термальными водами в них происходят:

1) *формирование специфических аккумулятивных форм* микро- и мезорельефа как в руслах, так и на бортах долин за счет осаждения минеральных новообразований;

2) *вторичная проработка гидротермальными растворами* аллювиальных отложений и коренных пород, что приводит к кардинальному изменению их свойств и, соответственно, особенностей протекания флювиальных процессов: на одних участках интенсифицируется размыв выветрелых долин пород, на других – в случае цементации отложений – напротив, эрозия замедляется, нередко образуются пороги;

3) *активизация склоновых процессов* на участках газогидротермальных проявлений с формированием оползневых тел и обвальных масс, благодаря чему в днищах долин идет аккумуляция смещенного склонового материала с последующим его переотложением селевыми процессами.

Нами проведена типизация форм аккумулятивного рельефа, образование которых связано с

газогидротермальной активностью в пределах речных долин четырех вулканических массивов Курило-Камчатского региона. Выделены основные формы аккумулятивного микро- и мезорельефа, связанные с различными проявлениями газогидротермальной активности; дана их характеристика, описаны морфометрические параметры. Рассмотрены аккумулятивные образования по большей части (за исключением сцементированных фрагментов аллювиальных отложений) плохо сохраняются после завершения активной фазы гидротермальной деятельности и быстро разрушаются под воздействием текучих вод. Характерными процессами в долинах геотермальных зон являются не только образование натечных форм и цементация отложений поймы и террас в местах выхода минерализованных термальных источников, но и формирование иногда достаточно крупных оползневых террас.

Необходимо отметить также, что для газогидротермальных проявлений типична пространственная миграция: на одних участках термальная активность затухает, на других появляется. При этом трансформируются и связанные с ней аккумулятивные формы и характерные склоновые процессы: наличие газогидротерм активизирует смещение материала на склонах. При затухании термальной деятельности оползневые тела и натечные формы зарастают и морфологически выглядят как обычные речные террасы, что требует особого внимания при изучении подобных территорий на поствулканическом этапе.

В данной работе авторы сосредоточились преимущественно на морфологии аккумулятивных образований; химические особенности их состава охарактеризованы лишь в самых общих чертах. Однако необходимость дальнейшего изучения специфики функционирования геохимических барьеров в водотоках геотермальных зон и определения химического состава соединений, доминирующих в цементирующих растворах и новообразованиях, скрепляющих и слагающих аккумулятивные формы рельефа, не вызывает сомнений. Подобные геохимические исследования позволят дополнить и уточнить полученные в работе выводы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Полевые исследования 2013–2020 гг. выполнялись в рамках госзадания ИГ РАН № 0148-2019-0005, этап полевых работ 2021 г. в долине р. Гейзерной и обобщение материалов – за счет гранта Российского научного фонда № 21-17-00216, <https://rscf.ru/project/21-17-00216/>.

Авторы признательны коллегам, принимавшим участие в организации и проведении полевых маршрутов на вулканах Баранского, Менделеева, Мутновский

и в Узон-Гейзерной депрессии: И.И. Власовой, А.В. Дегтерева, Д.Н. Козлову, А.В. Копаниной, А.И. Тальских (ИМГиГ ДВО РАН), Д.В. Михалеву (МГУ), Д.В. Мишуриному, А.Л. Гуринову, А.Л. Захарову, А.А. Медведеву (ИГ РАН), а также сотрудникам Курильского и Кроноцкого заповедников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вакин Е.А., Кирсанов И.Т., Кирсанова Т.П.* Термальные поля и горячие источники Мутновского вулканического района // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: Дальнаука, 1976. С. 85–114.
2. *Белюсов В.И., Сугробов В.М.* Геологическая и гидрогеологическая обстановка геотермальных районов и гидротермальных систем Камчатки // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: Дальнаука, 1976. С. 5–22.
3. *Лебедев Л.М., Зотов А.В., Никитина И.Б., Дуничев В.М., Шурманов Л.П.* Современные процессы минералообразования на вулкане Менделеева (о-в Кунашир). М.: Наука, 1980. 176 с.
4. *Леонов В.Л., Гриб Е.Н., Карпов Г.А., Сугробов В.М., Сугробова Н.Г., Зубин М.И.* Кальдера Узон и Долина Гейзеров / Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука, 1991. Т. II. С. 94–141.
5. *Рычагов С.Н.* Гидротермальная система вулкана Баранского (о. Итуруп): модель геологической структуры // Вулканология и сейсмология. 1993. № 2. С. 59–75.
6. *Рычагов С.Н., Щегольков Ю.В.* Минеральные новообразования на поверхности зерен пирита Нижне-Кошелевской геотермальной аномалии, Южная Камчатка // Руды и металлы. 2011. № 2. С. 52–57.
7. *Сугробов В.М., Сугробова Н.Г.* Особенности разгрузки высокотемпературных подземных вод в Долине Гейзеров // Вопросы географии Камчатки. Петропавловск-Камчатский. 1990. Вып. 10. С. 81–89.
8. *Чудаев О.В.* Состав и условия образования современных гидротермальных систем Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2003. 203 с.
9. *Чудаев О.В., Чудаева В.А., Карпов Г.А., Эдмундс У.М.* Геохимия вод основных геотермальных районов Камчатки. Владивосток: Дальнаука, 2000. 157 с.
10. *Сугробов В.М., Сугробова Н.Г., Дроздин В.А., Карпов Г.А., Леонов В.Л.* Жемчужина Камчатки – Долина Гейзеров. Научно-популярный очерк, путеводитель. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2009. 108 с.
11. *Фролова Ю.В., Ладыгин В.М., Рычагов С.Н.* Инженерно-геологические особенности гидротермально-метасоматических пород Камчатки и Курильских островов // Инженерная геология. 2011. № 3. С. 40–54.
12. *Фролова Ю.В., Гвоздева И.П., Чернов М.С., Кузнецов Н.П.* Инженерно-геологические аспекты гидротермальных преобразований туфогенных пород

- Долины гейзеров (полуостров Камчатка) // Инженерная геология. 2015. № 6. С. 30–42.
13. *Фролова Ю.В., Зеркаль О.В., Гвоздева И.П.* Влияние гидротермальных преобразований на физико-механические свойства туфогенных пород Долины гейзеров и их роль в формировании оползней // Геодинамические процессы и природные катастрофы / Тезисы докл. III Всерос. научн конф. с межд. участием. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2019. С. 186.
 14. *Бортникова С.Б., Бессонова Е.П., Гора М.П., Шевко А.Я., Панин Г.Л., Жарков Р.В., Ельцов И.Н., Котенко Т.А., Бортникова С.П., Маништейн Ю.А., Котенко Л.В., Козлов Д.Н., Абросимова Н.А., Карин Ю.Г., Поспеева Е.В., Казанский А.Ю.* Газогидротермы активных вулканов Камчатки и Курильских островов: состав, строение, генезис. Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2013. 282 с.
 15. *Жарков Р.В.* Термальные источники Южных Курильских островов / Отв. ред. О.В. Чудаев. Владивосток: Дальнаука, 2014. 378 с.
 16. *Kalacheva E.G., Taran Yu.A., Kotenko T.A., Inguaggiato S., and Voloshina E.V.* The hydrothermal system of Mendeleev volcano, Kunashir Island, Kuril Islands: the geochemistry and the transport of magmatic components // *J. of Volcanology and Seismology*. 2017. Vol. 11. No. 5. P. 335–352.
<https://doi.org/10.1134/S0742046317050037>
 17. *Лебедев Л.М., Дуничев В.М., Никитина И.Б., Цепин А.И.* К минералогии натечных кремнистых кор в долине р. Лесной, о-в Кунашир // Современные гидротермы и минералообразование. М.: Наука, 1988. С. 89–97.
 18. *Барабанов Л.Н.* Гидротермы Курильской вулканической области. Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии РАН, 1976. 460 с.
 19. *Bragin I.V., Chelnokov G.A., and Kharitonova N.A.* Geochemistry of thermal springs at Baransky volcano, Southern Kuriles (Russia) // *Environ. Earth Sci.* 2019. Vol. 78. № 3. P. 79–89.
 20. *Zharkov R.V.* Active Volcanoes and Thermal Springs of Kunashir Island (Russia) // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 459. No. 2. 022039.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/2/022039>
 21. *Мархинин Е.К., Стратула Д.С.* Гидротермы Курильских островов М.: Наука, 1977. 212 с.
 22. *Жарков Р.В., Побережная Т.М.* Влияние сольфатарно-гидротермальной деятельности вулканов на компоненты ландшафтов (влк. Менделеева, о-в Кунашир, Курильские острова) // Вестник ДВО РАН. 2008. № 1. С. 53–58.
 23. *Побережная Т.М.* Геохимия природных и техногенных ландшафтов Сахалина и Южных Курильских островов. Владивосток: Дальнаука, 2010. 124 с.
 24. *Двигало В.Н., Мелекесцев И.В.* Геолого-геоморфологические последствия катастрофических обвальных и обвально-оползневых процессов в Камчатской Долине Гейзеров (по данным аэрофотограмметрии) // Вулканология и сейсмология. 2009. № 5. С. 24–37.
 25. *Пинегина Т.К., Делемень И.Ф., Дрознин 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. // Вестник ДВО РАН. 2008. № 1. С. 33–44.
 26. *Лебедева Е.В., Сугробов В.М., Чижова В.П., Завадская А.В.* Долина р. Гейзерной (Камчатка): гидротермальная деятельность и особенности рельефообразования // Геоморфология. 2020. № 2. С. 60–73.
 27. Атлас долины реки Гейзерной в Кроноцком заповеднике / Ред. Завадская А.В. М.: Красанд, 2015. 88 с.
 28. *Пуйн Б.И.* Термальные ключи Камчатки // Труды СОПС АН СССР. Сер. Камчатская. 1937. Вып. 2. 268 с.
 29. *Ellis A.J. and Mahon W.A.J.* Natural hydrothermal systems and experimental hot water/rock interaction // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1964. Vol. 28. P. 1323–1357.
 30. *Giggenbach W.F.* Mass transfer in hydrothermal alteration systems – a conceptual approach // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1984. Vol. 48. P. 2693–2711.
 31. *Таран Ю.А., Пилипенко В.П., Рожков А.М.* Геохимия гидротермальных растворов и газов Мутновской гидротермальной системы // Геотермические и геохимические исследования высокотемпературных гидротерм. М.: Наука, 1986. 207 с.
 32. *Hedenquist J.W. and Browne P.R.L.* The evolution of the Waiotapu geothermal system, New Zealand, based on the chemical and isotopic composition of its fluids, minerals and rocks // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1989. Vol. 53. P. 2235–2257.
 33. *Абросимова Н.А.* Геохимия газогидротермальных источников вулканов Эбеко и Мутновский. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Томск: ИНГиГ, 2013. 19 с.
 34. *Кононов В.И.* Геохимия термальных вод областей современного вулканизма. М.: Наука, 1983. 215 с.
 35. *Churchill D.M., Manga M., Hurwitz S., Peek S., Damby D.E., Conrey R., Wood J.R., Blaine McCleskey R., Keller W.E., Hosseini B., and Hungerford J.D.G.* The structure and volume of large geysers in Yellowstone National Park, USA and the mineralogy and chemistry of their silica sinter deposits // *J. of Volcanology and Geothermal Research*. 2021. 107391.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107391>
 36. *Скляр Е.В., Федоровский В.С., Кулагина Н.В., Склярова О.А., Сквитина Т.М.* Позднечетвертичная “Долина гейзеров” на западе Байкальского рифта (Ольхонский регион). ДАН. 2004. Т. 395. № 3. С. 1–5.
 37. *Великославинский С.Д., Котов А.Б., Скляр Е.В., Сквитина Т.М., Толмачева Е.В., Склярова О.А., Прокопов Н.С.* Геохимические особенности и флюидный режим формирования позднечетвертичных гейзеритов Приольхонья и о. Ольхон (Байкальская

- рифтовая зона) // ДАН. 2017. Т. 474. № 4. С. 465–470.
38. Lynn B.Y. Mapping vent to distal-apron hot spring paleo-flow pathways using siliceous sinter architecture // *Geothermics*. 2012. Vol. 43. P. 3–24.
39. Campbell K.A., Guido D.M., John D.A., Vikre P.G., Rhys D., and Hamilton A. The Miocene Atastra Creek sinter (Bodie Hills volcanic field, California and Nevada): 4D evolution of a geomorphologically intact siliceous hot spring deposit // *J. of Volcanology and Geothermal Research*. 2018. Vol. 370. P. 65–81.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.12.006>
40. Churchill D.M., Manga M., Hurwitz S., Peek S., Licciardi J.M. and Paces J.B. Dating silica sinter (geyserite): A cautionary tale // *J. of Volcanology and Geothermal Research*. 2020. Vol. 402. 106991.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.106991>
41. Ладыгин В.М., Фролова Ю.В., Рычагов С.Н. Преобразование эффузивных пород под воздействием кислотного выщелачивания поверхностными термальными водами (геотермальная система Баранского, о. Итуруп) // *Вулканология и сейсмология*. 2014. № 1. С. 20–37.
42. Лебедева Е.В. Виды воздействия вулканической и поствулканической деятельности на флювиальный рельеф // *Геоморфология*. 2019. № 4. С. 49–66.
43. Лебедева Е.В. Особенности селеформирования в вулканических регионах // *Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита* / Тр. 6-й междунар. конф. (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Т. 1. Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. Душанбе: ООО “Промоушн”, 2020. С. 460–469.
44. Лебедева Е.В. Цепочки катастрофических геоморфологических процессов в речных долинах вулканических регионов // *Геоморфология*. 2018. № 4. С. 38–55.

Accumulative landforms in valleys with gas-hydrothermal manifestations (on the example of watercourses of some volcanic massifs in the Kuril-Kamchatka region)

E. V. Lebedeva^{a,#} and R. V. Zharkov^{b,##}

^a*Institute of Geography RAS, Moscow, Russia*

^b*Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*

[#]*E-mail: Ekaterina.lebedeva@gmail.com*

^{##}*E-mail: rafael_zharkov@mail.ru*

Within the valleys of streams of geothermal zones, where manifestations of gas-hydrothermal activity are noted, the processes of relief formation are accompanied by chemical and thermal effects. It has been established that in the valleys of the rivers under consideration: 1) the formation of specific accumulative forms of micro- and mesorelief both in the channels and on slopes occurs, 2) there is a processing of alluvial deposits and bedrocks by hydrothermal solutions, which leads to a radical change in both their properties, and the features of fluvial processes; 3) the activation of slope processes with the formation of landslide bodies and rock-slide masses is observed due to which in the bottoms there is an accumulation of displaced slope's material, including redeposited by mudflows. Typification of accumulative relief forms, the formation of which is associated with gas-hydrothermal activity, within the river valleys of 4 volcanic massifs on the Kuril Islands (volcanoes Mendeleeva on Kunashir Is. and Baranskogo on Iturup Is.) and Kamchatka (volcanoes Mutnovsky and Uzon-Geysernaya caldera) was carried out. The main forms of accumulative micro- and mesorelief associated with various manifestations of gas-hydrothermal activity are highlighted; their characteristics are given, morphometric parameters are described. Typical processes in the valleys of geothermal zones are not only the formation of various sinter forms and the cementation of floodplain and terrace deposits in places where mineralized thermal springs emerge, but also are forming of rather large landslide terraces and blocking of watercourses with dams composed of slope's and mudflow's material. Under the influence of acidic solutions, active weathering of bedrocks and boulder-pebble material to clays can also occur. Often, the sediments that make up floodplains and terraces, morphologically looking like typical pebble alluvium, are in fact a clay mass and are easily washed away by surface waters. With the attenuation of gas-hydrothermal activity, landslide bodies and drip forms overgrow and morphologically look like ordinary river terraces.

Keywords: gas hydrotherms, volcanism, hydrothermal solutions, landslide processes, fluvial relief, cementation, weathering

ACKNOWLEDGMENTS

Field research in 2013–2020 were carried out within the framework of the State assignment of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences No. 0148-2019-0005, the stage of field work in 2021 in the valley of the Geysernaya River and generalization of materials – at the expense of the Russian Science Foundation grant No. 21-17-00216, <https://rscf.ru/project/21-17-00216/>.

The authors are grateful to their colleagues who took part in organizing and conducting field routes on the Baranskogo, Mendeleeva, Mutnovsky volcanoes and in the Uzon-Geysernaya depression: I.I. Vlasova, A.V. Degterev, D.N. Kozlov, A.V. Kopanina, and A.I. Talskikh (IMGiG FEB RAS), D.V. Mikhalev (Moscow State University), D.V. Mishurinsky, A.L. Gurinov, A.L. Zakharov, and A.A. Medvedev (IG RAS), as well as employees of the Kuril and Kronotsky reserves.

REFERENCES

1. Vakin E.A., Kirsanov I.T., and Kirsanova T.P. *Termal'nye polya i goryachie istochniki Mutnovskogo vulkanicheskogo raiona* (Thermal fields and hot springs of the Mutnovsky volcanic region). *Gidrotermal'nye sistemy i termal'nye polya Kamchatki*. Vladivostok: Dal'nauka (Publ.), 1976. P. 85–114. (in Russ.)
2. Belousov V.I. and Sugrobov V.M. *Geologicheskaya i gidrogeologicheskaya obstanovka geotermal'nykh raionov i gidrotermal'nykh sistem Kamchatki* (Geological and hydrogeological setting of geothermal regions and hydrothermal systems of Kamchatka). *Gidrotermal'nye sistemy i termal'nye polya Kamchatki*. Vladivostok: Dal'nauka (Publ.), 1976. P. 5–22. (in Russ.)
3. Lebedev L.M., Zotov A.V., Nikitina I.B., Dunichev V.M., and Shurmanov L.P. *Sovremennyye protsessy mineraloobrazovaniya na vulkane Mendeleeva (o-v Kunashir)* (Modern processes of mineral formation on Mendeleev volcano (Kunashir Is.)). Moscow: Nauka (Publ.), 1980. 176 p. (in Russ.)
4. Leonov V.L., Grib E.N., Karpov G.A., Sugrobov V.M., Sugrobova N.G., and Zubin M.I. *Kal'dera Uzon i Dolina Geizerov* (Caldera Uzon and the Valley of Geysers). *Deistviyushchie vulkany Kamchatki*. Moscow: Nauka (Publ.), 1991. Vol. 2. P. 94–141. (in Russ.)
5. Rychagov S.N. *Gidrotermal'naya sistema vulkana Baranskogo (o. Iturup): model' geologicheskoi struktury* (Hydrothermal system of Baransky volcano (Iturup Island): model of geological structure). *Vulkanologiya i seismologiya (Journal of Volcanology and Seismology)*. 1993. No. 2. P. 59–75. (in Russ.)
6. Rychagov S.N. and Shchegol'kov Yu.V. *Mineral'nye no-voobrazovaniya na poverkhnosti zeren pirita Nizhne-Koshelevskoi geotermal'noi anomalii, Yuzhnaya Kamchatka* (Mineral neoplasms on the surface of pyrite grains of the Nizhne-Koshelevskaya geothermal anomaly, South Kamchatka). *Rudy i metallurgiya*. 2011. No. 2. P. 52–57. (in Russ.)
7. Sugrobov V.M. and Sugrobova N.G. *Osobennosti razgruzki vysokotemperaturnykh podzemnykh vod v Doline Geizerov* (Peculiarities of discharge of hightemperatured underground waters in the Valley of the Geysers). *Vo-prosy geografii Kamchatki*. Petropavlovsk-Kamchatsky. 1990. P. 81–89. (in Russ.)
8. Chudaev O.V. *Sostav i usloviya obrazovaniya sovremennykh gidrotermal'nykh sistem Dal'nego Vostoka Rossii* (Composition and conditions of formation of modern hydrothermal systems in the Russian Far East). Vladivostok: Dal'nauka (Publ.), 2003. 203 p. (in Russ.)
9. Chudaev O.V., Chudaeva V.A., Karpov G.A., and Edmunds U.M. *Geokhimiya vod osnovnykh geotermal'nykh raionov Kamchatki* (Geochemistry of waters of the main geothermal regions of Kamchatka). Vladivostok: Dal'nauka (Publ.), 2000. 157 p. (in Russ.)
10. Sugrobov V.M., Sugrobova N.G., Droznin V.A., Karpov G.A., and Leonov V.L. *Zhemchuzhina Kamchatki - Dolina Geizerov. Nauchno-populyarnyi ocherk, putevoditel'* (The Pearl of Kamchatka is the Valley of Geysers. Popular science essay, guide). Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatpress (Publ.), 2009. 108 p. (in Russ.)
11. Frolova Yu.V., Ladygin V.M., and Rychagov S.N. *Inzhenerno-geologicheskie osobennosti gidrotermal'no-metasomaticheskikh porod Kamchatki i Kuril'skikh ostrovov* (Engineering-geological features of hydrothermal-metasomatic rocks of Kamchatka and the Kuril Islands). *Inzhenernaya geologiya (Engineering geology)*. 2011. No. 3. P. 40–54. (in Russ.)
12. Frolova Yu.V., Gvozdeva I.P., Chernov M.S., and Kuznetsov N.P. *Inzhenerno-geologicheskie aspekty gidrotermal'nykh preobrazovaniy tufogennykh porod Doliny geizerov (poluostrov Kamchatka)* (Geotechnical aspects of hydrothermal transformations of tuffaceous rocks of the Valley of Geysers (Kamchatka Peninsula)). *Inzhenernaya geologiya (Engineering geology)*. 2015. No. 6. P. 30–42. (in Russ.)
13. Frolova Yu.V., Zerkal' O.V., and Gvozdeva I.P. *Vliyaniye gidrotermal'nykh preobrazovaniy na fiziko-mekhanicheskie svoystva tufogennykh porod Doliny geizerov i ikh rol' v formirovaniy opolznei* (The influence of hydrothermal transformations on the physicochemical properties of tuffogenic rocks of the Valley of Geysers and their role in the formation of landslides). *Geodinamicheskie protsessy i prirodnye katastrofy: tezisy dokl. III Vseros. nauchn. konf. s mezhd. uchastiem*. L.M. Bogomolov (Ed.). Yuzhno-Sakhalinsk: IMGiG DVO RAN (Publ.), 2019. P. 186. (in Russ.)
14. Bortnikova S.B., Bessonova E.P., Gora M.P., Shevko A.Ya., Panin G.L., Zharkov R.V., El'tsov I.N., Kotenko T.A., Bortnikova S.P., Manshtein Yu.A., Kotenko L.V., Kozlov D.N., Abrosimova N.A., Karin Yu.G., Pospeeva E.V., and Kazanskii A.Yu. *Gazogidrotermnyy aktivnykh vulkanov Kamchatki i Kuril'skikh ostrovov: sostav, stroeniye, genezis* (Gas hydrotherms of active volcanoes in Kamchatka and the Kuril Islands: composition, structure, genesis). Novosibirsk: INGT SO RAN (Publ.), 2013. 282 p. (in Russ.)

15. Zharkov R.V. *Termal'nye istochniki Yuzhnykh Kuril'skikh ostrovov* (Thermal springs of the South Kuril Islands). Chudaev O.V. (Ed.). Vladivostok: Dal'nauka (Publ.), 2014. 378 p. (in Russ.)
16. Kalacheva E.G., Taran Yu.A., Kotenko T.A., Inguaggiato S., and Voloshina E.V. The hydrothermal system of Mendeleev volcano, Kunashir Island, Kuril Islands: the geochemistry and the transport of magmatic components. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2017. Vol. 11. No. 5. P. 335–352. <https://doi.org/10.1134/S0742046317050037>
17. Lebedev L.M., Dunichev V.M., Nikitina I.B., and Tsepin A.I. Mineralogy of sintered siliceous crust in the valley of the river. Lesnoy, Kunashir Island. *Sovremennye gidrotermy i mineraloobrazovanie* (Modern hydrotherms and mineral formation). Moscow: Nauka (Publ.), 1988. P. 89–97. (in Russ.)
18. Barabanov L.N. *Hydrotermy Kuril'skoi vulkanicheskoi oblasti* (Hydrotherms of the Kuril volcanic region). Petropavlovsk-Kamchatsky: Institute of Volcanology RAS (Publ.), 1976. 460 p. (in Russ.)
19. Bragin I.V., Chelnokov G.A., and Kharitonova N.A. Geochemistry of thermal springs at Baransky volcano, Southern Kuriles (Russia). *Environ. Earth Sci.* 2019. Vol. 78. No. 3. P. 79–89.
20. Zharkov R.V. Active Volcanoes and Thermal Springs of Kunashir Island (Russia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 459. No. 2. 022039. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/2/022039>
21. Markhinin E.K. and Stratula D.S. *Gidrotermy Kuril'skikh ostrovov* (Hydrotherms of the Kuril Islands). Moscow: Nauka (Publ.), 1977. 212 p. (in Russ.)
22. Zharkov R.V. and Poberezhnaya T.M. Influence of solfatary-hydrothermal activity of volcanoes on landscape components (Mendeleev volcano, Kunashir Is., Kuril Islands). *Vestnik DVO RAN*. 2008. No. 1. P. 53–58. (in Russ.)
23. Poberezhnaya T.M. *Geokhimiya prirodnykh i tekhnogennykh landshaftov Sakhalina i Yuzhnykh Kuril'skikh ostrovov* (Geochemistry of natural and technogenic landscapes of Sakhalin and the South Kuril Islands). Vladivostok: Dal'nauka (Publ.), 2010. 124 p. (in Russ.)
24. Dvigalo V.N. and Melekestsev I.V. Geological and geomorphological consequences of catastrophic rockfall and rockfall – landslides processes in the Kamchatka Valley of Geysers (according to aerial photogrammetry). *Vulkanologiya i seysmologiya (Journal of Volcanology and Seismology)*. 2009. No. 5. P. 24–37. (in Russ.)
25. Pinegina 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. Kamchatka Valley of Geysers after the catastrophe on 3 June 2007. *Vestnik DVO RAN*. 2008. No. 1. P. 33–44. (in Russ.)
26. Lebedeva E.V., Sugrobov V.M., Chizhova V.P., and Zavadskaya A.V. The valley of the river Geyzernaya (Kamchatka): hydrothermal activity and features of relief forming. *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2020. No. 2. P. 60–73. (in Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0435428120020066>
27. *Atlas doliny reki Geyzernoy v Kronotskom zapovednike* (Atlas of the valley of the River Geyzernaya in Kronotsky Reserve). Zavadskaya A.V. (Ed.). M.: KRASAND (Publ.), 2015. 88 p. (in Russ.)
28. Piip B.I. *Termal'nyye klyuchi Kamchatki* (Thermal springs of Kamchatka). *Trudy SOPS AN SSSR. Ser. Kamchatskaya*. 1937. Vol. 2. 268 p. (in Russ.)
29. Ellis A.J. and Mahon W.A.J. Natural hydrothermal systems and experimental hot water/rock interaction. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1964. Vol. 28. P. 1323–1357.
30. Giggenbach W.F. Mass transfer in hydrothermal alteration systems – a conceptual approach. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1984. Vol. 48. P. 2693–2711.
31. Taran Yu.A., Pilipenko V.P., and Rozhkov A.M. Geochemistry of hydrothermal solutions and gases of the Mutnovskaya hydrothermal system. *Geotermicheskiye i geokhimicheskiye issledovaniya vysokotemperaturnykh gidroterm* (Geothermal and geochemical studies of high-temperature fluids). Moscow: Nauka (Publ.), 1986. 207 p. (in Russ.)
32. Hedenquist J.W. and Browne P.R.L. The evolution of the Waiotapu geothermal system, New Zealand, based on the chemical and isotopic composition of its fluids, minerals and rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1989. Vol. 53. P. 2235–2257.
33. Abrosimova N.A. *Geokhimiya gazogidrotermal'nykh istochnikov vulkanov Ebeko i Mutnovskii* (Geochemistry of gas-hydrothermal springs of Ebeko and Mutnovsky volcanoes). PhD thesis. Tomsk: INGiG (Publ.), 2013. 19 p. (in Russ.)
34. Kononov V.I. *Geokhimiya termal'nykh vod oblastei sovremennogo vulkanizma* (Geochemistry of thermal waters in areas of modern volcanism). Moscow: Nauka (Publ.), 1983. 215 p. (in Russ.)
35. Churchill D.M., Manga M., Hurwitz S., Peek S., Damby D.E., Conrey R., Wood J.R., Blaine McCleskey R., Keller W.E., Hosseini B., and Hungerford J.D.G. The structure and volume of large geysers in Yellowstone National Park, USA and the mineralogy and chemistry of their silica sinter deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2021. Vol. 419. 107391. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107391>
36. Sklyarov E.V., Fedorovskiy V.S., Kulagina N.V., Sklyarova O.A., and Skovitina T.M. Late Quaternary Valley of Geysers in the west of the Baikal Rift (Olkhon region). *Doklady Akademii nauk*. 2004. Vol. 395. No. 3. P. 1–5. (in Russ.)
37. Velikoslavinskii S.D., Kotov A.B., Sklyarov E.V., Skovitina T.M., Tolmacheva E.V., Sklyarova O.A., and Prokopov N.S. Geochemical features and fluid regime of the formation of Late Quaternary geysers in the Olkhon region and Olkhon Is. (Baikal rift zone). *Doklady Akademii nauk*. 2017. Vol. 474. No. 4. P. 465–470. (in Russ.)

38. Lynn B.Y. Mapping vent to distal-apron hot spring paleo-flow pathways using siliceous sinter architecture. *Geothermics*. 2012. Vol. 43. P. 3–24.
39. Campbell K.A., Guido D.M., John D.A., Vikre P.G., Rhys D., and Hamilton A. The Miocene Atastra Creek sinter (Bodie Hills volcanic field, California and Nevada): 4D evolution of a geomorphically intact siliceous hot spring deposit. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2018. Vol. 370. P. 65–81. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.12.006>
40. Churchill D.M., Manga M., Hurwitz S., Peek S., Licciardi J.M. and Paces J.B. Dating silica sinter (geyserite): A cautionary tale. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2020. Vol. 402. 106991. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.106991>
41. Ladygin V.M., Frolova Yu.V., and Rychagov S.N. Transformation of effusive rocks under the influence of acid leaching by surface thermal waters (geothermal system of Baransky volcano, Iturup Is.). *Vulkanologiya i seismologiya (Journal of Volcanology and Seismology)*. 2014. No. 1. P. 20–37. (in Russ.)
42. Lebedeva E.V. Kinds of impacts of volcanic and post volcanic activity on fluvial relief. *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2019. No. 4. P. 49–66. (in Russ.)
43. Lebedeva E.V. Features of debris flow formation in volcanic regions. *Selevye potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita (Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection)*. Proceed. of the 6th conference (Tajikistan). Vol. 1. S.S. Chernomorets and K.S. Viskhadzhieva (Eds.). Dushanbe: OOO “Promoushn” (Publ.), 2020. P. 460–469. (in Russ.)
44. Lebedeva E.V. Sequences of catastrophic geomorphic processes in the river valleys of volcanic regions. *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2018. No. 4. P. 38–55. (in Russ.)