
СОВРЕМЕННАЯ КОЛИЧЕСТВЕННАЯ
И ПРОЦЕССНАЯ ГЕОМОРФОЛОГИЯ

УДК 551.4+551.2

**РЕЛЬЕФООБРАЗОВАНИЕ В ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РАЙОНАХ
КУРИЛО-КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА: ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ
И ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ**

© 2025 г. Е. В. Лебедева^{1,*}, Ю. В. Фролова^{2,*}

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

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

*e-mail: ju_frolova@mail.ru

Поступила в редакцию 23.06.2025 г.

После доработки 28.07.2025 г.

Принята к публикации 25.09.2025 г.

Результаты многолетних геологических и геоморфологических полевых работ на островах Кунашир, Итуруп, Парамушир, а также на полуострове Камчатка показали, что на термальных полях и прилегающих к ним территориях наблюдается значительная активность денудационных процессов, в первую очередь, склоновых и эрозионных. Данные проведенных лабораторных исследований свидетельствуют, что в результате газогидротермальной проработки пород на подобных территориях происходит кардинальное изменение их состава, сопровождающееся разуплотнением и снижением прочностных свойств. Все это способствует гравитационному смещению значительных объемов материала на склонах, часто с перегораживанием русел водотоков. Развитие склоновых процессов дополнительно активизируется при наличии выходов термальных вод и за счет прогрева грунтов. В геотермальных районах многочисленны следы селей, причем нередко асезонных. В результате активизации линейной эрозии на обнаженных склонах могут формироваться участки бедлендов. Водотоки, дренирующие термальные поля, выносят значительное количество взвешенного и растворенного материала. Все это приводит к увеличению скорости денудации и формированию эрозионно-денудационных воронок и денудационных котловин на участках гидротермальных взрывов, а также к аномальному расширению долин водотоков в пределах термальных полей по сравнению с фоновыми участками. Данные наблюдений подтверждают и такой интересный феномен, как колебания топографической поверхности в пределах геотермальных зон, обусловленные как естественной миграцией термальных флюидов, так и их использованием при эксплуатации термальных месторождений. Очевидна необходимость продолжения исследований геотермальных районов Курило-Камчатского региона с использованием широкого спектра не только геологических, но и геоморфологических и картографических методов, в том числе применение новейших технологий, таких как радиолокационная интерферометрия.

Ключевые слова: термальные поля, гидротермальное воздействие, аргиллизация, склоновые процессы, селеформирование, эрозия, Курило-Камчатская дуга

DOI: 10.7868/S2658697525060036

ВВЕДЕНИЕ

На морфологию земной поверхности влияет множество факторов, как внутренних — например, вулканизм и тектонические движения, так и внешних — в том числе, количество осадков, активизирующих эрозию. Курило-Камчатский регион отличается высокой активностью как эндогенных, так и экзогенных процессов, что

в общих чертах было описано ранее в ряде обобщающих региональных работ (Камчатка ..., 1974; Мелекесцев, 1980). Однако в них практически не было уделено внимания специфике рельефообразования в пределах геотермальных зон, которые достаточно широко распространены в вулканических регионах и характеризуются высокой динамикой природных процессов.

Геотермальные районы, для которых характерен повышенный тепловой поток (Вулканизм ..., 1974), несмотря на локальное распространение на земном шаре в целом, в последние годы вызывают пристальное внимание и приобретают все большее значение не только в нашей стране, но и в мире. Развитие геотермальной энергетики, которую относят к возобновляемым и экологически чистым источникам, имеет большое потенциальное значение. В настоящее время в 30-ти странах функционируют геотермальные электростанции (Huttrer, 2020), около 90 стран используют геотермальные ресурсы для целей теплоснабжения (Lund, Toth, 2020). Развитие геотермальной энергетики предполагает строительство соответствующей инфраструктуры — не только самих станций, но и дорог, трубопроводов и иных сооружений. Помимо этого, интерес к геотермальным районам вырос и вследствие увеличения притока туристов на эти примечательные территории, где не только организованы многочисленные познавательные экологические маршруты, но и создаются санаторно-курортные объекты. В связи с перечисленным возникают вопросы безопасности как сотрудников и посетителей, так и создаваемой промышленной и рекреационной инфраструктуры от неблагоприятных природных процессов.

Спецификой геотермальных площадей являются масштабные преобразования горных пород под действием циркулирующих гидротерм, охватывающие большие объемы от поверхности до глубины первых километров. Термальные флюиды разной температуры, химического состава, фазового состояния воздействуют на вмещающие породы, в результате чего существенно меняются состав, пористость и физико-механические свойства последних. В итоге формируются пространственно неоднородные толщи, в составе которых представлены в различной степени измененные породы с очень контрастными свойствами. В свою очередь, изменение физико-механических свойств пород влечет за собой ряд геологических последствий, в том числе и опасных, что отмечается многими специалистами для различных геотермальных районов мира (Фролова и др., 2011; Browne, Lawless, 2001; Frolova et al., 2014; Romero et al., 2021; Rouwet et al., 2014; Voight, 1992). К ним относятся не только миграция и изменение режима термопроявлений, гидротермальные взрывы, изменение напряженно-деформированного состояния массивов горных пород, а также локальные деформации поверхности.

Наиболее интенсивные преобразования пород происходят в верхних горизонтах — в местах разгрузок термальных вод и парогазовых струй.

Обычно здесь преобладают низкотемпературные преобразования, приводящие к выщелачиванию и разуплотнению пород и снижению их прочностных характеристик (Frolova et al., 2014, 2021), что активизирует ряд опасных геолого-геоморфологических процессов и приводит к формированию своеобразного рельефа.

Цель данного исследования — рассмотреть особенности рельефообразования в пределах геотермальных зон на примере ряда районов Курило-Камчатского региона, выявить общие закономерности и объяснить их с учетом трансформации коренного субстрата в результате газогидротермального воздействия.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РЕГИОНА

Камчатский полуостров и Курильские острова находятся на участке перехода от океана к континенту северо-западного сегмента Тихоокеанского огненного кольца — одной из самых динамичных зон Земли. Обычно они рассматриваются как единая крупная островодужная система, относящаяся к области кайнозойской складчатости. Положение Курило-Камчатской вулканической дуги над зоной субдукции обеспечивает повышенный конвективный тепловой поток и условия, благоприятные для формирования гидротермальных систем (ГТС). Если рассматривать Курило-Камчатский регион в целом, то преобладающее число ГТС расположено в пределах Восточного вулканического пояса, включая Южную Камчатку, и на Большой Курильской гряде. Большинство исследованных ГТС приурочены к плейстоценовым вулканотектоническим депрессиям или сложно построенным вулканическим массивам, сложенным неоген-четвертичными вулканогенными и вулканогенно-осадочными образованиями. Интенсивно трещиноватые, хорошо пронизываемые отложения являются вмещителем подземных вод, которые нагреваются аномально высоким тепловым потоком, формируя в массиве конвективные ячейки, и, в конечном итоге, разгружаются на дневной поверхности в виде термальных источников и парогазовых струй.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В основе работы лежат материалы многолетних полевых геологических и геоморфологических исследований в пределах геотермальных районов Курило-Камчатской дуги, многие из которых проводились совместно с лабораторией геотермии Института вулканологии и сейсмологии (ИВиС) и сотрудниками Института морской геологии и геофизики (ИМГиГ) ДВО РАН. Были изучены гидротермальные системы Па-

ужетская, Узон-Гейзерная, Больше-Банная, Мутновская; Кошелевские и Камбальные термальные поля (ТП) на Камчатке; Северо-Парамуширская, Баранского, Менделеева и Головнина на Курильских островах (Лебедева, 2022; Лебедева и др., 2020; Фролова и др., 2011; Frolova et al., 2014; Lebedeva et al., 2022; и др.). На рис. 1 представлена схема расположения исследованных гидротермальных систем.

При подготовке работы проводились анализ полевых геологических (за 2005–2024 гг.) и геоморфологических (за 2012–2024 гг.) описаний и маршрутных наблюдений, работа с полевыми фотоархивами. Изучены литературные источники и фондовые материалы по анализируемому вопросу.

На исследуемые участки ряда термальных полей (на о-вах Кунашир, Итуруп, вулканах Мутновский, Ксудач, в Узон-Гейзерной депрессии) проводилось дешифрирование космических снимков высокого разрешения, на ключевые участки влк. Мутновский и Узон-Гейзерной депрессии — аэровизуальные наблюдения и низковысотная съемка с БПЛА.

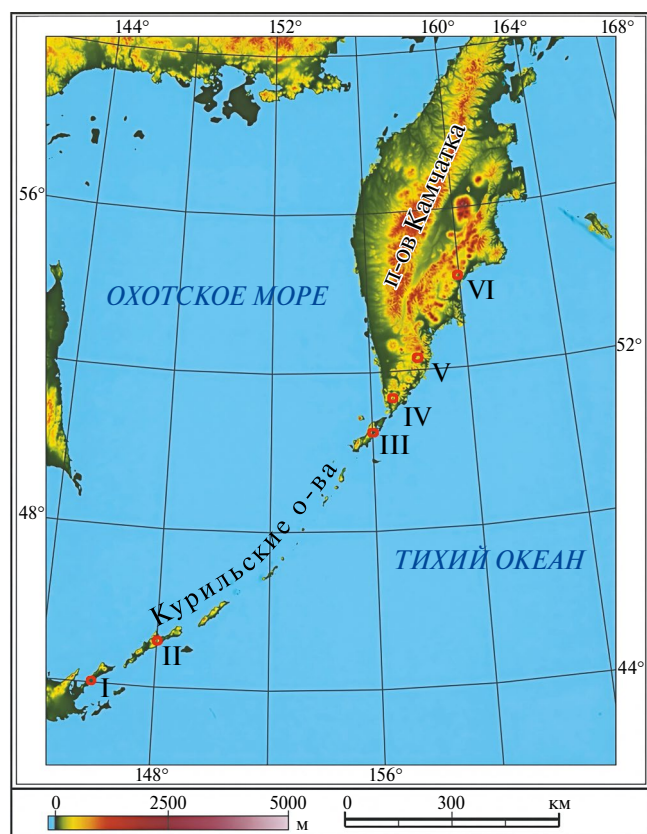


Рис. 1. Положение основных участков исследований. Курильские острова: I, о. Кунашир (влк. Менделеева и кальдера Головнина); II, о. Итуруп (влк. Баранского); III, о. Парамушир (влк. Эбеко). Камчатка: IV, Паужетско-Камбально-Кошелевский геотермальный район; V, влк. Мутновский; VI, Узон-Гейзерная кальдера.

Выполнен широкий спектр лабораторных исследований, включавших определение минерального состава, строения и физико-механических свойств вулканогенных пород, слагающих геотермальные районы исследуемого региона, и продуктов их гидротермальной переработки. Методика исследований детально изложена в работах (Фролова, 2015; Фролова и др., 2011).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что для геотермальных районов характерны специфические формы рельефа, созданные эндогенными процессами, и активизация ряда экзогенных процессов рельефообразования, обусловленная воздействием разгружающихся гидротерм на окружающие их горные породы. Поэтому, в первую очередь, нами были рассмотрены механизмы и результаты этого воздействия и проанализированы свойства гидротермально измененных пород.

Трансформация горных пород

Газогидротермальная деятельность нередко сопровождается вулканической, но также может сохраняться и после ее затухания. Термальные воды вызывают интенсивную химико-минералогическую переработку вулканогенных пород, в результате которой формируются обширные площади, сложенные гидротермально измененными (метасоматическими) породами. Среди них преобладают гидротермальные глины, опалиты и сольфатарные вторичные кварциты. Данные породы очень контрастны по своим прочностным характеристикам (табл. 1): наибольшей прочностью обладают вторичные кварциты (прочность на сжатие нередко превышает 100 МПа), а самыми слабыми являются гидротермальные глины (прочность на сжатие менее 1 МПа).

Наиболее масштабным процессом на термальных полях является *гидротермальная аргиллизация*, в ходе которой глинистые минералы замещают первичные компоненты вулканогенных пород (плагиноклазы, пироксены, амфиболы, вулканическое стекло и др.), что сопровождается разуплотнением, выщелачиванием, трещинообразованием с резким снижением прочностных и деформационных свойств. В результате прочные вулканические массивы нередко полностью трансформируются в аргиллизиты и гидротермальные глины. При сильной аргиллизации андезитов их модуль упругости уменьшается в 3–4 раза, прочность на одноосное сжатие снижается в среднем на порядок (от более 100 МПа до 10 МПа и ниже), прочность на разрыв уменьшается с 25 до 5 МПа, прочность

Таблица 1. Физико-механические свойства продуктов гидротермальной деятельности

Показатель	Глины	Опалиты	Вторичные кварциты		
			Сольфатарные (приповерхностные)		Глубинные
			Моно-кварциты	Кварц-алунитовые	Кварц-серицитовые
Плотность скелета грунта, г/см³	0.57–1.51	$\frac{1.71}{1.32-2.14}$	2.27	$\frac{2.36}{2.29-2.46}$	$\frac{2.52}{2.45-2.75}$
Пористость, %	41–77	$\frac{35}{23-51}$	18	$\frac{12}{6-17}$	$\frac{13}{9-15}$
Прочность на сжатие, МПа	0.07–0.3	$\frac{30}{3-84}$	73	$\frac{69}{27-122}$	$\frac{114}{78-196}$
Прочность на разрыв, МПа	—	$\frac{3.4}{0.6-9.0}$	—	—	16
Прочность на сдвиг (сцепление), МПа	0.001–0.29	$\frac{4.6}{0.7-9.7}$	—	—	$\frac{22.7}{20.3-25.0}$
Кол-во образцов	20	124	1	5	9

Примечание: над чертой — среднее значение, под чертой — максимальное и минимальное значения.

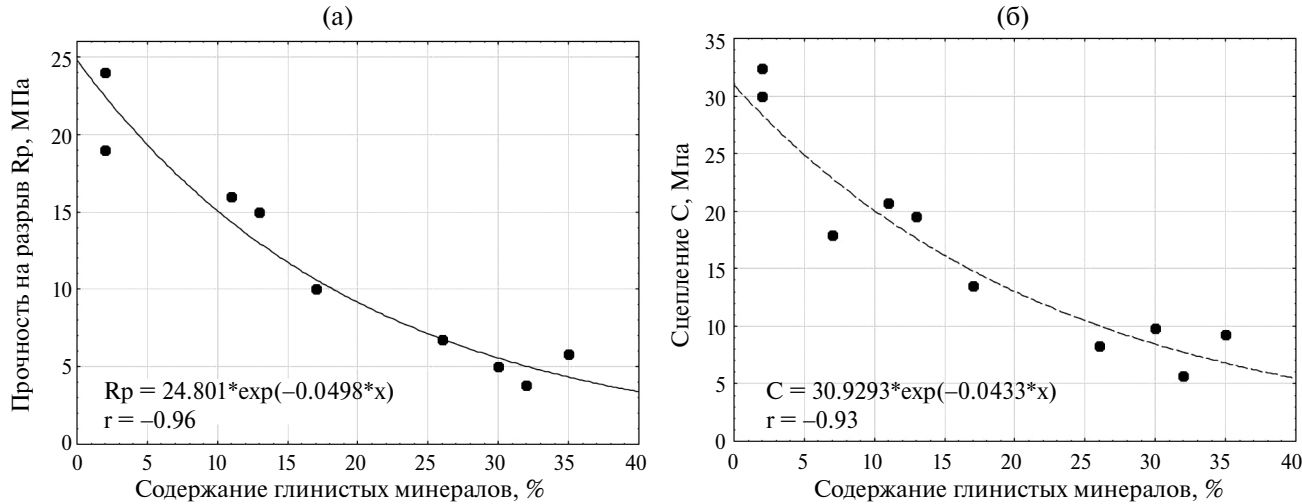


Рис. 2. Снижение прочностных свойств андезитов с увеличением содержания глинистых минералов: прочность на разрыв (а); прочность на сдвиг (сцепление) (б).

на сдвиг (сцепление) — с 30 до 5 МПа и менее. На рис. 2 показана тенденция к разупрочнению андезитов Нижнекошелевского термального поля (Камчатка) при увеличении содержания глинистых минералов. При полной трансформации вулканогенных пород в глины прочность на одноосное сжатие снижается на три порядка. Также значительно уменьшаются сдвиговые характеристики, отвечающие за устойчивость склона: сцепление — на 2–3 порядка, угол внутреннего трения — в 2–3 раза (Frolova et al., 2014). Аргиллизированные породы становятся неустойчивыми при водонасыщении (их прочность значительно снижается, иногда вплоть до полного разрушения породы).

Опалитизация и окварцевание, напротив, могут вызывать некоторое упрочнение пород, в результате чего они могут сохраняться в виде положительных форм рельефа: например, опалитовых (серных) бугров и останцовых островершинных хребтов, сложенных вторичными кварцитами (рис. 3). Однако эти процессы имеют не столь масштабного распространения как аргиллизация.

Помимо новообразованных пород на термальных полях сохраняются и реликты исходных вулканитов, что делает субстрат (приповерхностный горизонт пород) этих территорий крайне неоднородным по составу и свойствам.



Рис. 3. Денудационные останцы на Южно-Камбальном термальном поле: хр. Цветные скалы, сложенный вторичными кварцитами (Ближнее поле) (а); опалитовый бугор (Дальнее поле) (б). Фотографии Ю.В. Фроловой.

Именно разница в прочностных свойствах формирующихся гидротермально-метасоматических пород является одной из причин, приводящих к формированию своеобразного рельефа термальных полей. Более прочные кремнистые породы — опалиты и вторичные кварциты, как правило, слагают возвышенные участки, а окружающие их гидротермальные глины, напротив, легко разрушаются, размываются, образуя отрицательные формы рельефа.

Важно отметить, что для геотермальных площадей характерна *миграция поверхностных термоявлений* и изменение режима их работы во времени. Это видно и по изменению растительности, которая погибает на участках максимального прогрева, а также подтверждается тем фактом, что площадь распространения измененных пород намного превышает современные

термальные поля и участки разгрузок гидротерм. Основной причиной подобного феномена является изменение морфологии порово-трещинного пространства в процессе гидротермального метасоматоза: в результате кристаллизации вторичных минералов в пустотах закрываются старые пути фильтрации, а под действием выщелачивания открываются новые каналы, что приводит к смещению местоположения разгрузки парогидротерм. В свою очередь, это отражается на морфологических особенностях поверхности, приводя к изменениям микро- и мезорельефа.

Кроме того, работами последних лет (Чернов и др., 2023; Loche, Scaringi, 2023; Scaringi, Loche, 2022) установлена повышенная чувствительность глинистых пород к изменениям температурного режима. В частности, при повышении температуры глинистого грунта от 20 до 85°C,

зафиксировано изменение морфологии порового пространства и снижение прочности на сдвиг. Это связано с физико-химическими процессами, происходящими на микроуровне, и прежде всего, с разрушением или уменьшением гидратных пленок адсорбционной и осмотической воды и, соответственно, с ослаблением контактов коагуляционного типа (Чернов и др., 2023). Проведенные этими исследователями эксперименты и моделирование термогидромеханических свойств глинистых грунтов показывают, что тепловые эффекты, в том числе, даже сезонные колебания температуры в глинистых отложениях на горных склонах, могут провоцировать процессы смещения пород.

Особенности рельефообразования

На термальных полях активно протекает спектр эндогенные процессов, приводящих к изменению характера поверхности и возникновению новых форм рельефа. Крайне опасным явлением в геотермальных районах являются *гидротермальные взрывы* (Browne, Lawless, 2001), в результате которых образуются глубокие воронки иногда весьма значительных размеров (десятки метров и более). К взрыву приводит быстрое снижение давления в ГТС, что вызывает вскипание гидротерм и парообразование, приводящее к резкому расширению парогазовой смеси. В результате происходит брекчирование пород и выброс обломков на поверхность. Изначально взрывные воронки окружены характерными бортиками, сложенными обломочным материалом. Такие воронки наблюдаются на склонах Мутновского влк., на влк. Баранского, в русле р. Гейзерной и на многих других термальных полях (табл. 2, рис. 4). После формирования воронок газогидротермальная деятельность в них часто продолжается. В дальнейшем эти понижения могут заполняться водой с формированием термальных озер либо небольших кипящих котлов, либо разрушаться

эрозией и денудацией — особенно, если они располагаются на склонах. В последнем случае они могут постепенно трансформироваться в эрозионно-денудационные воронки или даже котловины.

При выходе термальных вод и газов на поверхность в результате резкого снижения температуры и давления происходит *осаждение ряда минералов* с формированием из них небольших построек (как сольфатарных, так и гейзерных), а также натечных плащей, террас и ступеней (рис. 5). Подробно эти формы были описаны нами ранее (Лебедева, 2022; Lebedeva, Zharkov, 2022). При этом за счет *выщелачивания пород* при взаимодействии с агрессивными флюидами и *выноса вещества* также формируются подземные полости — обычно приповерхностные. В то же время в этих подземных полостях и трещинах может происходить и рост вторичных минералов — их кристаллизация из термальных растворов и газов, что приводит к “залечиванию” трещин. Однако взрывные процессы приводят к формированию новых. В результате такого смещения местоположения трещин, по которым поднимаются термальные растворы и парогазовые смеси, происходит и миграция термальных площадок — наиболее прогретых участков термальных полей, что приводит к расширению зоны трансформации пород со всеми вытекающими последствиями.

Формирование ослабленных гидротермальной деятельностью пород способствует интенсификации экзогенных процессов — *гравитационных, селевых и эрозионных* на склонах вулканических массивов и в пределах речных долин (табл. 3). Кроме того, многочисленные термальные источники, парогазовые выходы и грязевулканические проявления дополнительно увлажняют горные породы склонов, стимулируя их смещение и развитие водной эрозии. Наряду с этим на лишенных растительности сухих участках максимального прогрева активна дефляция, а в

Таблица 2. Формы рельефа, созданные эндогенными процессами

Процесс	Основные механизмы и факторы	Форма рельефа
Газогидротермальные взрывы	Резкое снижение давления в ГТС → → вскипание гидротерм, парообразование, расширение → взрыв	Взрывные воронки на поверхности, трещины и полости — под землей
Осаждение вторичных минералов из парогазовых смесей и термальных вод в полостях и при выходе на поверхность	Кристаллизация минералов — реакция на изменение температуры, давления, скорости потока	Постройки и плащи гейзеров, натечные террасы, ступени водопадов, залечивание трещин и подземных каналов
Выщелачивание пород при взаимодействии с агрессивными газами и водами	Химические реакции, вынос растворенного вещества водой	Подземные и приповерхностные полости

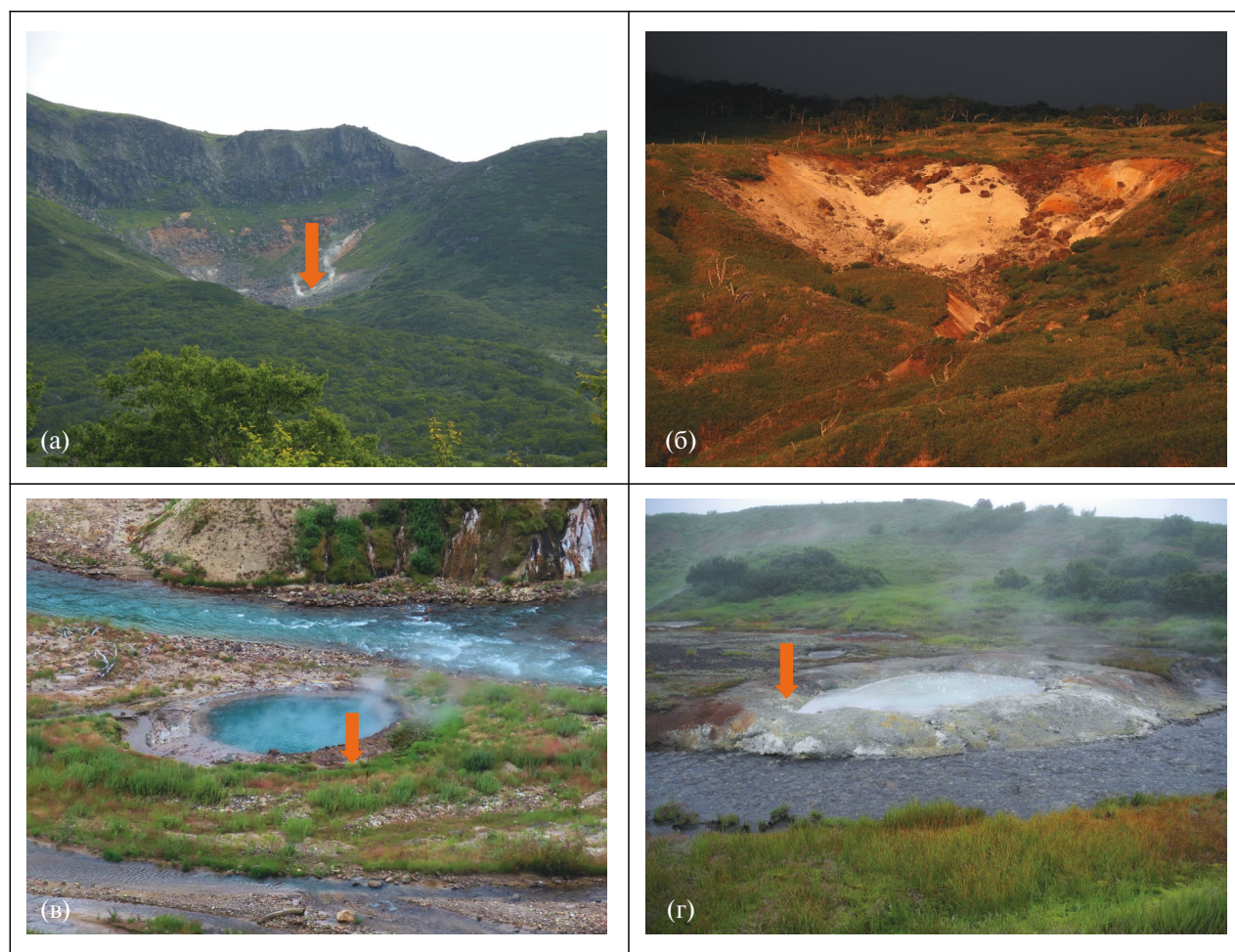


Рис. 4. Результаты эндогенной деятельности — взрывные воронки различных размеров. Крупные воронки на склонах влк. Баранского (о. Итуруп): со следами газогидротермальной активности (стрелка — участки парения) (а); преобразованная эрозионно-денудационными процессами (б). Малые воронки с активной гидротермальной деятельностью (кипящие котлы) в днищах водотоков (Камчатка): свежая воронка (образовалась в 2019–2020 гг., стрелка — валик из обломочного материала) над гейзером Малая Печка, р. Гейзерная (в). Воронка в верховьях р. Фальшивой, влк. Мутновский (стрелка — валик, покрытый коркой минеральных новообразований) (г). Фотографии Е.В. Лебедевой.

ветровой тени может наблюдаться аккумуляция снесенного материала.

Склоновые процессы. В Курило-Камчатском регионе наиболее широко известны масштабные обвалы и оползни на склонах долины р. Гейзерной (Камчатка) на участках Гейзерного и Верхнегейзерного термальных полей у подножия влк. Кихпиныч, которые произошли в 1981, 2007 и 2014 гг. (рис. 6а, б). Общий объем смещенных там пород составил около 24 млн м³ (Двигало, Мелекесцев 2009; Лебедева и др., 2020; Леонов, 2014; Пинегина и др., 2008; Lebedeva et al., 2022; Zerkal, Gvozdeva, 2019). Протяженность амфитеатра обрушения обвала-оползня 2007 г. достигает 800 м, оползня-обвала 2014 г. — 200 м. В стенках срыва хорошо видны гидротермально измененные породы, наблюдаются выходы термальных вод и парогазовых струй, что подтверждает связь этих событий с гидротермальной проработкой

пород и дополнительным увлажнением склонов. Тем более, что явных триггеров для обвалов 2007 и 2014 гг. исследователями (Леонов, 2014; Пинегина и др., 2008) установлено так и не было.

Дешифрирование разновременных космических снимков высокого разрешения с 1964 по 2021 г. показало также, что в пределах термальных полей левого борта долины р. Гейзерной максимальная площадь обнаженных участков, которая достигает 40% от общей площади склонов (Балдина и др., 2023). Помимо описанных выше явлений здесь фиксируются участки обвалов, осыпей, небольших оползней и других активных процессов. Также на склонах долины многочисленны разновысотные террасовидные поверхности — замаскированные растительностью следы древних смещений материала — мощных голоценовых обвалов и оползней, а в днище долины фиксируются



Рис. 5. Аккумулятивные формы на склонах и в руслах водотоков: покрытые минеральными новообразованиями ступени водопада (а) и русловые лотки (б) в долине Кипящей речки (влк. Баранского, о. Итуруп). Натечные террасы: в долине р. Гейзерной (Камчатка) (в); в долине руч. Столбового (влк. Менделеева, о. Кунашир) (г). Постройки: гейзер Большой, р. Гейзерная (д); сольфатара на влк. Баранского (о. Итуруп) (е). Фотографии Е.В. Лебедевой.

детрузивные валы, формирование которых происходило в несколько этапов (Лебедева и др., 2025). В аналогичной по морфологии долине р. Шумной (куда впадает р. Гейзерная, но где нет термальных проявлений) доля обнаженных участков активизации процессов на склонах

не превышает 5–10% (Балдина и др., 2023), а следов масштабных смещений вовсе не наблюдается.

Небольшие оползневые тела на склонах отмечаются практически повсеместно в пределах геотермальных зон. Многочисленные оползни

Таблица 3. Формы рельефа, созданные экзогенными процессами

Процесс	Основные механизмы и факторы	Форма рельефа
Гравитационные	Уменьшение сцепления и прочности гидротермально измененных пород, повышенное увлажнение	Стенки срыва, оползневые цирки, обвальные и оползневые тела, оползневые террасы и плотины, оплывины
Селевые	Смещение грязе- и водокаменных потоков по долинам и на склонах, прорывы подпрудных озер	На склонах — лотки, в днищах долин — валы, террасы, конусы выноса, плотины
Эрозия	Размыв лишней растительности прогретых склонов	Промоины, бедленды
Суффозия	Вынос твердых частиц водой	Подземные и приповерхностные полости
Комплексная денудация	Плоскостной смыв, растворение, дефляция*	Гидротермальные педименты — слабонаклонные площадки на склонах
Избирательная денудация	Препарировка гидротермально измененных пород повышенной прочности	Гребни, бугры, останцы

Примечание: * на гидротермальных педиментах, где в данный период нет прогрева, также наблюдается снос материала в результате сочетания процессов промерзания-оттаивания и воздействия сил гравитации.

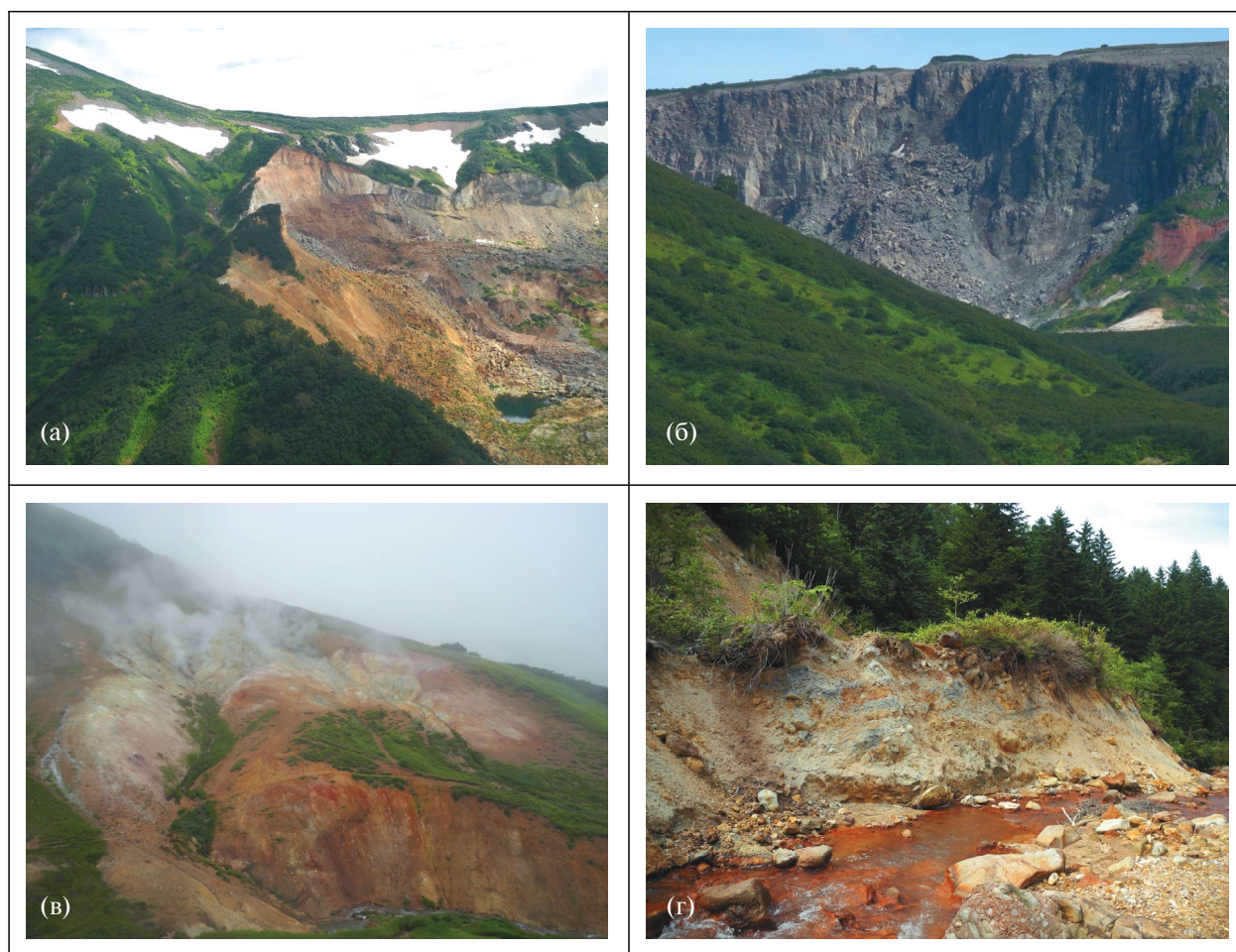


Рис. 6. Гравитационные процессы. Стенки срыва обвалов-оползней 2007 и 2014 гг. в долине р. Гейзерной (Камчатка) (а, б); оползневые тела на склонах влк. Мутновский (Камчатка) (в); оползневая терраса в долине руч. Кислого (влк. Менделеева, о. Кунашир) (г).

Фотографии Е.В. Лебедевой.

прослеживаются в пределах термальных полей, расположенных на склонах влк. Мутновский (рис. 6в). В верховьях руч. Кислого на склонах влк. Менделеева (о. Кунашир) нами зафиксировано до 4-х ярусов оползневых террас, представляющих собой блоки сползших гидротермально проработанных пород (рис. 6г). Аналогичные примеры оползней можно наблюдать и в долине руч. Валентины, также берущего начало на склонах этого вулкана, в бассейне р. Серной на склонах влк. Баранского (о. Итуруп) и на многих других участках.

При затухании гидротермальной деятельности и зарастании таких оползневых тел они могут быть приняты за фрагменты речных террас, но наличие над ними стенок срыва, а в толще — брекчированных пород вместо окатанного материала, свидетельствует об их обвальном оползневом генезисе.

Активное проявление гравитационных процессов на склонах долин геотермальных зон является важным фактором их развития и во многом обуславливает морфологию их бортов с многочисленными локальными террасовидными поверхностями. В результате постепенно происходит расширение долин на участках термальных полей, и в итоге они могут приобретать четковидное строение в плане (Лебедева, 2019).

Практически на всех термальных полях, приуроченных к склонам вулканических построек, распространены мелко-среднемасштабные неглубокие оползни, которые формируют характерную бугристую поверхность. Среди этих оползней по механизму смещения выделяются оползни течения и блоковые оползни скольжения (Фролова и др., 2023) (рис. 7а). Первые представляют собой вязкопластические оползни-потоки, формирующиеся в увлажненных горизонтах гидротермальных глин, смещающихся

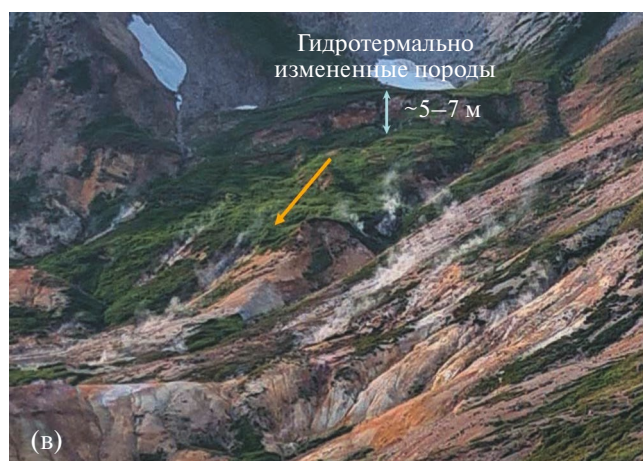


Рис. 7. Мелко-среднемасштабные неглубокие оползни на Южно-Камбальных термальных полях: оползни скольжения и оползни течения на Дальнем поле (а); русловой оползень течения (б); оползень скольжения на Ближнем поле (в). Фотографии Ю.В. Фроловой.

по подстилающим их прочным вулканогенным породам. По долинам ручьев встречаются отложения русловых (канализованных) оползней-потоков (рис. 7б), которые при сильном увлажнении гидротермальных глинистых отложений в результате снеготаяния или обильных атмосферных осадков могут трансформироваться в грязевые и грязекаменные потоки — сели. Второй тип оползней образуется в сильно аргиллизированных вулканитах или плотных гидротермальных глинах с высоким содержанием кремнистых минералов, придающих им относительную жесткость. Обычно у оползней второго типа хорошо выражены морфологические элементы: оползневой цирк, стенка отрыва и оползневое тело, часто рассеченное поперечными трещинами (рис. 7в).

На сложенных гидротермальными глинами склонах при дополнительном увлажнении (снеготаяние, экстремальные осадки) формируются многочисленные сплывы. При постоянном увлажнении (выходы мелких источников) задержанных склонов типичны солифлюкционные

террасы. Интересными элементами рельефа являются и так называемые *гидротермальные педименты* (Лебедева, 2019): выровненные площадки на склонах, возникающие чаще около выходов парогазовых струй. Подобные площадки выявлены на бортах долины р. Гейзерной (Лебедева и др., 2020; Сугробов и др., 2009), а также близ небольших источников на склонах влк. Баранского, о-в Итуруп.

Селеформирование. Поступающий со склонов в днища речных долин материал выносится преимущественно селями, которые часто провоцируются ливневыми осадками при прохождении тайфунов, активным снеготаянием, но не только. В долине р. Гейзерной масштабные (объемом >500 тыс. м³) сели сформировались при обрушении гидротермально измененных пород с ее левого борта. Смещение значительных объемов материала со склонов может приводить к перегораживанию русла рек и формированию подпрудных водоемов. В свою очередь позднее такая плотина может быть прорвана с повторным сходом селя (рис. 8а).



Рис. 8. Селевые формы рельефа. Долина р. Гейзерной (Камчатка): разрушенная селево-оползневая плотина 2007 г. (а); селеносные бассейны левых притоков реки на Верхнегейзерном термальном поле с конусами выноса в днище долины (б, в); Курильские острова: селевый вал в днище Кипящей речки на склоне влк. Баранского (о. Итуруп) (г). Фотографии Е.В. Лебедевой (а, г) и С.С. Черноморца (с БПЛА; б, в).

Анализ результатов наблюдений в долине р. Гейзерной показал, что для нее типично периодическое возникновение подобных существующих непродолжительное время подпруд (Лебедева и др., 2020, 2024). Продолжительность их существования во многом зависит от характера материала, сформировавшего плотину: вулканогенно-осадочные породы быстрее размываются рекой, плотины из блоков прочных лав более устойчивы. Следы уже спущенных водоемов отмечаются и в других долинах рассматриваемых территорий.

Анализ селевой активности в бассейне Гейзерной позволил заключить, что даже небольшие водотоки в пределах термальных полей являются селеносными (рис. 8б, в). Поступающий в них со склонов материал периодически залпово выносятся оттуда с формированием селевых конусов в устьях. Причем сели на термальных полях могут иметь асезонный характер, т.е. формироваться и в периоды низкой водности в зависимости от гидротермальной активности в условиях постоянного прогрева и выходов газогидротерм (Lebedeva, Chernomorets, 2024). Они могут возникать и в зимний период, поскольку активизация прогрева приводит к таянию снега.

Следы селей прослеживаются и на термальных участках склонов вулканов Баранского и Менделеева (Курильские острова — рис. 8г). Селевые отложения термальных полей могут подвергаться вторичной проработке термальными растворами, нередко происходит их цементация. Роль селевых процессов и, соответственно, селевого материала значительна и при формировании террасового комплекса в пределах речных долин ТП. Так, низкие террасы (4–12 м) в долине р. Гейзерной по большей части сложены именно селевым материалом, часто разновозрастным, переслаивающимся с пачками аллювиальных отложений и осадков подпрудных озер (Лебедева и др., 2024). Для всех типов отложений характерна значительная измененность обломков в результате газогидротермальной проработки. Изучение обломочного материала различных фракций, состава и строения вторичных минералов осадка позволило заключить, что трансформация материала проходила в несколько этапов, а воздействие термальных вод на рыхлые породы было разнонаправленным и приводило как к их цементации, так и к трансформации в глины. Морфологическая сохранность террас лучше в случае цементации отложений. Некоторые из изученных террас, по-видимому, представляют собой фрагменты более древних селевых плотин в русле реки.

Эрозионные процессы активно развиваются на обнаженных участках склонов ТП, так как

гидротермально измененные породы легко размываются поверхностными водами. В результате на термальных участках формируются бедленды (рис. 9). Эрозионные врезы, в пределах которых иногда наблюдаются выходы парогазовых струй и даже постройки сольфатар, дают начало ложбинам на склонах вулканов и постоянным водотокам.

Благодаря наличию многочисленных выходов гидротерм воды ручьев становятся высоко минерализованными. Именно поэтому для водотоков гидротермальных зон характерно формирование упомянутых выше ступеней водопадов и русловых лотков непосредственно в их руслах (Лебедева, 2022; Lebedeva, Zharkov, 2022). 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.

В то же время данные водотоки выносят с термальных полей большие объемы растворенного вещества. Например, согласно оценке, проведенной для шести наиболее крупных гидротермальных систем Курильских островов, ежесуточный гидротермальный вынос составляет там 122 т хлора и 124 т серы (Калачева, Таран, 2017). Позднее ежесуточный вынос реками, дренирующими очаги разгрузки ультракислых вулканогидротермальных систем Курильских островов, был оценен в 230 ± 30 т хлора и 360 ± 50 т серы (Калачева, 2025). Оценка химической денудации на о. Парамушир, проведенная следующими авторами (Калачева, 2025; Kalacheva et al., 2019), показала, что в бассейне р. Юрьева, дренирующей термальные поля влк. Эбеко и выносящей до 90 т растворенных веществ в сутки, величина химического стока почти в 10 раз больше, нежели в среднем по острову (120 ± 40 т/год с км²), и составляет около 1100 ± 200 т/год с км². Проведенные в 2021–2023 гг. наблюдения в долине р. Гейзерной (Школьный и др., 2025) также позволили заключить, что количество выносимого рекой растворенного вещества достигает 16.9–31.8 тыс. т/год (или 44–87 т в сутки, т.е. сопоставимо с р. Юрьева). При этом основной объем выносимых веществ поступает в результате разгрузки термальных минерализованных вод. Модуль растворенного стока на левобережной части водосбора р. Гейзерной, где расположены Гейзерное и Верхнегейзерное термальные поля, составляет от 3 до 16 г/с (или до почти 505 т/год) с км², что значительно выше такового на правобережной части бассейна (менее 2 г/с с км²), где



Рис. 9. Изрезанные промоинами участки термальных полей: влк. Менделеева (о. Кунашир) (а, б); долина р. Гейзерной (в); сочетание эрозии и суффозии на склонах влк. Менделеева (г). Фотографии Е.В. Лебедевой.

термальные поля отсутствуют. Кроме того, размыв гидротермальных глин способствует увеличению твердого стока и механическому выносу материала рекой. Восстановленный по данным наблюдений на посту и данным пробпоотбора, сток взвешенных наносов через устьевой створ р. Гейзерной составляет около 7 тыс. т/год, что соответствует модулю в 7.9 г/с км² (Школьный и др., 2025).

Происходящие в результате гидротермальных процессов активизация гравитационных, селевых и эрозионных процессов и вынос водотоками большого объема вещества во взвешенном и растворенном состоянии являются важными факторами, приводящими к увеличению общей скорости денудации в геотермальных районах. С течением времени на термальных полях происходит образование сложных отрицательных форм рельефа в виде эрозионно-денудационных воронок и денудационных котловин диаметром до десятков и сотен метров, а также расширение долин водотоков в пределах термальных участков. Такие котловины наблюдаются на Южно-Камбальных, Нижне- и Верхнекошелевских термальных полях,

на участке Дачных термопроявлений на Мутновском влк., на склонах вулканов Баранского, Менделеева и многих других. Дополнительному увеличению площади котловин и расширению долин способствуют обвальнo-оползневые процессы, которые происходят по их бортам, сложенным ослабленными гидротермальной деятельностью породами.

Кроме того, на термальных площадях также нередко фиксируются *деформации поверхности*, причем отмечаются как ее опускание, так и поднятие или колебательные движения (Rouwet et al., 2014). Это подтверждается данными радиолокационной интерферометрии и связывается с активной подземной миграцией термальных флюидов, которая приводит к повышению давления на одних участках ТП и снижению на других. Так, деформации в кальдере Лонг-Вэлли (Калифорния) за 8 лет превысили 30 см (Hooper et al., 2004). На сайте Геологической службы США регулярно публикуются интерферограммы, позволяющие следить, как во времени меняется характер движений

в кальдере Йеллоустон. Если за 2004–2006 гг. практически все ее днище поднялось на 11–15 см, то в 2020–2021 гг. в его центральной части произошло опускание на 3 см¹. В целом формирование локальных поднятий и опусканий зафиксировано на многих термальных полях мира, однако подобных данных непосредственно по Курило-Камчатскому региону на настоящий момент практически нет, хотя есть все основания предполагать существование такого явления и в рассматриваемом регионе. Первые попытки проведения подобных исследований в Узон-Гейзерной депрессии (Ширшова и др., 2023) зафиксировали по данным интерферометрии опускания и поднятия в разных областях этой кальдеры от –15 до +7 см за 5 лет.

Однако оседание поверхности может быть вызвано и антропогенными факторами — эксплуатацией геотермального месторождения с отработкой термального флюида. В результате на поверхности образуются трещины и разрывы, что нередко наносит ущерб инженерным сооружениям, дорогам и иной инфраструктуре. Например, на месторождении Вайракей (Новая Зеландия) образовалась депрессионная воронка глубиной до 15 м, максимальная скорость оседания составляла 0.5 м/год (Koros et al., 2015; White et al., 2005). В Курило-Камчатском регионе столь значительных последствий пока не отмечено, что, возможно, объясняется не столь продолжительной эксплуатацией месторождений, но в районе Мутновской ГеоТЭС за 2003–2013 гг. зафиксированы колебания поверхности в диапазоне 0.5–2 см/год (Kiryukhin et al., 2015).

ВЫВОДЫ

Таким образом, на участках поверхностных термопроявлений и прилегающих к ним территориях наблюдаются специфические формы рельефа (как денудационные, так и аккумулятивные), формирование которых вызвано изменением состава и свойств горных пород при гидротермальной переработке, осаждением вторичных минералов и выщелачиванием пород, а также активными гравитационными, селевыми и эрозионными процессами.

Гидротермальная аргиллизация способствует снижению прочности пород на два-три порядка значений, тем самым способствуя денудационным процессам на склонах. Опалитизация и окварцевание, напротив, могут вызывать некоторое упрочнение пород, в результате чего формируются денудационные останцы различной морфологии. Однако эти процессы имеют

не столь масштабное распространение как аргиллизация.

В целом с термальных полей происходит непрерывный вынос большого объема вещества в растворенном и во взвешенном состоянии, что свидетельствует о высоких темпах денудации и активной трансформации рельефа.

Результаты исследований свидетельствуют, что активность гравитационных, селевых и эрозионных процессов повышается в условиях гидротермальных зон. Оползнеобразование на склонах долин подобных территорий является важным фактором их развития и во многом обуславливает морфологию их бортов и днища, а также наряду с гидротермальными процессами влияет на состав аллювия.

Очевидна необходимость продолжения исследований геотермальных районов Курило-Камчатского региона с использованием широкого спектра не только геологических, но и геоморфологических, гидрологических и картографических методов, в том числе с применением радиолокационной интерферометрии.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Статья подготовлена по материалам исследований по теме Государственного задания ИГ РАН № FMWS-2024-0005 и МГУ имени М.В. Ломоносова.

FUNDING

The research was conducted as part of the Institute of Geography RAS State Assignment (project no. FMWS-2024-0005) and as part of the Lomonosov Moscow State University State Assignment.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность коллегам, участвовавшим в полевых и камеральных работах, а также сотрудникам Кроноцкого и Курильского заповедников за всестороннюю помощь.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors express their gratitude to colleagues who participated in field and laboratory works, as well as to the staff of the Kronotsky and Kurilsky nature reserves for their comprehensive assistance.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Балдина Е.А., Лебедева Е.В., Аникина Н.В. Активность геоморфологических процессов на склонах речных долин в условиях газогидротермальных проявлений (по разновременным снимкам

¹ <https://www.usgs.gov/observatories/yvo/news/yellowstone-year-2021-review>

- и ЦМР) // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2023. Т. 29. Ч. 1. С. 272–287.
<https://doi.org/10.35595/2414-9179-2023-1-29-272-287>
- Вулканизм, гидротермальный процесс и рудообразование / ред. С.И. Набоко. М.: Недра, 1974. 264 с.
- 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.
- Калачева Е.Г. Ультракислые сульфатно-хлоридные воды вулcano-гидротермальных систем Курильских островов. Автореф. дисс. ... д-ра геол.-мин. наук. Новосибирск: ИГиМ, 2025. 43 с.
- Калачева Е.Г., Таран Ю.А. Роль гидротермальных систем Курильской островной дуги в выносе магматических компонентов // Вулканизм и связанные с ним процессы: матер. XX науч. конф., посвящ. Дню Вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2017. С. 169–172.
- Камчатка, Курильские и Командорские острова: История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока / ред. И.В. Лучицкий. М.: Наука, 1974. 440 с.
- Лебедева Е.В. Виды воздействия вулканической и поствулканической деятельности на флювиальный рельеф // Геоморфология. 2019. № 4. С. 49–66.
<https://doi.org/10.31857/S0435-42812019449-66>
- Лебедева Е.В. Влияние газогидротермальной деятельности на формирование рельефа речных долин геотермальных зон // Геоморфология. 2022. Т. 53. № 5. С. 116–126.
<https://doi.org/10.31857/S043542812205008X>
- Лебедева Е.В., Балдина Е.А., Черноморец С.С., Котенков А.В. Оползне- и селеформирование в долине р. Гейзерной (Камчатка, Россия): причины и возможности потенциальной активизации // Изв. РАН. Сер. геогр. 2025. Т. 89. № 4. С. 650–668.
- Лебедева Е.В., Захаров А.Л., Котенков А.В. Формирование террас в долине реки с активными газогидротермальными проявлениями (на примере р. Гейзерной, п-ов Камчатка) // Геоморфология и палеогеография. 2024. Т. 55. № 3. С. 123–145.
<https://doi.org/10.31857/S2949178924030071>
- 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.
<https://doi.org/10.31857/S0435428120020066>
- Леонов В.Л. Обвал и оползень, произошедшие 4 января 2014 г. в Долине Гейзеров, Камчатка, и их последствия // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014. № 1. Вып. 23. С. 7–20.
- Мелекесцев И.В. Вулканизм и рельефообразование. М.: Наука, 1980. 212 с.
- Пинегина Т.К., Делемень И.Ф., Дроздин В.А. и др. Камчатская Долина Гейзеров после катастрофы 3 июня 2007 г. // Вестн. ДВО РАН. 2008. № 1. С. 33–44.
- 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.
- Фролова Ю.В. Скальные грунты и методы их лабораторного изучения. М.: КДУ, 2015. 220 с.
- 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.
- Фролова Ю.В., Зеркаль О.В., Большаков И.Е. Гидротермальные преобразования пород как фактор развития оползневых процессов в геотермальных районах Курило-Камчатской островной дуги // Грунтоведение. 2023. № 2. С. 36–43.
<https://doi.org/10.53278/2306-9139-2023-2-21-36-43>
- Фролова Ю.В., Ладыгин В.М., Рычагов С.Н. Инженерно-геологические особенности гидротермально-метасоматических пород Камчатки и Курильских островов // Инженерная геология. 2011. № 1. С. 48–64.
- Чернов М.С., Ермолинский А.Б., Соколов В.Н., Разгулина О.В. Особенности активизации склоновых процессов в массивах глинистых грунтов термальных полей Южной Камчатки // Сергеевские чтения. Фундаментальные и прикладные вопросы инженерной геодинамики: матер. годичной сессии Науч. совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии / ред. Е.А. Вознесенский, В.И. Осипов. М.: Геоинфо, 2023. Вып. 24. С. 77–80.
- Ширшова В.Ю., Балдина Е.А., Лебедева Е.В. Опыт применения метода дифференциальной интерферометрии для определения смещений земной поверхности в Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии по данным sentinel-1a за 2017–2022 годы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 4. С. 133–146.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-4-133-146>
- Школьный Д.И., Цыленков А.С., Лебедева Е.В., Ефимова Л.Е. Внутригодовые изменения водного, твердого и растворенного стока реки Гейзерной // Вулканизм и связанные с ним процессы: матер. XXVIII ежегод. науч. конф., посвящ. Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2025. С. 398–401.

- Browne P.R.L., Lawless J.L.* Characteristics of hydrothermal eruptions, with examples from New Zealand and elsewhere // *Earth-Sci. Rev.* 2001. Vol. 52. P. 299–331.
- Frolova J.V., Chernov M.S., Rychagov S.N., et al.* The influence of hydrothermal argillization on the physical and mechanical properties of tuffaceous rocks: a case study from the Upper Pauzhetsky thermal field, Kamchatka // *Bull. Eng. Geol. Environ.* 2021. Vol. 80. P. 1635–1651.
<https://doi.org/10.1007/s10064-020-02007-2>
- Frolova J.V., Ladygin V.M., Rychagov S.N., Zukhubaya D.Z.* Effects of hydrothermal alterations on physical and mechanical properties of rocks in the Kuril-Kamchatka island arc // *Inzh. Geol.* 2014. Vol. 183. P. 80–95.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.10.011>
- Hooper A., Zebker H., Segall P., Kampes B.* A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers // *Geoph. Res. Lett.* 2004. Vol. 31. № 23. L23611.
<https://doi.org/10.1029/2004GL021737>
- Hutter G.* Geothermal Power Generation in the World 2015–2020 Update Report: Proceedings Worlds Geothermal Congress — 2020+1. Reykjavik, 2021.
<https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/01017.pdf>
- Kalacheva E., Kotenko T., Voloshina E.* Chemical weathering fluxes from Paramushir volcanic island (Kuril Island arc, Russia). E3S Web Conf. 2019. Vol. 98. Art. 08007.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199808007>
- Kiryukhin A., Rutqvist J., Maguskin M.* Modeling of the vertical deformations during exploitation of the Mutnovsky Geothermal Field, Kamchatka, Russia: Proceedings World Geothermal Congress 2015. Melbourne, Australia, 2015.
<https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2015/22086.pdf>
- Koros W., O'Sullivan J., Pogacnik J., et al.* Variability of geotechnical properties of materials within Wairakei subsidence bowl, New Zealand / Proceedings 37th New Zealand Geothermal Workshop. New Zealand, Taupo, 2015. P. 1–8.
- Lebedeva E.V., Baldina E.A., Medvedev A.A.* Dynamics of slope processes in the Geysernaya river valley (Kamchatka) according to the data of interpretation of multi-temporal space images // *Dokl. Earth Sci.* 2022. Vol. 507. № 1. P. S9–S18.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X22601262>
- Lebedeva E.V., Chernomorets S.S.* Debris flow activity and specific features of debris flow formation in the Geysernaya River valley (Kamchatka) // *Rus. J. Pacific Geol.* 2024. Vol. 18. № 1. P. S15–S27.
<https://doi.org/10.1134/S1819714024700179>
- Lebedeva E.V., Zharkov R.V.* Accumulative Landforms in Valleys with Gas-Hydrothermal Occurrences (from the Example of Watercourses of Some Volcanic Massifs in the Kuril-Kamchatka Region) // *Dokl. Earth Sci.* 2022. Vol. 506. Part 3. P. 7–18.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X22700131>
- Loche M., Scaringi G.* Temperature and shear-rate effects in two pure clays: Possible implications for clay landslides // *Results Eng.* 2023. Vol. 20. Art. 101647.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101647>
- Lund J.W., Toth A.N.* Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review: proceedings World Geothermal Congress 2020+1. Reykjavik, Iceland, 2021.
<https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/01018.pdf>
- Romero J.E., Polacci M., Watt S., et al.* Volcanic lateral collapse processes in mafic arc edifices: a review of their driving processes, types and consequences // *Front. Earth Sci.* 2021. № 9. 23 p.
<https://doi.org/10.3389/feart.2021.639825>
- Rouwet D., Sandri L., Marzocchi W., et al.* Recognizing and Tracking Volcanic Hazards Related to Non-Magmatic Unrest: a Review // *J. Appl. Volcanol.* 2014. Vol. 3. № 17. P. 1–17.
- Scaringi G., Loche M.* A thermo-hydro-mechanical approach to soil slope stability under climate change // *Geomorph.* 2022. Vol. 401. Art. 108108.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108108>
- Voight B.* Causes of landslides: Conventional factors and special considerations for geothermal sites and volcanic regions // *Trans.-Geotherm. Resour. Coun.* 1992. Vol. 16. P. 529–533.
- White P.J., Lawless J.V., Terzaghi S., Okada W.* Advances in subsidence modelling of exploited geothermal fields / Proceedings World Geothermal Congress 2005. Turkey, Antalya, 2005.
<https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2005/0222.pdf> (accessed 28.07.2025).
- Zerkal O.V., Gvozdeva I.P.* Landslide activity and landslide hazard in Geyser Valley (Kamchatka Peninsula, Russia) / Natural hazards and risk research In Russia: Innovation and discovery In Russian science and engineering. Switzerland: Springer Int. Publ., 2019. Vol. 1. P. 317–344.

Relief Formation in Geothermal Areas of the Kuril-Kamchatka Region: Geological Conditions and Geomorphological Effects

E. V. Lebedeva^{a,*} and J. V. Frolova^{b,*}

^a*Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

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

**e-mail: ju_frolova@mail.ru

The results of long-term geological and geomorphological field work on the Kuril Islands (Kunashir, Iturup, and Paramushir islands) and Kamchatka Peninsula have shown significant activity of denudation processes in thermal fields and surrounding areas, among which landslides and erosion are the most common. The laboratory studies indicate that gas-hydrothermal alteration of rocks in geothermal regions results in a significant change in their composition, weakening and decrease in strength. These factors contribute to the gravitational displacement in slopes, often with blocking of river valleys. Slope displacement and failure is additionally activated by the thermal water discharges and soils heating. Geothermal areas often have numerous traces of debris flows, often non-seasonal. The activation of linear erosion on exposed slopes can result in the formation of badlands areas. Watercourses draining thermal fields can carry away significant amounts of suspended and dissolved material. It leads to an increase in denudation rates and the formation of erosion-denudation funnels and denudation basins in areas of hydrothermal explosions. It also causes an abnormal expansion of watercourse valleys within thermal fields compared to background areas. Our observations allow us to draw conclusions about surface deformation in geothermal fields, which is caused by the natural migration of thermal fluids and the exploitation of thermal deposits. Obviously, there is need to continue research of the geothermal areas at the Kuril-Kamchatka region using a wide range of geological, geomorphological and cartographic methods, including the innovative technologies such as radar interferometry.

Keywords: thermal fields, hydrothermal impact, argillization, slope processes, debris flow formation, erosion, Kuril-Kamchatka arc

REFERENCES

- Baldina E.A., Lebedeva E.V., Anikina N.V. Activity of geomorphological processes on the slopes of river valleys in the conditions of gas-hydrothermal occurrences (based on multi-temporal images and DEM analysis). *InterCarto. InterGIS.*, 2023, vol. 29, pp. 272–287. (In Russ.).
<https://doi.org/10.35595/2414-9179-2023-1-29-272-287>
- Browne P.R.L., Lawless J.L. Characteristics of hydrothermal eruptions, with examples from New Zealand and elsewhere. *Earth-Sci. Rev.*, 2001, vol. 52, pp. 299–331.
- Chernov M.S., Ermolinskii A.B., Sokolov V.N., Razgulina O.V. Features of slope processes activation in clay soil massifs of thermal fields of Southern Kamchatka. In *Sergeevskie chtenia. Fundamental'nye i prikladnye voprosy inzhenernoi geodinamiki: materialy godichnoi sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoi geologii i gidrogeologii. T. 24* [Sergeev Readings. Fundamental and Applied Issues of Engineering Geodynamics: Proc. of the Annual Session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on the Problems of Geoecology, Engineering Geology, and Hydrogeology. Vol. 24]. Voznesenskii E.A., Osipov V.I., Eds. Moscow: Geoinfo Publ., 2023, pp. 77–80. (In Russ.).
- Dvigalo V.N., Melekestsev I.V. Geological and geomorphological consequences of catastrophic rockfall and rockfall — landslides processes in the Kamchatka Valley of Geysers (according to aerial photogrammetry). *Vulkanol. Seismol.*, 2009, no. 5, pp. 24–37. (In Russ.).
- Frolova J.V. *Skal'nye grunty i metody ikh laboratornogo izucheniya* [Rocks and Methods of Their Laboratory Study]. Moscow: KDU Publ., 2015. 220 p.
- Frolova J.V., Ladygin V.M., Rychagov S.N. Engineering and geological features of hydrothermal-metasomatic rocks of Kamchatka and the Kuril Islands. *Inzh. Geol.*, 2011, no. 3, pp. 40–54. (In Russ.).
- Frolova J.V., Ladygin V.M., Rychagov S.N., Zukhubaya D.Z. Effects of hydrothermal alterations on physical and mechanical properties of rocks in the Kuril-Kamchatka island arc. *Eng. Geol.*, 2014, vol. 183, pp. 80–95.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.10.011>
- Frolova J.V., Gvozdeva I.P., Chernov M.S., Kuznetsov N.P. Geotechnical aspects of hydrothermal transformations of tuffaceous rocks of the Valley of Geysers (Kamchatka Peninsula). *Inzh. Geol.*, 2015, no. 6, pp. 30–42. (In Russ.).
- Frolova J.V., Chernov M.S., Rychagov S.N. et al. The influence of hydrothermal argillization on the physical

- and mechanical properties of tuffaceous rocks: a case study from the Upper Pauzhetsky thermal field, Kamchatka. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 2021, vol. 80, pp. 1635–1651.
<https://doi.org/10.1007/s10064-020-02007-2>
- Frolova J.V., Zerkal O.V., Bolshakov I.E. Hydrothermal alteration of rocks as a factor of landslide development in geothermal areas of the Kuril-Kamchatka volcano arc. *Gruntoved.*, 2023, no. 2, pp. 36–43. (In Russ.).
<https://doi.org/10.53278/2306-9139-2023-2-21-36-43>
- Hooper A., Zebker H., Segall P., Kampes B. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geoph. Res. Lett.*, 2004, vol. 31, no. 23, art. L23611.
<https://doi.org/10.1029/2004GL021737>
- Hutter G. Geothermal power generation in the World 2015–2020: Update Report. In *Proc. of the Worlds Geothermal Congress 2020+1*. Reykjavik, 2021. Available at: <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/01017.pdf> (accessed: 28.07.2025).
- Kalacheva E.G. Ultra-acidic sulfate-chloride waters of volcano-hydrothermal systems of the Kuril Islands. *Extended Abstract of Dr. Sci. (Geol.-Miner.) Dissertation*. Novosibirsk: Siberian State Univ. of Geosystems and Technologies, 2025. 43 p.
- Kalacheva E.G., Taran Yu.A. The role of hydrothermal systems of the Kuril Island arc in the removal of magmatic components. In *Vulkanizm i svyazannye s nim protsessy: mater. XXVIII ezhegodnoi nauchn. konf., posvyashchennoi Dnyu vulkanologa* [Volcanism and Related Processes: Proc. of the 28th Annual Sci. Conf. Dedicated to the Volcanologist Day]. Petropavlovsk-Kamchatsky: IVIS DVO RAN, 2017, pp. 169–172. (In Russ.).
- Kalacheva E., Kotenko T., Voloshina E. Chemical weathering fluxes from Paramushir volcanic island (Kuril Island arc, Russia). *E3S Web Conf.*, 2019, no. 98, art. 08007.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199808007>
- Kamchatka, Kuril'skie i Komandorskie ostrova. Istoriya razvitiya rel'efa Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Kamchatka, Kuril and Commander Islands. The History of the Development of the Relief of Siberia and the Far East]. Luchitskii I.V., Ed. Moscow: Nauka Publ., 1974. 440 p.
- Kiryukhin, A., Rutqvist J., Maguskin M. Modeling of the vertical deformations during exploitation of the Mutnovsky Geothermal Field, Kamchatka, Russia. In *Proc. of the World Geothermal Congress 2015*. Melbourne, 2015. Available at: <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2015/22086.pdf> (accessed: 28.07.2025).
- Koros W., O'Sullivan J., Pogacnik J. et al. Variability of geotechnical properties of materials within Wairakei subsidence bowl, New Zealand. In *Proc. of the 37th New Zealand Geothermal Workshop*. Taupo, 2015, pp. 1–8.
- Lebedeva E.V. Types of impact of volcanic and post-volcanic activity on the fluvial relief. *Geomorfol.*, 2019, no. 4, pp. 49–66. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S0435-42812019449-66>
- Lebedeva E.V. Gas-hydrothermal activities impact on the relief formation of river valleys geothermal zones. *Geomorfol.*, 2022, vol. 53, no. 5, pp. 116–126.
<https://doi.org/10.31857/S043542812205008X>
- Lebedeva E.V., Zharkov R.V. Accumulative landforms in valleys with gas-hydrothermal occurrences (from the example of watercourses of some volcanic massifs in the Kuril-Kamchatka region). *Dokl. Earth Sci.*, 2022, vol. 506, no. 3, pp. 7–18.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X22700131>
- Lebedeva E.V., Chernomorets S.S. Debris Flow Activity and Specific Features of Debris Flow Formation in the Geysernaya River Valley (Kamchatka). *Russ. J. Pacific Geol.*, 2024, vol. 18, no. 1, pp. S15–S27.
<https://doi.org/10.1134/S1819714024700179>
- Lebedeva E.V., Sugrobov V.M., Chizhova V.P., Zavadskaya A.V. The valley of the river Geysernaya (Kamchatka): hydrothermal activity and features of relief forming. *Geomorfol.*, 2020, no. 2, pp. 60–73. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S0435428120020066>
- Lebedeva E.V., Baldina E.A., Medvedev A.A. Dynamics of slope processes in the Geysernaya river valley (Kamchatka) according to the data of interpretation of multi-temporal space images. *Dokl. Earth Sci.*, 2022, vol. 507, no. 1, pp. S9–S18.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X22601262>
- Lebedeva E.V., Zakharov A.L., Kotenkov A.V. Formation of terraces in a river valley with active gashydrothermal manifestations (the Geysernaya River valley, Kamchatka Peninsula as an example). *Geomorfol. Paleo-geogr.*, 2024, vol. 55, no. 3, pp. 123–145. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S2949178924030071>
- Lebedeva E.V., Baldina E.A., Chernomorets S.S., Kotenkov A.V. Landslide and debris flow formation in the Geysernaya River valley (Kamchatka, Russia): Causes and possibilities of potential activation. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2025, vol. 89, no. 4, pp. 650–668. (In Russ.).
- Leonov V.L. The collapse and landslide that occurred on January 4, 2014 in the Valley of Geysers, Kamchatka, and their consequences. *Vestn. KRAUNTS. Nauki Zemle*, 2014, vol. 23, no. 1, pp. 7–20. (In Russ.).
- Loche M., Scaringi G. Temperature and shear-rate effects in two pure clays: Possible implications for clay landslides. *Results Eng.*, 2023, vol. 20, art. 101647.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101647>
- Lund J.W., Toth A.N. Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review. In *Proc. of the World Geothermal Congress 2020+1*. Reykjavik, 2021. Available

- at: <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/01018.pdf> (accessed: 28.07.2025).
- Melekestsev I.V. *Vulkanizm i rel'efoobrazovanie* [Volcanism and Relief Formation]. Moscow: Nauka Publ., 1980. 212 p.
- Pinegina T.K., Delemen' I.F., Droznin V.A., Kalacheva E.G., Chirkov S.A., Melekestsev I.V., Dviga-lo V.N., Leonov V.L., Seliverstov N.I. Kamchatka Valley of Geysers after the catastrophe on 3 June 2007. *Vestn. DVO RAN*, 2008, no. 1, pp. 33–44. (In Russ.).
- Romero J.E., Polacci M., Watt S. et al. Volcanic lateral collapse processes in mafic arc edifices: a review of their driving processes, types and consequences. *Front. Earth Sci.*, 2021, no. 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.639825>
- Rouwet D., Sandri L., Marzocchi W. et al. Recognizing and tracking volcanic hazards related to non-magmatic unrest: a review. *J. Appl. Volcanol.*, 2014, vol. 17, no. 3, pp. 1–17.
- Scaringi G., Loche M. A thermo-hydro-mechanical approach to soil slope stability under climate change. *Geomorph.*, 2022, vol. 401, art. 108108. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108108>
- Shirshova V.Yu., Baldina E.A., Lebedeva E.V. The experience of using the differential interferometry method to determine the displacements of the Earth's surface in the Uzon-Geysernaya volcano-tectonic depression according to Sentinel-1A data for 2017–2022. *Sovrem. Probl. Distant. Zondir. Zemli Kosm.*, 2023, vol. 20, no. 4, pp. 133–146. (In Russ.). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-4-133-146>
- Shkolnyi D.I., Tsyplenkov A.S., Lebedeva E.V., Efimova L.E. Intra-annual changes in runoff, sediment yield and dissolved load of the Geysernaya River. In *Vulkanizm i svyazannye s nim protsessy: mater. XXVIII ezhegodnoi nauchn. konf., posvyashchennoi Dnyu vulkanologa* [Volcanism and Related Processes: Proc. of the 28th Annual Sci. Conf. Dedicated to the Volcanologist Day]. Petropavlovsk-Kamchatsky: IVIS DVO RAN, 2025, pp. 398–401. (In Russ.).
- Sugrobov V.M., Sugrobova N.G., Droznin V.A., Karpov G.A., Leonov V.L. *Zhemchuzhina Kamchatki – Dolina Geyzerov* [The Pearl of Kamchatka is the Valley of Geysers]. Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatpress Publ., 2009. 108 p.
- Voight B. Causes of landslides: Conventional factors and special considerations for geothermal sites and volcanic regions. *Trans.- Geotherm. Resour. Counc.*, 1992, vol. 16, pp. 529–533.
- Vulkanizm, gidrotermal'nyi protsess i rudoobrazovanie* [Volcanism, Hydrothermal Process and Ore Formation]. Naboko S.I., Ed. Moscow: Nedra Publ., 1974. 264 p.
- White P.J., Lawless J.V., Terzaghi S., Okada W. Advances in subsidence modelling of exploited geothermal fields. In *Proc. of the World Geothermal Congress 2005*. Antalya, 2005. Available at: <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2005/0222.pdf> (accessed: 28.07.2025).
- Zerkal O.V., Gvozdeva I.P. Landslide activity and landslide hazard in Geyser Valley (Kamchatka Peninsula, Russia). In *Natural hazards and risk research In Russia: Innovation and discovery In Russian science and engineering*. vol. 1. Springer, 2019, pp. 317–344.