

Дистанционные методы исследования Земли

Remote methods in Earth research

УДК: 528.873:551.4.042

DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-272-287

Е.А. Балдина¹, Е.В. Лебедева², Н.В. Аникина³

АКТИВНОСТЬ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА СКЛОНАХ РЕЧНЫХ ДОЛИН В УСЛОВИЯХ ГАЗОГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ (ПО РАЗНОВРЕМЕННЫМ СНИМКАМ И ЦМР)

АННОТАЦИЯ

В геотермальных зонах районов современного вулканизма на геоморфологические процессы значительное влияние оказывают многочисленные выходы разнообразных по составу газогидротерм, под воздействием которых могут кардинально меняться свойства пород, а как следствие — особенности и темпы денудации. Выполнено изучение и сравнительный анализ активности процессов на склонах речных долин Камчатки в условиях газогидротермальных проявлений (долина р. Гейзерной) и без таковых (долина р. Шумной). Для наиболее корректного выделения и сопоставления участков долин, отличающихся разными условиями развития современных склоновых процессов, использованы цифровая модель рельефа ArcticDEM и серия морфометрических карт (крутизны склонов, экспозиции, элементарных водосборных бассейнов), построенных на ее основе, а также геологические карты, результаты термальной съемки разного уровня детальности и данные полевых наблюдений. Проведено дешифрирование снимков высокого пространственного разрешения (0,5–5 м) на середину 1960-х гг. (KeyHole-4 CORONA) и современных на период 2016–2021 гг. разных съемочных систем. В результате дешифрирования получены количественные оценки состояния склонов в пределах выделенных на основе морфометрии фрагментов выбранных долин на два временных среза, отстоящие на 55 лет. Установлено, что в условиях развития газогидротермальных проявлений доля суммарной площади участков склонов, пораженных активными процессами, при прочих равных условиях значительно превышает таковую на участках без

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail*: baldina@geogr.msu.ru

² Институт географии РАН, Старомонетный пер., д. 29с4, Москва, Россия, 119017, *e-mail*: Ekaterina.lebedeva@gmail.com

³ Институт географии РАН, Старомонетный пер., д. 29с4, Москва, Россия, 119017, *e-mail*: nikitina.nadine@gmail.com

газогидротерм. За 55 лет доля площадей активизации склоновых процессов на фоновых участках практически не изменилась, а на территориях, подверженных газогидротермальному воздействию, увеличилась на 10–17 %. Проведенные исследования позволяют заключить, что газогидротермальные проявления являются наиболее мощным драйвером современных геоморфологических процессов на склонах в исследуемом регионе.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геотермальная зона, динамика склоновых процессов, разновременные снимки высокого разрешения, морфометрические построения, Камчатка

Elena A. Baldina¹, Ekaterina V. Lebedeva², Nadezhda V. Anikina³

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)

ABSTRACT

In the geothermal zones of modern volcanic areas, geomorphological processes are considerably influenced by numerous gas-hydrothermal outcrops, which may dramatically change rock properties and, consequently, denudation peculiarities and rates. The activity of processes on the slopes of Kamchatka river valleys under conditions of gas-hydrothermal occurrences (Geysernaya river valley) and without them (Shumnaya river valley) has been studied and comparatively analyzed. For the most correct separation and comparison of the valley regions which differ in the conditions of development of the modern slope processes, ArcticDEM digital elevation model and a series of morphometric maps (slope steepness, exposition, elementary watersheds) built on its basis, as well as geological maps, results of thermal survey of different detail level and field observation data were used. Interpretation of high spatial resolution images (0.5–5 m) for the mid-1960s (KeyHole-4 CORONA) and modern images for the period 2016–2021 from different survey systems was carried out. As a result of decoding, quantitative assessments of slope conditions within the selected valley fragments selected on the basis of morphometry were obtained for two time slices separated by 55 years. It is established that under conditions of gas-hydrothermal manifestations development, the share of the total area of the slope's sections affected by active processes, with other conditions being equal, is significantly higher than the same in the areas without gas-hydrotherms. For 55 years the share of the areas with slope processes activation on the background areas practically has not changed, and on the territories affected by gas-hydrothermal influence has increased by 10–17 %. The conducted studies allow us to conclude that gas-hydrothermal manifestations are the most powerful driver of modern geomorphological processes on slopes in the studied region.

KEYWORDS: geothermal area, slope dynamics, multi-temporal high-resolution images, morphometric plotting, Kamchatka

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* baldina@geogr.msu.ru

² Institute of Geography RAS, 29s4, Staromonetny ln., Moscow, 119017, Russia, *e-mail:* Ekaterina.lebedeva@gmail.com

³ Institute of Geography RAS, 29s4, Staromonetny ln., Moscow, 119017, Russia, *e-mail:* nikitina.nadine@gmail.com

ВВЕДЕНИЕ

На горных склонах повсеместно наблюдаются лишённые растительности участки активных смещений пород — осыпи, обвалы и оползни различного типа. Важную роль при формировании таких смещений играют внешние (выпадение экстремальных осадков, землетрясения) и внутренние факторы (крутизна склонов, литологические свойства пород, наличие участков повышенной трещиноватости, экспозиция и др.). В геотермальных зонах районов современного вулканизма, в частности на Камчатке, на геоморфологические процессы на склонах значительное влияние оказывают многочисленные выходы разнообразных по составу газогидротерм, которые прогревают, увлажняют горные породы, а также изменяют их физические свойства. Выделяются [Рычагов, 1993; Сугробов и др., 2009; Бортникова и др., 2013] три основных типа газогидротермальных проявлений: парогазовые выходы, грязевулканические проявления и термальные источники. Ю.В. Фроловой с коллегами установлено [2011; 2015; 2019], что под влиянием минерализованных термальных вод вулканическое стекло замещается глинистыми минералами и цеолитами, что вызывает снижение плотности породы и уменьшение внутреннего сцепления. В результате смещения пород на склонах идут более активно.

Наблюдения в долине р. Гейзерной, где расположено одно из пяти крупнейших гейзерных полей мира, свидетельствуют об активном развитии там гравитационных склоновых процессов [Пинегина и др., 2008]. По аэрофотоснимкам 1950–1990 гг. были отдешифрованы многочисленные оползни [Двигало, Мелекесцев, 2009]. По результатам дистанционного зондирования (снимки 2009 г.) на внутриваловых склонах в нижнем течении реки помимо этого были выделены следы обвалов и осыпей [Зеркаль и др., 2019]. На основе обширной базы разновременных снимков высокого разрешения на склонах долины среднего и нижнего течения р. Гейзерной прослежена активность процессов [Балдина и др., 2022] за последние несколько десятилетий (1964–2020 гг.). На всем обследованном фрагменте долины площадью 24,8 км² доля обнажений — т. е. участков, поражённых современными процессами рельефообразования (преимущественно склоновыми, реже — эрозионными), в 1964 г. составляла 10,5 %, а к 2017 г. возросла до 13,5 % [Lebedeva et al., 2022].

Для оценки роли воздействия газогидротермальных проявлений на активизацию протекания склоновых процессов целесообразно сравнить интенсивность последних на участках с выраженной газогидротермальной активностью и на расположенных в близких природных условиях, но без газогидротерм. Ранее нами было проведено сравнение правого и левого бортов долины р. Гейзерной. На участке с газогидротермальными проявлениями (левый борт) площадь активных процессов рельефообразования втрое превышала таковую на склоне без газогидротерм [Lebedeva et al., 2022]. Однако на левом борту долины в большей мере представлены и зоны трещиноватости, т. к. он в целом совпадает с кальдерообразующим разломом; кроме того, влияние на характер процессов в какой-то мере могла оказать и экспозиция склонов. Поэтому для подтверждения полученного заключения было принято решение провести аналогичные исследования в другой долине в сходных физико-географических условиях, но не затронутой газогидротермальными процессами. В качестве долины-аналога был выбран фрагмент среднего течения р. Шумной (выше впадения р. Гейзерной) протяжённостью 9,6 км и площадью 11,6 км² (рис. 1).

Прогрев и выветривание пород в долине р. Гейзерной наблюдается на протяжении всего года, что несложно проследить на снимках в тепловом ИК канале даже относительно низкого (100 м) пространственного разрешения. Сопоставление участков двух долин на снимке со спутника Landsat-8 в тепловом канале (10,6–11,19 мкм), сделанном в ночное

время в марте 2023 г., когда вся Камчатка еще покрыта снегом (рис. 2а), позволяет по высокой яркости изображения однозначно опознать обилие участков с повышенным тепловым излучением в пределах долины р. Гейзерной и темные оттенки «холодной» долины р. Шумной. Однако после впадения в р. Шумную р. Гейзерной ее русло хорошо прослеживается благодаря светлому тону, свидетельствующему об относительно высокой температуре воды. Результаты тепловой съемки, выполненной с вертолета 5 августа 2010 г. [Kirykhin et al., 2012], обозначившей наиболее прогретые участки Гейзерного и Верхнегейзерного термальных полей в днище долины и на ее левом борту, во многом совпадают с современными (рис. 2б).

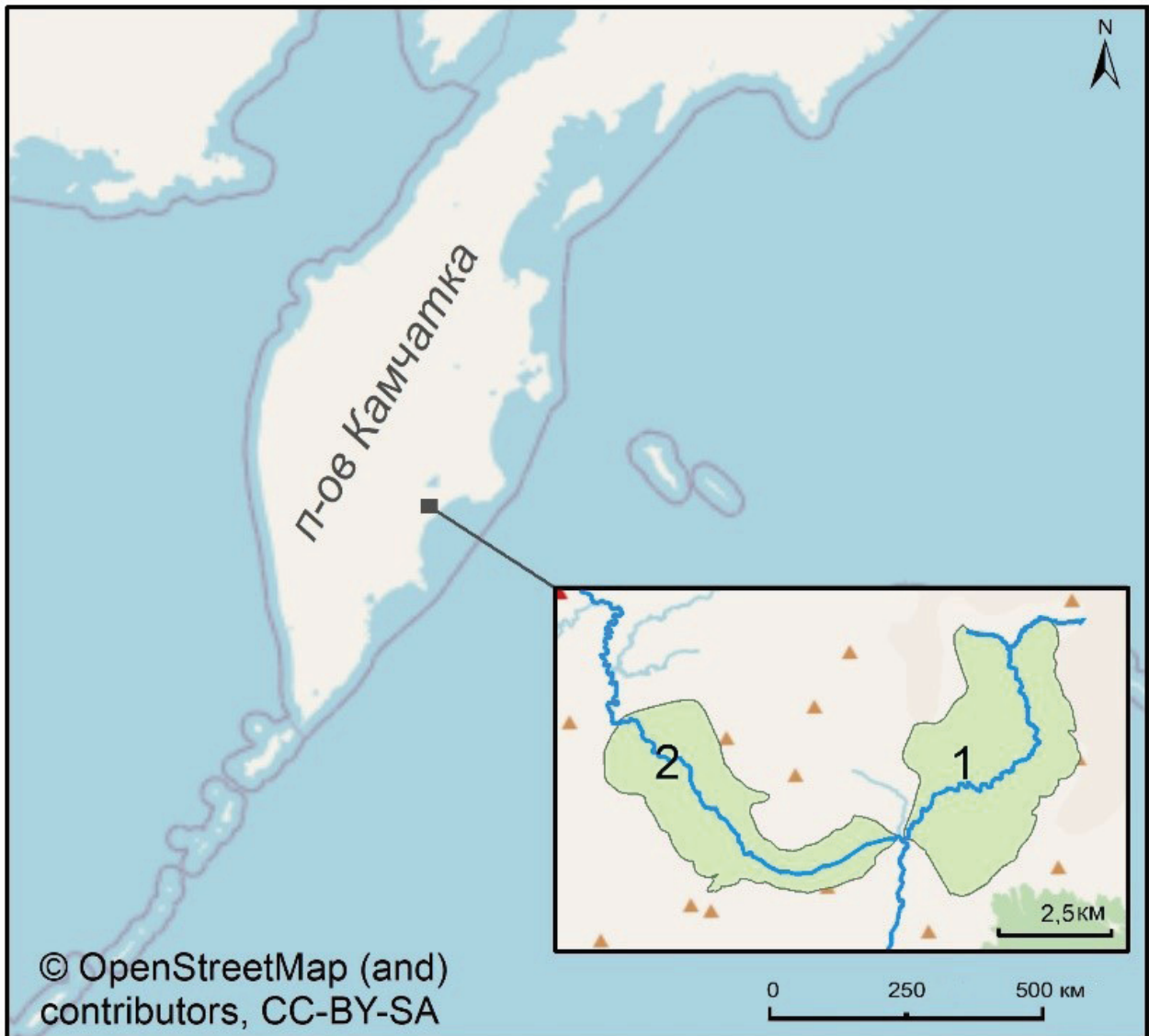


Рис. 1. Положение района исследований: 1 — долина р. Гейзерной, 2 — долина р. Шумной
 Fig. 1. Location of the study area: 1 — Geysernaya River valley, 2 — Shumnaya River valley

Задача данного исследования состоит в детальном сравнении двух выбранных участков, отчетливо различающихся газогидротермальными условиями развития современных процессов на склонах.

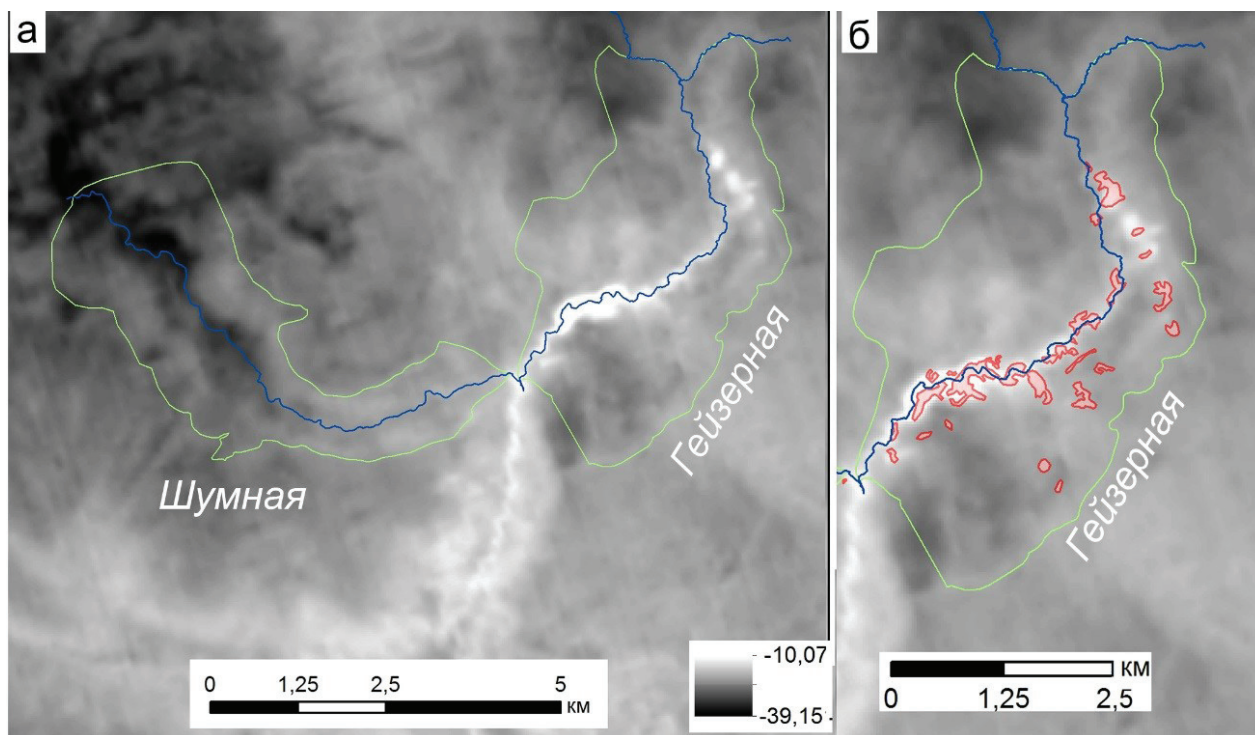


Рис. 2. Долины рр. Шумной и Гейзерной на снимке в тепловом инфракрасном диапазоне Landsat-8, полученном ночью 5 марта 2023 г.: а — значения температуры на верхней границе атмосферы, б — фрагмент того же снимка; розовые контуры — термальные поля, зафиксированные тепловой съемкой с вертолета ИВуС 5 августа 2010 г. [Kirykhin et al., 2012]

Fig. 2. Shumnaya and Geysernaya river valleys on Landsat-8 thermal infrared image, acquired at night on March 5, 2023: a — temperature values at the upper atmosphere boundary, b — fragment of the same image; pink outlines — thermal fields recorded by thermal survey by IV&S from a helicopter on August 5, 2010 [Kirykhin et al., 2012]

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемая территория расположена в восточной части Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии в пределах Восточного вулканического пояса Камчатки [Сугробов и др., 2009] и находится на территории Кроноцкого государственного заповедника. В долине р. Гейзерной расположено одно из 5 крупнейших гейзерных полей мира [Атлас..., 2015]. Река является левым притоком р. Шумной (бассейн Тихого океана) и берет свое начало на склонах вулкана Кихпиныч. Ее протяженность составляет около 11 км, продольный профиль ступенчатый, невыработанный. Исследования активности склоновых процессов [Лебедева и др., 2022; Lebedeva et al., 2022] проводились в нижнем и среднем течении реки, где наряду с выходами высокотемпературных напорных вод и паровых струй проявлениями тепловых аномалий являются также грязевые котлы, участки гидротермально измененных пород, нагретая до различных температур почва.

Река Шумная вытекает из оз. Центрального, расположенного в кальдере Узон, и впадает в Тихий океан. Ее общая протяженность около 40 км. Тепловые аномалии в ее пределах установлены лишь близ устья р. Гейзерной, где еще Т.И. Устиновой был обнаружен самый первый гейзер [Атлас..., 2015], но этот участок не входит в анализируемую зону. В среднем течении р. Шумной ее долина также следует вдоль

кольцевого разлома, ограничивающего кальдеру. В геологическом строении изученных территорий обеих долин участвуют три комплекса пород: докальдерный (Q_3^{1-3}), синхронный кальдерообразованию (39–40 тыс. л.н.) и посткальдерный. В среднем течении обе долины вскрывают лавы и пирокластику андезитов и дацитов докальдерного комплекса [Леонов и др., 1991; Атлас..., 2015]. Вдоль расположенных внутри кальдеры бортов выходят заполняющие ее слабо литифицированные вулканогенно-озерные отложения позднего плейстоцена — туфы, туфопесчаники, туфогравелиты с линзами брекчий (Q_3^4).

Для получения репрезентативных расчетов необходимо было определить морфометрические характеристики выделяемых фрагментов долин и корректно провести границы сравниваемых участков, что было выполнено на основе анализа морфометрических характеристик рельефа на основе свободно распространяемой цифровой модели рельефа ArcticDEM с разрешением 2 x 2 м, полученной с сайта Университета Миннесоты¹. Получение морфометрических характеристик и создание соответствующих карт выполнено с использованием инструментов модуля Spatial Analyst в программном пакете ArcGIS 10.5 от ESRI. Границы участков в пределах сравниваемых фрагментов долин рр. Гейзерной и Шумной проводились на основе ряда признаков. С помощью серии созданных карт были выделены морфометрически выраженные бровки долин, определена крутизна склонов, экспозиция, а также границы локальных (малых) водосборных бассейнов, построенные в ArcGIS с помощью модуля Spatial Analyst/Hydrology на основе анализа направлений линий стока по ЦМР. Левый борт долины р. Гейзерной и правый борт долины р. Шумной определялись совершенно однозначно на основе всего набора данных, тогда как для правого борта р. Гейзерной и левого борта р. Шумной при определении границ дополнительно учитывалось наличие следов проявлений активных экзогенных процессов на приводораздельных склонах, указывающих на направление существующих литодинамических потоков.

В результате проведенного анализа мы исключили из расчетов бассейн левого притока р. Шумной — р. Сестренки и участок долины р. Гейзерной выше слияния Правой илевой Гейзерных, имеющий большие абсолютные высоты, иную ориентировку и геоморфологическое строение. Морфометрические карты рельефа с отмывкой, уклонов и экспозиции склонов приведены на рисунке 3.

На основании анализа построенных карт были получены морфометрические характеристики сравниваемых участков долин: максимальные и минимальные высоты, относительная глубина вреза, средние уклоны, а также выделены фрагменты бортов долин различной экспозиции (табл. 1).

Кроме того, были построены по 2 поперечных морфометрических профиля в верхней и нижней частях рассматриваемых долин, пересекающих склоны разной экспозиции (рис. 3а, 4), с выделением зон проявлений газогидротермальной активности.

¹ Цифровая модель рельефа ArcticDEM. Сайт Полярного центра геопространственных исследований университета Миннесоты (The Polar Geospatial Center (PGC) at the University of Minnesota). Электронный ресурс: <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/> (дата обращения 01.03.2023).

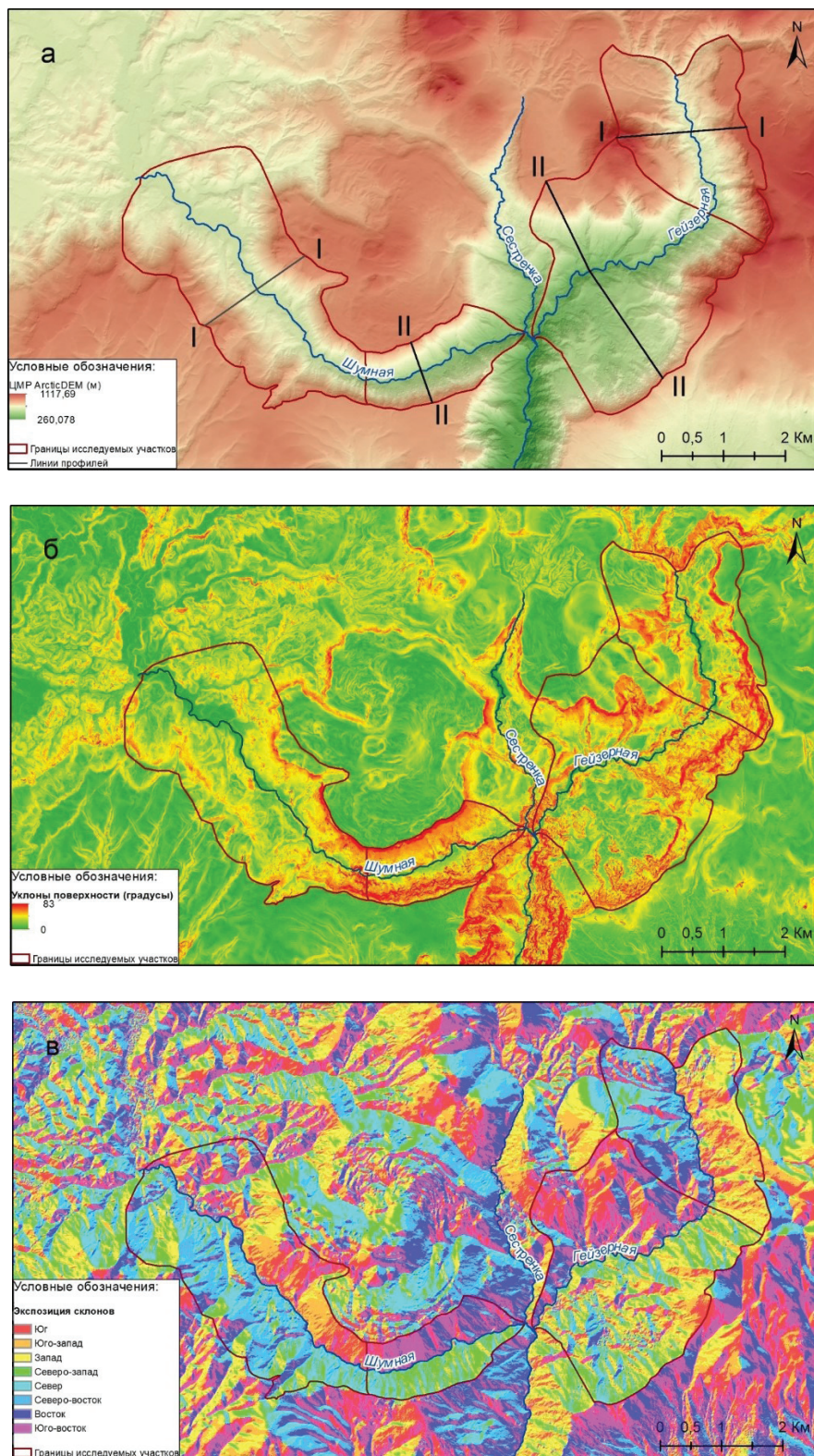


Рис. 3. Морфометрическая характеристика исследованных фрагментов долин рр. Гейзерной и Шумной. Карты (по ЦМР ArcticDEM): а — абсолютных отметок рельефа (м), б — уклонов, в — экспозиций склонов

Fig. 3. Morphometric characteristics of the studied fragments of the Geysernaya and Shumnaya Rivers valleys. Maps (by ArcticDEM): а — absolute elevations (m), б — slopes, в — slope exposures

На выбор фрагмента долины среднего течения р. Шумной в качестве аналога долины р. Гейзерной, но без газогидротермальных проявлений, повлияли несколько факторов. Во-первых, этот участок расположен в сходных природных условиях, что позволяет не принимать во внимание влияние на склоновые процессы, например, погодноклиматических условий. Во-вторых, абсолютные отметки днища и водоразделов, а также глубина вреза (рис. 3а, 4), крутизна склонов (рис. 3б), литологическое строение (выходы лав, пород дайкового комплекса и вулканогенно-озерных туфов) этих участков близки между собой (табл. 1). В-третьих, каждый из анализируемых фрагментов состоит из двух частей, ориентированных с СЗ на ЮВ и с ЮЗ на СВ, что позволяет сравнивать склоны одной экспозиции. В-четвертых, оба выбранных фрагмента долин расположены вдоль разлома, ограничивающего Узон-Гейзерную кальдеру (рис. 3в). В-пятых, оба анализируемых участка характеризуются значительным сходством растительного покрова, с выраженной высотной поясностью: на абс. отметках до 700 м встречаются высокотравье и парковые леса из каменной березы, выше доминируют ольховый и кедровый стланики, на высотах от 900–1000 м — горные тундры [Сугробов и др., 2009].

Табл. 1. Сравнительная характеристика морфометрии анализируемых фрагментов долин р. Гейзерной и Шумной
 Table 1. Comparative description of the morphometry of the Geysernaya and Shumnaya Rivers valleys

Параметры	Гейзерная	Шумная
Протяженность водотока, км	7,6	9,6
Абс. отметки днища, м	385–700	390–650
Абс. отметки бортов долины, м	900–1100	900–950
Глубина вреза долины, м	250–550	300–500
Средняя крутизна склонов, °	20–23	19–32
Площадь участка долины, км ²	14,9	11,6

Участки различной экспозиции

Борт долины	Правый		Левый		Правый		Левый	
	СВ	ЮВ	СВ	ЮВ	СВ	СЗ	ЮЗ	ЮВ
Средняя крутизна склонов, град	20	23	23	23	19	31	20	32
Площадь, км ²	2,6	3,9	2,8	5,7	5,2	1,2	3,9	1,3
Наличие газогидротерм	нет	нет*	есть	есть	нет			

* Газогидротермальные проявления отмечены только в нижних частях склонов — до высоты 10–15 м над руслом.

Немаловажным фактором послужило и то, что рассматриваемая часть долины р. Шумной изображена на тех же снимках, по которым проводилось дешифрирование проявлений склоновых процессов в долине р. Гейзерной, что позволяет проводить сравнительную оценку двух долин на основе анализа одних и тех же исходных материалов. Следовательно, возможно максимально корректное сравнение между собой участков склонов с наличием газогидротермальных проявлений и без таковых с исключением влияния иных факторов.

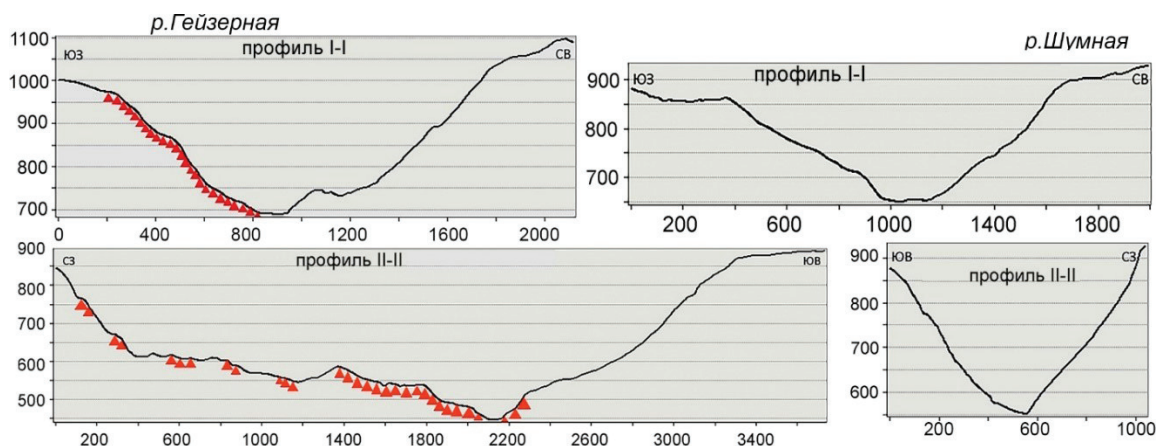


Рис. 4. Поперечные профили долин в верхнем и нижнем течении рр. Гейзерной и Шумной (положение профилей указано на рис. 3а). Красными треугольниками выделены участки газогидротермальных проявлений в долине р. Гейзерной: профиль I-I — Верхнегейзерное и II-II — Гейзерное термальные поля

Fig. 4. Crosscut profiles of the valleys in the upper and lower reaches Geysernaya and Shumnaya Rivers (the position of the profiles is shown in fig. 3a). Red triangles mark the sites of gas-hydrothermal occurrences in the valley of the Geysernaya River: profile I-I — Upper Geysernoye and II-II — Geysernoye thermal fields

При дешифрировании проявлений склоновых процессов в долине р. Шумной были частично использованы те же высококачественные снимки сверхвысокого пространственного разрешения (GeoEye, Pleiades-1A/1B, World-View-2 2009–2017 гг.), подробно охарактеризованные в [Балдина и др., 2022]. Однако большинство из них захватывают лишь самую нижнюю часть долины р. Шумной. С учетом задачи сравнения наиболее полезными являются материалы съемок, охватывающие одновременно обе долины. К их числу относятся как архивные снимки со спутника KeyHole-4 CORONA 1964 и 1967 гг., так и характеризующие современный период снимки с российского спутника Ресурс-П2 (аппаратура Геотон-Л1) 2015 и 2016 гг. Эти снимки представлены в многозональном (пространственное разрешение ~1,7 м) и панхроматическом (~0,5 м) вариантах. Однако и архивные, и современные (2015 и 2016 гг.) данные на обе долины представлены без ортотрансформирования, т. е. содержат значительные искажения, обусловленные горным рельефом. Это обстоятельство затрудняет их использование для получения точно сравнимых количественных параметров и очертаний контуров двух долин, поскольку дешифрирование склоновых процессов в долине р. Гейзерной проводилось по снимкам высокой детальности и геометрических качеств. Доступное в онлайн-режиме высокодетальное покрытие ESRI World Imagery¹ охватывает обе долины съемкой от 4 октября 2020 г. Его существенным недостатком является значительная затененность бортов долин северо-западной экспозиции из-за низкого положения Солнца при съемке.

Нижняя часть правого борта долины р. Шумной недостаточно освещена практически на всех как на архивных, так и на современных снимках. Для получения современной картины распространения участков активизации склоновых процессов на северных склонах долины р. Шумной были привлечены все доступные материалы последних лет (с 2015 по 2021 г.), включая некоторые из снимков со спутников CubeSat американской компании Planet Labs: 22 августа 2016 г. и 3 августа 2021 г. Эти снимки

¹ Базовая подложка компании ESRI для программы ArcGIS. Электронный ресурс: <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08febac2a9> (дата обращения 01.03.2023).

относительно невысокого качества по яркостным характеристикам, их пространственное разрешение недостаточно высоко (~5 м), но они ортотрансформированы и передают правильные очертания контуров в плане. Кроме того, этот участок был изучен во время аэровизуальных наблюдений и беспилотных съемок 2020–2022 гг.

Предварительное сравнение двух долин, изобразившихся на каждом из двух панхроматических снимков, разделенных 55-летним интервалом времени, позволяет уверенно утверждать, что число участков без растительности (яркий светлый тон) в долине р. Гейзерной значительно больше, чем в долине р. Шумной как на снимке 1964 г., так и на современном. При этом приходится учитывать, что на панхроматических (черно-белых) снимках обнажения более темноцветных пород могут слабо отличаться от тона растительного покрова, а нерастаявшие снежники (наличие которых нельзя исключить на снимке 1964 г.) практически не отличаются от обнажений пород светлых оттенков.

Для панхроматических снимков со спутника KeyHole-4 CORONA характерна достаточно высокая яркость изображения как участков, лишенных растительного покрова, так и участков с низкорослой травянистой или разреженной растительностью, поэтому их уверенное разделение в некоторых местах возможно только с опорой на доступные современные цветные снимки (рис. 5). Однако при этом нельзя отрицать вероятное частичное зарастание обнажений 1960-х гг. к 2020 г.

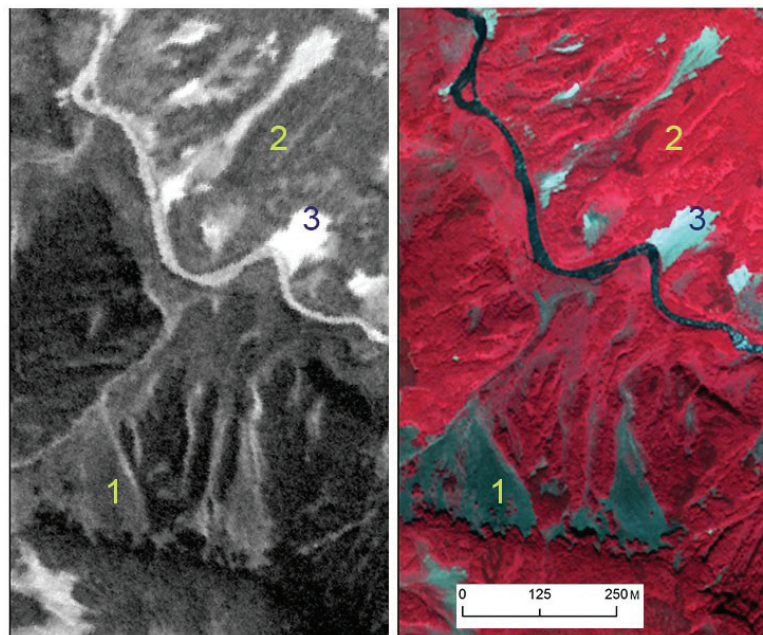


Рис. 5. Изображение склонов разной экспозиции и освещенности на участке долины р. Шумной на снимке 1964 г. (слева) и 2016 г. (справа): 1 — темноцветные (лавы и пирокластическая) осыпи, 2 — травянистый растительный покров, 3 — стенки светлоцветных (вулканогенно-озерных) пород

Fig. 5. Image of slopes of different exposures (and illumination) in the Shumnaya River valley in the 1964 (left) and 2016 (right) images: 1 — dark-colored (lava and pyroclastic) talus, 2 — herbaceous vegetation cover, 3 — walls of light-colored (volcanogenic-lake) rocks

Для детального дешифрирования участков развития склоновых процессов и последующих количественных определений были использованы все доступные снимки, в т. ч. при разных вариантах цветового синтеза многозональных (для современного этапа), а

также цифровая обработка изображений (для обоих временных срезов) для обеих долин. Для количественных определений параметров долин результаты дешифрирования были сведены в единый проект, выполнено визуальное контурное дешифрирование обнаженных участков в пределах морфометрически обоснованных границ.

Подход, примененный нами ранее [Лебедева и др., 2022] при исследовании долины р. Гейзерной, опирающийся на подтвержденный полевыми наблюдениями способ оценки активности проявления экзогенных процессов в горном районе путем выявления и прослеживания изменений во времени и по площади по снимкам очертаний участков, лишенных растительного покрова, был применен и при анализе состояния склонов долины р. Шумной.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Существенно различающееся качество снимков разных периодов не позволяет выявить достаточно точное соотношение площади участков развития склоновых процессов на левом и правом бортах долины р. Шумной (из-за затененности большей части правого борта на многих снимках), однако визуальное сравнение одинаково освещенных участков правого склона долины показывает их почти неизменное состояние в 1960-е и в 2020 гг. Для более равномерно освещенных участков левого и правого бортов можно отметить в целом практически неизменное общее число и состояние участков без растительного покрова для обоих периодов. При этом в более поздний срок можно наблюдать несколько большее покрытие прежде обнаженных участков растительным покровом.

Для обследованного по разновременным снимкам участка долины р. Шумной площадью 11,6 км² выявляемые различия в площади участков, затронутых современными процессами, находятся в пределах точности, обеспечиваемой доступными снимками. Общая площадь обнаженных в разной степени участков на рассматриваемой территории на середину 1960-х составляла 0,73 км², т. е. 6,3 %, а на 2016–2021 гг. она лишь незначительно сократилась до 0,68 км², что составляет 5,8 % площади всего участка, причем эта разница может быть обусловлена разным качеством использованных снимков. Наиболее корректно изменение площади участков активизации за ~55 лет можно проследить на левом борту долины р. Шумной: в середине 1960-х они занимали там 8,0 %, а в 2016–20 гг. — 7,1 %.

Доля обнаженных участков от площади рассматриваемых территорий на 2020 г. показана на рисунке 6. Хорошо видно, что она максимальна на левобережье р. Гейзерной, к которому приурочены Верхнегейзерное и Гейзерное термальные поля. Здесь доля обнаженных участков превышает 30 % (нижнее течение) и даже 40 % (верхнее течение). На правобережье реки — составляет от 10 до 20 %. Необходимо отметить, что на правобережье Гейзерной газогидротермальные проявления и термоземы отмечены в нижних частях склонов до высоты 10–15 м над урезом реки, причем преимущественно в ее нижнем течении (на участке Гейзерного термального поля), где глубина вреза долины максимальна. На фоновых участках в долине р. Шумной на правобережье доля обнаженных участков практически не превышает 5 %, а на левобережье, где больше площадь выходов слабоустойчивых вулканогенно-озерных туфов, составляет 5–10 %. Стоит отметить, что активность склоновых процессов (доля обнаженных участков) практически не обнаруживает однозначной связи ни с экспозициями, ни с крутизной склонов в этих двух долинах.

Сравнительную степень изменений в двух долинах за 55-летний период демонстрируют данные, приведенные в таблице 2. По долине р. Шумной и на верхнем по течению участке правого борта СВ экспозиции долины р. Гейзерной величина изменений доли участков активизации за последние 55 лет находится в пределах погрешности дешифрирования.

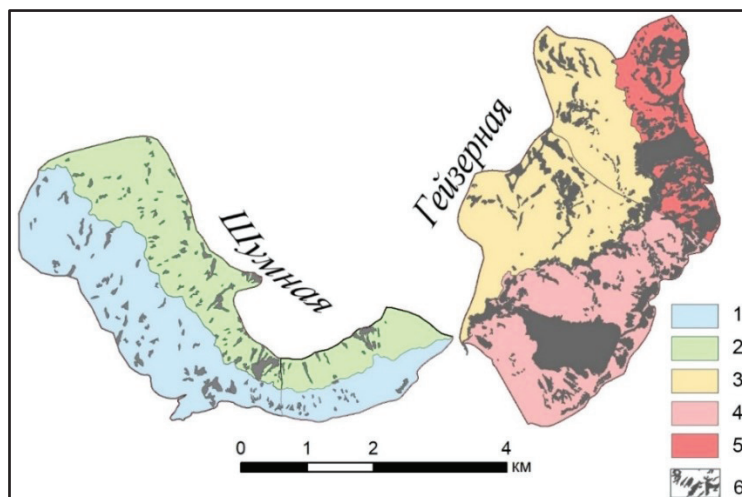


Рис. 6. Схемы дешифрирования участков, затронутых активными процессами (без растительности), в долинах рр. Гейзерная и Шумная на 2020 г., и оценка доли их суммарной площади на склонах разной экспозиции. Шкала значения долей (в %): 1 — до 5; 2 — 5–10; 3 — 10–20; 4 — 30–40; 5 — более 40; 6 — участки без растительного покрова
 Fig. 6. Results of image interpretation of areas affected by active processes (without vegetation) in the Geysernaya and Shumnaya river valleys for 2020 and assessment of the proportion of their total area on slopes of different exposures. Scale of the shares value (in %): 1 — up to 5; 2 — 5–10; 3 — 10–20; 4 — 30–40; 5 — over 40; 6 — areas without vegetation

По левому борту долины р. Гейзерной в пределах Верхнегейзерного и Гейзерного термальных полей наблюдается активный прирост доли площадей участков активизации склоновых и эрозионных процессов — от 10,9 до 17 %. Небольшой прирост в 5,6 % отмечен на нижнем по течению участке правого борта долины, где газогидротермальные проявления Гейзерного термального поля отмечены в нижних частях придолинных склонов.

Табл. 2. Изменение доли участков активизации склоновых процессов в долинах рр. Шумной и Гейзерной за последние 55 лет (1964–2020 гг.)
 Table 2. Changes in the proportion of slope activation sites in the Shumnaya and Geysernaya Rivers valleys over the past 55 years (1964–2020)

Параметры	Шумная				Гейзерная			
	Участки различной экспозиции							
Борт долины	Правый		Левый		Правый		Левый	
Экспозиция	СВ	СЗ	ЮЗ	ЮВ	СВ	ЮВ	ЮЗ	СЗ
	Доля участков активизации, %							
1960-е гг.	5,3	3,0	8,8	5,5	8,7	11,2	33,5	16,4
2016–2020 гг.	5,0	3,5	7,6	5,6	14,2	11,6	44,3	33,4
Динамика изменений, %	-0,3	+0,3	-1,2	+0,1	+5,6	+0,4	+10,9	+17,0
Наличие газогидротерм	нет				нет*	нет	есть	есть
Общее изменение доли площади участков активизации процессов, %	Сокращение — от 6,3 до 5,8				Увеличение — от 16,8 до 26,4			

* Газогидротермальные проявления отмечены только в нижних частях склонов — до высоты 10–15 м над руслом.

Выявленная динамика склоновых процессов хорошо подтверждается наблюдениями и расчетами других специалистов: установлено, что только за последние 40 лет в результате гравитационных процессов с левого борта долины р. Гейзерной смещено в ее днище не менее 24 млн м³ пород [Пинегина и др., 2008; Двигало, Мелекесцев, 2009; Шевченко и др., 2018; Лебедева и др., 2020]. Данные закономерности сказываются и на характере поперечного профиля через долину реки в ее нижнем течении (профиль П-П рис. 4): максимальное расширение долины р. Гейзерной и максимальное выполаживание ее борта наблюдается на участке Гейзерного термального поля, где на протяжении по крайней мере второй половины голоцена происходили масштабные смещения материала на склоне, о чем свидетельствуют не только результаты дешифрирования древних оползневых тел [Двигало, Мелекесцев, 2009], но и находка погребенной почвы в основании детрузивного вала, продатированной серединой голоцена [Белоусов, Белоусова, 2017].

ВЫВОДЫ

Выбор территорий для сравнительного анализа в соседних долинах — в сходных физико-географических условиях — позволил максимально корректно сравнивать между собой участки склонов с наличием газогидротермальных проявлений и без таковых с исключением влияния иных факторов — литологии, трещиноватости пород, экспозиции и др. Максимально приближены по данным параметрам склоны СЗ экспозиции на левобережье р. Гейзерной с развитием газогидротерм и на правобережье р. Шумной без таковых. Корректность сравнения обеспечена также единством используемых космических снимков: начальный период исследования задан одним и тем же снимком со спутника KeyHole-4 CORONA, а наиболее современный — высокодетальным покрытием ESRI World Imagery, в качестве вспомогательных использовались материалы, полностью или частично охватывающие обе долины. Использование ЦМР ArcticDEM обеспечило сравнимость морфометрических характеристик обеих долин и, в частности, позволило выявить незначительность влияния на активность процессов экспозиций и крутизны склонов. Проведенное исследование позволяет заключить, что в условиях развития газогидротермальных проявлений площадь участков склонов, пораженных активными процессами, в 2–3 р. превышает таковую на участках без газогидротерм.

БЛАГОДАРНОСТИ

Методики разработаны в рамках ГЗ географического факультета МГУ (121051400061-9) и ГЗ ИГ РАН (FMGE-2019-0005). Анализ материалов, дешифрирование снимков и полевые исследования осуществлены при поддержке гранта РФФ № 21-17-00216.

ACKNOWLEDGEMENTS

The methodology was developed in the framework of the Geography Faculty of Moscow State University State Assignment (121051400061-9), and the analysis of materials was carried out in the framework of the Institute of Geography of RAS State Assignment (FMGE-2019-0005). Image interpretation and field studies were supported by Grant No. 21-17-00216 of the Russian Science Foundation.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атлас долины реки Гейзерной в Кроноцком заповеднике. М.: Красанд, 2015. 88 с.
 Балдина Е.А., Лебедева Е.В., Медведев А.А. Методика дешифрирования архивных и современных космических снимков для изучения динамики склоновых процессов в долине р. Гейзерная (Камчатка). ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение

- устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2022. Т. 28. Ч. 1. С. 266–283. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-266-283.
- Белоусов А.Б., Белоусова М.* Роль оползней в формировании гейзеров Долины Гейзеров, Камчатка. Материалы конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский: ИВиС, 2017. С. 155–157.
- 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: ИНГТ СО РАН, 2013. 280 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.
- Зеркаль О.В., Гвоздева И.П., Фролова Ю.В.* Развитие оползневых процессов в долине р. Гейзерной. Геодинамические процессы и природные катастрофы: Тезисы докладов III Всероссийской научной конференции с международным участием. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2019. С. 138.
- Лебедева Е. В., Балдина Е. А., Медведев А. А.* Склоновые процессы в долине р. Гейзерной (Камчатка): результаты дешифрирования разновременных космических снимков высокого пространственного разрешения. Геоморфология, 2022. Т. 53. № 4. С. 3–16. DOI: 10.31857/S0435428122040095.
- Лебедева Е.В., Сугробов В.М., Чиждова В.П., Завадская А.В.* Долина р. Гейзерной (Камчатка): гидротермальная деятельность и особенности рельефообразования. Геоморфология, 2020. № 2. С. 60–73. DOI: 10.31857/S0435428120020066.
- Леонов В.Л., Гриб Е.Н., Карпов Г.А., Сугробов В.М., Сугрובה Н.Г., Zubин М.И.* Кальдера Узон и Долина Гейзеров. Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука, 1991. Т. II. С. 94–141.
- 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.
- Рычагов С.Н.* Гидротермальная система вулкана Баранского (о. Итуруп): модель геологической структуры. Вулканология и сейсмология, 1993. № 2. С. 59–75.
- Сугробов В.М., Сугрובה Н.Г., Дрознин 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., Ладыгин В.М., Рычагов С.Н.* Инженерно-геологические особенности гидротермально-метасоматических пород Камчатки и Курильских островов. Инженерная геология, 2011. № 3. С. 40–54.
- 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., 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

докладов III Всероссийской научной конференции с международным участием. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2019. С. 186.

Шевченко А.В., Двигало В.Н., Свирид И.Ю. Дистанционные исследования геоморфологических процессов на вулканических объектах Камчатки. XXXVI Пленум ГК РАН: Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Геоморфология — наука XXI века». Барнаул: Издательство АГУ, 2018. С. 403–410.

Kiryukhin A.V., Rychkova T.V., Dubrovskaya I.K. Formation of the hydrothermal system in Geysers Valley (Kronotsky Nature Reserve, Kamchatka) and triggers of the Giant Landslide. *Applied Geochemistry*, 2012. V. 27. P. 1753–1766. DOI:10.1016/j.apgeochem.2012.02.011

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. *Doklady Earth Sciences*, 2022. V. 507. P. S9–S18. DOI: 10.1134/S1028334X22601262.

REFERENCES

Atlas of the Geysers River Valley in the Kronotsky Nature Reserve. Moscow: Krasand, 2015. 88 p. (in Russian).

Baldina E.A., Lebedeva E.V., Medvedev A.A. Methodology of interpretation of archival and modern satellite imagery to study the dynamics of slope processes in the Geysernaya River valley (Kamchatka). *InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference*. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2022. V. 28. № 1. P. 266–283 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-266-283.

Belousov A.B., Belousova M. The role of landslides in the formation of geysers in the Valley of Geysers, Kamchatka. *Proceedings of the conference “Volcanism and related processes”*. Petropavlovsk-Kamchatsky: IV&S, 2017. P. 155–157 (in Russian).

Bortnikova S.B., Bessonova E.P., Gora M.P., Shevko A.Y., Panin G.L., Zharkov R.V., Yeltsov I.N., Kotenko T.A., Bortnikova S.P., Manshtein Yu.A., Kotenko L.V., Kozlov D.N., Abrosimova N.A., Karin Yu.G., Pospieva E.V., Kazansky A.Yu. Gas-hydrotherms of active volcanoes of Kamchatka and the Kuril Islands: composition, structure, genesis. Novosibirsk: IPGG SB RAS, 2013. 280 p. (in Russian).

Dvigalo V.N., Melekestsev I.V. Geological and geomorphological consequences of catastrophic landslide and landslide processes in the Kamchatka Valley of Geysers (from aerial photogrammetry data). *Volcanology and Seismology*, 2009. № 5. P. 24–37 (in Russian).

Frolova Y.V., Gvozdeva I.P., Chernov M.S., Kuznetsov N.P. Engineering-geological aspects of hydrothermal transformations of tuffogenic rocks of the Valley of Geysers (Kamchatka Peninsula). *Engineering Geology*, 2015. № 6. P. 30–42 (in Russian).

Frolova Y.V., Zerkal O.V., Gvozdeva I.P. Effect of hydrothermal transformations on physical and mechanical properties of tuffogenic rocks of the Valley of Geysers and their role in landslide formation. *Geodynamic processes and natural disasters: Abstracts of III All-Russian scientific conference with international participation*. Yuzhno-Sakhalinsk: IMG&G FEB RAS, 2019. P. 186 (in Russian).

Frolova Yu.V., Ladygin V.M., Rychagov S.N. Engineering-geological features of hydrothermal-metasomatic rocks of Kamchatka and the Kuril Islands. *Engineering Geology*, 2011. № 3. P. 40–54 (in Russian).

Kiryukhin A.V., Rychkova T.V., Dubrovskaya I.K. Formation of the hydrothermal system in Geysers Valley (Kronotsky Nature Reserve, Kamchatka) and triggers of the Giant Landslide. *Applied Geochemistry*, 2012. V. 27. P. 1753–1766. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2012.02.011.

- Lebedeva E. V., Baldina E. A., Medvedev A. A.* Slope processes in the Geysernaya River valley (Kamchatka): Results of interpretation of multi-temporal high spatial resolution satellite imagery. *Geomorphology*, 2022. V. 53. № 4. P. 3–16 (in Russian) DOI: 10.31857/S0435428122040095.
- 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. *Doklady Earth Sciences*, 2022. V. 507. Suppl. 1. P. S9–S18. DOI: 10.1134/S1028334X22601262.
- Lebedeva E.V., Sugrobov V.M., Chizhova V.P., Zavadskaya A.V.* Geysernaya River valley (Kamchatka): hydrothermal activity and features of relief formation. *Geomorphology*, 2020. No. 2. P. 60–73 (in Russian) DOI: 10.31857/S0435428120020066.
- Leonov V.L., Grib E.N., Karpov G.A., Sugrobov V.M., Sugrobova N.G., Zubin M.I.* Uzon Caldera and the Valley of Geysers. *Active Volcanoes of Kamchatka*. Moscow: Nauka, 1991. V. II. P. 94–141 (in Russian).
- Pinegina T.K., Delemen I.F., Droznin V.A., Kalacheva E.G., Chirkov S.A., Melekestsev I.V., Dvigalo V.N., Leonov V.L., Seliverstov N.I.* Kamchatka Geysers Valley after catastrophe on 3 June 2007. *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2008. № 1. P. 33–44 (in Russian).
- Rychagov S.N.* Hydrothermal system of Baransky volcano (Iturup Island): Model of geological structure. *Volcanology and Seismology*, 1993. № 2. P. 59–75 (in Russian).
- Shevchenko A.V., Dvigalo V.N., Svirid I.Yu.* Remote studies of geomorphologic processes on volcanic objects of Kamchatka. XXXVI Plenum of the Geomorphological Commission of the Russian Academy of Sciences: All-Russian scientific-practical conference with international participation “Geomorphology — science of XXI century”. Barnaul: Publishing house of ASU, 2018. P. 403–410 (in Russian).
- Sugrobov V.M., Sugrobova N.G., Droznin V.A., Karpov G.A., Leonov V.L.* The Pearl of Kamchatka — the Valley of Geysers. Popular science essay, guidebook. Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatpress, 2009. 108 p. (in Russian).
- Zerkal O.V., Gvozdeva I.P., Frolova Y.V.* Development of landslide processes in the Geysernaya river valley. *Geodynamic processes and natural disasters: Abstracts of the III All-Russian scientific conference with international participation*. Yuzhno-Sakhalinsk: IMG&G FEB RAS, 2019. P. 138 (in Russian).