

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

УДК 551.4:528.77

ФОРМИРОВАНИЕ ОПОЛЗНЕЙ И СЕЛЕЙ В ДОЛИНЕ р. ГЕЙЗЕРНОЙ НА КАМЧАТКЕ: ПРИЧИНЫ И ВОЗМОЖНОСТИ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ АКТИВИЗАЦИИ

© 2025 г. Е. В. Лебедева^{1, *}, Е. А. Балдина^{2, **}, С. С. Черноморец^{2, ***}, А. В. Котенков^{1, 2, ****}

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

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

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

**e-mail: baldina@geogr.msu.ru

***e-mail: sc@geogr.msu.ru

****e-mail: avkotenkov@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.01.2025 г.

После доработки 21.04.2025 г.

Принята к публикации 03.06.2025 г.

Дешифрирование разновременных космических снимков с 1964 по 2021 г. показало, что в долине р. Гейзерной современные обвально-оползневые процессы наиболее активно идут на ее левом борту в пределах Гейзерного и Верхнегейзерного термальных полей. Доля обнаженных участков склонов со следами активных процессов за этот период увеличилась там на 11–17% и к 2021 г. составила до 30–40% от общей площади склонов. Анализ селевой активности в бассейне р. Гейзерной, где за последние 40 лет трижды наблюдались масштабные селевые процессы, связанные с обрушением значительных фрагментов левого борта долины, позволил установить, что селеносными являются также преимущественно левые притоки реки в ее среднем и нижнем течении. Кроме того, сели левобережной части бассейна, которые формируются в пределах термальных полей в условиях постоянного прогрева и выходов газогидротерм, могут иметь асезонный характер. Проанализировано распределение проявлений эндогенных процессов (участков тепловых аномалий, современных поднятий, разломов, эпицентров локальных землетрясений) и ареалов развития экзогенных процессов (селеносных бассейнов, участков массовых смещений материала со склонов, развития эрозии и аккумуляции рыхлого материала) в долине. По совокупности факторов выделена зона потенциальной активизации склоновых и селевых процессов и развития катастрофических их проявлений, охватывающая левый борт долины р. Гейзерной и ее днище, а также бассейн руч. Лавового. Активизацию склоновых и селевых процессов на левом борту долины мы связываем с трансформацией коренных пород в результате газогидротермального воздействия, а также с повышенным увлажнением и прогревом склонов. Высокие риски обвальных, оползневых и селевых процессов, инициация которых наиболее вероятна на левом борту долины, необходимо учитывать при планировании развития рекреационных объектов в Кроноцком заповеднике. Для обеспечения безопасного туризма в бассейне реки необходимо создание системы мониторинга.

Ключевые слова: склоновые процессы, газогидротермы, сель, эндогенные процессы, дешифрирование снимков высокого разрешения

DOI: 10.7868/S2658697525040103

ВВЕДЕНИЕ

Оползневые явления — одна из основных причин стихийных бедствий во всем мире. Наиболее часто они наблюдаются на участках глубоко расчлененного рельефа и обусловлены сейсмическими событиями, сильными ливнями или комбинацией этих явлений (Iverson, 2000;

Keefer, 2002; Tang et al., 2011). При формировании массовых смещений материала на склонах помимо этих внешних факторов (триггеров) важную роль играют и так называемые внутренние факторы (условия) — крутизна и экспозиция склонов, литологические свойства пород, наличие зон повышенной трещиноватости

и др. Наши исследования в горных районах Курило-Камчатского региона показали, что развитие оползней там значительно активизируется на участках с газогидротермальными проявлениями (Балдина и др., 2023; Лебедева, 2019, 2022; Лебедева и др., 2020). Аналогичные данные имеются и по многим другим вулканическим регионам мира: участки развития оползней описаны в пределах термальных полей Центральной и Южной Америки, Филиппин, Индонезии, Италии, США, Новой Зеландии, Японии и др. (Crozier, 2005; Darmawan et al., 2022; Flynn et al., 1991; Leynes et al., 2005; Newson et al., 2002; Romero et al., 2024; Wijaya et al., 2017; и мн. др.). На геологической карте термального поля Гейзерс в Калифорнии, например, показано 9 оползней различных размеров (McNitt, 1963). Одним из наиболее интересных примеров на Камчатке является долина р. Гейзерной, где расположено одно из пяти крупнейших гейзерных полей мира (Атлас ..., 2015). В последние десятилетия в долине произошли три крупных обвала-оползня (август 1981, июнь 2007, январь 2014 гг.), приводивших к ее перегораживанию с формированием временных подпружных водоемов и сопровождавшихся сходом мощных селей (Двигало, Мелекесцев, 2009; Лебедева и др., 2020; Леонов, 2014; Пинегина и др., 2008; Zerkal, Gvozdeva, 2019; и др.).

Исследователи (Двигало, Мелекесцев, 2009; Сугробов и др., 2009) едины во мнении, что оползень 1981 г. спровоцировали обильные осадки, выпавшие в результате тайфуна “Эльза”. Однако причины наиболее масштабных событий 2007 и 2014 гг. до сих пор однозначно не установлены. Среди них называются и слабые сейсмические толчки, и снеготаяние, и особенности залегания пород, и парогазовый взрыв, и совокупность перечисленных факторов (Двигало, Мелекесцев, 2009; Леонов, 2014; Пинегина и др., 2008; Zerkal, Gvozdeva, 2019; и др.). На наш взгляд, важным фактором, способствующим смещению материала на склоне, может быть гидротермальная проработка горных пород и наличие там газогидротермальных проявлений (Балдина и др., 2023; Лебедева, 2022).

Ранее, на основе дешифрирования разновременных космических снимков высокого и сверхвысокого пространственного разрешения (0.5–5 м) в интервале шести десятилетий — с 1964 по 2021 г., нами (Балдина и др., 2022) было проведено выделение участков, лишенных растительного покрова, которые соответствуют разным типам современного смещения пород. Изменения в местоположении, очертаниях или площади лишенных растительности участков за период между съемками отображают активность изменений в проявлении экзогенных про-

цессов. Результаты дешифрирования заверялись посредством аэровизуальных наблюдений и полевых обследований территории. В результате дешифрирования были получены количественные оценки состояния склонов долины р. Гейзерной (Lebedeva et al., 2022) на два временных среза, отстоящих на 57 лет друг от друга. Также было проведено изучение интенсивности склоновых процессов за тот же временной интервал на фоновом участке в соседней долине р. Шумной, близкой по морфологии, экспозиции склонов и геологическому строению, но не затронутой газогидротермальными процессами (Балдина и др., 2023). Это позволило оценить роль воздействия газогидротермальных проявлений на активизацию склоновых процессов, исключив влияние других факторов. Кроме того, по мозаике детальных космических снимков World Imagery ESRI были отдешифрированы селевые бассейны, которые также заверялись в процессе маршрутных наблюдений. Итогом явилась карта селевой активности на 2022 г., составленная С.С. Черноморцем (Lebedeva, Chernomorets, 2024). Был изучен состав и характеристики селевых отложений и современного аллювия (Lebedeva et al., 2023).

В этой работе на основе анализа и обобщения перечисленных выше данных, полученных в результате исследований последних лет в бассейне р. Гейзерной, наряду с рассмотрением возможных причин и условий массовых смещений материала на склонах долины и сопутствующего селеформирования нам хотелось определить участки их дальнейшей потенциальной активизации и оценить масштабы возможного негативного воздействия. Выделение зоны потенциальной активизации склоновых и селевых процессов важно для безопасного развития туризма в долине р. Гейзерной; эту информацию необходимо учитывать и при создании инфраструктуры Кроноцкого заповедника.

ХАРАКТЕРИСТИКА РЕГИОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Долина р. Гейзерной расположена в восточной части Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии в пределах Восточного вулканического пояса Камчатки (Сугробов и др., 2009) и входит в состав Кроноцкого государственного заповедника (рис. 1). Река Гейзерная является левым притоком р. Шумной (бассейн Тихого океана) и берет свое начало на склонах вулкана Кихпинич. Ее протяженность составляет около 11 км, глубина вреза в нижнем течении превышает 400 м, а общий перепад высот — более 700 м. Гидрологический режим реки характеризуется хорошо выраженным весенне-летним

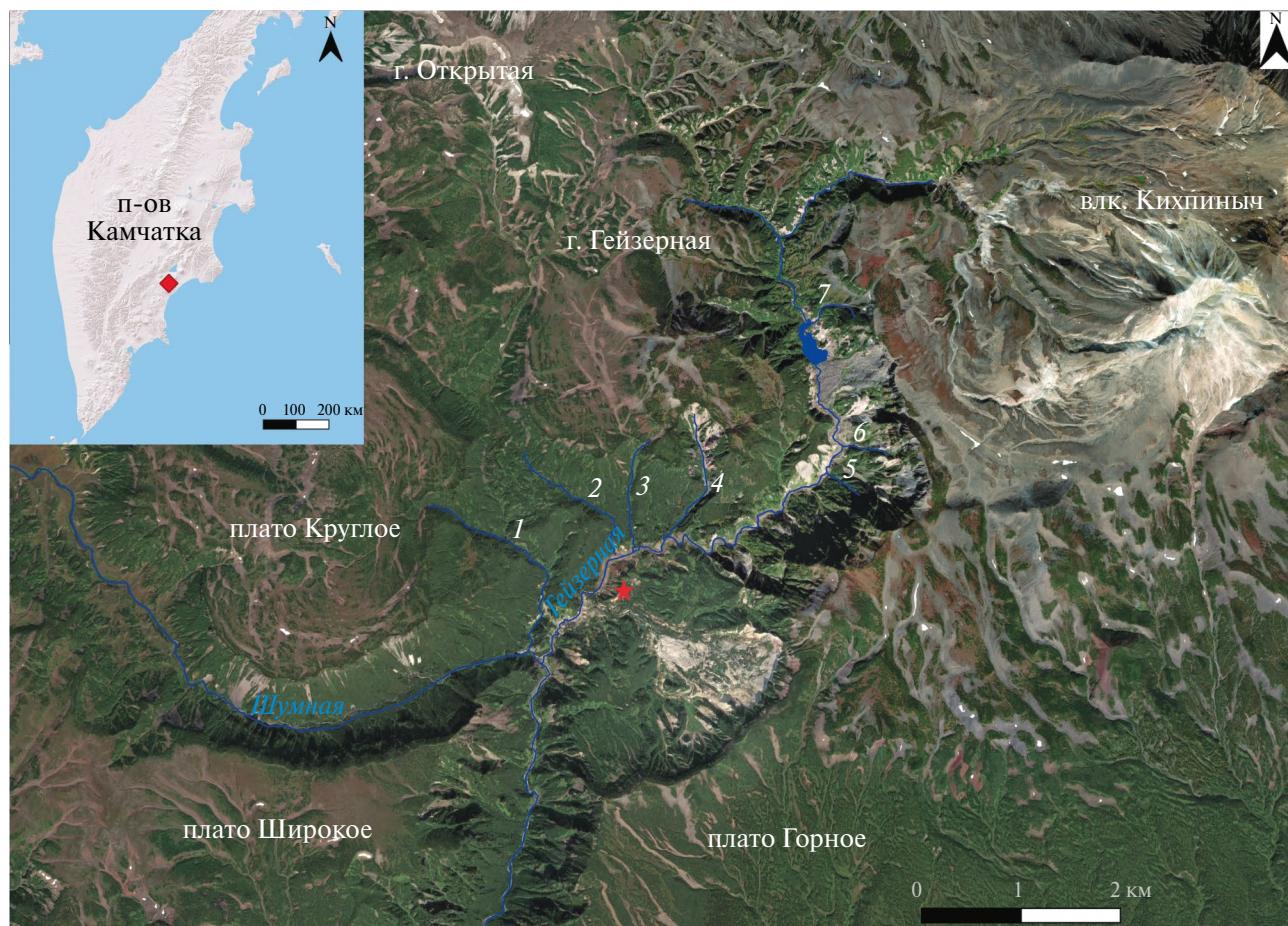


Рис. 1. Район исследований и его положение на п-ове Камчатка (красный ромб). В качестве основы использован снимок World Imagery с пространственным разрешением 1 м (<https://doc.arcgis.com/en/data-appliance/latest/maps/world-imagery.htm>). Реки и ручьи: 1 — Сестренка, 2 — Скользящий, 3 — Двуглавый, 4 — Лавовый, 5 — Дальний, 6 — Подъем, 7 — Кровавый; ★ — кордон Кроноцкого заповедника.

половодьем, летней и зимней меженью; питание — смешанное.

Долина реки следует вдоль кольцевого разлома, ограничивающего кальдеру. В ее геологическом строении принимают участие три комплекса пород. Докальдерные образования представлены туфобрекчиями и туфоконгломератами, а также лавами преимущественно андезитового и дацитового состава средне-позднеплейстоценового возраста. На этапе кальдерообразования (около 40 тыс. л.н.) они были прорваны дайками, произошло формирование игнимбритов, лав бортового комплекса и ряда экструзий. На посткальдерной стадии депрессия оказалась заполненной озерными отложениями и лавами экстрезивных куполов (Атлас ..., 2015; Геологическая карта ..., 1981; Леонов и др., 1991; Сугробов и др., 2009). Вулканогенно-озерные осадки представлены преимущественно пемзовыми туфами, туфопесчаниками и туфогравелитами. Предполагается, что заложение глубоко врезанной в озерные отложения долины р. Гейзерной произошло в начале голоцена (Сугробов и др., 2009).

На склонах долины р. Гейзерной встречаются поля нагретых до различных температур пород: в верховьях (у подножия одноименного вулкана) — Кихпиничевское, в среднем течении — Верхнегейзерное и в низовье — Гейзерное. Высокотемпературные напорные воды в виде многочисленных источников и парогазовых струй выходят там по трещинам в водоупорной кровле (Сугробов и др., 2009; Kiryukhin et al., 2012). Большинство источников расположено в днище долины и на ее левом борту, который сформировался вдоль края кальдеры. Наряду с выходами термальных вод и паровых струй проявлениями тепловых аномалий являются также грязевые котлы, участки гидротермально измененных пород, нагретая до различных температур почва. Прогрев и трансформация пород под воздействием термальных растворов в долине р. Гейзерной наблюдаются на протяжении всего года, что хорошо видно на снимках Landsat-8 в тепловом инфракрасном канале (10.6—11.19 мкм), сделанном ночью в марте 2023 г. при температуре воздуха ~ −20°C, когда вся территория еще покрыта снегом (рис. 2). Светлые пятна, соответствующие областям с повышенным

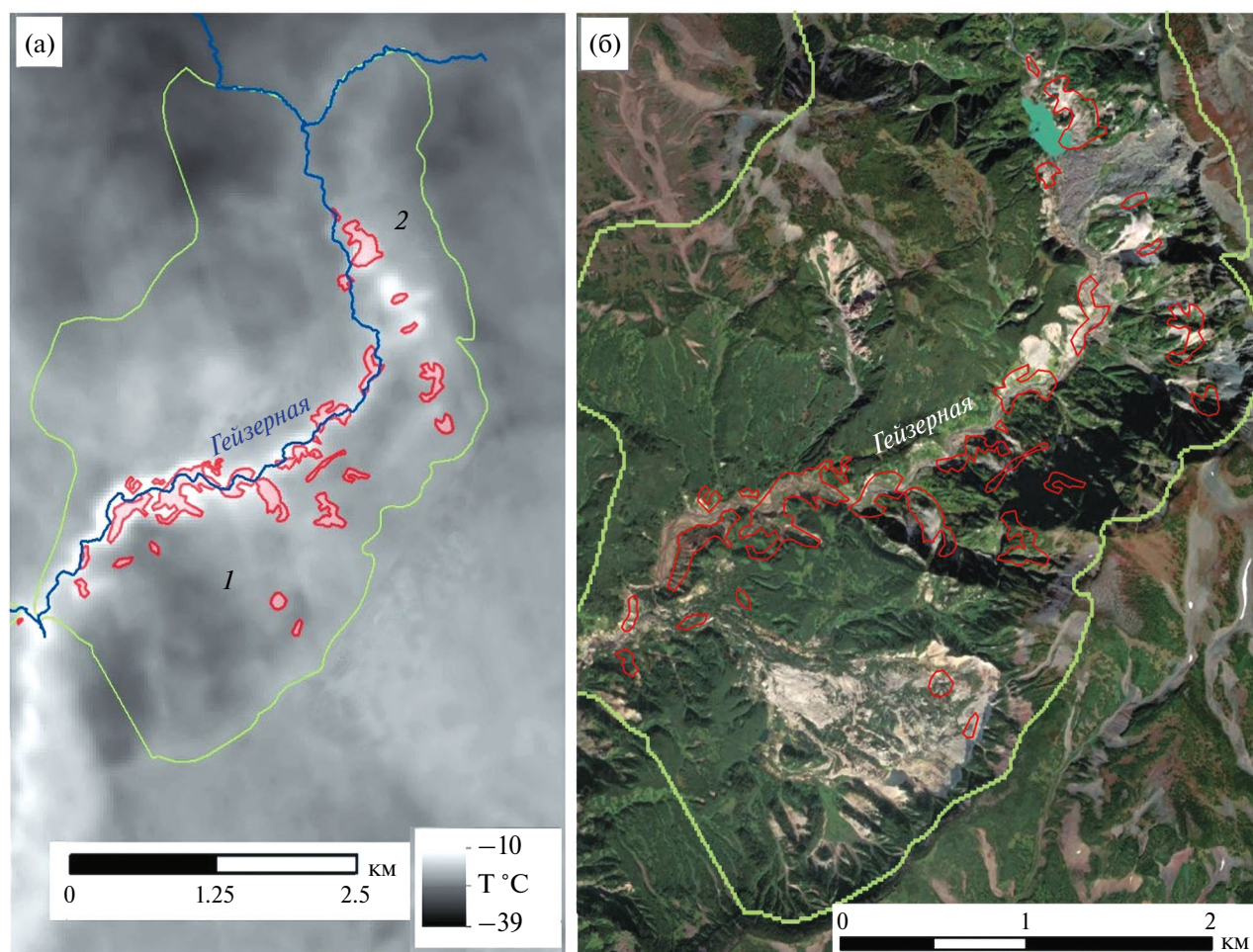


Рис. 2. Термальные проявления в долине р. Гейзерной: (а) ночной снимок Landsat-8 в тепловом инфракрасном канале (10.6–11.19 мкм, март 2023 г.); (б) фрагмент мозаики World Imagery 3 сентября 2023 (<https://doc.arcgis.com/en/data-appliance/latest/maps/world-imagery.htm>). Красные контуры — наиболее прогретые участки Гейзерного (1) и Верхнегейзерного (2) термальных полей в днище долины и на ее левом борту по результатам тепловой съемки с вертолета 5 августа 2010 г. (Kirykhin et al., 2012). Зеленая линия — границы исследуемого участка долины.

тепловым излучением, совпадают с контурами наиболее прогретых участков Гейзерного и Верхнегейзерного термальных полей, выявленных по результатам тепловой съемки 2010 г. (Kirykhin et al., 2012) в днище долины и на ее левом борту.

В бассейне р. Гейзерной выделяют пять водоносных комплексов (Сугробов и др., 2009). Верхние три из них представляют собой холодные грунтовые воды. С четвертым водоносным комплексом связаны уже преимущественно теплые и горячие источники. Пятый, самый глубокий комплекс — это высокотемпературные напорные воды, которые выходят в центральной части долины р. Гейзерной. Химический состав этих вод — хлоридно-натриевый с высокой общей минерализацией — 1.8–2.2 г/л. Расчетная температура воды на глубине достигает 150–180°C (Сугробов и др., 2009).

По (Атлас ..., 2015), количество выпадающих осадков в долине достигает 2000 мм/год, мощность снежного покрова — 4–6 м, снеготаяние

продолжается с мая по июнь. На прогретых участках термальных полей снежный покров исчезает в первую очередь. Наиболее медленно таяние снега идет на склонах северной экспозиции: на них, как и в понижениях рельефа на абсолютных отметках более 900 м, нередко сохраняются перелетовывающие снежники.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для решения задач данного этапа исследований наряду с анализом полученных ранее результатов нами были проведены критический обзор имеющихся фондовых и литературных материалов по геологическому строению долины, геоморфологические маршрутные исследования 2022–2024 гг. с опробованием рыхлых отложений, съемка с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) на участке долины нижнего и среднего течения реки протяженностью около 7.6 км (рис. 3).



Рис. 3. Основные этапы работ.

На основе анализа мозаики World Imagery ESRI, составленной из снимков последних лет (2023 и 2024 гг.), на выделенных ранее обнаженных участках склонов (Балдина и др., 2023) проводилась *типизация процессов смещения материала* с использованием инженерно-геологических (Склоновые ..., 2022) и геоморфологических классификаций (Воскресенский, 1971). Были определены участки современного развития осыпей, обвалов, оползней различного типа, сплывов и др. Результаты дешифрирования заверялись в процессе полевых маршрутов.

По аналогичной методике с использованием снимков, сделанных в разные сезоны года, определены участки развития *более древних крупных обвально-оползневых событий*, которые сохранились на склонах долины в виде залесенных разновысотных террасовидных поверхностей. Анализировалось их высотное распределение, положение стенок срыва, в результате ручного бурения и шурфования изучался характер отложений, перекрывающих выровненные участки.

С использованием инструментов модуля 3D Analyst Tools—Raster Surface—Slope в программном пакете ArcGIS 10.8 построена карта углов наклона склонов долины.

С учетом результатов маршрутных исследований 2023–2024 гг. и данных анализа вещественного состава селевых отложений (Лебедева и др., 2024; Lebedeva et al., 2023) была уточнена карта селевой активности бассейна реки.

Анализ *распространения термальных участков* проведен на основе сравнения данных разнопла-

новой тепловой съемки территории: с вертолета 2010 г. (Kiryukhin et al., 2012), зимней съемки 2023 г. со спутника Landsat, съемки с БПЛА, выполненной в 2021 г. А.А. Медведевым. Положение участков прогрева также уточнялось по данным полевых маршрутных наблюдений 2020–2024 гг.

На основе критического обзора литературных источников, анализа геологических карт с уточнением по данным дешифрирования снимков и полевым маршрутам 2020–2024 гг. был проведен *анализ проявлений эндогенных факторов и распространения экзогенных процессов рельефообразования* в долине реки и составлена итоговая карта. По совокупности факторов на ней выделена зона потенциальной активизации процессов рельефообразования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Созданные картографические материалы. В результате проведенных работ на долину р. Гейзерной была составлена серия карт. Анализ карты крутизны склонов (рис. 4а) и участков активизации склоновых процессов (рис. 4б) позволяет сравнить эти параметры и проанализировать распределение участков активизации по секторам долины и их связь с крутизной ее склонов. Полученные по результатам дешифрирования снимков площади лишенных растительности участков в 1964 и 2021 гг. и их изменения приведены в табл. 1. Доля участков активизации процессов рельефообразования от площади

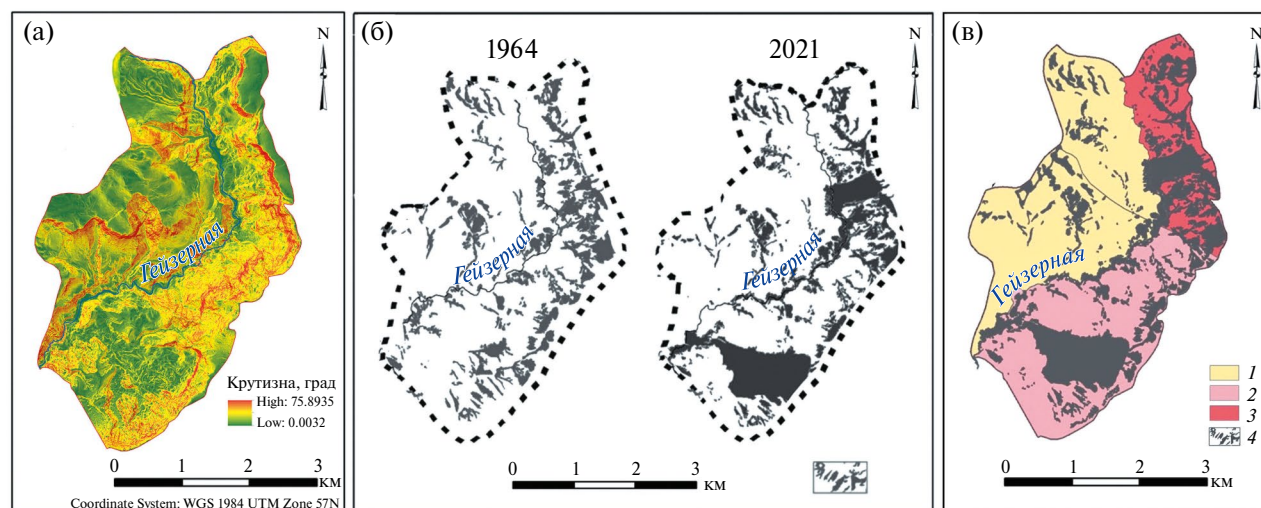


Рис. 4. Крутизна склонов и динамика склоновых процессов за 57 лет в долине р. Гейзерной: (а) карта крутизны склонов р. Гейзерной; (б) участки, лишенные растительности с активными склоновыми процессами на 1964 и 2021 гг. (темные контуры); (в) доля суммарной площади участков, затронутых активными процессами, на 2021 г. (шкала значения долей, % от общей площади склонов: 1 — 10–20; 2 — 30–40; 3 — более 40; 4 — участки без растительного покрова).

Таблица 1. Площади лишенных растительности участков в долине р. Гейзерной и их изменение за 1964–2021 гг.

Общая площадь участков в долине р. Гейзерной			Площадь участков без растительности с активными склоновыми процессами				Изменение площади участков без растительности с активными склоновыми процессами 1964–1921 гг.	
			1964 г.		2021 г.			
Борт	Экспозиция	S, км²	S, км²	%	S, км²	%	ΔS, км²	%
Правый	СВ	2.62	0.23	8.7	0.37	14.2	+0.15	5.6
	ЮВ	3.87	0.43	11.2	0.45	11.6	+0.02	0.4
Левый	СЗ	5.66	0.93	16.4	1.89	33.4	+0.96	17.0
	ЮЗ	2.77	0.99	36.0	1.23	44.3	+0.23	8.5
Всего		14.93	2.58	17.3	3.94	26.7	+1.36	9.1

фрагментов бортов долины на 2021 г. показана на рис. 4в.

Составлена карта типов современных процессов и явлений на лишенных растительности участках склонов долины р. Гейзерной (рис. 5). В долине р. Гейзерной чаще всего отмечаются масштабные обвально-оползневые события, завершающиеся прохождением селей. Они были зафиксированы в 1981, 2007 и 2014 гг. на левом борту долины. Но также есть и следы более ранних (до 1981) недатированных комплексных событий. Многочисленны и более мелкие обвалы и оползни. На участках выходов лав и в зонах их контакта с вулканогенно-озерными туфами доминируют обвалы и осыпи, в толщах

озерных отложений — осыпи и оползни-сплывы. Последние приурочены к нижним частям склонов долины, где термопроявления наиболее активны и повышено увлажнение пород. Блоковые оползни представлены единично, преимущественно на участке долины нижнего течения реки. На возвышенных слабонаклонных участках с абс. отметками более 800–900 м наблюдается оплывание и солифлюкция по поверхности сезонно- и многолетнемерзлых пород.

Важно, что большая часть смещенного со склонов материала трансформируется в сели и дальше перемещается в виде грязекаменных потоков. Селевые отложения прослеживаются в русле и на низких террасах на большей части

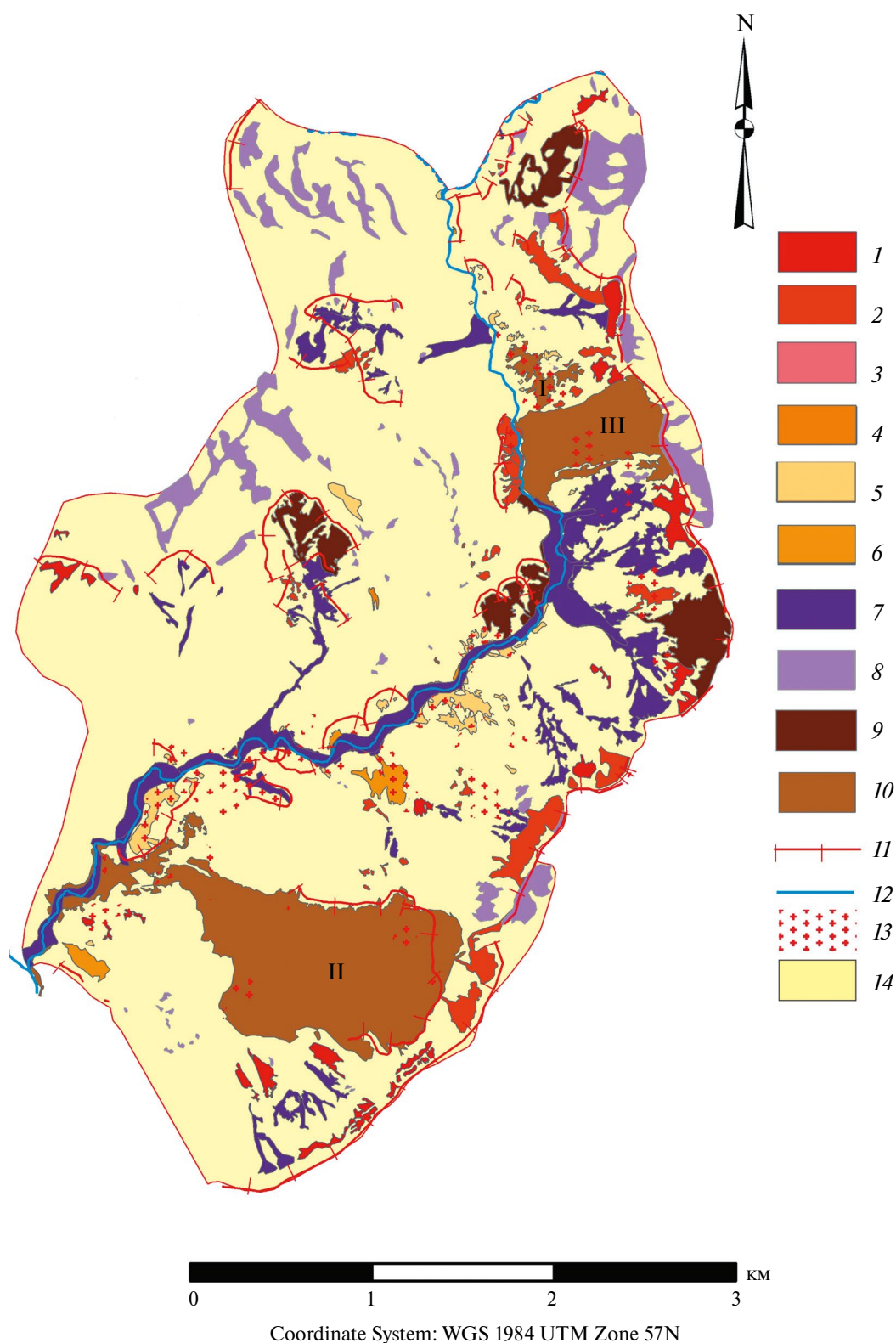


Рис. 5. Карта типов современных экзогенных процессов и явлений на склонах долины р. Гейзерной (контуры по состоянию на 2021 г.). 1 — обвалы; осыпи; 2 — крупнообломочного материала; 3 — мелкообломочного материала; блоковые оползни; 4 — скальных пород; 5 — обломочного материала; 6 — оползни-сплывы обломочного материала; 7 — сели; 8 — оплывание и солифлюкция; комплексные смещения материала (оползни с обвалами и селевыми потоками); 9 — недатированные (до 1981 г.), 10 — крупные современные: I — 1981 г., II — 2007 г., III — 2014 г.; 11 — стенки срыва; 12 — реки и ручьи; 13 — участки термопроявлений; 14 — исследуемая территория.

нижнего и среднего течения р. Гейзерной (Лебедева и др., 2024; Lebedeva et al., 2023). Формируются не только такие мощные сели, как после событий 1981, 2007 и 2014 гг. (>500 тыс. м³), но и небольшие на склонах и в малых эрозионных формах. Селевые процессы характерны для большинства притоков реки. В долинах ряда правобережных притоков (руч. Скользкий, Двуглавый) в процессе маршрутных исследований были обнаружены следы древних селей, “замаскированные” растительностью, современные сели активны в руч. Лавовом. Селеносны практически все левые притоки реки, причем там сели могут иметь асезонный характер, так как они формируются в условиях постоянного прогрева и активного газогидротермального воздействия в пределах термальных полей.

Помимо современных оползней многие исследователи выделяли в долине древние обвально-оползневые тела (Двигало, Мелекесцев, 2009; Леонов, 2007). Они хорошо видны на космических снимках и при съемке с БПЛА в виде разновысотных залесенных фрагментов террасовидных поверхностей (ТП) на склонах долины в нижнем и среднем течении реки (рис. 6а) на отметках от 30–50 до 300 м над урезом, что позволило нам составить схему их распространения (рис. 6б). Нередко эти ТП наклонены к руслу, но часто они имеют обратный уклон и состоят из серии ступеней. Исследование характера отложений, вскрытых под 1–2-метровым почвенно-пирокластическим чехлом на этих террасовидных поверхностях, отсутствие там окатанного материала позволило нам заключить об их не аллювиальном, а оползневом генезисе. Это подтверждается и наличием хотя и залесенных и задернованных, но все же, как правило, хорошо выраженных очагов их зарождения — стенок срыва на бортах долины и детрузивных валов в ее днище. Судя по протяженности стенок срыва и по размерам выявленных нами аккумулятивных тел, эти события по своим масштабам нередко превышали обвал-оползень 2007 г.

По материалам собственных исследований и по результатам анализа литературных источников, касающихся эндогенных и экзогенных факторов, влияющих на развитие обвально-оползневых и селевых процессов, составлена карта *проявлений эндогенных процессов* (рис. 7). На ней отражены разломы, участки тепловых аномалий, эпицентры малоамплитудных землетрясений, область поднятия, выделенная по данным интерферометрии, показаны выходы основных горячих источников на склонах долины. На карту были нанесены и установленные нами участки *активизации экзогенных процессов рельефообразования*: массового смещения мате-

риала на склонах, селеформирования, эрозии, аккумуляции и др. По результатам анализа совокупности данных была выделена *зона потенциальной активизации процессов рельефообразования*, охватывающая левый борт долины р. Гейзерной, ее днище и бассейн руч. Лавового.

Склоновые процессы. Дешифрирование разновременных снимков показало, что более 75% площади всех обнажений на склонах долины — участков развития активных современных процессов — находится на ее левом борту, где располагаются термальные поля и основные выходы газогидротерм (Lebedeva et al., 2022). Доля обнажений от общей площади склонов там составляет от 30 до 40%, причем ее прирост за 57 лет составил до 10–17% (Балдина и др., 2023). На правобережье реки, где термальные участки отмечены лишь в нижних частях склонов (до высоты 10–15 м над урезом), доля обнажений составляет от 10 до 20%, а прирост — менее 6%. В аналогичной по морфологии долине р. Шумной без газогидротермальных проявлений доля обнаженных участков на склонах не превышает 5–10%, а прирост их площади за 57 лет не установлен (Балдина и др., 2023).

Наиболее крутые участки склонов (до 83°) приурочены к верхним частям бортов долины (см. рис. 4а). Очевидно, что тесная связь участков современной активизации экзогенных процессов с крутизной склонов в долине р. Гейзерной не просматривается: оба борта долины имеют близкую крутизну, однако максимальные площади активизации приурочены к левобережью, где наблюдаются выходы газогидротерм. Стоит отметить, что доля обнаженных участков также не обнаруживает однозначной связи с экспозициями склонов в долинах изученных рек (Балдина и др., 2023). В то же время стенки срыва (очаги зарождения) более древних оползневых событий, замаскированных растительностью, как правило, приурочены к крутым участкам на бортах долины (см. рис. 6б).

На основе распределения крупных комплексных обвально-оползневых событий (как древних, так и современных) с использованием подхода *landslide susceptibility modeling (LSM)* на основе алгоритма RandomForest (Харченко и др., 2025) выполнена оценка предрасположенности долины р. Гейзерной к развитию оползней. Согласно результатам моделирования, наиболее опасные в оползневом отношении участки также сконцентрированы вдоль левого борта долины р. Гейзерной, в пределах зон разломов, повышенных термальных аномалий и контакта слаболитифицированных вулканогенно-озерных отложений с более прочными породами экструзий.

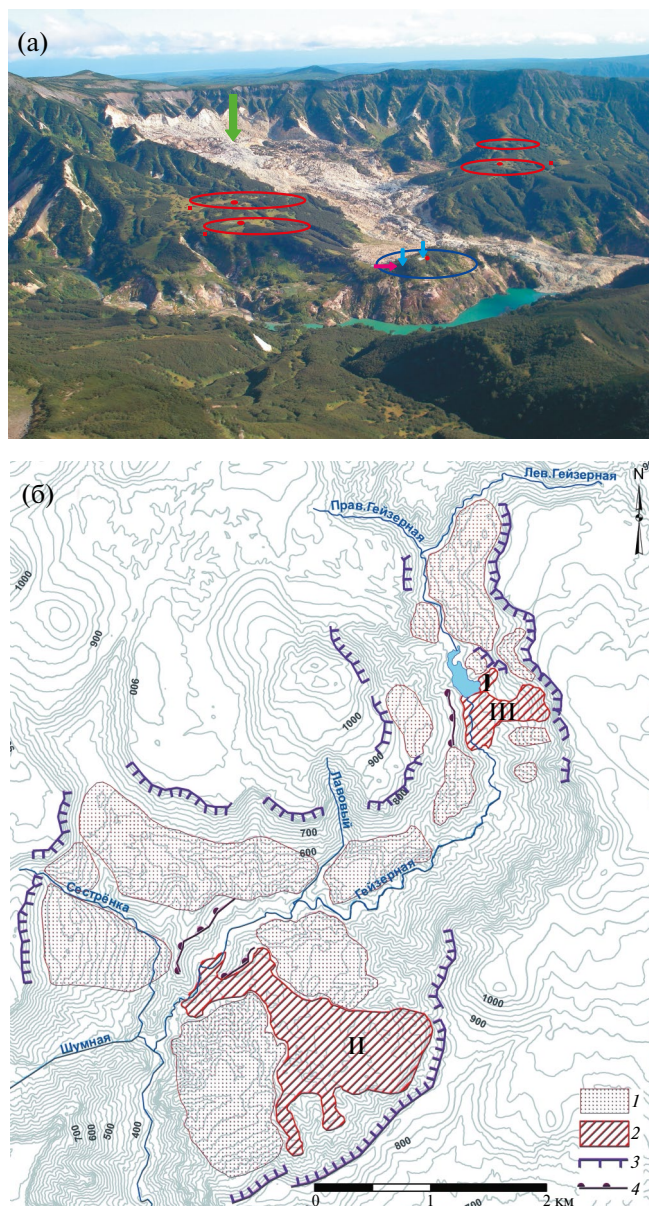


Рис. 6. Древние и современные крупные обально-оползневые тела в долине р. Гейзерной. (а) Вид на оползень-обвал 2007 г. (зеленая стрелка), селевую плотину и подпрудное озеро (фотография А.В. Завадской, 2008 г.). Красные овалы — ступени (фрагменты) древних блоковых оползней, красные точки — места опробования их верхних горизонтов. Синий овал — древний детрузивный вал у кордона заповедника, синие стрелки — положение буровых скважин И.Н. Василюка, розовая стрелка — место опробования погребенной почвы А.Б. и М.Г. Белоусовыми. (б) Карта древних и современных крупных обально-оползневых тел в долине. Обально-оползневые тела: 1 — древние (залесенные), 2 — современные (I — 1981, II — 2007 и III — 2014 гг.), практически лишенные растительности; 3 — стенки срыва; 4 — детрузивные валы.

Влияние газогидротерм. На склонах и в днище долины в пределах Гейзерного и Верхнегейзерного термальных полей наблюдаются термальные источники, парогазовые выходы и грязевул-

канические проявления, которые прогревают, увлажняют горные породы, а также влияют на их физические свойства (Рычагов, 1993; Фролова и др., 2011, 2015; и др.). Ю.В. Фроловой с коллегами в долине р. Гейзерной и в аналогичных районах Курило-Камчатского региона (2011, 2015) установлено, что под влиянием минерализованных термальных вод вулканическое стекло в горных породах замещается глинистыми минералами и цеолитами, что вызывает трансформацию рыхлых отложений и коренных пород в гидротермальные глины, снижение плотности пород и уменьшение их внутреннего сцепления практически в два раза. Очевидно, что данное изменение свойств пород не может не повлечь за собой и изменение характера и темпов процессов рельефообразования, в данном случае — активизацию склоновых процессов на бортах глубоко врезанной долины. В стенках срыва последних масштабных обвалов-оползней в долине р. Гейзерной вскрываются гидротермально измененные породы, выходы термальных вод и парогазовых струй, поэтому логично рассматривать активизацию склоновых процессов в пределах термальных полей как следствие гидротермальной проработки пород и дополнительного увлажнения склонов.

Кроме того, работами последних лет (Loche et al., 2021, 2022; Scaringi, Loche, 2022) установлена повышенная чувствительность глинистых пород к изменениям температурного режима, что связано с физико-химическим поведением их микроструктуры, обусловленным наличием абсорбированной воды и сложных химических связей. По наблюдениям в различных регионах мира (Италия, Китай и др.), колебания температуры могут играть существенную роль в смещении глинистого материала на склонах. Проведенные 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 их смещения. Под воздействием тепла изменяется широкий спектр параметров, в том числе, прочность на сдвиг. Авторами подчеркивается необходимость учета температуры при анализе оползней. Поэтому в пределах рассматриваемых нами термальных полей, где наблюдаются и нагрев, и увлажнение геотермальных глин, возможно дальнейшее активное формирование оползней и обвалов, трансформирующихся в селевые потоки, подобно событиям недавних лет.

Особенности селеформирования. В целом, денудация в бассейне реки идет преимущественно по следующей схеме: 1) смещение материала со склонов с перегораживанием русла реки,

формированием подпрудного водоема и сходом селя; 2) прорыв/спуск озера с повторным сходом селя (Лебедева и др., 2020). Смещение материала со склонов сопровождается постепенной трансформацией обвальнo-оползневых масс в селя. Подпрудные озера являются перехватывающими водоемами для малых селей, приходящих с верховий, но при определенных условиях их плотины прорываются, и накопленная в них вода служит источником жидкой составляющей для новых селей, идущих вниз по реке. Из селевого материала формируются разновысотные аккумулятивные террасы, в которые превращаются как фрагменты плотин, так и селевые конусы выноса (Лебедева и др., 2024). Судя по характеру строения днища долины и особенностям вещественного состава доминирующего там материала, для текущей стадии эволюции реки ведущим является именно селевой механизм транзита материала (Lebedeva, Chernomorets, 2024). Это справедливо и для большинства долин левых притоков реки и ряда правых.

Важно, что в левых притоках реки сели могут иметь асезонный характер, так как они формируются в условиях постоянного прогрева в пределах термальных полей. Они могут возникать здесь и в зимний период, поскольку активизация прогрева может приводить к таянию снега. Формирование селей на правом борту долины, напротив, подчиняется сезонным закономерностям. Источниками водной составляющей селей здесь служат весеннее таяние снега, летние дожди, выходы холодных грунтовых вод (руч. Лавовый). Объемы селевых потоков в притоках не превышают 10 тыс. м³, они формируют небольшие конусы выноса в устье, но не идут далеко по главной реке.

Соотношение эндогенных и экзогенных процессов. К зонам выделенных на итоговой карте (см. рис. 7) разломов приурочены участки повышенной трещиноватости пород; благодаря выходам термальных вод это и участки повышенного увлажнения и гидротермальной проработки. По активным разломам происходят и подвижки при сейсмических событиях, что может служить триггером гравитационных процессов. На участках тепловых аномалий Верхнегейзерного и Гейзерного термальных полей коренные породы трансформировались в глины, которые по своим физико-механическим свойствам способствуют более активному развитию оползневых процессов. Необходимо отметить миграцию участков максимального прогрева, которая фиксируется как по результатам разновременной термальной съемки, так и в процессе маршрутных наблюдений за состоянием растительного покрова. В результате такой миграции, гидротермальными преобразования-

ми охвачены гораздо большие участки склонов, нежели современные термальные аномалии.

На карту нанесены эпицентры локальных землетрясений низкого энергетического уровня ($M = 2-3$), которые не регистрируются региональной сетью, но были установлены по данным полевых наблюдений 2008–2009 гг. Ю.А. Кугаенко с коллегами (2010). Подобные землетрясения могут выступать в качестве триггеров опасных событий — обвалов, оползней, сплывов, но непосредственно поблизости от выявленных эпицентров следов современных активных гравитационных процессов не наблюдается. Возможно, концентрация эпицентров в верховьях руч. Двуглавого и Скользкого связана с зоной разлома СЗ простирания, а вторая область их концентрации находится близ центральной части поднятия, установленного (Lundgren, Lu, 2006) в результате интерферометрической обработки данных Radarsat-1 на 2000–2003 гг. Величина поднятия территории на этом участке в указанный период составила до 15 см, что, по-видимому, привело к возникновению там зоны напряжения и впоследствии могло способствовать формированию обвала 2014 г. Выявленное смещение, по мнению (Кугаенко и др., 2010, 2015; Kiryukhin et al., 2012), свидетельствует о современной активизации магматического очага, расположенного под восточной частью Узон-Гейзерной депрессии и влк. Кихпинич. Однако с 1999 по 2000 г. и с 2003 по 2004 г. деформаций поверхности на этом участке (Lundgren, Lu, 2006) зафиксировано не было. Недавно проведенное сравнение радиолокационных снимков 2017–2022 гг. (Ширшова и др., 2023) значительных деформаций данной территории также не показало. Однако очевидно, что данные исследования должны быть продолжены, так как поднятие этого участка может иметь прерывистый характер.

Большинство термальных источников (Сугробов и др., 2009) приурочено к днищу долины и ее левому борту. Холодные источники также многочисленны на левом борту и в нижней части правого борта. Выходы грунтовых вод способствуют увлажнению вулканогенно-осадочных пород, прорезаемых рекой, и облегчают смещение гидротермальных глин на склонах. Мощные выходы холодных вод в верховьях руч. Лавового обусловили активное врезание этого водотока, в нижней части которого часто формируются сели, выносящие грубообломочный материал в долину р. Гейзерной.

Выделение зоны максимальной потенциальной активности процессов по совокупности факторов и риск новых обрушений бортов долины р. Гейзерной. Мы согласны с мнением В.Н. Двигало

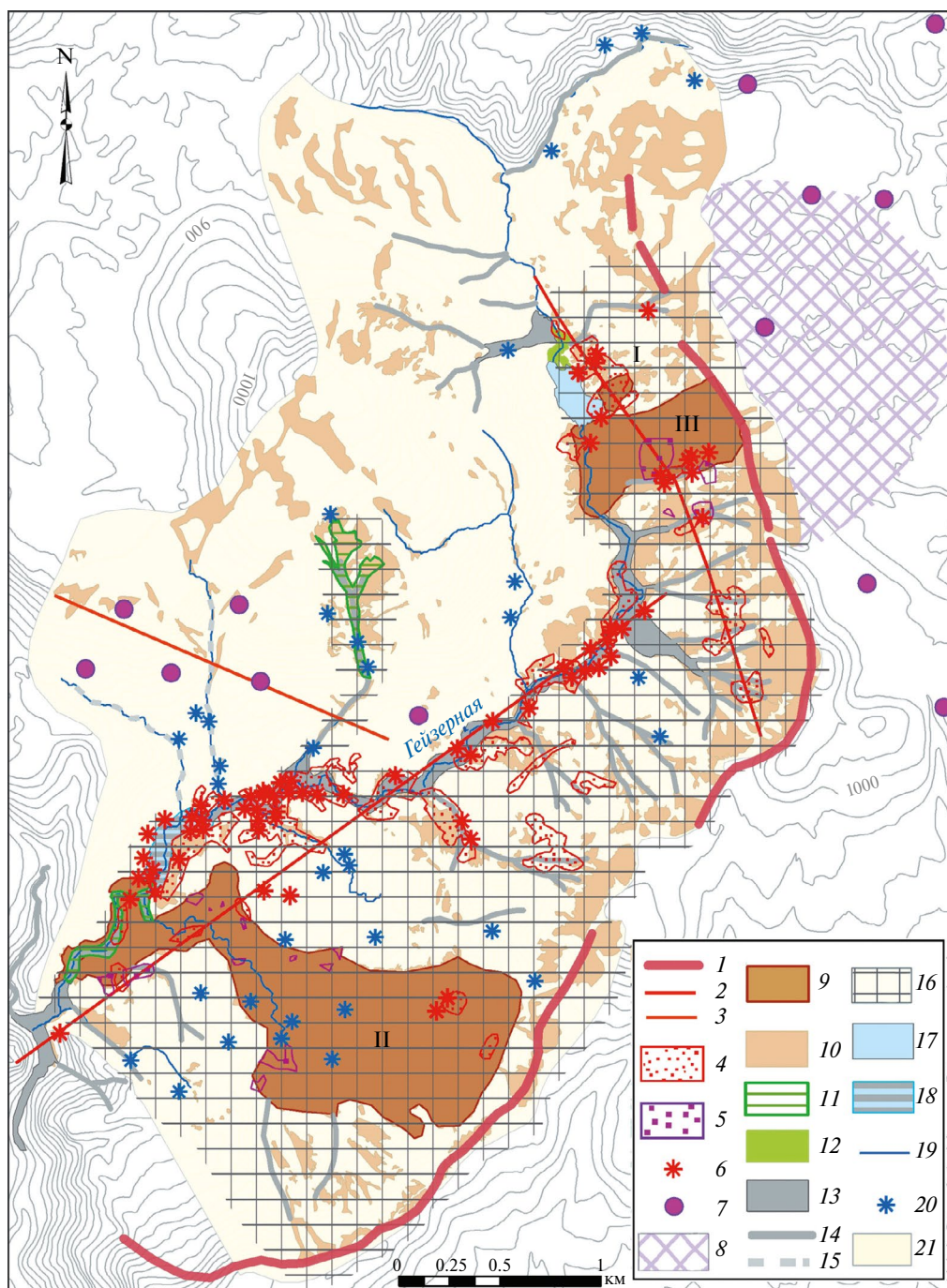


Рис. 7. Карта проявлений эндогенных процессов и ареалов активизации экзогенных процессов рельефообразования в долине нижнего и среднего течения р. Геизерной. Проявления эндогенных процессов: разломы: 1 — кальдерообразующий (Геологическая карта ..., 2011), 2 — термофлюидопроводящие (Kiryukhin, 2016), 3 — иные, установленные по геолого-геофизическим данным (Геологическая карта ..., 1981); участки тепловых аномалий: 4 — по результатам тепловой съемки 2010 г. с вертолета (Kiryukhin et al., 2012), 5 — по результатам съемки в инфракрасном диапазоне (05.03.2023 г., <https://earthexplorer.usgs.gov/>) и полевых наблюдений 2021–2023 гг.; 6 — выходы термальных вод с $T \geq 20^\circ\text{C}$ [по (Сугробов и др., 2009) с уточнениями по полевым данным]; 7 — эпицентры локальных землетрясений низкого энергетического уровня ($M = 2-3$), не регистрируемых региональной сетью (2008–2009 гг.) по (Кугаенко и др., 2010); 8 — центральная часть области поднятия за 2000–2003 гг. по данным интерферометрии (Lundgren, Lu, 2006). Участки активизации экзогенных процессов: 9 — крупные оползни-обвалы, трансформировавшиеся в сели (I — 1981, II — 2007 и III — 2014 гг.); 10 — лишенные растительности склоны со следами массового смещения материала различного типа (на 2023 г.); 11 — эрозия; аккумуляция рыхлого материала: 12 — аллювиального, 13 — селевого; селеносные русла: 14 — четко выраженные, 15 — нечетко выраженные; 16 — зона потенциальной активизации процессов рельефообразования и развития катастрофических их проявлений по результатам анализа совокупности эндогенных и экзогенных факторов; подпрудные озера: 17 — существующее, 18 — спущенное; 19 — неселевые участки русел рек; 20 — выходы холодных грунтовых вод ($T \leq 20^\circ\text{C}$) по (Сугробов и др., 2009) с уточнениями по полевым наблюдениям 2020–2024 гг.; 21 — исследуемая территория.

и И.В. Мелекесцева, считавших высоким риск новых обрушений бортов долины р. Гейзерной, а следовательно, и селеформирования в ее бассейне (2009). В частности, ими было спрогнозировано место обвала 2014 г. По оценке В.А. Дрознина и В.Л. Леонова, наиболее опасными для формирования оползней и обвалов в будущем являются участки на правом берегу реки в верховьях руч. Двуглавого и Лавового — см. рис. 14 на стр. 99 в (Сугробов и др., 2009).

По совокупности рассмотренных выше эндогенных факторов и характера развития современных экзогенных процессов на итоговой карте (см. рис. 7) мы выделяем несколько иную зону потенциальной активизации процессов рельефообразования, которая охватывает 2 участка на склонах: левый борт долины р. Гейзерной от устья руч. Кровавого и почти до ее впадения в р. Шумную и бассейн руч. Лавового, а также прирусловую часть долины р. Гейзерной, по которой происходит сход наиболее мощных селей.

Левый борт долины характеризуется многочисленными проявлениями газогидротермальной активности в пределах термальных полей. Трансформация вещества на участках термального воздействия протекает круглый год, поэтому сели в левых притоках реки могут иметь асезонный характер. Здесь максимальна площадь обнаженных участков проявлений современных склоновых процессов. За последние 40 лет в результате гравитационных процессов с левого борта долины р. Гейзерной в ее днище смещено не менее 24 млн м³ пород (Лебедева и др., 2020). Результаты анализа космических снимков высокого разрешения показали, что прирост площади участков, затронутых процессами активного рельефообразования, с 1964 по 2021 г. на левобережье реки в среднем составлял 22.6 тыс. м²/год, в то время как на правом берегу — лишь 2.9 тыс. м²/год.

Также здесь многочисленны следы замаскированных растительностью древних смещений материала — мощных обвалов и оползней. Характерная морфология этих ступеней на склонах (их разновысотность, наличие стенок срыва, уклон от русла реки) и отсутствие окатанного материала на их поверхности позволяют нам рассматривать их как фрагменты древних оползневых тел. У подножия склона в районе кордона заповедника идентифицирован древний детрузивный вал, бурение которого на глубину 6 м показало наличие двух перекрывающих друг друга толщ вулканогенно-озерных отложений супесчаного состава с дресвой, разделенных погребенным почвенно-пирокластическим чехлом (устное сообщение руководителя буро-

вых работ И.Н. Василюка). В самом основании вала при его подрезке были обнаружены слои деформированной погребенной почвы. Все это свидетельствует о неоднократности оползневых событий на этом участке. Калиброванный возраст почвы по данным радиоуглеродного анализа (AMS) — 6020–6270 лет (Белоусов, Белоусова, 2017), что позволяет заключить, что крупные оползни сходили с левого борта долины р. Гейзерной в ее нижнем течении по крайней мере со второй половины голоцена. Активные гравитационные смещения на склоне привели к его постепенному выполаживанию и расширению долины. Проведенный анализ селевой активности (Lebedeva, Chernomorets, 2024) также свидетельствует о потенциальной опасности левого борта долины, так как его обрушение может привести к формированию новых обвалов, оползней, а затем и селей. Плотина 2014 г. устойчива к размыву, а при дальнейшем размыве плотины 2007 г. и расширении прорана не исключается обрушение его бортов и сход селей на нижнем участке долины р. Гейзерной.

Что касается правого борта долины р. Гейзерной, то в настоящее время наиболее динамичным и потенциально опасным участком там, действительно, является *долина руч. Лавового*. Разгрузка холодных вод в его верховьях вызывает активное врезание, провоцирующее смещение материала на склонах — обваливание, осыпание и оползание. В результате этих процессов в порожисто-водопадное русло водотока постоянно поступают значительные объемы обломочного материала, который залпами выносятся в днище долины р. Гейзерной в виде селей небольших объемов.

Активность современных процессов рельефообразования на левобережье реки и в долине руч. Лавового подтверждается и другими результатами проведенных нами исследований. Данные анализа стока наносов методом фингерпринтинга, выполненного в 2021–2022 гг. А.С. Цыпленковым (устное сообщение), показали, что в русло Гейзерной в районе кордона Кроноцкого заповедника поступает до 60–80% наносов из руч. Лавового, а остальное — преимущественно за счет разрушения левого борта реки выше по течению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных работ установлено, что большинство участков проявления эндогенных процессов приурочено к левобережью реки — борту Узон-Гейзерной кальдеры. Здесь же максимальны и области активизации экзогенных процессов, в первую очередь гравита-

ционных: крупные комплексные события 1981, 2007, 2014 гг., участки склонов со следами массового смещения материала различного типа; активно идет селеформирование в водотоках. Это сказывается и на морфологии долины реки в ее нижнем течении: максимальное ее расширение и выполаживание борта наблюдается на участке Гейзерного термального поля, где происходили масштабные смещения материала по крайней мере с середины голоцена. Близкая картина приуроченности аномальных расширений долин к участкам развития газогидротермальных процессов наблюдалась нами и в долинах иных рек Курило-Камчатского региона, в частности, на склонах вулканов Менделеева (о. Кунашир) и Баранского (о. Итуруп).

Существенным является то, что формирование селей в пределах термальных полей не подчиняется сезонным закономерностям, известным для невулканических районов, где наиболее селеопасными являются весенний период снеготаяния и летне-осенние сезоны дождей. Сели возможны здесь и в зимний период, поскольку активизация газогидротермальной деятельности может провоцировать склоновые процессы и таяние снежного покрова. Обвал 2014 г. произошел зимой, 2007 г. — в период снеготаяния.

Правый борт долины р. Гейзерной, где газогидротермальная деятельность не отмечена (за исключением самых нижних участков склонов) включает лишь несколько селеопасных притоков, самый активный из которых — Лавовый.

Таким образом, по совокупности проанализированных факторов нами выделена зона потенциальной активизации процессов рельефообразования и развития катастрофических их проявлений, охватывающая прирусловую часть долины р. Гейзерной и ее левый борт, а также бассейн руч. Лавового. Здесь риски обвальных, оползневых и селевых процессов весьма высоки, что необходимо учитывать при планировании развития инфраструктуры Кроноцкого заповедника. Не рекомендуется строительство инфраструктурных объектов в днище долины и на ее левобережной части. Для обеспечения безопасного туризма в бассейне реки необходимо создание системы мониторинга склоновых процессов с использованием стационарных видеокамер, сейсмоматчика и осадкомера, а также проведение регулярной низковысотной съемки выделенных опасных зон с БПЛА.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Анализ материалов и обобщение данных выполнено в рамках государственного задания Инсти-

тута географии РАН FMWS-2024-0005 (анализ геоморфологических процессов в условиях газогидротермальной активности) и госбюджетных тем I.20 121051400061-9 (дешифрирование снимков, составление карт) и I.7 AAAA-A16-116032810093-2 (оценка риска опасных природных процессов) МГУ имени М.В. Ломоносова.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны коллегам, участвовавшим в проведении полевых исследований, а также сотрудникам Кроноцкого биосферного заповедника за помощь и предоставление архивных материалов.

FUNDING

Analysis of remote sensing materials and summarization of data were performed within the framework of the state assignment of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences FMWS-2024-0005 (geomorphological processes in conditions of gas-hydrothermal activity) and within the state budgetary themes I.20 121051400061-9 and I.7 AAAA-A16-116032810093-2 of the Lomonosov Moscow State University.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank their colleagues who took part in the field studies, and the staff of the Kronotsky Biosphere Reserve for their help and for providing archival materials.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас долины реки Гейзерной в Кроноцком заповеднике / ред. А.В. Завадская М.: КРАСАНД, 2015. 88 с.
- Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций: Дальневосточный Федеральный округ Российской Федерации. М.: Дизайн. Информация. Картография, 2007. 324 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. М.: Географический ф-тет МГУ, 2022. Т. 28. Ч. 1. С. 266–283.
<https://doi.org/10.35595/2414-9179-2022-1-28-266-283>
- Балдина Е.А., Лебедева Е.В., Аникина Н.В. Активность геоморфологических процессов на склонах речных долин в условиях газогидротермальных проявлений (по разновременным снимкам и ЦМР) // ИнтерКарто. ИнтерГИС. М.: Географический ф-тет МГУ, 2023. Т. 29. С. 272–287.
<https://doi.org/10.35595/2414-9179-2023-1-29-272-287>

- Белоусов А.Б., Белоусова М.Г. Роль оползней в формировании гейзеров Долины Гейзеров, Камчатка // Вулканизм и связанные с ним процессы: матер. XXV науч. конф., посвящ. Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2017. С. 155–157.
- Воскресенский С.С. Динамическая геоморфология. Формирование склонов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1971. 229 с.
- Геологическая карта. Л. N-57, м-б 1 : 1 000 000, 3-е изд., 2011. https://vsegei.ru/ru/info/ggk_1000ns/ (дата обращения 10.11.2023).
- Геологическая карта. Л. N-57, м-б 1 : 200 000, 1-е изд., 1981. https://vsegei.ru/ru/info/pub_ggk200-1/ (дата обращения 10.11.2023).
- Двигало В.Н., Мелекесцев И.В. Геолого-геоморфологические последствия катастрофических обвалов и обвално-оползневых процессов в камчатской Долине гейзеров (по данным аэрофотограмметрии) // Вулканология и сейсмология. 2009. № 5. С. 24–37.
- Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Коновалова А.А. Локальная сейсмичность района Долины гейзеров по данным полевых наблюдений 2008–2009 гг. // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. № 1. Вып. 15. С. 90–99.
- Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Горбатилов А.В., Степанова М.Ю. Развитие модели района Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии и вулкана Кихпинич (Камчатка) по результатам совместного анализа данных микросейсмического зондирования и локальной геодинамической активности // Физика Земли. 2015. № 3. С. 89–101. <https://doi.org/10.7868/S0002333715030096>
- 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. Gas-hydrothermal activities impact on the relief formation of river valleys geothermal zones (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., 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. Геологические предпосылки и возможность прогноза оползня, произошедшего 3 июня 2007 г. в Долине гейзеров, Камчатка // Пробл. комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: матер. первой регион. науч.-технич. конф. Петропавловск-Камчатский: ИВиС, 2007. С. 19–27.
- 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.
- Леонов В.Л., Гриб Е.Н., Карпов Г.А., Сугробов В.М., Сугрובה Н.Г., Зубин М.И. Кальдера Узон и Долина Гейзеров // Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука, 1991. Т. II. С. 94–141.
- Пинегина Т.К., Делемень И.Ф., Дроздин В.А., Калачёва Е.Г., Чирков С.А., Мелекесцев И.В., Двигало В.Н., Леонов В.Л., Селиверстов Н.И. Камчатская Долина Гейзеров после катастрофы 3 июня 2007 г. // Вестн. ДВО РАН. 2008. № 1. С. 33–44.
- Рычагов С.Н. Гидротермальная система вулкана Баранского (о. Итуруп): модель геологической структуры // Вулканология и сейсмология. 1993. № 2. С. 59–75.
- Склоновые геологические процессы / ред. В.Т. Трофимов, О.В. Зеркаль. М.: Перо, 2022. 724 с.
- Сугробов В.М., Сугрובה 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., 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., Ладыгин В.М., Рычагов С.Н. Инженерно-геологические особенности гидротермально-метасоматических пород Камчатки и Курильских островов // Инженерная геология. 2011. № 3. С. 40–54.
- Харченко С.В., Котенков А.В., Лебедева Е.В. Предрасположенность территории с газогидротермальными проявлениями к развитию оползней (на примере долины р. Гейзерной, Камчатка) // География и природные ресурсы. 2025. № 3. С. 102–114. <https://doi.org/10.15372/GIPR20250310>
- Черноморец С.С., Лебедева Е.В. Селевые потоки в условиях поствулканической гидротермальной активности (на примере долины р. Гейзерной) // XXXVII пленум Геоморфологической комиссии Российской академии наук: тезисы докл. Всерос. науч.-практич. конф. с международ. уч. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2023. С. 343–349.

- 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>
- Crozier M.J.* Multiple-occurrence regional landslide events in New Zealand: hazard management issues // Landslides. 2005. № 2. P. 247–256.
- Darmawan H., Troll V.R., Walter T.R., Deegan F.M., Geiger H., Heap M.J., Seraphine N., Harris C., Humaida H., Mulle D.* Hidden mechanical weaknesses within lava domes provided by buried high-porosity hydrothermal alteration zones // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. Art. 3202.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-06765-9>
- Flynn T., Goff F., Van Eeckhout E., Goff S., Ballinger J., Suyama J.* Catastrophic landslide at Zunil I Geothermal Field, Guatemala, January 5, 1991 // Geothermal Resources Council Transactions. 1991. Vol. 15. P. 425–433.
- Iverson R.M.* Landslide triggering by rain infiltration // Water Resources Res. 2000. Vol. 36. № 1. P. 1897–1910.
<https://doi.org/10.1029/2000WR900090>
- Keefer D.K.* Investigating landslides caused by earthquakes – a historical review // Surv. Geophys. 2006. Vol. 23. № 6. P. 473–510.
<https://doi.org/10.1023/A:1021274710840>
- Kiryukhin A.V.* Modeling and observations of geyser activity in relation to catastrophic landslides–mudflows (Kronotsky nature reserve, Kamchatka, Russia) // J. Volcanology and Geothermal Res. 2016. Vol. 323. P. 129–147.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.05.008>
- 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 // Appl. Geochem. 2012. Vol. 27. P. 1753–1766.
<https://doi.org/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 // Dokl. Earth Sci. 2022. Vol. 507. № 1. P. S9–S18.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X22601262>
- Lebedeva E.V., Zakharov A.L., Mikhalev D.V.* The Geysernaya River Alluvium (Kamchatka): Composition and Features of Formation // Dokl. Earth Sci. 2023. Vol. 513. № 1. P. S1–S11.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X23602432>
- 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 Geology. 2024. Vol. 18. № 1. P. S15–S27.
<https://doi.org/10.1134/S1819714024700179>
- Leynes R.D., Pioquinto W., Caranto J.A.* Landslide hazard assessment and mitigation measures in Philippine geothermal fields // Geothermics. 2005. Vol. 34. № 2. P. 205–217.
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2004.08.002>
- Loche M., Scaringi G.* Heating-induced strengthening or weakening of clays during slow to fast shearing at landslide stress levels // Geophys. Res. Lett. 2022. Arxiv:2211.05058.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.05058>
- Loche M., Scaringi G., Blahut J., Hartvich F.* Investigating the Potential of Infrared Thermography to Inform on Physical and Mechanical Properties of Soils for Geotechnical Engineering // Remote Sensing. 2022. Vol. 14. № 16. Art. 4067.
<https://doi.org/10.3390/rs13071265>
- Loche M., Scaringi G., Blahut J., Melis M.T., Funedda A., Da Pelo S., Erbi I., Deiana G., Meloni M.A., Cocco F.* An Infrared Thermography Approach to Evaluate the Strength of a Rock Cliff // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. № 7. Art. 1265.
<https://doi.org/10.3390/rs13071265>
- Lundgren P., Lu Zh.* Inflation model of Uzon caldera, Kamchatka, constrained by satellite radar interferometry observations // Geophys. Res. Lett. 2006. Vol. 33. Art. L06301.
<https://doi.org/10.1029/2005GL025181>
- McNitt J.R.* Exploration and Development of geothermal power in California. San Francisco, 1963. 45 p.
- Newson A.M., Pebble W.M., Browne P.R.L.* Landsliding on the Paeroa Fault at Te Kopia. In: Proceedings of the 24th New Zealand Geothermal Workshop / S. Soengkono, P.R.L. Browne (Eds.). Auckland: Univ. of Auckland, 2002. P. 61–65.
- Romero J.E., Villaseñor T., Arcos R., Polanco E., Becerril L., Pio E., Jullian D.* A Late-Pleistocene confined volcanic debris avalanche promoted by hydrothermal alteration at the Tinguiririca volcano (Andes of Central Chile) // J. Volcanology and Geothermal Res. 2024. Art. 108181.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2024.108181>
- Scaringi G., Loche M.* A thermo-hydro-mechanical approach to soil slope stability under climate change // Geomorphology. 2022. Vol. 401. Art. 108108.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108108>
- Tang C., Zhu J., Qi X., Ding J.* Landslides induced by the Wenchuan earthquake and the subsequent strong rainfall event: a case study in the Beichuan area of China // Eng. Geol. 2011. Vol. 122. № 1–2. P. 22–33.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.03.013>

- Wijaya P.K., Zangel C., Straka W., Ottner F. Geological aspects of landslides in volcanic rocks in a geothermal area (Kamojang, Indonesia). In: Proceedings of the 4th World Landslide Forum. Ljubljana, 2017. P. 1–8. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53483-1_51
- 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. Springer Nature, 2019. P. 317–344. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91833-4_23
- ESRI World Imagery // ArcGIS Data Appliance. <https://doc.arcgis.com/en/data-appliance/latest/maps/world-imagery.htm> (дата обращения 20.01.2025).
- Landsat data // USGS: science for a changing world. <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения 20.01.2025).

The Formation of Landslides and Debris Flows in the Geysernaya River Valley in Kamchatka: Causes and Possibilities of Potential Activation

E. V. Lebedeva^{a,*}, E. A. Baldina^{b,**}, S. S. Chernomorets^{b,***}, and A. V. Kotenkov^{a,b,****}

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

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

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

**e-mail: baldina@geogr.msu.ru

***e-mail: sc@geogr.msu.ru

****e-mail: avkotenkov@yandex.ru

The interpretation of multi-temporal satellite images from 1964 to 2021 revealed that modern landslide processes are most active on the left side of the Geysernaya River valley, within the Geysernoe and Verkhnegeysernoe thermal fields. During this period, the proportion of exposed slope areas showing signs of dynamic processes increased by 11–17%. By 2021, this figure had risen to 30–40% of the total slope area. Large-scale debris flows associated with the collapse of significant parts of the left side of the valley have been observed three times in the last 40 years. Analyzing debris flow activity in the Geysernaya River basin revealed that debris flows predominantly form in the left tributaries of the river in its middle and lower reaches. In addition, the debris flows on the left side of the valley may be off-seasonal, as they are formed within the thermal fields under conditions of constant heating and outlets of gas-hydrotherms. We investigated the distribution of manifestations of endogenous processes (areas of thermal anomalies, modern uplift, faults and epicenters of local earthquakes) and areas of activation of exogenous processes (debris flows, rock mass movements, erosion and aggradation) in the valley. We identified the zone where catastrophic slope and debris flow processes could potentially occur. This zone is confined to the bottom of the Geysernaya River valley and the left side of the valley, as well as the Lavovyi Creek basin. Slope processes are activated by the transformation of bedrock into clay due to gas-hydrothermal impact, as well as slope wetting and heating. When planning the development of recreational facilities in the Kronotsky Reserve, the high risk of rockfalls, landslides and debris flows, most likely on the left side of the valley, should be considered. In order to ensure safe tourism, it is necessary to create a system for monitoring slope processes.

Keywords: slope processes, gas-hydrotherms, debris flows, endogenous processes, high-resolution image interpretation

REFERENCES

- Atlas prirodnikh i tekhnogennykh opasnostei i riskov chrezvychainykh situatsii: Dal'nevostochnyi Federal'nyi Okrug Rossiiskoi Federatsii* [Atlas of Natural and Man-made Hazards and Emergency Risks: Far Eastern Federal District of the Russian Federation]. Moscow: Dezin. Informatsiya. Kartografiya Publ., 2007. 324 p.
- Atlas doliny reki Geizernoi v Kronotskom zapovednike* [Atlas of the Geysernaya River Valley in Kronotsky Reserve]. Moscow: KRASAND Publ., 2015. 88 p.
- Baldina E.A., Lebedeva E.V., Medvedev A.A. Technique for interpretation of archive and recent satellite images to study the slope processes dynamics in the Geysernaya River valley (Kamchatka). *InterCarto. InterGIS*, 2022, vol. 28, pp. 266–283. (In Russ.).
- 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.).
- Belousov A.B., Belousova M.G. The role of landslides in the formation of geysers in the Valley of Geysers, Kamchatka. In *Vulkanizm i svyazannye s nim protsessy: mater. XXV ezhegodnoi nauchn. konf., posvyashchennoi Dnyu vulkanologa* [Volcanism and Related processes: Proc. of the 25th Annual Sci. Conf. Dedicated to the Volcanologist Day]. Petropavlovsk-Kamchatsky: IViS DVO RAN Publ., 2017, pp. 155–157. (In Russ.).
- Chernomorets S.S., Lebedeva E.V. Debris flows in conditions of post-volcanic hydrothermal activity (on the example of the Geysernaya River Valley). In *XXXVII plenum Geomorfologicheskoi komissii Rossiiskoi akademii nauk* [37th Plenum of the Geomorphological Commission of the Russian Academy of Sciences]. Irkutsk: Izd-vo Inst. Zemnoi Kory SO RAN, 2023, pp. 343–349. (In Russ.).
- Crozier M.J. Multiple-occurrence regional landslide events in New Zealand: hazard management issues. *Landslides*, 2005, no. 2, pp. 247–256. <https://doi.org/10.1007/s10346-005-0019-7>
- Darmawan H., Troll V.R., Walter T.R., Deegan F.M., Geiger H., Heap M.J., Seraphine N., Harris C., Humaida H., Mulle D. Hidden mechanical weaknesses within lava domes provided by buried high-porosity hydrothermal alteration zones. *Sci. Rep.*, 2022, vol. 12, art. 3202. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06765-9>
- 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. Seismolog.*, 2009, no. 5, pp. 24–37. (In Russ.).
- ESRI World Imagery: ArcGIS Data Appliance. Available at: <https://doc.arcgis.com/en/data-appliance/latest/maps/world-imagery.htm> (accessed: 20.01.2025).
- Flynn T., Goff F., van Eeckhout E., Goff S., Ballinger J., Suyama J. Catastrophic landslide at Zunil I geothermal field, Guatemala, January 5, 1991. *Geotherm. Res. Council Trans.*, 1991, vol. 15, pp. 425–433.
- Frolova Yu.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 Yu.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.).
- Geological map. Sheet N-57-XXI, N-57-XXII, scale 1 : 200 000, 1st edition, 1981. Available at: https://vsegei.ru/ru/info/pub_ggk200-1/ (accessed: 10.11.2023). (In Russ.).
- Geological map. Sheet N-57, scale 1 : 1 000 000, 3d edition, 2011. Available at: https://vsegei.ru/ru/info/ggk_1000ns/ (accessed: 10.11.2023). (In Russ.).
- Iverson R.M. Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resour. Res.*, 2000, vol. 36, no. 1, pp. 1897–1910. <https://doi.org/10.1029/2000WR900090>
- Keefer D.K. Investigating landslides caused by earthquakes — a historical review. *Surv. Geophys.*, 2006, vol. 23, no. 6, pp. 473–510. <https://doi.org/10.1023/A:1021274710840>
- Kharchenko S.V., Kotenkov A.V., Lebedeva E.V. Predisposition of the territory with gas- hydrothermal manifestations to the development of landslides (on the example of the valley of the Geysernaya River, Kamchatka). *Geogr. Prir. Resur.*, 2025, no. 3, pp. 102–114. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/GIPR20250310>
- Kiryukhin A.V. Modeling and observations of geyser activity in relation to catastrophic landslides—mudflows (Kronotsky nature reserve, Kamchatka, Russia). *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2016, vol. 323, pp. 129–147. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.05.008>
- 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. *J. Appl. Geochem.*, 2012, vol. 27, pp. 1753–1766. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.02.011>
- Kugaenko Yu.A., Saltykov V.A., Gorbatikov A.V., Stepanova M.Yu. The model of the Uzon-Geysernaya volcano-tectonic depression and Kikhpinych volcano, Kamchatka, from the joint analysis of microseismic sounding data and local geodynamic activity. *Izv., Phys. Solid Earth*, 2015, vol. 51, no. 3, pp. 403–418.

- <https://doi.org/10.1134/S106935131503009X>
- Kugaenko Yu. A., Saltykov V.A., Konovalova A.A. Local seismicity of the Geyser Valley area based on field observations in 2008–2009. *Vestn. KRAUNTTs. Nauki Zemle*, 2010, vol. 15, no. 1, pp. 90–99. (In Russ.).
- Landsat data: USGS: science for a changing world. Available at: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed 20.01.2025).
- 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. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S043542812205008X>
- 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., Mikhalev D.V. The Geysernaya River alluvium (Kamchatka): composition and features of formation. *Dokl. Earth Sci.*, 2023, vol. 513, no. 1, pp. S1–S11.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X23602432>
- Lebedeva E.V., Zakharov A.L., Kotenkov A.V. Formation of terraces in a river valley with active gas-hydrothermal manifestations (the Geysernaya River valley, Kamchatka Peninsula as an example). *Geomorfol. Paleogeogr.*, 2024, vol. 55, no. 3, pp. 123–145. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S2949178924030071>
- Leonov V.L. Geological prerequisites and the possibility of predicting the landslide that occurred on June 3, 2007 in the Valley of geysers, Kamchatka. In *Probl. kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa Dal'nego Vostoka Rossii* [Problems of Integrated Geophysical Monitoring of the Russian Far East]. Petropavlovsk-Kamchatsky: Izd-vo IViS DVO RAN, 2007, pp. 19–27. (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. KRAUNTTs. Nauki Zemle*, 2014, vol. 23, no. 1, pp. 7–20. (In Russ.).
- Leonov V.L., Grib E.N., Karpov G.A., et al. Uzon Caldera and Valley of Geysers. In *Aktivnye vulkany Kamchatki. T. 2* [Active Volcanoes of Kamchatka. Vol. 2]. Moscow: Nauka Publ., 1991, pp. 94–141. (In Russ.).
- Leynes R.D., Pioquinto W., Caranto J.A. Landslide hazard assessment and mitigation measures in Philippine geothermal fields. *Geothermics*, 2005, vol. 34, no. 2, pp. 205–217.
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2004.08.002>
- Loche M., Scaringi G. Heating-induced strengthening or weakening of clays during slow to fast shearing at landslide stress levels. *Geophys. Res. Lett.*, 2022, arXiv:2211.05058.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.05058>
- Loche M., Scaringi G., Blahut J., Melis M.T., Funedda A., Da Pelo S., Erbi, I., Deiana G., Meloni M.A., Cocco F. An infrared thermography approach to evaluate the strength of a rock cliff. *Remote Sens.*, 2021, vol. 13, no. 7, art. 1265.
<https://doi.org/10.3390/rs13071265>
- Loche M., Scaringi G., Blahut J., Hartvich F. Investigating the potential of infrared thermography to inform on physical and mechanical properties of soils for geotechnical engineering. *Remote Sens.*, 2022, vol. 14, no. 16, art. 4067.
<https://doi.org/10.3390/rs13071265>
- Lundgren P., Lu Zh. Inflation model of Uzon caldera, Kamchatka, constrained by satellite radar interferometry observations. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, vol. 33, art. L06301.
<https://doi.org/10.1029/2005GL025181>
- McNitt J.R. *Exploration and Development of Geothermal Power in California*. San Francisco, 1963. 45 p.
- Newson A.M., Pebble W.M., Browne P.R.L. Landsliding on the Paeroa Fault at Te Kopia. In *Proc. of the 24th New Zealand Geothermal Workshop*. Soengkono S., Browne P.R.L., Eds. Auckland: Univ. of Auckland, 2002, pp. 61–65.
- Pinegina T.K., Delemen' I.F., Droznin V.A., Kalacheva E.G., Chirkov S.A., Melekescev I.V., Dvigo 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., Villaseñor T., Arcos R., Polanco E., Becerril L., Pio E., Jullian D. A Late-Pleistocene confined volcanic debris avalanche promoted by hydrothermal alteration at the Tinguiririca volcano (Andes of Central Chile). *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2024, art. 108181.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2024.108181>
- Rychagov S.N. The hydrothermal system of the Baransky volcano (Iturup Isl.): a model of the geological

- structure. *Vulkanol. Seismolog.*, 1993, no. 2, pp. 59–75. (In Russ.).
- Scaringi G., Loche M. A thermo-hydro-mechanical approach to soil slope stability under climate change. *Geomorphology*, 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 iz Kosmosa*, 2023, vol. 20, no. 4, pp. 133–146. (In Russ.). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-4-133-146>
- Sklonovye geologicheskie protsessy* [Slope Geological Processes]. Trofimov V.T., Zerkal' O.V., Eds. Moscow: Pero Publ., 2022. 724 p.
- Sugrobov V.M., Sugrobova N.G., Droznin V.A., Karpov G.A., Leonov V.L. *Zhemchuzhina Kamchatki – Dolina Geizerov. Nauchno-populyarnyi ocherk, putevoditel'* [The Pearl of Kamchatka is the Valley of Geysers. Popular Science Essay, Guide]. Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatpress Publ., 2009. 108 p.
- Tang C., Zhu J., Qi X., Ding J. Landslides induced by the Wenchuan earthquake and the subsequent strong rainfall event: a case study in the Beichuan area of China. *Eng. Geol.*, 2011, vol. 122, no. 1–2, pp. 22–33. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.03.013>
- Voskresenskii S.S. *Dinamicheskaya geomorfologiya: Formirovanie sklonov* [Dynamic Geomorphology: Formation of Slopes]. Moscow: Izd-vo Mosk. Univ., 1971. 229 p.
- Wijaya P.K., Zangel C., Straka W., Ottner F. Geological aspects of landslides in volcanic rocks in a geothermal area (Kamojang, Indonesia). In *Proc. of the 4th World Landslide Forum*. Ljubljana, 2017, pp. 1–8. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53483-1_51
- 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*. Springer Nature, 2019, pp. 317–344. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91833-4_23