

Научные статьи

УДК 551.435.1; 551.311.8; 551.432.7

DOI: 10.31431/1816-5524-2023-3-59-5-19

СЕЛЕВАЯ АКТИВНОСТЬ И ОСОБЕННОСТИ СЕЛЕФОРМИРОВАНИЯ В ДОЛИНЕ р. ГЕЙЗЕРНОЙ (КАМЧАТКА)

© 2023 Е.В. Лебедева¹, С.С. Черноморец²¹Институт географии РАН, Москва, Россия, 119017;
e-mail: Ekaterina.lebedeva@gmail.com²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Москва, Россия, 119991; e-mail: sc@geogr.msu.ru

Поступила в редакцию 30.04.2023 г.; после доработки 30.07.2023 г.; принята в печать 26.09.2023 г.

Составлена карта селевой активности бассейна р. Гейзерной, где за последние 40 лет трижды наблюдались масштабные селевые процессы, связанные с обрушением фрагментов левого борта долины. Выделены и охарактеризованы три самостоятельных селевых участка: верховья реки — бассейн Левого Гейзера, среднее течение — ниже подпрудного озера, сформировавшегося в 2014 г., и нижнее течение — ниже подпрудного озера, существовавшего в 2007–2014 гг. Установлено, что селевые процессы характерны для большинства притоков реки. Причем в левых притоках сели могут иметь асезонный характер, так как они формируются в условиях постоянного прогрева и активного газогидротермального воздействия в пределах термальных полей. Обвальная плотина, сформировавшаяся в 2014 г., устойчива к размыву и самостоятельный прорыв подпрудного озера маловероятен. При дальнейшем размыве плотины 2007 г. и расширении прорыва не исключается обрушение его бортов и сход селей на нижнем участке долины р. Гейзерной. Риски обвальных, оползневых и селевых процессов, инициация которых наиболее вероятна на левом борту долины, необходимо учитывать при планировании развития рекреационных объектов.

Ключевые слова: обвальная плотина, подпрудное озеро, газогидротермальная деятельность, асезонные сели.

ВВЕДЕНИЕ

Селевой поток (сель) — стремительный русловой поток, состоящий из смеси воды и обломков горных пород, внезапно возникающий в бассейнах небольших горных рек. Селевой поток (СП) характеризуется резким подъемом уровня, пульсационным (волновым) движением, кратковременностью действия (как правило, 1–3 часа), значительным эрозионно-аккумулятивным эффектом. Скорость СП составляет в большинстве случаев 2–10 м/с. Тело селевого потока образовано селевой массой; содержание твердого материала в ней от 10 до 75% объема, плотность — от 1100 до 2500 кг/м³. Непосредственными причинами формирования СП служат ливни, интенсивное таяние снега и льда, реже — прорыв

озерных перемычек, извержение вулканов, землетрясения, а также последствия хозяйственной деятельности (Перов, 1996).

Исследования селей на Камчатке были сосредоточены как на конкретных селепроявлениях при извержениях вулканов (Безымянный, Кроноцкий, Ключевской, Шивелуч и др.), так и на обобщении регионального материала в мелком масштабе (Атлас..., 2007; Бударина, Перов, 1981, 1984; Виноградов, 1969; Догановский, Орлов, 1970; Евтодьева, 1976; Краевая, 1969; Краевая, Олюнин, 1976; Опасные..., 2008; Сейнова и др., 2010, 2014; Черноморец, Сейнова, 2010а; Черноморец, Сейнова, 2010б; Belousov, 1994; Belousov et al., 2002; Hu et al., 2015; Perov et al., 2017; Salaorni et al., 2017 и др.). При этом селевая активность в районах развития газогидротермальных процессов

редко становилась объектом специального изучения. Одной из немногих работ является статья (Котенко, Котенко, 2020), посвященная селям 2017 г. на р. Юрьева (о. Парамушир, Курильские о-ва), известной своими газогидротермальными проявлениями. Однако гидротермальной составляющей селевого процесса там не было уделено внимания. В процессе исследования геотермальных регионов Камчатки и Курильских островов отмечается (Лебедева, 2020; Лебедева и др., 2020) важная роль в селеформировании таких территорий наличия интенсивно гидротермально проработанных и превращенных в глины обводненных пород, которые могут легко смещаться, формируя масштабные оползни или оползни-обвалы даже при слабых сейсмических событиях и/или выпадении обильных осадков. Перегораживание долин смещенными массами пород приводит к подпруживанию рек и сходу селей, как это неоднократно наблюдалось за последние десятилетия в долине р. Гейзерной на Камчатке (Кугаенко и др., 2007; Пинегина и др., 2008). В результате только двух последних из них (2007 и 2014 гг.) зафиксировано поступление в долину с ее бортов до 24 млн м³ пород (Лебедева и др., 2020). Однако специального изучения особенностей селеформирования в бассейне р. Гейзерной не проводилось. Цель данной работы — оценка селевой активности и особенностей селеформирования данной территории, входящей в состав Кроноцкого государственного заповедника и активно посещаемой туристами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Долина р. Гейзерной находится на восточной границе Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии Восточного вулканического пояса Камчатки (рис. 1). В геологическом строении исследуемой территории 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, экструзивных куполов и лав бортового комплекса. На посткальдерной стадии депрессия оказалась заполненной озерными отложениями и лавами (Атлас..., 2015; Сугробов и др., 2009). Вулканогенно-озерные осадки представлены преимущественно

Рис. 1. Полуостров Камчатка (<https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA03374>). Красным квадратом обозначен район исследований.

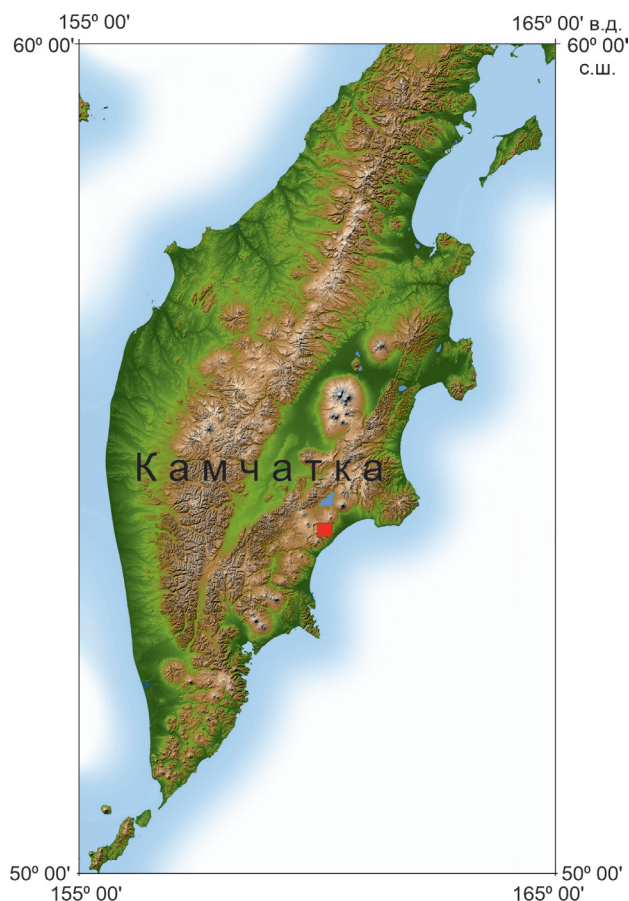
Fig. 1. Kamchatka Peninsula (<https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA03374>). The red square indicates the study area.

пемзовыми туфами, туфопесчаниками, туфогравелитами с линзами туфобрекчий и туфоконгломератов. Предполагается, что заложение глубоко врезанной в озерные отложения долины произошло в начале голоцена (Сугробов и др., 2009).

На склонах долины встречаются поля гидротермально измененных и нагретых до различных температур пород: в верховьях (у подножия одноименного вулкана) — Кихпинычевские, в среднем течении — Верхнегейзерное и в низовье — Гейзерное (Атлас..., 2015). 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 непосредственно прилегает к краю кальдеры.

Река Гейзерная является левым притоком р. Шумной (бассейн Тихого океана) и берет свое начало на склонах вулкана Кихпиныч (Атлас..., 2015). Ее протяженность составляет менее 12 км, а перепад высот — более 700 м. Гидрологический режим реки характеризуется хорошо выраженным весенне-летним половодьем, летней и зимней меженью; питание — смешанное.

В последние годы в долине р. Гейзерной описано несколько событий, имевших селевую составляющую — это оползни-обвалы ее левого борта, произошедшие в 1981, 2007 и 2014 гг. (рис. 2).



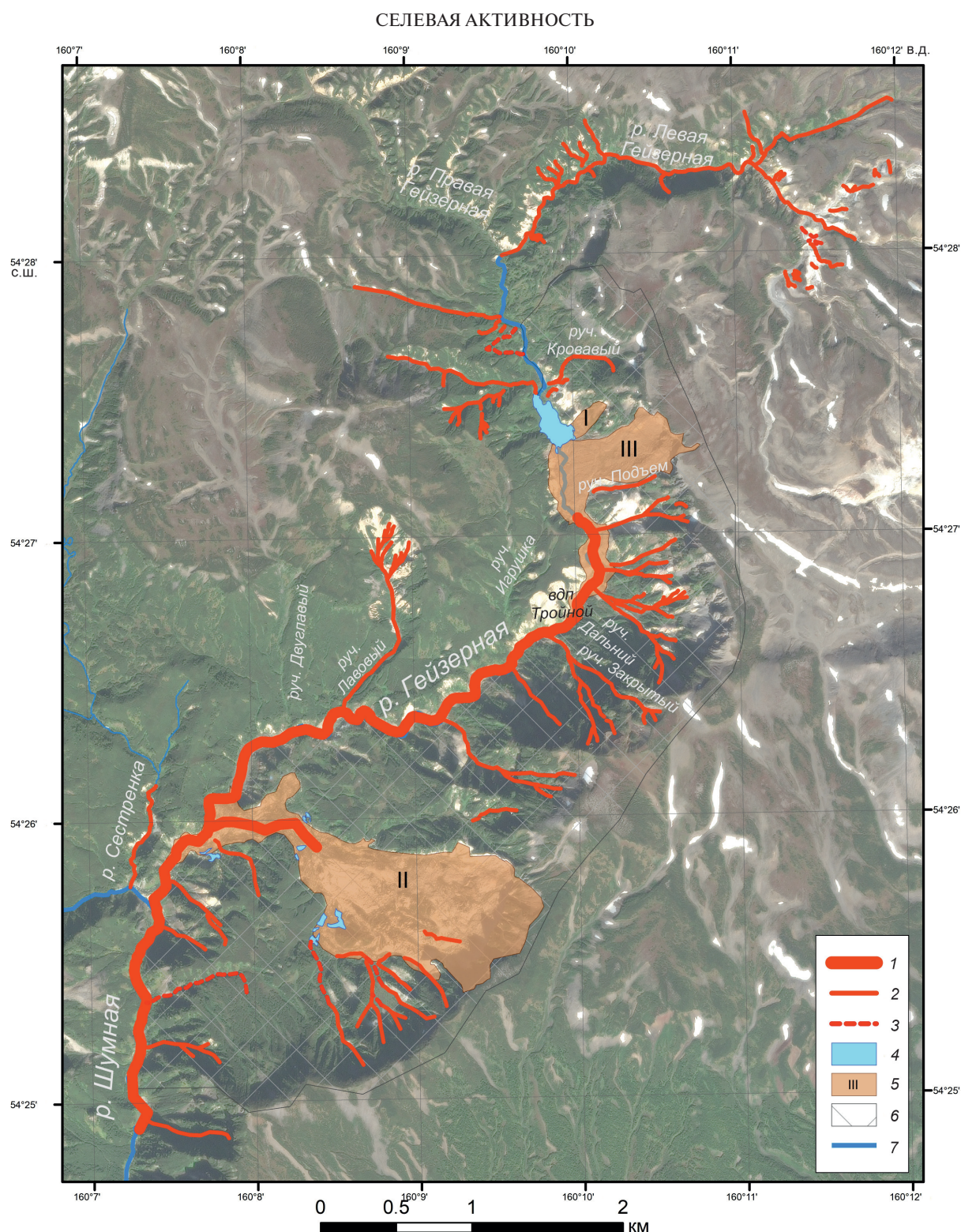


Рис. 2. Карта селевой активности бассейна р. Гейзерной (по состоянию на август 2022 г.). Русла селей различного объема: 1 — >500 тыс. м³; 2 — <500 тыс. м³; 3 — нечеткие следы селевых процессов; 4 — временные подпрудные озёра; 5 — оползни-обвалы, трансформировавшиеся в сели: I — 1981г., II — 2007, III — 2014 гг.; 6 — неустойчивый склон, обрушение которого может привести к формированию новых обвалов, оползней и селей; 7 — неселевые участки русел рек. В качестве основы использован космический снимок SPOT 2017 г. Составил С.С. Черноморец.

Fig. 2. Map of debris flow activity in the Geysernaya River basin (as of August 2022). Debris flow channels of various volumes: 1 — >500 thousand m³; 2 — <500 thousand m³; 3 — indistinct traces of debris flow processes; 4 — temporary dammed lakes; 5 — collapse-landslides transformed into debris flows: I — 1981, II — 2007, III — 2014; 6 — unstable slope, which collapse may lead to the formation of new rockfalls, landslides and mudflows; 7 — parts of river valleys not affected by debris flows. The 2017 SPOT satellite image was used as a basis. Compiled by S.S. Chernomorets.

Во всех случаях ниже участков обрушения пород массы двигались по р. Гейзерной в виде селевых потоков большого объема, существенно изменивших облик долины.

Тайфун «Эльза», прошедший над Камчаткой 04.10.1981 г., спровоцировал оползень на левобережье р. Гейзерной в ее среднем течении на абсолютных отметках 710–790 м. Анализ материалов аэрофотосъемки для регистрации последствий тайфуна позволил оценить масштабы склоновых процессов (Двигало и др., 2014). Установлено, что оползневые массы фронтом шириной 60–95 м спустились в русло р. Гейзерной в районе отметки 640 м и перегородили его. Но практически сразу плотина была размыта, в результате чего образовался сель, который прошел по реке вплоть до ее устья; пострадали несколько гейзеров. Объем сохранившейся части оползня на момент съемки составлял 80 тыс. м³ (Шевченко и др., 2018).

Катастрофическое событие 03.07.2007 г. в нижнем течении реки привлекло пристальное внимание исследователей. Анализ механизмов формирования обвала-оползня и последующего схода селя было посвящено множество работ (Дроздин и др., 2008; Кирюхин, Рычкова, 2011; Пинегина и др., 2008 и др.). Объем сместившихся масс горных пород оценивался в 17 млн м³, а в разуплотненном виде — 20,7 млн м³ (Двигало, Мелекесцев, 2009; Zerkal, Gvozdeva, 2019). Селевые массы заполнили долину руч. Водопадного и перегородили долину р. Гейзерной с формированием подпрудного озера, затопившего ряд гейзеров. Мощность селевых отложений в долине р. Гейзерной достигла 50 м, сель вышел в долину р. Шумной и спустился вниз по ее течению на несколько километров.

4 января 2014 г. выше по течению руч. Подъем сформировался новый оползень-обвал, также подпрудивший р. Гейзерную. Часть отложений стала основой для образования грязекаменного потока, чему способствовало наличие в этот период мощного снежного покрова. По данным Д.В. Добрынина¹, объем пород, сместившихся на этом участке долины, оценивается в 2,5 млн м³, а объем селевых масс, спустившихся по долине р. Гейзерной, — 0,75 млн м³ (Атлас..., 2015). Заплеск селевого материала на борту долины достигал 15 м, а на поворотных участках — до 40 м. Селевые массы частично заполнили подпрудное озеро 2007 г.; напор воды, устремившейся вниз по течению, а также сильные дожди способствовали активизации разрушения плотины 2007 г., в результате чего к 2015 г. вода из озера постепенно спустилась.

Очевидно, что в бассейне реки селевые события происходили и ранее и будут происходить в

дальнейшем, поэтому анализ селевой активности и специфики селеформирования здесь весьма актуален и необходим, в том числе, для обеспечения безопасности туристической деятельности на территории Кроноцкого заповедника. Исследование опирается на анализ опубликованных литературных и фондовых материалов по долине р. Гейзерной и сопредельной территории, результаты дешифрирования космических снимков высокого разрешения 2009–2017 гг., а также на данные собственных полевых маршрутных исследований 2020–2022 гг. в бассейне реки — от склонов сопки Желтой (вулканический комплекс Кихпинич — см. Атлас..., 2015) до устья — и анализ вещественного состава селевых отложений. В 2022 г. для анализа селевой активности С.С. Черноморцем была проведена специализированная съемка с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) бассейна р. Гейзерной с последующей стереообработкой.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

По результатам работ составлена карта селевой активности бассейна р. Гейзерной по состоянию на август 2022 г. (рис. 2). Сели территории подразделены на события большого объема (>500 тыс. м³) и малого. На карте показаны также русла с четкими и с нечеткими следами селей, неселевые участки, существующие на момент съемки временные подпрудные озера, оползни-обвалы 1981, 2007 и 2014 гг. Нижние участки обвала-оползня 2007 г. и оползня-обвала 2014 г., где происходил переход к селевому процессу, также показаны как селевые. Оконтуры неустойчивый склон — левый борт долины с многочисленными газогидротермальными проявлениями, обрушение которого может привести к формированию новых обвалов, оползней и селей. На карте также отмечены участок русла р. Шумной, где прослеживаются селевые отложения, и низовья р. Сестренки.

В зависимости от времени прохождения следы селей сохранились в долинах по-разному. Отложения самого молодого селя 2014 г. покрыты разреженной травянистой растительностью лишь на отдельных участках; селевые террасы 15-летней давности в низовьях Гейзерной и в долине р. Шумной задернованы и покрыты подростом ольхи и березы. Время появления этих селевых отложений хорошо дешифрируется по космическим снимкам сверхвысокого разрешения последних лет. Более древние аккумулятивные образования, как правило, выделяются только при маршрутных исследованиях: развалы крупных валунов (диаметром до 1–3 м) в руслах и на бортах долин небольших ручьев маскируются высокотравьем и зарослями

¹ Добрынин Д.В. Оползень и сель в долине р. Гейзерной 2014г. Отчет. Кроноцкий государственный природный биосферный заповедник, 2014. 19 с.

ольхи и березы и плохо видны на космических и аэроснимках.

Проведенные исследования позволяют разделить бассейн р. Гейзерной на несколько самостоятельных селевых участков: (1) верховья — бассейн р.левой Гейзерной, (2) долина среднего течения — ниже подпрудного озера 2014 г. и (3) участок нижнего течения реки — от днища спущенного подпрудного озера 2007 г. до устья.

1. Верховья р. Гейзерной — бассейн р.левой Гейзерной. Река Левая Гейзерная берет начало на склонах сопки Желтой, входящей в вулканический комплекс Кихпинич (Атлас..., 2015). В ее долине, как и в долинах ее притоков имеются хорошо сохранившиеся следы относительно свежих селевых потоков. Источником твердой составляющей селей в настоящее время здесь служат морены, склоновые отложения, а также изначально прочные вулканические породы (лавы и др.) в пределах Кихпиничевских термальных полей (Сугробов и др., 2009), разрушенные гидротермальными процессами. На склонах долины и ее притоков имеется большое количество мелких селевых очагов (рис. 3); объемы селей ориентировочно составляют десятки или первые сотни тысяч кубических метров (рис. 4 на 1 стр. обложки), а их протяженность — до 3–4 км.

Ниже термальных полей ширина селевых террас в долине р.левой Гейзерной достигает 20–25 м по левому борту и 8–10 м по правому.

Средний уклон их вдоль по долине 0.08. Высота над урезом колеблется от 1.5 до 2.0–2.5 м, сложены террасы неокатанным и слабоокатанным (1–2 класс) глыбово-валунным материалом, иногда с несортированным супесчано-суглинисто-дресвяным заполнителем. Максимальный диаметр перемещенных обломков до 4 м. В 1–1.5 км выше слияния с Правой Гейзерной правый коренной борт долины Левой Гейзерной отшлифован проходившими селями и селевыми паводками на высоту до 5–6 м (рис. 5).

В месте слияния Правой и Левой Гейзерных старые селевые отложения Левой Гейзерной прослеживаются в виде развалов крупных валунов в русле и на бортах долины до высоты 8–10 м. На участке ниже слияния водотоков селевые отложения в днище сменяются аллювиальными: обломочный материал в русле хорошо переработан рекой, его окатанность увеличивается до 2–3 класса, и на протяжении около 1.5 км до подпрудного озера 2014 г. р. Гейзерная в настоящее время имеет неселевой характер.

2. Среднее течение реки. Подпрудное озеро 2014 г. является одним из результатов комплексного геоморфологического события — оползня-обвала января 2014 г. (рис. 6). По данным проведенной в августе 2022 г. Д.И. Школьным батиметрической съемки, оно имеет максимальную глубину 18.6 м, а его объем в этот период достигал 313.4 тыс. м³.



Рис. 3. Склоновые селевые очаги на бортах долины р.левой Гейзерной (здесь и далее, где это не указано особо, фото С.С. Черноморца).

Fig. 3. Debris flow sources on the slopes of the Levaya Geisernaya River valley (here and below, where not specifically indicated, photo by S.S. Chernomoretz).



Рис. 5. Следы шлифовки правого коренного борта долины р. Лево́й Гейзерной в результате прохождения селей (1–1.5 км выше по течению от слияния с р. Правой Гейзерной).

Fig. 5. Traces of abrasion of the right bedrock side of the Levaya Geysernaya River valley debris flows (1–1.5 km upstream from the confluence with the Pravaya Geysernaya River).

Эта территория относится к Верхнегейзерному термальному полю (Сугробов и др., 2009) и характеризуется газогидротермальной активностью преимущественно на левом борту долины и в ее днище. На восточном берегу озера выше по течению обвала 2014 г. находится полузагрязненный блок, смещенный во время события 1981 г. (Двигало, Мелекесцев, 2009). На нем и в непосредственной близости отмечены следы газогидротермальной деятельности, впрочем, как и на стенке срыва обвала 2014 г. Одним из проявлений термальной активности является работающий гейзер, названный С.С. Черноморцем «Озерным». Место локализации гейзера является селевым очагом — как действующим, так и, возможно, потенциальным, особенно в зимнее и весеннее время. Площадь водосбора этого очага мала, поэтому объемы возможных селей не должны быть значительными.

Плотина озера сложена преимущественно обломками лав крупного размера — 2–5 м, иногда до 10 м в диаметре. Ее протяженность по долине около 700 м, высота над исходным руслом реки — до 22 м. В настоящее время в подпружном водоеме происходит аккумуляция обломочного материала, приносимого рекой; из тела плотины постепенно вымывается мелкозем. На правом борту долины напротив стенки срыва оползня-обвала 2014 г. видны четкие следы подъема смещенного материала до 40–50 м вверх по склону (run-up)

после того, как он ударился в этот борт долины (рис. 6). У подножия склона сформировался вал высотой до 10–15 м, сложенный гидротермально измененными сильно раздробленными породами (рис. 7) — как смещенными оползем-обвалом с подножия левого борта долины, так и, частично, обрушившимися после «взбегания» вверх по правому склону долины.

Ниже плотины начинается протяженная зона трансформации обвала в сель, которая продолжается вплоть до устья руч. Игрушка (рис. 2). На левом борту долины ниже впадения руч. Подъем во время события 2014 г. сформировался фрагмент аккумулятивной террасы высотой до 20 м над руслом, сложенный крупнообломочным материалом пестрого петрографического состава (лавы, шлаки, туфы, туфобрекчии) с валунами размером до 1–2 м и глыбами до 3–4 м. Окатанность валунов 1–2 класс, заполнитель — суглинисто-супесчаный с дресвой и гравием. На космических снимках высокого разрешения 2009 г. данная аккумулятивная форма отсутствует.

В днище долины на участке трансформации наблюдается чередование бугристых обвальных отложений (высота бугров до 4–5 м) и непосредственно селевых отложений. Глыбы ожелезненных лав и экструзивных пород достигают размера 3–4 м и более. Река Гейзерная разбивается здесь на два рукава: основное русло идет под левым

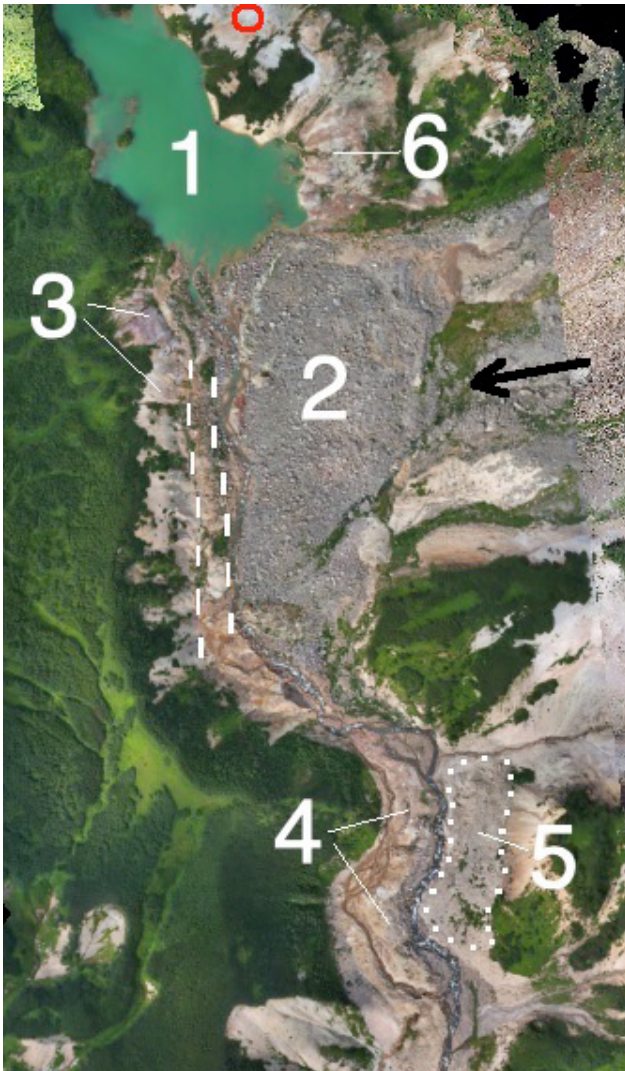


Рис. 6. Снимок с БПЛА участка долины р. Гейзерной в районе оползня-обвала 2014г. (черная стрелка — направление смещения материала). 1 — подпрудное озеро; 2 — обвальное тело — плотина; 3 — следы подъема материала по склону (run-up); 4 — зона трансформации обвала в сель; 5 — образованная в 2014 г. аккумулятивная терраса; 6 — полузатопленный блок пород, смещенный во время события 1981г. Белый пунктир — границы вала, сложенного гидротермально измененными породами, красный овал — гейзер Озерный.

Fig. 6. UAV image of the Geysernaya River valley section in the landslide area in 2014 (black arrow — direction of the landslide). 1 — dammed lake; 2 — landslide body — dam; 3 — traces of landslide run-up on the slope; 4 — zone of landslide transformation into mudflow; 5 — accumulative terrace formed in 2014; 6 — half-flooded block of rocks displaced during the 1981 event. White dotted line is the boundaries of the swell composed of hydrothermally altered rocks, the red oval marks the Geyser Ozerny.



Рис. 7. Вид на плотину и подпрудное озеро, сформировавшееся в 2014 г., с борта вертолета. Слева следы подъема обвального материала по склону (run-up) и вал, сложенный гидротермально измененным материалом, смещенным с левого борта долины (фото Е.В. Лебедевой).

Fig. 7. View of the dam and the 2014 dammed lake 2014 from the helicopter. On the left, traces of run-up of landslide material on the slope and a ridge formed by hydrothermally altered material displaced from the left side of the valley (photo by E.V. Lebedeva).



бормом, менее многоводное — под правым. В районе Тройного водопада (Атлас..., 2015) русло реки становится опять однокруковым. Мощность привнесенных в 2014 г. отложений в русле ниже водопада превышала 10 м, постепенно сокращаясь до 3–4 м к устью руч. Игрушка (Леонов, 2017), где трансформация завершается. Далее поток имел чисто селевой характер.

Заплески селевого материала на борта долины ниже по течению свидетельствуют о том, что скорость этого селя 2014 г. была весьма высока. Так, близ кордона заповедника селом была разрушена спускавшаяся к реке лестница на высоте около 15 м над урезом (Атлас..., 2015), а на поворотном участке долины близ руч. Ступенчатого заплеск селевого материала зафиксирован на высоте около 40 м. В итоге все низкие террасы реки по крайней мере до высоты 4–9 м оказались перекрыты примерно полуметровым слоем плохо сортированного галечно-мелковалунного с дрсвой и щебнем селевого материала, о чем свидетельствуют изученные разрезы этих террас (Лебедева и др., 2023), а также весенние фотографии долины 2014 г., любезно предоставленные А.В. Завадской. Кроме того, в русле реки вплоть до подпрудного озера 2007 г. встречается много глыб размером до 2–5 м, представленных в основном лавами, — перенесенные селом 2014 г. фрагменты обвалившегося борта долины.

Селевые массы достигли подпрудного озера 2007 г. и частично заполнили его. Об этом свидетельствует плохая окатанность галечного материала, доминирование обломков лав, характерных для этого селя, и повышение содержания битой гальки в верхней по течению части днища осушенного в настоящее время водоема (Лебедева и др., 2023). Спровоцированная селом волна способствовала разрушению плотины 2007 г. и углублению прорана в ее теле. К весне 2014 г. уровень этого подпрудного озера упал примерно на 1 м (Атлас..., 2015), и к концу года оно постепенно оказалось спущенным.

3. Нижнее течение долины р. Гейзерной. Первоначальная глубина возникшего в 2007 г. подпрудного озера достигала 27 м (Пинегина и др., 2008), оно просуществовало около 8 лет. Судя по высоте постройки гейзера Большого, который в настоящее время возвышается над урезом примерно на 3 м, а до 2007 г. по (Леонов, 2012) его грифон располагался на относительной высоте 11 м, за это время в озере могло накопиться до 7–9 м рыхлых отложений, представленных преимущественно галечно-валунным материалом с супесчано-гравийным заполнителем. В настоящее время днище долины на месте спущенного озера занимает многокруковое русло р. Гейзерной, протоки которого активно смещаются, перемывая речные наносы и селевой материал.

Расположенная ниже плотина 2007 г. сложена в различной мере раздробленными вулканогенно-озерными туфами палевого цвета, вынесенными в долину обвалом-оползнем 2007 г., трансформировавшимся в селя. Размер глыб достигает здесь 1–5 м, заполнитель суглинисто-щебнистый, несортированный. Поверхность плотины представляет нагромождение обвалных масс в виде холмов высотой 1–5 м, также представленных раздробленными туфами. Протяженность плотины вдоль по долине превышает 500 м, максимальная мощность отложений, вскрывающихся в бортах сформировавшегося прорана, составляет около 50 м (рис. 8).

Массы смещенных в 2007 г. со склона в верховьях руч. Водопадного (левый приток р. Гейзерной) пород при выходе в долину р. Гейзерной ударились в противоположный борт, произошел заброс материала вверх по долине (против течения реки) более чем на 500 м. При этом основная масса, трансформировавшаяся в селя, направилась вниз по долине, где путь ей преградила прорезанная рекой дайка Триумфальные ворота высотой около 30 м. Селевая масса частично преодолела сужение, однако, мощность отложений ниже по течению (за дайкой) сократилась до 10–15 м. При выходе в долину р. Шумной, светлые туфы сформировали селевой конус выноса в устье р. Гейзерной и изначально перекрыли гейзер Первенец, расположенный на левом борту долины. Следы селевых масс четко прослеживаются еще на 1–2 км далее по обоим берегам р. Шумной в виде террас высотой 2–7 м, а затем русло Шумной приобретает обычный неселевой характер.

Селевые процессы характерны для всего бассейна р. Гейзерной: они наблюдаются практически во всех ее левых притоках (рис. 2) — начиная от руч. Кровавого и до устья, а также и в ряде правых. Так, селевые очаги дешифрируются в безымянном правом притоке р. Гейзерной, впадающем чуть выше подпрудного озера 2014 г. Селевая активность прослеживается в верховьях руч. Лавового: грязекаменные потоки регулярно формируются здесь в результате схода оползней-сплывов на участках выхода грунтовых вод, что хорошо видно на разновременных снимках высокого разрешения (Балдина и др., 2022). Сели достигают устья ручья и иногда выходят в долину р. Гейзерной примерно на 50–100 м. Следы старых селевых отложений наблюдаются среди высокотравья и березового редколесья в долине руч. Двуглавого.

Большое количество селевых очагов приурочено к левому борту долины (рис. 9) в районе Верхнегейзерного и Гейзерного термального полей (Сугробов и др., 2009). В водосборных бассейнах левых притоков реки здесь многочисленны газогидротермальные проявления в виде



Рис. 8. Прорезанная р. Гейзерной плотина, образованная обвалом-оползнем 2007 г., трансформировавшимся в сель (фото Е.В. Лебедевой).

Fig. 8. The 2007 dam cut through by the Geysernaya River (photo by E.V. Lebedeva).

парогазовых струй и источников. Широко представлены термоземы — нагретые участки почвы, гидротермально измененные породы, а сами воды ручьев прогреты и минерализованы, о чем свидетельствуют даже их названия — Теплый, Горячий, Кровавый (Атлас..., 2015). В приустьевых частях этих водотоков прослеживаются небольшие селевые конусы выноса, подрезаемые р. Гейзерной.

Долина р. Сестренки, впадающей в Шумную чуть выше устья Гейзерной, также имеет ряд мелких селевых очагов в верховьях и на участке нижнего течения, в среднем ее течении следы селей не прослеживаются. Очаг зарождения одного из селей находится на правом борту в 700 м выше устья реки. Источником твердой составляющей являются прорезаемые рекой рыхлообломочные вулканогенно-озерные отложения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Механизмы селеформирования. Денудация в бассейне реки идет преимущественно по следующей схеме: 1) смещение материала со склонов с перегораживанием русла реки, фор-

мирование подпрудного водоема и сход селя; 2) прорыв/спуск озера с повторным сходом селя (Лебедева и др., 2020). Обрушение материала со склонов сопровождается постепенной трансформацией обвальных масс в сель, что хорошо можно проследить на примере оползня-обвала 2014 г. на участке среднего течения р. Гейзерной. Подобная трансформация не является уникальной особенностью долины Гейзерной, она описана для ряда событий в других регионах мира (Аристов и др., 2018; Petrakov et al., 2008; Evans et al., 2009).

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. Это справедливо и для некоторых долин притоков (в том числе, руч. Лавовый, Подъем и др.). В целом, обилие склонового материала, перемещенного селями, обуславливает плохую окатанность валунов и гальки в русле реки, слабую дезинтеграцию песчаной фракции аллювия, плохую сортировку материала. Селевая составляющая приводит к изменению петрографического состава аллювия



Рис. 9. Селевые очаги и русла малых водотоков со следами селей на левом борту долины р. Гейзерной (съемка с БПЛА): вверху — руч. Дальний, внизу — вид сверху на селевый бассейн руч. Закрытого.

Fig. 9. Debris flow sources and small stream channels with traces of debris flows on the left side of the Geysernaya River valley (UAV survey): above — Dalnyi brook, below — top view of the debris flow basin of the brook Zakrytyi.

реки в зависимости от того, материал какого селя попадал в русло на данном участке: в среднем течении это преобладание лавового материала, вынесенного селом 2014 г., а в нижнем — материала туфов гейзерной свиты, вынесенных селом 2007 г. (Лебедева и др., 2023).

Прохождение крупных селей заметно изменяет морфологию днища долины Гейзерной. Создаются, а затем быстро заполняются и/или уничтожаются подпрудные озера, которые являются перехватывающими водоемами для малых селей, приходящих с верховий. Но при определенных условиях эти озера 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.

Важно отметить, что сели в левых притоках р. Гейзерной могут иметь асезонный характер, т.к. формируются в условиях активного газогидротермального воздействия. Они могут возникать здесь и в зимний период, поскольку активизация подземного нагрева 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 не превышают 10 тыс. м³, они формируют небольшие конусы выноса в устье, но не идут далеко по главной реке.

Отдельным районом селеформирования являются склоны сопки Желтой (вулканический комплекс Кихпиныч — Атлас..., 2015). Небольшие селевые потоки проходят здесь расстояние до 3–4 км, и в настоящее время они не доходят до подпрудного озера 2014 г. Опасность для нижележащей долины и инфраструктуры заповедника этот участок может представлять только в случае значительной активизации деятельности вулкана Кихпиныч.

Формирование крупных селей в долине связано со смещением значительных масс горных пород со склонов в днище, а небольших селей — как с весенне-летним снеготаянием, так и с газогидротермальной деятельностью. Непосредственными триггерами, запускающими цепочку катастрофических процессов, могут являться как ливневые осадки, так и даже небольшие сейсмические толчки, парогазовые взрывы и др.

Риск новых обрушений бортов долины р. Гейзерной. Необходимо согласиться с мнением В.Н. Двигало и И.В. Мелекесцева (2009), счита-

ющих высоким риск новых обрушений бортов долины р. Гейзерной, а следовательно, и селеформирования в ее бассейне. В частности, ими было спрогнозировано место обрушения, произошедшего в 2014 г. обвала. По оценке В.А. Дрознина и В.Л. Леонова (Сугробов и др., 2009), наиболее опасными для формирования оползней в перспективе являются участки на правобережье реки в верховьях руч. Двуглавого и руч. Лавового.

Нами оконтурен потенциально опасный неустойчивый склон — левый борт долины от устья руч. Кровавого и почти до впадения р. Гейзерной в р. Шумную, обрушение которого может привести к формированию новых обвалов, оползней и, соответственно, селей (рис. 2). Этот борт характеризуется многочисленными проявлениями газогидротермальной активности в пределах Верхнегейзерного и Гейзерного термальных полей, способствующими разогреву и увлажнению пород. Ю.В. Фроловой с соавторами (2015, 2019) в процессе лабораторных исследований установлено, что в долине р. Гейзерной в местах гидротермальной проработки вулканогенно-озерные туфы постепенно трансформируются в глины со снижением их плотности практически вдвое и возрастанием пористости, что приводит к резкому уменьшению угла внутреннего сцепления. Очевидно, что данное изменение свойств пород не может не повлечь за собой и активизацию склоновых процессов на бортах глубоко врезанной долины. Поэтому здесь возможно дальнейшее формирование оползней и обвалов, трансформирующихся в селевые потоки, подобно описанным событиям 1981, 2007 и 2014 гг. Анализ участков развития склоновых процессов в долине р. Гейзерной за последние 5 десятилетий свидетельствует, что 75% всей площади активизации процессов на склонах сосредоточено именно на левом борту долины (Балдина и др., 2022; Lebedeva et al., 2022). Трансформация твердого вещества на участках термального воздействия протекает в долине р. Гейзерной круглый год, поэтому подчеркнем еще раз, что сели в левых притоках реки могут иметь асезонный характер.

Что касается находящихся уже непосредственно в долине масс сместившихся пород, то плотина 2014 г. устойчива к размыву и, соответственно, самостоятельный прорыв этого подпрудного озера представляется маловероятным. Участие озерной воды в последующем селевом процессе возможно только в случае нового масштабного обрушения левого борта долины непосредственно в озеро, что в ближайшее время также маловероятно на этом участке.

Частично разрушенная к настоящему времени плотина 2007 г. сложена обломками туфов

и неустойчива к размыву. Полевые наблюдения и сравнение разновременных снимков показывают, что на бортах прорана, глубина которого достигает 50 м, постоянно происходят небольшие обвалы и оползни. При дальнейшем размыве тела плотины рекой возможны и более масштабные обрушения бортов прорана, что может вызвать сход селя на нижнем участке долины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Долина р. Гейзерной — одна из самых селеопасных долин Российской Федерации. Мощные селевые потоки здесь сходят регулярно (за последние 40 лет по крайней мере три раза) и их объемы могут достигать первых миллионов кубических метров, хотя до 2007 г. максимальный объем единовременных селевых выносов региона оценивался как 10–50 тыс. м³, а опасность селей — как средняя (Атлас..., 2007). Весь восточный борт кальдеры — левый борт долины р. Гейзерной на участке от устья руч. Кровавый практически до впадения р. Гейзерной в Шумную — является неустойчивым. На нем возможно формирование комплексных потоков каскадного типа, начинающихся как обвалы и оползни и трансформирующихся в сели. Их прохождение заметно перестраивает морфологию днища долины реки. Создаются, а затем быстро заполняются и/или уничтожаются подпрудные водоемы. Пока указанные озера существуют, они, с одной стороны, являются перехватывающими водоемами для малых селей, приходящих с верховий. С другой стороны, необходимо оценивать их потенциал прорывоопасности: при определенных условиях они прорываются, и накопленная в них вода служит источником жидкой составляющей для селей, идущих вниз по р. Гейзерной.

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. Крупные сели возможны здесь и в зимний период, поскольку активизация газогидротермальной деятельности может провоцировать склоновые процессы и таяние снежного покрова. Мелкие сели снеготаяния и ливневые регулярно сходят по всем левым притокам р. Гейзерной (начиная с руч. Кровавого и далее вниз по течению Гейзерной).

Правый борт долины р. Гейзерной, где газогидротермальная деятельности не отмечена (за исключением самых нижних участков склонов) включает несколько селеопасных притоков (в том числе руч. Лавовый). Формирование селей

здесь подчиняется сезонным закономерностям. Источниками водной составляющей селей служат весеннее таяние снега, летние дожди, выходы грунтовых вод. Объемы селевых потоков не превышают 10 тыс. м³. Они формируют небольшие конусы выноса в устьях ручьев, но не идут далеко по главной реке.

Указанное сочетание условий формирования является уникальным для Российской Федерации. Высокие риски обвальных, оползневых и селевых процессов, инициация которых возможна на левом борту долины, необходимо учитывать при планировании развития рекреационных объектов в Кроноцком заповеднике. Оценка потенциальной опасности селей на этой территории требует, на наш взгляд, дополнительных исследований.

Полевые работы выполнены при финансовой поддержке гранта РНФ № 21-17-00216. Анализ материалов ДЗЗ и обобщение данных — в рамках государственного задания Института географии РАН АААА-А19-119021990091-4 (FMGE-2019-0005) (геоморфологические процессы в условиях газогидротермальной активности) и по теме ГЗ МГУ имени М.В. Ломоносова, раздел I.7 (ЦИТИС 121051300175-4) (селевые процессы). Авторы признательны коллегам Е.А. Балдиной, А.Л. Захарову, А.В. Котенкову, Б.М. Курамагомедову, С.В. Харченко, Д.И. Школьному, участвовавшим в проведении полевых исследований и в обработке материалов, а также сотрудникам Кроноцкого биосферного заповедника за помощь и предоставление архивных материалов.

Список литературы [References]

- Аристов К.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С. Сравнительное картографирование многостадийных гляциальных потоков // Геориск. 2018. Т. XII. № 4. С. 66–75 [Aristov K.A., Tutubalina O.V., Chernomoretz S.S. Comparative mapping of multiphase glacial flows // Georisk. 2018. V. XII. № 4. P. 66–75 (in Russian)].
- Атлас долины реки Гейзерной в Кроноцком заповеднике / Под ред. Завадской А.В. М.: КРАСАНД, 2015. 88 с. [Atlas of the valley of the River Geysernaya in Kronotsky Reserve / Ed. Zavadskaya A.V. Moscow: KRASAND, 2015. 88 p. (in Russian)].
- Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций. ДВФО РФ. М.: ИПЦ «Дизайн. Информация. Картография», 2007. 324 с. [Atlas of natural and man-made hazards and emergency risks. Far Eastern Federal District of the Russian Federation. Moscow: Design. Informatsiya. Kartografiya, 2007. 324 p. (in Russian)].
- 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: Материалы Международной конференции. М.: Географиче-

- ский факультет МГУ, 2022. Т. 28. Ч. 1. С. 266–283. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2022-1-28-266-283> [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 Geyzernaya River valley (Kamchatka) // Intercarto. Intergis. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: Faculty of Geography MSU, 2022. V. 28. Pt. 1. P. 266–283 (in Russian)].
- Бударина О.И., Перов В.Ф. К оценке селевой опасности горных районов Камчатки // Проблемы противо-селевых мероприятий. Алма-Ата: «Казахстан», 1981. С. 201–212 [Budarina O.I., Perov V.F. On the assessment of mudflow hazard in the mountainous regions of Kamchatka // Problems of anti-mudflow measures. Alma-Ata: «Kazakhstan», 1981. P. 201–212 (in Russian)].
- Бударина О.И., Перов В.Ф. Карта селеопасных районов Камчатки // Вестник МГУ. Серия 5. География. 1984. № 1. С. 86–88 [Budarina O.I., Perov V.F. Map of mudflow-prone areas of Kamchatka // Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seria 5. Geografia. 1984. № 1. P. 86–88 (in Russian)].
- Виноградов Ю.Б. О селевых явлениях на Камчатке // Труды КазНИГМИ. 1969. Вып. 33. С. 139–143 [Vinogradov Yu.B. About mudflows in Kamchatka // Trudy KazNIGMI. 1969. Iss. 33. P. 139–143 (in Russian)].
- Двигало В.Н., Мелекестев 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 [Dvigalo V.N., Melekestev I.V. The geological and geomorphic impact of catastrophic landslides in the Geyser Valley of Kamchatka: Aerial photogrammetry Journal of Volcanology and Seismology. 2009. № 3. P. 314–325 (in Russian)].
- Двигало В.Н., Свирид И.Ю., Шевченко А.В., Жарков Р.В. Мониторинг и прогноз селевых процессов в камчатской Долине гейзеров на основе фотограмметрических исследований // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита: материалы III Международной конференции. Южно-Сахалинск: Филиал ДВГИ ДВО РАН, 2014. С. 105–108 [Dvigalo V.N., Svirid I.Yu., Shevchenko A.V., Zharkov R.V. Monitoring and forecasting of mudflow processes in the Kamchatka Valley of Geysers based on photogrammetric studies // Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Materialy III Mezhdunarodnoj konferencii. Yuzhno-Sakhalinsk: Sakhalin Branch FEGI FEB RAS, 2014. P. 105–108 (in Russian)].
- Догановский А.М., Орлов В.Г. О возможности образования селей на сухих руслах вулкана Кроноцкого // Вопросы географии Камчатки. 1970. Вып. 6. С. 88–93 [Doganovsky A.M., Orlov V.G. On the possibility of mudflow formation on the dry beds of the Kronotsky volcano // Voprosy geografii Kamchatki. 1970. Iss. 6. P. 88–93 (in Russian)].
- Дрозин В.А., Двигало В.Н., Муравьев Я.Д. Оползень 3 июня 2007 г. в Долине Гейзеров на Камчатке // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды Международной конференции. Пятигорск: Ин-т Севкавгипроводхоз, 2008. С. 41–44 [Droznin V.A., Dvigalo V.N., Muravyov Yu.D. Landslide June 3, 2007 in the Valley of Geysers in Kamchatka // Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Trudy Mezhdunarodnoj konferencii. Pyatigorsk: In-t Sevkaavgiprovodhoz, 2008. P. 41–44 (in Russian)].
- Евтодьев Ю.А. Селевая опасность горных районов Камчатки // Гляциологические исследования. 1976. Вып. 25. С. 80–85 [Evtodiev Yu.A. Mudflow danger in the mountainous regions of Kamchatka // Glyatsiologicheskiye issledovaniya. 1976. Iss. 25. P. 80–85 (in Russian)].
- Кирюхин А.В., Рычкова Т.В. Условия формирования и состояние гидротермальной системы Долины Гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2011. № 3. С. 238–253 [Kiryukhin A.V., Rychkova T.V. Formation conditions and the state of the hydrothermal system of the Valley of Geysers (Kronotsky Reserve, Kamchatka) // Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Hidrogeologiya. Geokriologiya. 2011. № 3. P. 238–253 (in Russian)].
- Котенко Т.А., Котенко Л.В. Сели 4 сентября 2017 г. на охотоморском побережье о. Парамушир, Курильские острова // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции. Т. 1. Душанбе: ООО «Промоушн», 2020. С. 97–110 [Kotenko T.A., Kotenko L.V. Mudflows of September 4, 2017 on the Sea of Okhotsk coast of the Paramushir Isl., Kuril Islands // Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Trudy 6-j Mezhdunarodnoj konferencii. V. 1. Dushanbe: ООО «Promoushn», 2020. P. 97–110 (in Russian)].
- Краевая Т.С. Краткая характеристика селеопасных районов Камчатки. Труды КазНИГМИ. 1969. Вып. 33. С. 144–150 [Krayevaya T.S. Brief description of the mudflow-prone areas of Kamchatka // Trudy KazNIGMI. 1969. Iss. 33. P. 144–150 (in Russian)].
- Краевая Т.С., Олюнин В.Н. Камчатка // Селеопасные районы Советского Союза. М.: Изд-во Московского университета, 1976. С. 163–168 [Krayevaya T.S., Olyunin V.N. Kamchatka // Mudflow hazardous areas of the Soviet Union. Moscow: Publ. House of Moscow State University, 1976. P. 163–168 (in Russian)].
- Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Синицын В.И. Сейсмические наблюдения в Долине Гейзеров // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. № 2. Вып. 10. С. 171–172 [Kugaenko Yu.A., Saltykov V.A., Sinityn V.I. Seismic observations in the Valley of Geysers // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2007. № 2 (10). P. 171–172 (in Russian)].
- Лебедева Е.В. Особенности селеформирования в вулканических регионах // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции. Т. 1. Душанбе: ООО «Промоушн», 2020. С. 460–469 [Lebedeva E.V. Features of debris flow formation in volcanic regions // Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Trudy 6-j Mezhdunarodnoj konferencii. V. 1. Dushanbe: ООО «Promoushn», 2020. P. 460–469 (in Russian)].
- Лебедева Е.В., Захаров А.Л., Михалев Д.В. Аллювий р. Гейзерной (Камчатка): вещественный состав и

- особенности формирования // Геоморфология и палеогеография. 2023. Т. 54. № 2. С. 36–50. <https://doi.org/10.31857/S2949178923020056> [Lebedeva E.V., Zakharov A.L., Mikhalev D.V. Geysernaya River alluvium (Kamchatka): composition and features of formation. Geomorfologiya i Paleogeografiya. V. 54. №. 2. P. 36–50 (in Russian)].
- 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> [Lebedeva E.V., Sugrobov V.M., Chizhova V.P., Zavadskaya A.V. The valley of the river Geyzernaya (Kamchatka): hydrothermal activity and features of relief forming. Geomorfologiya. 2020. №. 2. P. 60–73 (in Russian)].
- Леонов А.В. Каталог основных объектов Долины гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка). М: ИИЕТ РАН, 2012. 217 с. [Leonov A.V. Catalog of the main objects of the Valley of Geysers (Kronotsky Reserve, Kamchatka). Moscow: IHST RAS, 2012. 217 p. (in Russian)].
- Леонов А.В. Каталог гейзеров Кроноцкого заповедника. Долина гейзеров и кальдера вулкана Узон: история и современность. М: Реарт, 2017. 384 с. [Leonov A.V. Catalog of geysers in the Kronotsky Reserve. The Valley of Geysers and the Uzon Volcano Caldera: History and Modernity. Moscow: Publ. House LLC «Reart», 2017. 384 p. (in Russian)].
- Опасные природные процессы Дальневосточного региона России / Под ред. Разумова В.В., Притворова А.П. М.: ИПЦ «Дизайн. Информация. Картография», 2008. 342 с. [Hazardous Natural Processes of the Russian Far East / Eds. Razumov V.V., Pritvorov A.P. Moscow: Design. Informatsiya. Kartografiya, 2008. 342 p. (in Russian)].
- Перов В.Ф. Селевые явления. Терминологический словарь. М.: Издательство Московского университета, 1996. 34 с. [Perov V.F. Mudflow phenomena. Terminological dictionary. Moscow: Publ. House of Moscow State University, 1996. 34 p. (in Russian)].
- Пинегина Т.К., Делемень И.Ф., Дрознин В.А. и др. Камчатская Долина Гейзеров после катастрофы 3 июня 2007 г. // Вестник ДВО РАН. 2008. № 1. С. 33–44 [Pinegina T.K., Delemen' I.F., Droznin V.A. et al. Kamchatka Valley of Geysers after the catastrophe on 3 June 2007. Vestnik DVO RAN. 2008. № 1. P. 33–44 (in Russian)].
- Сугробов В.М., Сугробова Н.Г., Дрознин В.А. и др. Жемчужина Камчатки - Долина Гейзеров. Научно-популярный очерк, путеводитель. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2009. 108 с. [Sugrobov V.M., Sugrobova N.G., Droznin V.A. et al. The Pearl of Kamchatka is the Valley of Geysers. Popular science essay, guide. Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatpress, 2009. 108 p. (in Russian)].
- Сейнова И.Б., Черноморец С.С., Тутубалина О.В. и др. Условия формирования селевых потоков в районах активного вулканизма (на примере вулканов Ключевской и Шивелуч, Камчатка) // Криосфера Земли. 2010а. Ч. 1. № 2. С. 29–45 [Seinova I.B., Chernomorets S.S., Tutubalina O.V. et al. Conditions for the formation of mudflows in areas of active volcanism (on the example of Klyuchevskoy and Shiveluch volcanoes, Kamchatka) // Kriosfera Zemli. 2010. Pt. 1. № 2. P. 29–45 (in Russian)].
- Сейнова И.Б., Черноморец С.С., Тутубалина О.В. и др. Условия формирования селевых потоков в районах активного вулканизма (на примере вулканов Ключевской и Шивелуч, Камчатка) // Криосфера Земли. 2010б. Ч. 2. № 3. С. 29–36 [Seinova I.B., Chernomorets S.S., Tutubalina O.V. et al. Conditions for the formation of mudflows in areas of active volcanism (on the example of Klyuchevskoy and Shiveluch volcanoes, Kamchatka) // Kriosfera Zemli. 2010. Pt. 2. № 3. P. 29–36 (in Russian)].
- Сейнова И.Б., Черноморец С.С., Демянчук Ю.В. Эндогенный механизм формирования лахаров на андезитовых вулканах (на примере вулкана Шивелуч, Камчатка) // Геориск. 2014. № 4. С. 44–54 [Seinova I.B., Chernomorets S.S., Demyanchuk Yu.V. Endogenic mechanism of lahar formation on andesitic volcanoes (by the example of the Shiveluch volcano, Kamchatka). GeoRisk. 2014. № 4. P. 44–54 (in Russian)].
- 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 [Frolova Yu.V., Gvozdeva I.P., Chernov M.S., Kuznetsov N.P. Engineering-geological aspects of hydrothermal alterations of tuffaceous rocks in the Geysers Valley (Kamchatka peninsula) // Inzhenernaya geologiya. 2015. № 6. P. 30–42 (in Russian)].
- 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. Южно-Сахалинск: Ин-т морской геологии и геофизики ДВО РАН, 2019. С. 186 [Frolova Yu.V., Zerkal' O.V., Gvozdeva I.P. The influence of hydrothermal transformations on the physicommechanical properties of tuffogenic rocks of the Valley of Geysers and their role in the formation of landslides // Geodynamical Processes and Natural Hazards: Abstracts of the III National scientific conf. Yuzhno-Sakhalinsk: Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, 2019. P. 186 (in Russian)].
- Черноморец С.С., Сейнова И.Б. Селевые потоки на вулканах. Уч. пособие. МГУ им. М.В.Ломоносова, Географ. Ф-т. М.: УНЦ ДО, 2010. 72 с. [Chernomorets S.S., Seinova I.B. Debris Flows on Volcanoes. A Tutorial. Moscow: ESC PHSE, 2010. 72 p. (in Russian)].
- Шевченко А.В., Двигало В.Н., Свирид И.Ю. Дистанционные исследования геоморфологических процессов на вулканических объектах Камчатки // XXXVI Пленум Геоморфологической комиссии РАН: «Геоморфология – наука XXI века». Барнаул: Изд-во АГУ, 2018. С.403–410. [Shevchenko A.V., Dvigalo V.N., Svirid I.Yu. Remote Studies of Geomorphological Processes at Volcanic Objects of Kamchatka // XXXVI Plenum of the Geomorphological Commission of Russian Academy of Sciences: «Geomorphology – the science of the XXI century». Barnaul: ASU Publ. House, 2018. P. 403–410 (in Russian)].

- Belousov A.* Generation of destructive lahars as a result of surge-snow interaction during 1993 eruption of Shiveluch volcano (Kamchatka). IVth International Conference at Colima volcano, Mexico. 1994. P. 62.
- Belousov A., Voight B., Belousova M., Petukhin A.* Pyroclastic surges and flows from the 8-10 May 1997 explosive eruption of Bezymianny volcano, Kamchatka, Russia // *Bulletin of Volcanology*. 2002. V. 64. P. 455–471. <https://doi.org/10.1007/s00445-002-0222-5>
- Evans S.G., Tutubalina O.V., Drobyshev V.N. et al.* Catastrophic detachment and high-velocity long-runout flow of Kolka Glacier, Caucasus Mountains, Russia in 2002 // *Geomorphology*. 2009. V. 105. № 3–4. P. 314–321.
- Hu K., Ma C., Liu J. et al.* Lahars in central Kamchatka Peninsula, Far Eastern Russia // *Journal of Mountain Science*. 2015. V. 33. № 1. P. 123–128 (in Chinese). <https://doi.org/10.16089/j.cnki.1008-2786.000017>
- 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. Iss. 9. 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 // *Doklady Earth Sciences*. 2022. V. 507. Suppl 1. P. S9–S18. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22601262>
- Perov V., Chernomorets S., Savernyuk E. et al.* Debris flow hazards in Russia: regional features and key events // *Natural Hazards*. 2017. V. 88. № 1. Suppl 1. P. S199–S235. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2841-3>
- Petrakov D.A., Chernomorets S.S., Tutubalina O.V. et al.* Catastrophic glacial multi-phase mass movements: a special type of glacial hazard // *Advances in Geosciences*. 2008. V. 14. P. 211–218.
- Salaorni E., Stoffel M., Tutubalina O. et al.* Dendrogeomorphic reconstruction of lahar activity and triggers: Shiveluch volcano, Kamchatka Peninsula, Russia // *Bulletin of Volcanology*. 2017. V. 79. № 1. P. 1–19. <https://doi.org/10.1007/s00445-016-1094-4>
- 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 Intern. Publ. AG, Springer Nature. 2019. P. 317–344.

DEBRIS FLOW ACTIVITY AND SPECIFICITY OF DEBRIS FLOW FORMATION IN THE GEYSERNAYA RIVER VALLEY (KAMCHATKA)

E.V. Lebedeva¹, S.S. Chernomorets²

¹*Institute of Geography RAS, Moscow, Russia, 119017; e-mail: Ekaterina.lebedeva@gmail.com*

²*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, 119991; e-mail: sc@geogr.msu.ru*

Received April 30, 2023; revised July 30, 2023; accepted September 26, 2023

A map of debris flow activity of the Geysernaya river basin, where large-scale debris flow processes associated with the collapse of fragments of the left side of the valley have been observed three times over the past 40 years, was compiled. Three independent debris flow areas of the river basin have been identified and characterized: the upper reaches of the river — the Levaya Geysernaya basin, the middle river course — below the dammed lake formed in 2014, and the lower downstream part — below the dammed lake that existed in 2007–2014. It was found that debris flow processes are typical for most of the Geysernaya river tributaries. Moreover, in the left tributaries debris flows may have aseasonal character, because they are formed in conditions of constant heating and active gas-hydrothermal influence within the thermal fields. The landslide dam formed in 2014 is resistant to erosion, and an independent breakthrough of the dammed lake is unlikely. With further erosion of the 2007 dam and the expansion of the breach in the dam body, collapse of its sides and debris flow in the lower part of the Geysernaya river valley cannot be ruled out. Risks of rockfall, landslide and debris flow processes, the initiation of which is most likely on the left side of the valley, should be considered in planning the development of recreational facilities.

Keywords: landslide dam, dammed lake, gas-hydrothermal activity, aseasonal debris flows.