
НАУЧНЫЕ
СООБЩЕНИЯ

УДК 551.435.13:551.432.7(571.66)

**ДОЛИНА Р. ГЕЙЗЕРНОЙ (КАМЧАТКА): ГИДРОТЕРМАЛЬНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ
И ОСОБЕННОСТИ РЕЛЬЕФООБРАЗОВАНИЯ****© 2020 г. Е. В. Лебедева^{1,*}, В. М. Сугробов^{2,**},
В. П. Чижова^{3,***}, А. В. Завадская^{4,****}**¹ *Институт географии РАН, Москва, Россия*² *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия*³ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
Москва, Россия*⁴ *Кроноцкий государственный биосферный заповедник, Елизово, Россия**e-mail: Ekaterina.lebedeva@gmail.com**e-mail: sugrvn@mail.ru,***e-mail: v.p.chizhova@gmail.com****e-mail: anya.zavadskaya@gmail.com

Поступила в редакцию 28.08.2019 г.

После доработки 21.11.2019 г.

Принята к публикации 17.12.2019 г.

Сведены воедино и систематизированы материалы наблюдений за процессами рельефообразования в долине р. Гейзерной на Камчатке за период более пяти десятилетий. Отмечено активное развитие гравитационных склоновых процессов, среди которых в верхней части склонов доминируют обвалы, отседание краев лавового плато, а в нижней — оползни и сплывы. Активному развитию склоновых процессов способствует воздействие на коренные породы сильно минерализованных термальных вод, которые разрушают последние до глин. В результате, наряду с продолжающимся углублением долины, на современном этапе она расширяется, на ее бортах формируются многочисленные локальные террасы, имеющие в основном оползневой генезис. Максимальное расширение долины отмечается на участках наиболее интенсивной гидротермальной деятельности. Масштабные смещения пород на склонах, нередко приводящие к перегораживанию долины, инициируются ливневыми осадками и сейсмическими толчками. Таким образом, денудация в бассейне реки идет преимущественно по следующей схеме: 1) смещение материала со склонов с перегораживанием русла реки и формированием подпрудного водоема, 2) прорыв/спуск озера со сходом селя. За рассматриваемый период описано три подобных события, в результате только двух последних (2007 и 2014 г.) зафиксировано поступление в долину с ее бортов около 24 млн м³ пород.

Ключевые слова: Долина гейзеров, гидротермальная деятельность, термальные воды, оползневые террасы, подпрудное озеро, сель, катастрофические процессы

DOI: 10.31857/S0435428120020066

ВВЕДЕНИЕ

Постановка проблемы. Водотоки, формирующиеся на участках гидротермальной активности, подвергаются химическому и термальному воздействию, в результате чего их воды становятся теплыми и высокоминерализованными. В связи с этим аккумулятивные и денудационные процессы в их руслах весьма специфичны — формируются различные натечные формы, происходит цементация аллювия и др. Однако специаль-

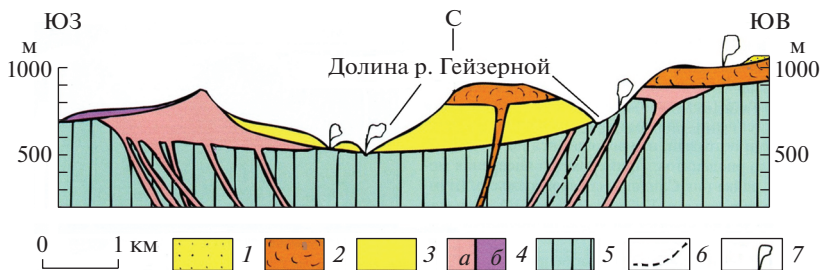


Рис. 1. Схематический геологический разрез бассейна р. Гейзерной (по [4] с изменениями).

Посткальдерный комплекс: 1 – озерные отложения (возраст 9–12 тыс. лет), 2 – лавы; 3 – озерные отложения (возраст 20–35 тыс. лет); 4 – кальдерообразующий комплекс (а – взрывные отложения и дайки (возраст 39–40 тыс. лет), б – лавы (бортового комплекса)); 5 – докальдерные отложения; 6 – разломы; 7 – термальные источники.

ных исследований влияния гидротермальной деятельности на морфологию долин таких водотоков не проводилось, что во многом связано с их удаленностью и труднодоступностью. Долина гейзеров – участок нижнего течения р. Гейзерной, находясь в пределах Кроноцкого заповедника и будучи объектом природного наследия ЮНЕСКО [1], в отличие от многих других долин территорий активной гидротермальной деятельности достаточно часто посещается исследователями. Здесь накоплены результаты наблюдений за событиями в бассейне реки за несколько десятилетий. Это позволяет на данном примере более детально разобраться в специфике рельефообразования в долинах водотоков зон гидротермальных проявлений и понять динамику ведущих геоморфологических процессов.

Местоположение и геологическое строение. Долина р. Гейзерной находится в 180 км к СВ от г. Петропавловска-Камчатского в пределах так называемого Восточного вулканического пояса. Это плоскогорье с отметками 600–900 м над у. м. с отдельными вулканами, высоты которых достигают 1300–2300 м. Характерными элементами рельефа территории являются также вулcano-тектонические депрессии и кальдеры [2].

Долина расположена на восточной границе Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии в пределах прогиба Восточной Камчатки, выполненного мощными толщами четвертичных вулканогенно-осадочных пород. В геологическом строении территории принимают участие три комплекса пород: докальдерный, синхронный кальдерообразованию и посткальдерный [3]. Их соотношение показано на упрощенной схеме геологического строения бассейна р. Гейзерной (рис. 1), составленной В.Л. Леоновым [4].

На этапе кальдерообразования произошло формирование основной толщи игмибритов, связанных с Узон-Гейзерной депрессией, образование даек, экструзивных куполов и лав бортового комплекса. 15–20 тыс. л. н. вулканическая деятельность в районе практически прекратилась, депрессия была полностью заполнена озерными отложениями и лавами [4]. В начале голоцена процессы эрозии, особенно активные в период отступления ледников последнего оледенения, привели к разрушению борта депрессии, спуску озер и заложению глубоко врезаемых каньонов р. Шумной и ее притока р. Гейзерной. Положение долины последней в целом совпадает с зоной разлома СВ ориентировки, протягивающейся от влк. Семячик к влк. Кихпинич; река вскрывает породы со следами тектонического дробления [5].

Гидрогеологические условия Гейзерной гидротермальной системы. В районе бассейна р. Гейзерной выделяется пять водоносных комплексов [4]. Первые четыре из них представляют собой горизонты грунтовых вод. С ними связаны многочисленные хо-

лодные источники, например, на правом берегу в верховье оврага Желтых скал на контакте лав и туфов. Однако с увеличением глубины горизонтов встречаются и разнообразны термопроявления, обусловленные подъемом пара и газа к поверхности; воды нагреваются также в зонах разломов и на участках контакта с экструзиями. С четвертым водоносным комплексом связаны уже преимущественно теплые и горячие источники.

Пятый — самый глубокий — водоносный комплекс отделен от комплексов грунтовых вод относительно водоупорными плотными туфами и лавами. Это высокотемпературные напорные воды, они, также как и обычные подземные, поднимаются под действием гидростатического давления и выходят на поверхность по трещинам в водоупорной кровле в виде многочисленных гейзеров, кипящих источников, паровых струй, особенно заметных в центральной части Долины гейзеров. По количеству гейзеров это одно из наиболее крупных гейзерных полей мира.

Химический состав высокотемпературных вод — хлоридно-натриевый с высокой общей минерализацией — 1.8–2.2 г/л. Расчетная температура воды на глубине на участке разгрузки достигает 150–180°C. Проявлениями тепловых аномалий на поверхности являются поля гидротермально измененных пород и нагретая до различных температур почва — термозём [6].

Особенности морфологии долины. Река Гейзерная является левым притоком р. Шумной (бассейн Тихого океана) и берет свое начало на отметке примерно 885 м на склонах влк. Кихпинч при слиянии ручьев Прозрачного и Мутного (или Безымянного). Ее протяженность составляет менее 12 км, а перепад высот — более 700 м при среднем уклоне 0.06. Продольный профиль реки ступенчатый, невыработанный — практически на всем протяжении она изобилует порогами и водопадами. Площадь бассейна 57.8 км² [7].

В верховьях долина ориентирована на ЮЗ, имеет глубину около 200 м и примерно такую же ширину. Далее Гейзерная поворачивает на ЮЮВ, и долина ее расширяется до километра. В месте расширения на ее левом борту расположены активные термальные площадки и горячие источники Верхнегейзерной группы. Ниже река опять круто поворачивает к ЮЗ, ее уклон возрастает: в русле прослеживаются три водопада общей высотой в 40 м, после этого долина опять резко расширяется — уже до 3.5 км. К участку расширения приурочены многочисленные источники Гейзерной группы и все гейзеры. Глубина долины в приустьевой части превышает 400 м. В целом такая широкая долина не соответствует небольшой речке, которая по ней течет, что отмечала еще Т.И. Устинова [5].

Гидрологический режим реки характеризуется хорошо выраженным весенне-летним половодьем, многоводной летней и зимней меженью. Питание реки — смешанное. Среднегодовой годовой модуль стока равен 30–35 л/км². По наблюдениям 2008 г. [7], сток взвешенных и влекомых наносов составляет около 5200 т/год. В межень расход в устье реки колеблется в пределах 1.5–2 м³/с, но в летне-осеннее время он увеличивается в полтора раза и значительно возрастает в период снеготаяния и выпадения осенних дождей, особенно связанных с глубокими циклонами. Глубина и ширина реки изменчивы; наибольшая ширина в межень (10–12 м) отмечается в ее приустьевой части; скорость местами достигает 1.5–2 м/с.

В русле Гейзерной часто выходят коренные породы, аккумуляция рыхлого материала отмечается фрагментарно. Аллювий нередко плохой окатанности (со значительным участием склоновых отложений), иногда выветрелый и сцементированный. Хорошо выраженные террасы в долине отсутствуют, хотя Т.И. Устинова [5] и отмечала наличие фрагментов (“обрывков”) 6, 15–18 и 22–25 м террас. Действительно, борта долины изобилуют ступенями и террасовидными площадками, которые не выдержаны по простиранию. Нередко на них или рядом выходят горячие ключи или отмечает-

ся парение грунта. Иногда площадки наклонные и перекрыты плащом гейзерита. Однако специальных детальных исследований флювиальных форм рельефа в долине не проводилось.

Термопроявления. Все поверхностные термопроявления бассейна р. Гейзерной первооткрыватель Долины Т.И. Устинова [5] объединила в три группы термальных полей: в верховьях — Кихпинычевское, в среднем течении реки — Верхнегейзерное и в низовье — Гейзерное. Такого районирования придерживаются и современные исследователи [4, 8]. Термопроявления Южно-Кихпинычевского термального поля (ТП) в верховьях ручья Белого представлены струями насыщенного пара (температура 94–96°C), грязевыми бурлящими котлами и участками нагретого грунта, в том числе парящего. В местах выхода парогазовых струй характерно отложение серы. На Западно-Кихпинычевском ТП, расположенном в месте слияния ручьев Мутный и Прозрачный, которые дают начало р. Гейзерной, часто встречаются небольшие теплые водные газирующие котлы — практически бессточные воронки с температурой от 18°C до 54°C, которые расположены в пределах отдельных небольших площадок измененных пород (т.н. холодные и теплые серные бугры).

Верхнегейзерное ТП вытянуто почти на 2 км в виде отдельных пятен по левобережью средней части долины р. Гейзерной и приурочено к выходам лав докальдерного комплекса. Основные термопроявления здесь — это мощные струи насыщенного пара, кипящие или грязевые бессточные котлы.

Гейзерное термальное поле расположено в нижнем течении р. Гейзерной и протягивается от ее устья вверх по течению почти на 5 км. Именно в этой части долины происходит основная разгрузка высокотемпературных подземных вод в виде разнообразных источников — горячих, кипящих, постоянных и пульсирующих — и, конечно, гейзеров. Также здесь отмечаются выходы пара, грязевые кипящие котлы, прогретые участки грунта. Это самое большое термальное поле в долине реки, и именно этот участок и получил собственное название — Долина гейзеров. Большая часть самых эффектных гейзеров находится в пределах двухкилометрового приустьевоего участка реки в центральной части долины. Помимо крупных гейзеров и источников, выделяющихся своей индивидуальностью и имеющих собственное название, здесь много миниатюрных гейзеров, источников и грязевых котлов.

Подавляющее число гейзеров и источников расположено в днище долины реки на ее левом берегу. На более высоких отметках встречаются лишь небольшие источники и гейзеры, выше которых находятся только выходы пара. На правом берегу гидротермальная деятельность проявляется в виде небольших пульсирующих источников, кипящих водных котлов и гейзеров (числом более двух десятков) на поверхности большой термальной площадки, постепенно поднимающейся от реки на высоту 10–15 м и напоминающей причудливый панцирь, — “Склон (или Площадка) разноцветных грифонов”. Более детальная характеристика термопроявлений Долины была дана во многих публикациях [4, 5, 9].

Гейзерная гидротермальная система по выносу тепла является одной из самых мощных на Камчатке. Величина общей разгрузки составляет около 300 л/с воды с температурой восходящего потока на глубине в среднем 250°C. Сюда входит и сумма дебитов источников и гейзеров, которая достигает 100 л/с. Относительно среднегодовой температуры воздуха (приблизительно 0°C) общий вынос тепла составляет 314 МВт [4].

Катастрофические процессы в долине. Важная особенность ландшафта долины р. Гейзерной — его весьма высокая естественная динамичность. Активность процессов рельефообразования в пределах глубоко врезанной долины заметна по периодическим небольшим обрушениям-оползням. Еще на начальных этапах наблюдений в долине (1960–1970-е гг.) в ее верховьях исследователи отмечали остатки оползней на берегах реки и следы обрушений обрывистых склонов (рис. 2). Многочисленные обвалы видны на обоих бортах долины и хорошо дешифрируются на аэрофотоснимках 1950–

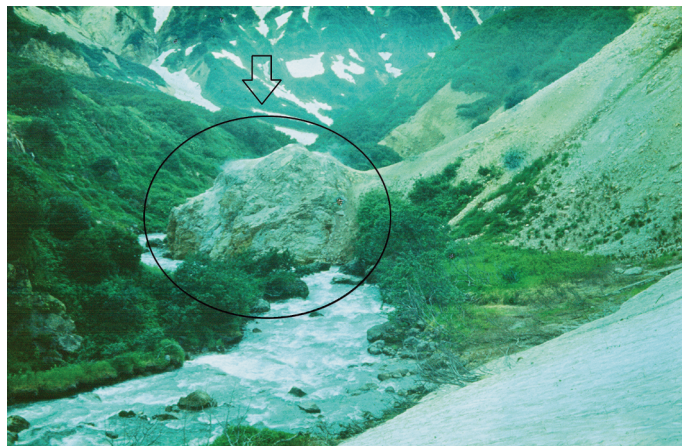


Рис. 2. Остатки старого оползня на правом берегу р. Гейзерной на участке Верхнегейзерного поля (фото В. Сугрובה, 1976 г.).

1990 гг. Но иногда эти события приобретали катастрофические масштабы: только за последние 40 лет на территории Долины гейзеров произошло три крупных обвала-оползня, сопровождавшихся селеобразованием: 04.10.1981 г., 03.06.2007 г. и 03–04.01.2014 г.

Первым детально изученным в Долине был оползень, спровоцированный тайфуном “Эльза”, прошедшим над Камчаткой 04.10.1981. Анализ материалов аэрофотосъемки для регистрации последствий тайфуна позволил В.Н. Двигало с коллегами оценить масштабы склоновых процессов [10, 11]. Оползень сформировался на абсолютных отметках 710–790 м и имел ширину 60–95 м. Оползневые массы спустились до отметки 640 м и перегородили русло р. Гейзерной, но практически сразу были размыты, 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 [11].

Второй, а также самый крупный из известных обвал-оползень сошел 3 июня 2007 г. с ЮВ борта долины и вызвал разрушение некоторых объектов инфраструктуры Кроноцкого заповедника. В.А. Дроздин и В.Л. Леонов [4] определяют его как сложный оползень, сопровождавшийся грязекаменным потоком (рис. 3). Поток накрыл большую часть бассейна ручья Водопадного и распространился вниз по долине р. Гейзерной. Обломочная масса перекрыла Гейзерную, что привело к образованию несколько выше устья ручья подпрудного озера, площадь которого через месяц составила 76100 м², а глубина – 27 м. В результате обработки материалов аэрофотосъемки 12.07.2007 г. совместно с цифровой моделью рельефа, составленной по снимкам 16.08.1993 г., специалистами Института вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН был вычислен объем перемещенных пород – 21 млн м³ [11].

По сути это было сложное комплексное явление – сочетание обвально-осыпных, оползневых, селевых, лавинных и солифлюкционных процессов. Детальный анализ ситуации позволил сотрудникам ИВиС выделить три последовательные фазы процесса обрушения и соответствующие им типы продуктов обрушения [12]. Первая фаза – основная – сползание и дробление крупных блоков пород, слагавших горные массивы верховьев и бортов долины ручья, еще покрытых мощным слоем снега. По мере перемещения вниз скорость этой массы резко возросла, и уже в долине руч. Водопадный она превратилась в типичный селевый поток. В местах резкого поворота русла ручья

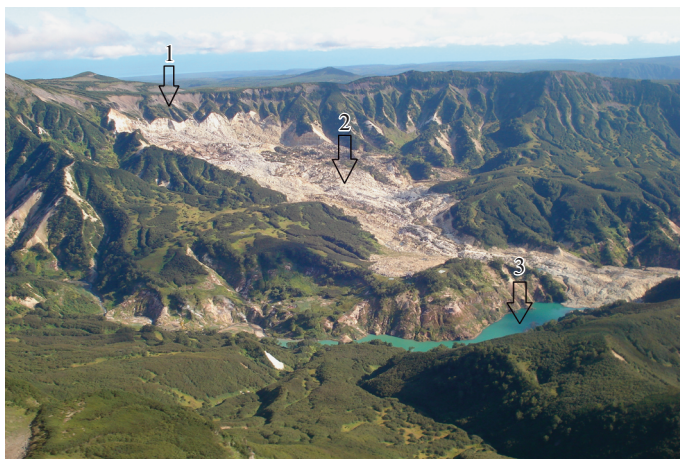


Рис. 3. Стенка срыва (1), тело оползня (2) и подпрудное озеро (3), образовавшееся после событий 3 июня 2007 г. (фото А. Завадской, 2008 г.).

на его бортах образовались заплески селевой массы высотой до 8–10 м (а местами и более). Достигнув р. Гейзерной, основная часть потока сформировала естественную плотину, первоначальной высотой около 30 м, которая перегородила долину этой реки. Одновременно со сходом грязекаменного потока происходило гравитационное обрушение уступов приводораздельной части в верховьях руч. Водопадный. Третья фаза — очередное обрушение склона с формированием блоков размером до 10 и более метров. В результате описанных событий образовался состоящий из двух смежных цирков подковообразный амфитеатр обрушения с почти вертикальной стенкой высотой около 150 м и протяженностью до 800 м; длина его пологонаклонного в сторону долины днища достигла 400–600 м.

Последствия этой природной катастрофы были не раз описаны в литературе [7, 12, 13]. Исследователями был сделан вывод, что одной из главных причин масштабного события 2007 г. явилось ослабление склонов, которые сложены здесь слабо сцементированными вулканогенно-осадочными породами. Локализация отмерших термальных площадок и гидротермальные изменения пород, наличие субвертикальных разрывных нарушений и зияющих трещин отседания, а также повышенное обводнение и мерзлотные процессы — все это способствовало развитию процессов обваливания и оползания. В качестве возможных причин инициации смещения отмечается и совпадение времени возникновения оползня с региональным (удаленным слабым) землетрясением [14].

Но на этом преобразования в Долине не закончились. Вечером 3 января 2014 г. в верховьях долины р. Гейзерной (Верхнегейзерное поле) обрушение края лавового плато у сопки Желтой вызвало другой оползень-обвал [15]. Так же, как и в предыдущем случае, обрушившаяся масса, перегородив реку, привела к образованию подпрудного озера. При анализе снимков от 28.04.2014 г. было установлено, что обрушение произошло по тыловой трещине отседания, как и прогнозировалось ранее в работе [16]. Длина линии отрыва составила 482 м, площадь сместившегося блока пород — 18 250 м², а высота — 200–220 м (рис. 4). Объем обвалившейся части борта долины достиг 2.85 млн м³. Река Гейзерная оказалась перекрытой фронтальной частью оползня на протяжении 700 м, максимальная мощность отложений над руслом составила 22 м. Выше плотины возникло новое подпрудное озеро, на момент съемки его площадь бы-

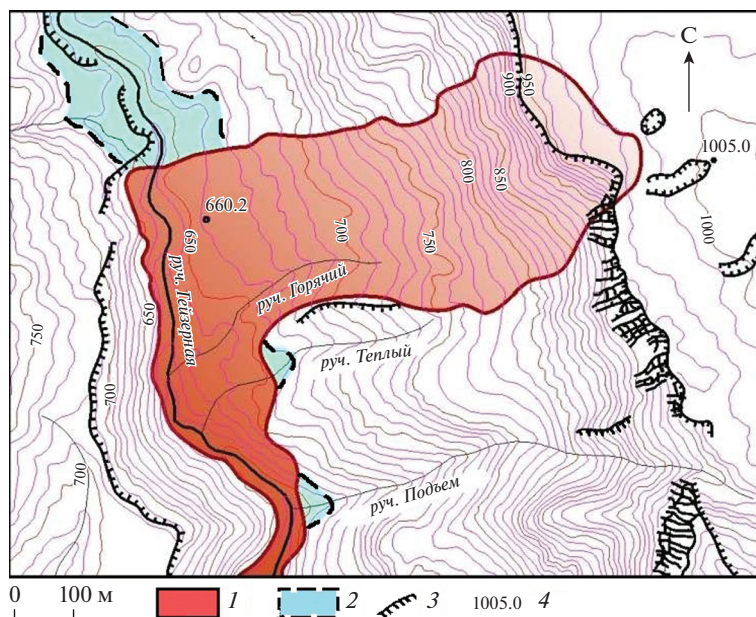


Рис. 4. Схема оползня-обвала, произошедшего в долине р. Гейзерной 4 января 2014 г. (по [15] с изменениями). 1 – тело оползня-обвала; 2 – подпрудные озера и их границы; 3 – уступы; 4 – высотные отметки.

ла равна 43100 м^2 , наибольшая глубина вблизи плотины – 20 м, объем воды – 258500 м^3 [11].

Часть отложений стала основой для образования грязекаменного потока, чему способствовали наличие мощного снежного покрова и высокая тиксотропность гидротермально измененных грунтов. Объем селя достиг 2.5 млн м^3 , его скорость была весьма велика: на поворотах русла р. Гейзерной сформировались заплески высотой до 15 м.

В результате схода селя грязевые массы заполнили долину реки. В нижней части Трехкаскадного водопада были срезаны гейзеритовые постройки гейзеров Жемчужный и Щель, а также термальные постройки на правобережье р. Гейзерной, частично перекрыты и забиты грязекаменной массой каналы гейзеров Великан и Горизонтальный. В результате этого ранее фонтанировавший на высоту 25 м гейзер Великан превратился в пульсирующий источник с высотой фонтана не более 1.5 м.

Селевые массы частично заполнили подпрудное озеро 2007 г., напор воды, устремившейся вниз по течению, а также сильные дожди способствовали разрушению плотины 2007 г., после чего озеро постепенно стало спускаться и к настоящему времени как постоянный водоем практически перестало существовать.

Таковы результаты наблюдений за последние десятилетия. Но внимательный взгляд исследователя не может не заметить на бортах долины р. Гейзерной следы и других – более древних – масштабных событий. Например, по данным В.Л. Леонова [17], в долине р. Сестрѐнка (также левого притока р. Шумной, как и сама Гейзерная) тоже дешифрируются следы древнего мощного оползневого процесса. В начале голоцена оползень запрудил эту долину и образовал там водоем примерно такого же размера, как и озеро, сформировавшееся в 2007 г. в долине р. Гейзерной. Нельзя не согласиться с заключением В.Н. Двигало и соавт. [10], что на многих участках долины есть



Рис. 5. Следы смещения крупных блоков пород на левом борту долины (показаны стрелками), Верхнегейзерное поле (фото В. Сугрובה, 1987 г.).

следы обвалов и оползней, которые хорошо видны на аэро- и фотоснимках (рис. 5, 6).

Работами последних лет [18] по результатам дистанционного зондирования в долине выделено свыше 650 проявлений активных склоновых процессов — оползней, обвалов, осыпей. Среди них доминируют оползни течения (360), из которых более 20 впоследствии трансформировались в сели.

Гидротермальная деятельность и рельефообразование. В зонах развития гидротермальных процессов под воздействием кислых растворов, образующихся при конденсации пара и растворении газов парогазовых струй, идет активный процесс изменения горных пород. В местах выхода воды и газа прочные породы постепенно превращаются в относительно мягкие глины. Благодаря притоку эндогенного тепла грунты долины р. Гейзерной не промерзают, и трансформация твердого вещества на участках термального воздействия протекает здесь круглый год, чему способствует и высокая минерализация вод. Проведенные исследования [19] показали, что в зонах воздействия термальных вод в бассейне р. Гейзерной обломки вулканического стекла в дацитовых туфах замещаются глинистыми минералами и цеолитами. При этом происходит снижение плотности породы практически вдвое и возрастает ее пористость, что приводит к резкому уменьшению сцепления.

В местах развития гидротермально измененных пород, в том числе и на склонах, часто формируются слабонаклонные ($1-5^\circ$) — почти субгоризонтальные площадки: иногда они небольшие — измеряются первыми метрами, иногда достигают протяженности в десятки метров и могут уже рассматриваться как гидротермальные педименты [20]. Гидротермальная деятельность значительно влияет и на микрорельеф, причем происходит формирование не только денудационных форм, что обусловлено выносом вещества, — примером чему являются упомянутые выровненные площадки, а также котлы и воронки. Широко представлены и аккумулятивные образования — фестоны и лотки непосредственно в руслах водотоков, натечные террасы на их бортах, иногда крутые стенки, изометричные бугры и щиты на участках выходов источников и гейзеров. Вокруг источников и гейзеров площадки и «стенки», как правило, сложены кремнистыми туфами и гейзеритами, что зависит от состава и температуры их формирования. Например, вокруг гейзера Тройного площадь гейзеритового щита превышала 100 м^2 (к сожалению, после схода селя 2007 г. он был разрушен и погребен под его осадками).

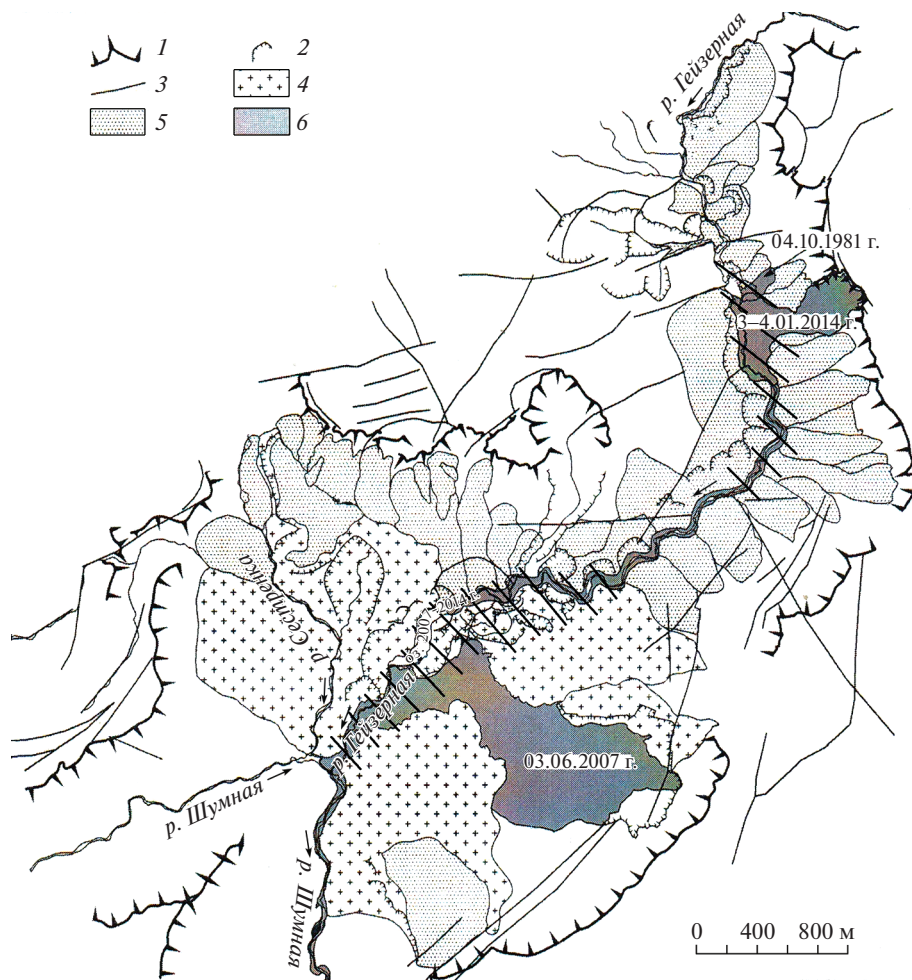


Рис. 6. Обвалные и обвало-оползневые формы в долине р. Гейзерной (по [10] с изменениями).

1–2 – кромки гравитационных обрушений первого и второго порядка; 3 – выраженные в рельефе тектонические нарушения; 4 – тела аллохтонов доисторического возраста, определенные И.В. Мелекесцевым [16]; 5–6 – зоны обвалов, обвало-оползней и селей доисторического (5) и исторического (6) возраста. Стрелками показано направление течения рек, штриховкой – основные гидротермальные поля.

Гидротермально измененные породы легко размываются поверхностными водами, на сложенных ими склонах формируются сплывы, но самое главное – пластичные и хорошо увлажненные глины способствуют образованию оползней, заметно влияющих на морфологию долин и рельеф зон гидротермального воздействия в целом. Наиболее динамичное развитие оползней в условиях непрерывного процесса гидротермального изменения скальных горных пород, по заключению В.М. Сугрובה, происходит на участках выходов пара в виде отдельных струй или площадного парения. В таких зонах образуются расширения речных долин с иногда достаточно крупными оползневыми террасами (рис. 7). Сами долины нередко из-за этого приобретают четковидную в плане форму. В долине р. Гейзерной аналогичные расширения соответствуют Верхнегейзерному и Гейзерному полям. Подобное явление типично для терри-



Рис. 7. Фрагменты оползневых террас в долине р. Гейзерной с разнообразными термопроявлениями (фото В. Яблокова, 2011 г.).

торий высокой гидротермальной активности большинства вулканических регионов мира [20, 21]. На Камчатке, например, это также хорошо видно на склонах влк. Мутновский (правые притоки р. Фальшивой), на Курильских о-вах — в бассейнах р. Серной (влк. Баранского, о-в Итуруп) и р. Лесной (влк. Менделеева, о-в Кунашир) и др.

По заключению И.В. Мелекесцева, Узон-Гейзерная вулcano-тектоническая депрессия может рассматриваться как вариант кальдерного комплекса Йеллоустон в миниатюре, где вулканическая деятельность также завершилась во время позднеплейстоценового оледенения, сменившись в голоцене гидротермальной [22]. Однако сравнение строения р. Гейзерной с морфологией Большого каньона Йеллоустона, также прорезающего мощную толщу гидротермально измененных пород, показывает, что каньон находится еще на этапе доминирования активного врезания. Гравитационные процессы лишь начинают развиваться на его бортах, а масштабные оползневые явления, которые наблюдаются в долине р. Гейзерной и привели к ее постепенному расширению — там еще впереди.

Крупные смещения на бортах долин готовятся достаточно долго. Так, на аэрофотоснимках 1973 и последующих годов в тыловой части будущего оползневого цирка 2007 г. на склонах Гейзерной уже хорошо просматривалась трещина отседания, визуальнo совпадающая с будущей стенкой отрыва [12]. Место оползня-обвала 2014 г. также было предсказуемо [16]. Ливневые осадки во время прохождения тайфунов, сейсмические толчки являются последней каплей — спусковым крючком — для провоцирования этих мощных гравитационных процессов. Дополнительное воздействие на склоны оказывают и многометровые снежники, формирующиеся на их перегибах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На первый взгляд, долина р. Гейзерной представляет собой типичную долину горной реки, однако, ее ширина значительно превышает параметры водного потока, что свидетельствует об участии в ее формировании не только флювиальных процессов. На протяжении голоцена и в настоящее время наряду с углублением (продольный профиль реки по-прежнему ступенчатый, невыработанный) ее долина расширяется за счет активных гравитационных процессов. Спектр этих процессов достаточно широк: на нижних, сильно увлажненных участках доминируют оплывание и оползание (преобладают оползни течения), в верхней части бортов — обвалы, осыпи, блоковые

оползни, отседание краев лавового плато. Смещение материала на склонах в виде небольших оползней и сплывов идет практически постоянно, несколько усиливаясь в период снеготаяния и во время дождей. Кроме того, периодически происходят масштабные смещения, представляющие собой цепочки катастрофических событий, провоцируемых сейсмическими толчками или обильными ливнями. За счет таких комплексных катастрофических процессов только с 2007 по 2014 г. включительно в долину поступило около 24 млн м³ пород со склонов.

В результате этого долина реки постепенно расширяется и на ее бортах формируются локальные оползневые террасы, что обуславливает их ступенчатое строение. Характер ступеней — их неустойчивость по простиранию и продолжающееся смещение на отдельных участках свидетельствуют о том, что данные формы являются обвальными и оползневыми террасами. Поступающий в днище долины материал выносится в основном селями, которые провоцируются ливневыми осадками. Для долины типично периодическое возникновение короткоживущих (годы) подпрудных водоемов, при прорыве которых также возникают сели.

Рассмотренный пример долины р. Гейзерной позволяет понять, под воздействием каких процессов идет формирование долин территорий развития гидротермальных процессов в целом. В частности, мы можем заключить, что активное проявление гравитационных процессов на склонах долин подобных зон является основным фактором их развития и во многом обуславливает морфологию их бортов и днища.

БЛАГОДАРНОСТИ

Статья подготовлена по данным исследований при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-05-00967), синтез материалов проводился в рамках темы Государственного задания № 0148-2019-0005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас долины реки Гейзерной в Кроноцком заповеднике / Ред. Завадская А.В. М.: КРАСАНД, 2015. 88 с.
2. Белоусов В.И., Леонов В.Л., Гриб Е.Н. Геологические позиции гидротермальных систем Долины гейзеров и кальдеры Узон // Вулканология и сейсмология. 1983. № 1. С. 65–79.
3. Леонов В.Л., Гриб Е.Н., Карпов Г.А., Сугробов В.М., Сугробова Н.Г., Zubin M.I. Кальдера Узон и Долина Гейзеров // Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука, 1991. Т. II. С. 94–141.
4. Сугробов В.М., Сугробова Н.Г., Дроздин В.А., Карпов Г.А., Леонов В.Л. Жемчужина Камчатки — Долина Гейзеров. Научно-популярный очерк, путеводитель. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2009. 108 с.
5. Устинова Т.И. Камчатские гейзеры. М.: Географгиз, 1955. 120 с.
6. Завадская А.В., Семенов И.Н., Паничева Д.М., Крупская В.В., Закусин С.В. Трансформация минералогического и гранулометрического состава почв гидротерм в Долине Гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка) // Геохимия ландшафтов (к 100-летию А.И. Перельмана) / Мат-лы Всерос. конф. (электрон. изд.). М.: Геогр. ф-т МГУ, 2016. С. 216–219.
7. Воробьевский И.Б., Дроздин В.А., Фролова Н.Л., Чижова В.П. Гидрологические и рекреационные последствия катастрофического селя в Долине гейзеров (Камчатка) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2010. № 2. С. 46–52.
8. Сугробов В.М., Сугробова Н.Г. Особенности разгрузки высокотемпературных подземных вод в Долине Гейзеров // Вопр. географии Камчатки. Петропавловск-Камчатский. 1990. Вып. 10. С. 81–89.
9. Леонов А.В. Каталог гейзеров Кроноцкого заповедника / Долина гейзеров и кальдера Узон: история и современность. М.: ООО “Реарт”, 2017. 384 с.
10. 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 / Мат-лы III Междунар. конф. Южно-Сахалинск, 22–26 сентября 2014 г. / Отв. ред. Н.А. Казаков. Южно-Сахалинск: Сахалинский филиал Дальневост. геол. ин-та ДВО РАН, 2014. С. 105–108.

11. Шевченко А.В., Двигало В.Н., Свирид И.Ю. Дистанционные исследования геоморфологических процессов на вулканических объектах Камчатки // XXXVI Пленум ГК РАН. Всерос. научн.-практич. конф. с межд. участием “Геоморфология — наука XXI века”. Барнаул: Изд-во АГУ, 2018. С. 403–410.
12. Пинегина Т.К., Делемень И.Ф., Дрознин В.А., Калачева Е.Г., Чирков С.А., Мелекесцев И.В., Двигало В.Н., Леонов В.Л., Селиверстов Н.И. Камчатская Долина гейзеров после катастрофы 3 июня 2007 г. // Вестн. ДВО РАН. 2008. № 1. С. 33–44.
13. Дрознин В.А., Двигало В.Н., Муравьев Я.Д. Оползень 3 июня 2007 г. в Долине Гейзеров на Камчатке // Тр. Междунар. конф. “Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита”. Пятигорск, 2008. С. 41–44.
14. Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Сеницын В.И. Сейсмические наблюдения в Долине Гейзеров // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. № 2. Вып. 10. С. 171–172.
15. 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.
16. Двигало В.Н., Мелекесцев И.В. Геолого-геоморфологические последствия катастрофических обвалов и обвально-оползневых процессов в Камчатской Долине Гейзеров (по данным аэрофотограмметрии) // Вулканология и сейсмология. 2009. № 5. С. 24–37.
17. 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 / Мат-лы Первой регион. научно-техн. конф. Петропавловск-Камчатский: Камчатский фил. Геофиз. службы РАН, 2007. С. 19–27.
18. Зеркаль О.В., Гвоздева И.П., Фролова Ю.В. Развитие оползневых процессов в долине р. Гейзерной // Геодинамические процессы и природные катастрофы / Тез. докл. III Всерос. научн. конф. с междунар. участием, г. Южно-Сахалинск, 27–31 мая 2019 г. / Отв. ред. Л.М. Богомолов. Южно-Сахалинск: Ин-т морской геологии и геофизики ДВО РАН, 2019. С. 138.
19. 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 / Тез. докл. III Всерос. научн. конф. с междунар. участием, г. Южно-Сахалинск, 27–31 мая 2019 г. / Отв. ред. Л.М. Богомолов. Южно-Сахалинск: Ин-т морской геологии и геофизики ДВО РАН, 2019. С. 186.
20. Лебедева Е.В. Виды воздействия вулканической деятельности на флювиальный рельеф // Геоморфология. 2019. № 4. С. 49–66.
21. Лебедева Е.В. Цепочки катастрофических геоморфологических процессов в речных долинах вулканических регионов // Геоморфология. 2018. № 4. С. 36–52.
22. Мелекесцев И.В. Инверсия эволюционного развития кальдерного комплекса и плейстоценовое оледенение “отменили” ожидаемое суперизвержение супервулкана Йеллоустон (США) // Геоморфология. 2019. № 2. С. 18–36.
<https://doi.org/10.31857/S0435-42812019218-36>

The Valley of the River Geyzernaya (Kamchatka): Hydrothermal Activity and Features of Relief Forming

E. V. Lebedeva^{a, #}, V. M. Sugrovov^{b, ##}, V. P. Chizhova^{c, ###}, and A. V. Zavetskaya^{d, ####}

^a Institute of Geography, RAS, Moscow, Russia

^b Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch of RAS, Petropavlovsk-Kamchatskiy, Russia

^c Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

^d Kronotsky Federal Nature Biosphere Reserve, Yelizovo, Kamchatka, Russia

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

^{##} e-mail: sugrvn@mail.ru

^{###} e-mail: v.p.chizhova@gmail.com

^{####} e-mail: anya.zavetskaya@gmail.com

The observational data on the relief formation processes for a period of more than five decades in the valley of river Geyzernaya are brought together and systematized. The active development of gravitational slope processes is noted, among which rockfalls of lava plateau

margins and rockslides in the upper parts of slopes are dominated, and landslides and slips are in the lower ones. It has been established that along with the ongoing deepening of the valley, at the present stage it's actively widening with the formation of numerous local terraces, which have mainly landslide genesis. The maximum width of the valley is observed in areas of the most intensive hydrothermal activity. The active development of slope processes is facilitated by the impact on the bedrock of highly mineralized thermal waters, which destroy the latter to clay. Large-scale displacements of rocks on the slopes are initiated by rainfall and seismic shocks. Denudation in the river basin proceeds mainly according to the following scheme: 1) displacement of material from the slopes with blocking of the river channel and the formation of a dammed reservoir, 2) breakthrough/descent of the lake with mudflow occurrence. During the period under review, several similar events recorded, as a result of which approximately 24 million m³ of rocks assumed in the valley from its slopes only from 2007 to 2014.

Keywords: Valley of Geysers, hydrothermal activity, thermal waters, landslide terraces, dammed lake, mudflow, catastrophic processes

ACKNOWLEDGMENT

The article was prepared on the basis of research with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (Grant No. 18-05-00967); the synthesis of materials was carried out in the framework of the State Plan No. 0148-2019-0005.

REFERENCES

1. *Atlas doliny reki Geyzernoy v Kronotskom zapovednike* (Atlas of the valley of the River Geysernaya in Kronotsky Reserve). A.V. Zavadskaya (Ed.). M.: KRASAND (Publ.), 2015. 88 p.
2. Belousov V.I., Leonov V.L., and Grib E.N. Geological positions of hydrothermal systems of the Valley of Geysers and Uzon Caldera. *Vulkanologiya i seysmologiya* (Volcanology and Seismology). 1983. No. 1. P. 65–79. (in Russ.).
3. Leonov V.L., Grib E.N., Karpov G.A., Sugrobov V.M., Sugrobova N.G., and Zubin M.I. Caldera Uzon and the Valley of Geysers. *Deystvuyushchiye vulkany Kamchatki* (Active volcanoes of Kamchatka). Moscow: Nauka (Publ.), 1991. Vol. II. C. 94–141. (in Russ.).
4. Sugrobov V.M., Sugrobova N.G., Droznin V.A., Karpov G.A., and Leonov V.L. *Zhemchuzhina Kamchatki – Dolina Geyzerov. Nauchno-populyarnyy ocherk, putevoditel'* (The Pearl of Kamchatka is the Valley of Geysers. Popular science essay, guide). Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatpress (Publ.), 2009. 108 p.
5. Ustinova T.I. *Kamchatskiye geyzery* (Kamchatka geysers). Moscow: Geografiz (Publ.), 1955. 120 p.
6. Zavadskaya A.V., Semenov I.N., Panicheva D.M., Krupskaya V.V., and Zakusin S.V. Transformation of the mineral and granulometric composition of the soils of the hydrotherm in the Valley of the Geysers (Kronotsky Reserve, Kamchatka). *Geokhimiya landshaftov (k 100-letiyu A.I. Perel'mana)*. *Materialy Vserossiyskoy Konferentsii (Geochemistry of landscapes (to the 100th of A.I. Perelman)*. Reports of the All-Russian Scientific Conference). Electronic Edition. Moscow: Geographical Faculty of MSU (Publ.), 2016. P. 216–219. (in Russ.).
7. Vorob'evsky I.B., Droznin V.A., Frolova N.L., and Chizhova V.P. Hydrological and recreational consequences of catastrophic mudflow in the Valley of Geysers (Kamchatka). *Vestnik Mosk. Un-ta. Ser. 5. Geografiya* (Bulletin of Moscow Univ. Series 5. Geography). 2010. No. 2. P. 46–52. (in Russ.).
8. Sugrobov V.M. and Sugrobova N.G. Peculiarities of discharge of hightemperatured underground waters in the Valley of the Geysers. *Voprosy geografii Kamchatki* (Kamchatka geography issues). Petropavlovsk-Kamchatsky, 1990. P. 81–89. (in Russ.).
9. Leonov A.V. Geyser catalog of the Kronotsky Reserve. In: *Dolina geyzerov i kal'dera Uzon: istoriya i sovremennost'* (The Valley of Geysers and Uzon caldera: history and modernity). Moscow: Publishing house LLC "Reart", 2017. 384 p.
10. Dvigalo V.N., Svirid I.Yu., Shevchenko A.V., and Zharkov R.V. *Monitoring i prognoz selevykh protsessov v kamchatskoi Doline Geyzerov na osnove fotogrammetricheskikh issledovaniy* (Monitoring and forecasting of mudflow processes in the Kamchatka Valley of Geysers based on photogrammetric studies). *Selevye potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita*. III International conference Yuzhno-

- Sakhalinsk, 22–26 September 2014. N.A. Kazakov (Ed.). Yuzhno-Sakhalinsk: Sakhalinskii filial Dal'nevost. geol. in-ta DVO RAN (Publ.), 2014. P. 105–108. (in Russ.)
11. Shevchenko A.V., Dvigalo V.N., and Svirid I.Yu. *Distantstionnye issledovaniya geomorfologicheskikh protsessov na vulkanicheskikh ob'ektakh Kamchatki* (Remote Studies of Geomorphological Processes at Volcanic Objects of Kamchatka). *XXXVI Plenum Geomorfologicheskoi komissii RAN*. All-Russian scientific and practical conf. with int. participation “Geomorphology – the science of the XXI century”. Barnaul: Izd-vo AGU (Publ.), 2018. P. 403–410. (in Russ.)
 12. Pinegina T.K., Delemen I.F., Droznin V.A., Kalacheva E.G., Chirkov S.A., Melekestsev I.V., Dvigalo V.N., Leonov V.L., and Seliverstov N.I. *Kamchatskaya Dolina Geyzerov posle katastrofy 3 iyunya 2007 g.* (Kamchatka Valley of Geysers after the catastrophe on 3 June 2007). *Vestnik DVO RAN*. 2008. No. 1. P. 33–44. (in Russ.)
 13. Droznin V.A., Dvigalo V.N., and Muravyov Ya.D. *Opolzen' 3 iyunya 2007 g. v Doline Geyzerov na Kamchatke* (Landslide June 3, 2007 in the Valley of Geysers in Kamchatka). *Trudy Mezhdunarodnoi konferentsii “Selevyye potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita”*. Pyatigorsk. 2008. P. 41–44. (in Russ.)
 14. Kugayenko Yu.A., Saltykov V.A., and Sinitsyn V.I. *Seismicheskie nablyudeniya v Doline Geyzerov* (Seismic observations in the Valley of Geysers). *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle*. 2007. No. 2. Vol. 10. P. 171–172. (in Russ.)
 15. Leonov V.L. *Obval i opolzen', proizoshedshie 4 yanvarya 2014 g. v Doline Geyzerov, Kamchatka, i ikh posledstviya* (The collapse and landslide that occurred on 4 January 2014 in the Valley of Geysers, Kamchatka, and their consequences). *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle*. 2014. No. 1. Vol. 23. P. 7–20. (in Russ.)
 16. Dvigalo V.N., and Melekestsev I.V. *Geologo-geomorfologicheskie posledstviya katastroficheskikh obval'nykh i obval'no-opolznevykh protsessov v Kamchatskoi Doline Geyzerov (po dannym aerofotogrammetrii)* (Geological and geomorphological consequences of catastrophic rockfall and rockfall-landslides processes in the Kamchatka Valley of Geysers (according to aerial photogrammetry)). *Vulkanologiya i seismologiya*. 2009. No. 5. P. 24–37. (in Russ.)
 17. Leonov V.L. *Geologicheskie predposylki i vozmozhnost' prognoza opolznaya, proizoshedshego 3 iyunya 2007 g. v Doline Geyzerov, Kamchatka* (Geological preconditions and the possibility of forecasting a landslide that took place on 3 June 2007 in the Valley of Geysers, Kamchatka). In: *Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa Dal'nego Vostoka Rossii*. The 1st regional scientific and technical conference. Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatka branch of the RAS Geophysical Service, 2007. P. 19–27. (in Russ.)
 18. Zerkal' O.V., Gvozdeva I.P., and Frolova Yu.V. *Razvitie opolznevykh protsessov v doline r. Geyzernoi* (The development of landslide processes in the valley of the river Geysernaya). *Geodinamicheskie protsessy i prirodnye katastrofy*. III All-Russian scientific conference with foreign participants. L.M. Bogomolov (Ed.). Yuzhno-Sakhalinsk: In-t morskoi geologii i geofiziki DVO RAN (Publ.), 2019. P. 138.
 19. Frolova Yu.V., Zerkal' O.V., and Gvozdeva I.P. *Vliyanie gidrotermal'nykh preobrazovaniy na fiziko-mekhanicheskie svoystva tufogennykh porod Doliny Geizerov i ikh rol' v formirovanii opolznei* (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). *Geodinamicheskie protsessy i prirodnye katastrofy*. III All-Russian scientific conference with foreign. L.M. Bogomolov (Ed.). Yuzhno-Sakhalinsk: In-t morskoi geologii i geofiziki DVO RAN (Publ.), 2019. P. 186.
 20. Lebedeva E.V. *Vidy vozdeistviya vulkanicheskoi deyatel'nosti na flyuvial'nyi rel'ef* (Kinds of impacts of volcanic and post volcanic activity on fluvial relief). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2019. No. 4. P. 49–66. (in Russ.)
 21. Lebedeva E.V. *Tsepochki katastroficheskikh geomorfologicheskikh protsessov v rechnykh dolinakh vulkanicheskikh regionov* (Sequences of catastrophic geomorphic processes in the river valleys of volcanic regions). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2018. No. 4. P. 36–52. (in Russ.)
 22. Melekestsev I.V. *Inversiya evolyutsionnogo razvitiya kal'dernogo kompleksa i pleistotsenovie oledeniye “otmenili” ozhidaemoe superizverzhenie supervulkana Yellowstone (SShA)* (The expected future super-eruption of the Yellowstone supervolcano (USA) is “cancelled” by the Pleistocene glaciation and by the inversion of Caldera Complex development). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2019. No. 2. P. 18–36. (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0435-42812019218-36>