
ГЕОМОРФОЛОГИЯ РЕЧНЫХ ДОЛИН

УДК 551.435.132:551.432.7:551.233(571.66)

**ФОРМИРОВАНИЕ ТЕРРАС В ДОЛИНЕ РЕКИ
С АКТИВНЫМИ ГАЗОГИДРОТЕРМАЛЬНЫМИ ПРОЯВЛЕНИЯМИ
(НА ПРИМЕРЕ р. ГЕЙЗЕРНОЙ, п-ов КАМЧАТКА)[#]**

© 2024 г. Е. В. Лебедева^{1,*}, А. Л. Захаров^{1,**}, А. В. Котенков^{1,***}

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

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

** E-mail: zaanleo@gmail.com

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

Поступила в редакцию 14.05.2024 г.

После доработки 07.06.2024 г.

Принята к публикации 19.07.2024 г.

Изучены морфология, строение и вещественный состав отложений низких террасовых уровней в долине р. Гейзерной, которые встречаются в виде небольших фрагментов. В разрезах доминирует грубый, плохо сортированный и слабо окатанный селевый материал разных возрастных генераций. На отдельных участках вскрыты слоистые песчано-гравийные отложения, накапливавшиеся в условиях подпрудных водоемов. Аллювиальные отложения представлены незначительными по мощности прослоями галечников с валунами лучшей окатанности и сортировки с песчано-гравийным заполнителем, подстилающими и/или перекрывающими селевые отложения. Для некоторых фрагментов террасовидных поверхностей характерен меньший уклон по сравнению с продольным профилем реки: по-видимому, они являются остатками бывших селево-оползневых плотин. Осадки современных селей прослеживаются на отметках от 0 до +50 м над урезом реки, отложения древних селей сохранились в высотном интервале от 0.5 до 12 м. Это свидетельствует об отсутствии прямой зависимости возраста отложений от уровня их залегания. Выветрелость и измененность рыхлого материала обусловлена близостью и активностью термопроявлений Гейзерного термального поля. Газогидротермальные процессы приводят к значительной трансформации состава и свойств анализируемых отложений – преимущественно к их цементации. Строение изученных разрезов свидетельствует о неоднократности схода селей по долине и о периодическом возникновении там временных подпрудных водоемов в результате формирования обвально-оползневых и селевых плотин. Активное поступление материала со склонов и его перераспределение селями обусловили плохую окатанность обломков и сортировку осадка, слабую дезинтеграцию материала. Среди породообразующих минералов мелкопесчаной фракции доминируют магнетит и пироксены при участии ильменита, легкая фракция представлена преимущественно опал-сметит-цеолитовыми агрегатами, в меньшей степени – гейзеритом. В минералогических спектрах отложений, накапливавшихся в условиях подпрудных озер, расширяется набор вторичных минералов и агрегатов. В подстилающих селевый материал горизонтах аллювия имеются признаки перераспределения древних осадков с хорошо окатанными обломками пород и зернами минералов.

Ключевые слова: флювиальные процессы, селеобразование, выветривание, гидротермально-измененные отложения, вторичные (новообразованные) минералы, подпрудные водоемы

DOI: 10.31857/S2949178924030071, **EDN:** PLGCWB

ВВЕДЕНИЕ

Во многих долинах рек вулканических регионов наблюдаются разнообразные газогидротермальные проявления: термальные источники, парогазовые струи, грязевые котлы и др. Однако

влияние гидротермальных процессов на формирование и развитие речных долин практически не изучено, специальных публикаций в отечественной и зарубежной литературе, помимо описаний самих газогидротерм, особенностей их режима, гидрогеологического строения территории и т.п., нет. Пожалуй, наиболее комплексной публикацией, затрагивающей в том числе некоторые аспекты строения долины с газогидротермальными проявлениями, является очерк “Жемчужина Камчатки – Долина гейзеров”, написанный группой

[#] Ссылка для цитирования: Лебедева Е.В., Захаров А.Л., Котенков А.В. (2024). Формирование террас в долине реки с активными газогидротермальными проявлениями (на примере р. Гейзерной, п-ов Камчатка). *Геоморфология и палеогеография*. Т. 55. № 3. С. 123–145. <https://doi.org/10.31857/S2949178924030071>; <https://elibrary.ru/PLGCWB>

ведущих специалистов Института вулканологии и сейсмологии РАН (Сутробов и др., 2009). Но и в ней “главные герои” — это гейзеры. В то же время наши исследования в Курило-Камчатском регионе, в том числе и в долине р. Гейзерной (но не только), показали, что долины водотоков геотермальных зон с активными газогидротермальными проявлениями весьма своеобразны и заслуживают внимания геоморфологов. Для них характерны вторичная проработка аллювиальных отложений и коренных пород термальными водами с существенным изменением их свойств; активизация склоновых процессов и переотложение смещенного склонового материала селями, формирование специфических аккумулятивных форм микро- и мезорельефа (Лебедева, 2022; Lebedeva, Zharkov, 2022). Русловой аллювий подобных водотоков характеризуется значительным участием селевого материала в его формировании (Lebedeva et al., 2023). Для галечного материала

типичны плохая окатанность, слабая сортировка, для песчаной фракции — обилие обломков пород и сростков минералов, что свидетельствует о слабой дезинтеграции осадка и значительной доли в нем склонового материала, в том числе переотложенного селями. Обилие газогидротерм обусловило высокое содержание измененных обломков пород (до 80%) в галечной фракции аллювия и новообразованных агрегатов (до 70%) в песчаной фракции (Lebedeva et al., 2023).

Активное проявление гравитационных процессов на склонах приводит к формированию многочисленных оползневых террас и к периодическому перегораживанию долин, причем иногда, как это наблюдается в долине р. Гейзерной, — с образованием короткоживущих подпрудных водоемов (Lebedeva et al., 2023). Очевидно, что все это сказывается и на особенностях протекания флювиальных процессов в подобных долинах и, в частности, на формировании низких террасовых уровней. В данной работе мы хотели впервые детально рассмотреть этот вопрос на примере долины р. Гейзерной, которая изучена лучше, нежели долины иных водотоков на склонах вулканов Камчатки и Курильских островов.

Общая характеристика бассейна реки. Долина р. Гейзерной расположена на восточной границе Узон-Гейзерной кальдеры — вулcano-тектонической депрессии в Восточном вулканическом поясе Камчатки (рис. 1). Геологическое строение бассейна и характер гидротермальных проявлений детально описаны в работах (Леонов и др., 1991; Сутробов и др., 2009; Лебедева и др., 2020; Lebedeva et al., 2023). Практически на всем протяжении река размывает толщи посткальдерных позднеплейстоцен-голоценовых вулканогенно-озерных осадков общей мощностью до 400 м (Геологическая карта ... 200 тыс. м-ба, 1981): пемзовых туфов, туфопесчаников, туфогравелитов с прослоями и линзами туфобрекчий и туфоконгломератов. В нижнем течении, где река врезана наиболее глубоко, она вскрывает докальдерные образования — туфобрекчий и туфоконгломераты устьевой свиты, а также лавы преимущественно андезитового и дацитового состава средне-позднеплейстоценового возраста (Геологическая карта ... 1 млн м-ба, 2011), прорезает дайки риодацитов. В среднем течении в левом борту долины вскрываются экструзивные купола и лавы бортового комплекса.

На склонах долины встречаются поля гидротермально измененных и нагретых до различных температур пород. Термопроявления представлены струями насыщенного пара, грязевыми и газирующими котлами, разнообразными источниками и гейзерами. Основная разгрузка высокотемпера-

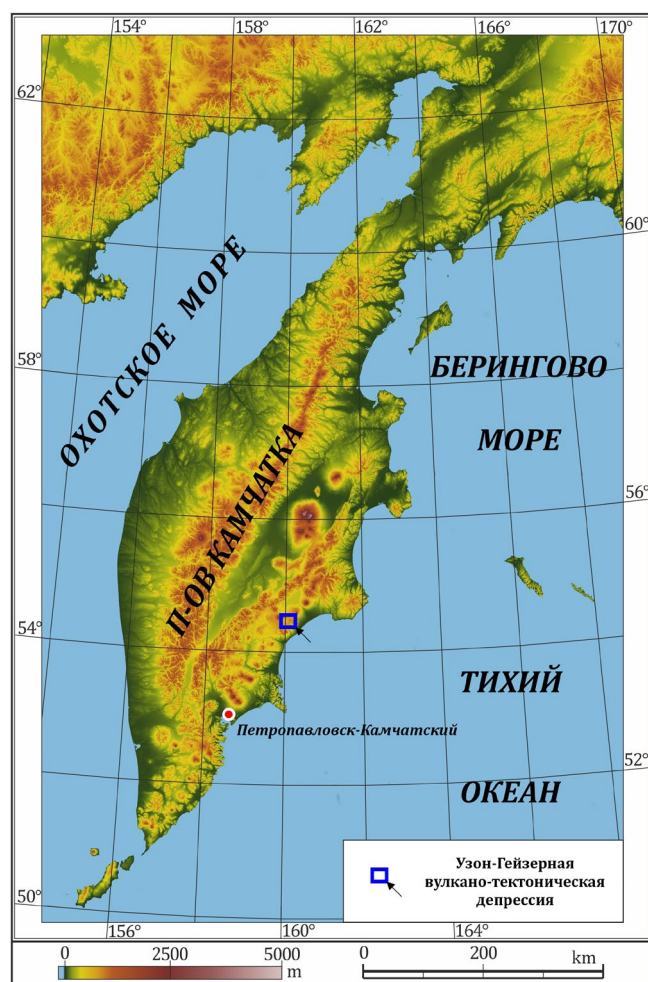


Рис. 1. Полуостров Камчатка и положение района исследований.

Fig. 1. Kamchatka Peninsula and the study area position.

турных хлоридно-натриевых подземных вод происходит на самом нижнем по течению Гейзерном термальном поле (Атлас ..., 2015). Большинство термопроявлений расположено в днище долины и на ее левом борту, который непосредственно прилегает к краю кальдеры. На правом борту гидротермальная деятельность прослеживается только до высот 10–15 м над урезом реки (Сугробов и др., 2009).

Долина характеризуется высокой оползневой и селевой активностью (Двигало, Мелекесцев, 2009; Зеркаль и др., 2019; Лебедева и др., 2020; Лебедева, Черноморец, 2023), что резко отличает ее от близлежащих аналогичных по морфологии врезов (Балдина и др., 2023). Только за последние 40 лет в ее среднем и нижнем течении произошло три крупных обвала-оползня, сопровождавшихся селеобразованием (1981 г., 2007 г. и 2014 г.), при общем объеме смещенного материала около 24 млн м³ (Двигало и др., 2014; Шевченко и др., 2018). Детально механизмы формирования смещений и объемы перемещенного материала описаны как в перечисленных работах, так и в (Пинегина и др., 2008; Двигало, Мелекесцев, 2009; Сугробов и др., 2009; Атлас ..., 2015). И, если в 1981 г. обломочная масса была быстро переработана рекой и вынесена вниз по течению, то в двух последующих случаях в долине формировались подпрудные водоемы. Последний существует и в настоящее время, его плотина, состоящая из материала обвала-оползня 2014 г., имеет высоту около 25 м над урезом реки. Плотина оползня-селя 2007 г. с отметками до 50 м над урезом прорезана рекой и к настоящему времени озеро спущено.

Река Гейзерная является левым притоком р. Шумной и относится к бассейну Тихого океана. Протяженность этого водотока 5 порядка, берущего начало на склонах влк. Кихпинич, составляет менее 12 км при перепаде высот около 700 м. Глубина долины в среднем течении около 200 м, в приустьевой части она увеличивается до 400 м, а ее ширина по бровкам, соответственно, колеблется от 1 до 3.5 км. Поперечный профиль долины V-образный, крутизна склонов 25–30°, в среднем и нижнем течении они несколько выглаживаются (до 20–25°). Продольный профиль реки невыработанный, ступенчатый. Гидрологический режим характеризуется весенне-летним половодьем, питание — смешанное. В приустьевой части ширина русла реки достигает 10–15 м, глубина колеблется от 0.5 до 1.2 м. В межень скорость течения около 1.5–2 м/с, а расход в устье реки — 1.5–2 м³/с, в паводки он увеличивается до 1.5 раз.

Характеристика террасового комплекса. Низкая пойма р. Гейзерной имеет высоту над урезом 0.5–1 м при ширине до 50–100 м, высокая — 2.0–2.5 м при ширине 5–20 м. В среднем и нижнем течении реки периодически прослеживаются фрагменты 1-й надпойменной террасы, сложенные в основном грубообломочным плохо сортированным галечно-валунным материалом, но иногда в их уступах встречается более тонкий, горизонтально слоистый супесчаный материал. Уклон фрагментов иногда меньше современного уклона реки, поэтому их высота относительно русла колеблется от 3–4 м в верхней по течению части и до 7–9 м — в нижней. В среднем течении к этому уровню привязаны подрезаемые рекой селевые конусы выноса в устьях левых притоков (Лебедева, Черноморец, 2023). Четко выраженные более высокие террасовые уровни в долине отсутствуют, хотя Т.И. Устинова (1955) и отмечала наличие фрагментов 15–18 и 22–25 м террас. Действительно, борта долины изобилуют разновысотными ступенями с отметками не только 15–20, но и 40, 60 и более метров, которые не выдержаны по простиранию и перекрыты почвенно-пирокластическим чехлом (ППЧ) мощностью 1–2 м, под которым вскрывается разбортная скала вулканогенно-озерных отложений, что подтверждается данными проведенного нами ручного бурения и шурфовочными работами. Широкое развитие оползневых процессов в долине и разновысотность террасовидных поверхностей позволяет предположить их оползневой генезис.

Цель данной работы — анализ строения фрагментов низких террасовых уровней с отметками до 10–20 м над современным урезом реки, находящихся в условиях активного газогидротермального воздействия, определение состава и генезиса слагающих их отложений и механизма формирования. Все эти фрагменты выглядят как речные террасы, однако в связи с особенностями их морфологии, характером отложений, среди которых есть заведомо не аллювиальный материал, более корректно обозначать их термином “террасовидная поверхность” (ТП).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В процессе полевых работ в долине р. Гейзерной в 2020–2023 гг. нами было изучено строение 10 фрагментов террасовидных поверхностей с отметками до 10–20 м над современным урезом в среднем и нижнем течении реки (ниже плотины подпрудного озера 2014 г. — рис. 2, 3). Гидротермально измененные флювиальные отложения ранее детально не изучались: в научной литературе нами был обнаружен единственный пример, касающийся специфики выветривания обломков

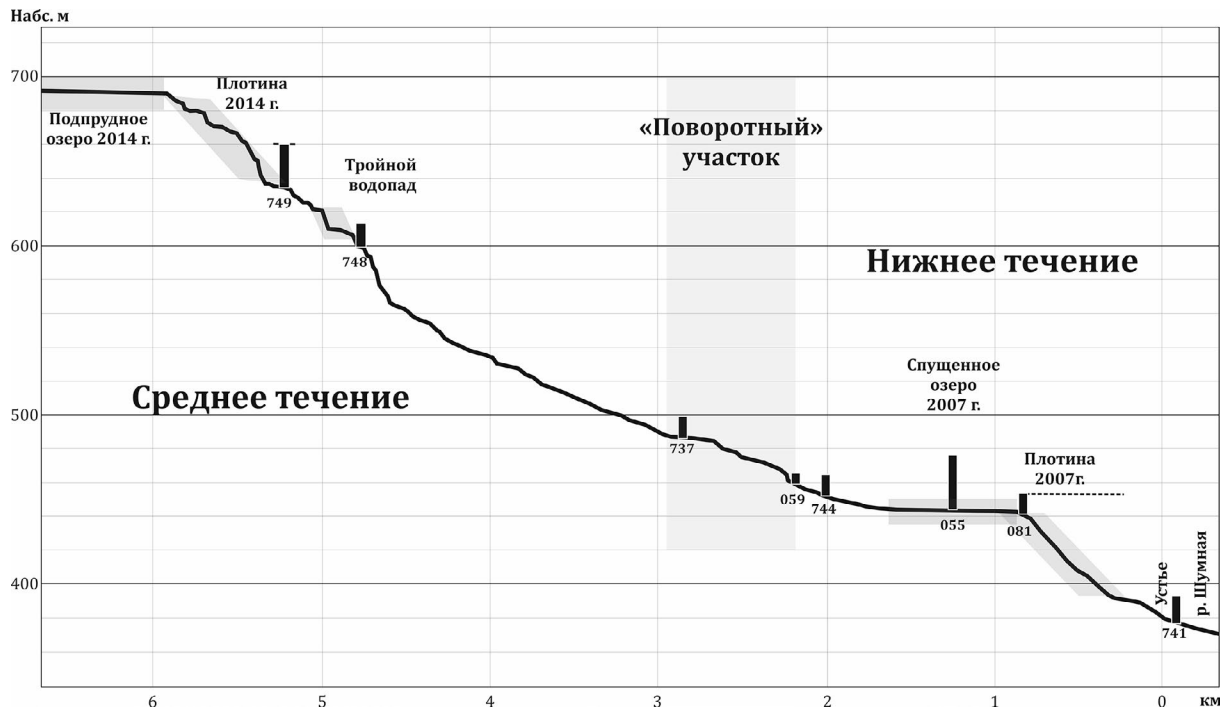


Рис. 2. Продольный профиль р. Гейзерной (среднее и нижнее течение) и положение изученных разрезов. Серой заливкой показаны поименованные на профиле участки, пунктиром – протяженность низких террасовидных поверхностей.

Fig. 2. The Geysernaya River longitudinal profile (middle and lower reaches) and the position of the studied sections of low terrace-like surfaces. The gray shading shows the areas named on the profile, the dotted line shows the extent of the low terrace-like surfaces.

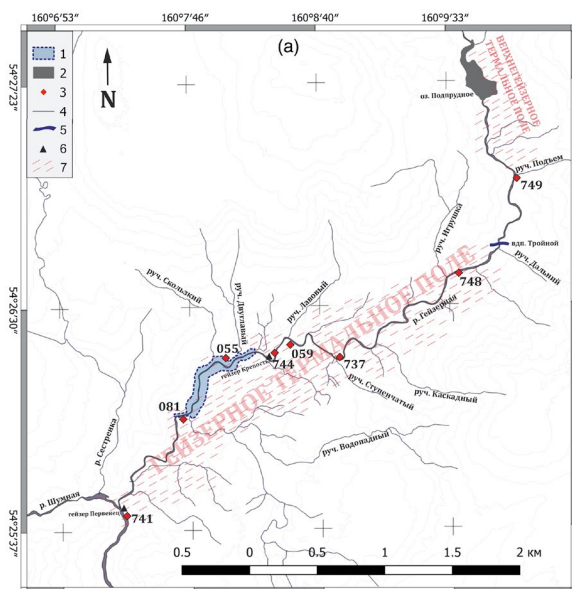


Рис. 3. Бассейн нижнего и среднего течения р. Гейзерной. (а) – Схема термальных полей. Подпрудные озера: 1 – спущенное (2007–2014 г.), 2 – существующее с 2014 г.; 3 – положение разрезов; 4 – водотоки; 5 – Тройной водопад; 6 – гейзеры Крепость и Первенец; 7 – термальные поля. (б) – Участки развития современных гравитационных процессов. Обвалы-оползни: 1.1 – 2007 г., 1.2 – 2014 г.; 2 – положение погребенного русла руч. Водопадного; 3 – положение разрезов.

Fig. 3. Basin of the lower and middle reaches of the Geysernaya River. (a) – Propagation of thermal fields. Dammed lakes: 1 – drained (2007–2014); 2 – existing since 2014; 3 – position of sections; 4 – watercourses; 5 – Troynoi waterfall; 6 – geysers Krepost' and Pervenets; 7 – thermal fields. (b) – Areas of modern gravitational processes. Landslides: 1.1 – 2007, 1.2 – 2014; 2 – position of the buried stream bed of Vodopadny creek; 3 – position of sections.

валунной фракции из селевых отложений в русле Кипящей речки на о-ве Итуруп (Ладыгин и др., 2014). Поэтому на данном этапе исследований было решено провести комплексный анализ вещественного состава мелкообломочной составляющей отложений, слагающих рассматриваемые террасы, что позволило нам определить их генезис. Помимо гранулометрического анализа был выполнен минералогический анализ мелкопесчаной фракции и изучена морфоскопия зерен крупнопесчаной и мелкогравийных фракций. На следующем этапе работ запланировано проведение углубленного анализа формирующегося цемента с привлечение электронной микроскопии, анализа шлифов, рентгеноспектрального флуоресцентного анализа (XRF).

Изучение гранулометрического состава проводилось по стандартной методике для пробы около 100 г мелкообломочной составляющей (включая гравий). Анализ выполнялся в лаборатории палеоархивов природной среды отдела палеогеографии ИГ РАН. Материал подвергался просеиванию через сита 2.0 мм и 1.1 мм. Крупные фракции (гравий и грубый песок) высушивались при температуре 40–105 °С, затем взвешивались. Аналогичные процедуры проводились с тонкой фракцией, которая для разрушения агрегатов потом смешивалась с 4% раствором пиррофосфата натрия, нагревалась до 90 °С в течение двух часов с помешиванием. В дальнейшем полученный образец измерялся на лазерном дифракционном анализаторе Malvern Mastersizer 3000 с протоколом на основе теории Фраунгофера (Eshel et al., 2004). Полученные данные статистически обрабатывались с использова-

нием пакета Gradistat. Всего было проанализировано 45 образцов. Были рассчитаны соотношение фракций гравия, песка и алеврита, медианный размер частиц (Md , мм), коэффициент сортировки по формуле Траска ($S_0\sqrt{D_{75}/D_{25}}$) (Ананьева, 1998).

Для минералогического и морфоскопического анализов тонкообломочной составляющей было отобрано 47 образцов каждый весом около 500 г. Глинистая фракция удалялась путем отмучивания, материал высушивался и просеивался. Морфоскопический анализ зерен и обломков пород в количестве 200 штук для каждого образца выполнялся Э.Г. Ананьевой для размерности гравия (10–5 мм, 5–2 мм) и песка (1–0.5 мм, 0.5–0.25 мм), т.е. всего были изучены 4 фракции, наиболее полно характеризующие тонкообломочную часть отложений. Анализировалась форма зерен, характер их поверхности, петрографический и минералогический состав, окатанность, вторичное изменение, наличие пленок и наростов. Минералогический анализ проведен А.В. Григорьевой (ИГЕМ РАН) для размерности 0.1–0.25 мм (мелкий песок), которая наиболее информативна при решении палеогеографических и палеогеоморфологических задач (Колосова, Ананьева, 1974). Изучался состав 200 зерен, доля тяжелой и легкой фракций (разделение которых проводилось в бромформе), степень выветрелости и корродированности зерен минералов, наличие вторичных минералов, особенности строения и состав агрегатов.

При изучении отложений мы опирались на ранее полученные материалы комплексного анализа руслового аллювия р. Гейзерной (Lebedeva et al.,

Таблица 1. Характеристики современного аллювиального и селевого материала в долине р. Гейзерной
Table 1. Characteristics of modern alluvial and debris flow material in the Geysernaya River valley

Материал	Показатель	Современные (эталонные)		
		Генезис отложений		
		Русловой аллювий	Селевые отложения 2007 г.	Селевые отложения 2014 г.
Мелко-обломочный	Сортировка (S_0)	1.9–9.0	4–9	13.5–13.9
	Выход тяжелой фракции, %	2.6–50.0	4.3–4.4	3.3–5.0
	Глинистые пленки и примазки	Отсутствуют	+	+
	Окатанность гравия и частиц песка	Гравий окатан, песок – слабо	Нет	Нет
Крупно-обломочный	Класс окатанности галечного материала	1–3	0–1	0–1, редко 2
	Коэффициент окатанности	1.7–2.4	<1	1.3–1.5
	Размер перемещаемых валунов и глыб, м	0.2–0.6	До 2–4	До 2–4

2023), выполненного по аналогичной методике. Были исследованы образцы из проксимальных частей селевых потоков 2007 и 2014 гг., кроме того, мы имели возможность сравнить трансформацию параметров отложений селя 2014 г. вниз по долине реки. Таким образом, в нашем распоряжении оказались характеристики эталонных образцов селевых и аллювиальных отложений (табл. 1), что позволило нам сравнивать с ними таковые вскрытых в низких террасах осадков и делать заключения об их генетической принадлежности. Основными параметрами, позволявшими проводить разделение, служили коэффициент сортировки, выход тяжелой фракции, наличие глинистых пленок и примазок, окатанность гравия и частиц песка, а также галечного материала, и максимальный размер включенных в толщу валунов и глыб. Совокупность перечисленных данных позволила нам судить о динамике и условиях осадконакопления. Ведущие минералы тяжелой фракции свидетельствуют об источнике поступления материала, комплекс новообразованных минералов легкой фракции — о вторичных изменениях, которым он подвергался.

Кроме того, в процессе маршрутных исследований и в результате анализа разновременных космических снимков сверхвысокого разрешения (0.5–3.0 м) за несколько временных срезов начиная с 1964 г. было изучено геоморфологическое строение территории и особенности трансформации рельефа днища долины, в том числе ее террасового комплекса, на протяжении последних 6 десятилетий. Методика дешифрирования и специфика использования снимков различных спутниковых систем на разные временные срезы детально описаны в (Балдина и др., 2022; Lebedeva et al., 2022; Балдина и др., 2023).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. СТРОЕНИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКА СОСТАВА ОТЛОЖЕНИЙ НИЗКИХ ТЕРРАСОВИДНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Результаты анализа вещественного состава изученных отложений разрезов¹ низких ТП и высокой поймы в нижнем и среднем течении реки (рис. 3, 4) приведены в табл. 2.

Разрез **749** находится ниже обвальной плотины 2014 г. и устья ручья Подъем на левом борту долины (рис. 3, (б)). Террасовидная поверхность высотой над урезом реки 20 м, слабо наклонена в сторону русла (до 5–7°), ее протяженность около 200 м, ширина не превышает 10–15 м. Вскрыта рыхлая толща мощностью до 15 м све-

жих по облику плохо окатанных галечно-валунных отложений пестрого петрографического состава с включением глыб размером до 3–4 м. Выше и ниже по течению (практически от плотины 2014 г. и на 200 м ниже точки опробования) эти отложения прослеживаются на склоне в виде чехла, их мощность меньше и терраса морфологически не выражена. Заполнитель толщи имеет чрезвычайно плохую сортировку, много обломков с признаками дробления. Выход тяжелой фракции (преимущественно пироксен и магнетит) составляет 3.3–5%, в легкой фракции доминируют опал-сметитовые и опал-кристобалитовые агрегаты, вулканическое стекло и полевые шпаты.

Анализ высокодетальных космических снимков 2009 и 2017 гг. показал, что данная ТП сформировалась на повороте долины р. Гейзерной после 2009 г., но до 2017 г. Этот факт в совокупности с характером отложений и их плохой сортировкой позволяет нам заключить, что данная форма рельефа возникла в зоне трансформации обвала 2014 г. в сел (Лебедева, Черноморец, 2023) непосредственно в момент этого события. Таким образом, толща представляет собой отложения проксимальной части селевого потока 2014 г. и ТП является селевой террасой.

Ниже по течению, перед впадением ручья Игрушка, в т. **748**, на левом борту р. Гейзерной на высоте до 4.6 м над урезом реки на участке протяженностью около 50–70 м вскрывается сложно построенная толща (рис. 5, (а)). Верхняя ее часть мощностью около двух метров по составу и строению близка осадкам в т. **749** и представляет собой частично переработанные рекой селевые отложения 2014 г., о чем свидетельствует лучшая сортировка осадка и более высокий выход тяжелой фракции (см. табл. 2). Подстилает толщу маломощный почвенный горизонт, залегающий на горизонтально-слоистых суглинисто-супесчаных отложениях. Судя по составу и слоистости, это осадки одного из временных подпрудных озер, сформировавшихся в долине в недалеком прошлом, где накапливался селевый и склоновый материал. Под ними у уреза вскрывается сцементированная галечно-валунная толща с плохо сортированным заполнителем. Ведущие минералы тяжелой фракции представлены пироксенами, магнетитом и ильменитом, в легкой фракции доминируют опал-сметит-цеолитовые агрегаты, в верхних горизонтах смектит-опаловидные агломераты. Оба нижних горизонта изменены газогидротермальными процессами (см. табл. 2).

На поворотном участке долины, в т. **737** были исследованы отложения высокой поймы (2.5 м) и низкой террасы (4.5 м) р. Гейзерной в несколь-

¹ В точке 737 расстояние между расчистками не превышало 20–30 м, поэтому номер точки не менялся, но при наименовании разрезов добавлялась литера А, В, Д и С.

ких расчистках (рис. 6). Расчистка 737А на левом борту вскрывает отложения пойменного уровня, на котором расположено небольшое термальное озеро. Осадки представлены суглинисто-дресвяным до глинистого материалом с включением мелких валунов и гальки, плохо сортированным, теплым на ощупь, пестрой окраски (пятнами) — от охристо-рыжего до белесого и лимонно-желтого. Материал подвергся сильной гидротермальной проработке после отложения: при визуальном сохранении общей структуры толщи галька выветрелая, легко режется лопатой, на валунах отмечена корка выветривания мощностью до двух сантиметров. Заполнитель в верхней части более тонкого состава — $Md = 0.13$ мм, с глубиной этот показатель увеличивается до 2.23 мм, но при этом сортировка осадка значительно улучшается (от 14.6 до 2.81). Единичные зерна лав окатаны, но преобладают обломки неокатанных зерен. Туфы

сильно выветрелые; пирокластический материал, из которого они состоят, замещен смектитами. Некоторые обломки пород полностью замещены гидроксидами железа. Если в верхнем образце доминируют магнетит и пироксены, а в легкой фракции — смектит-цеолитовые и опал-смектитовые агрегаты, а также гейзерит, то в нижнем — до 40% тяжелой фракции составляют сульфиды. Окатанность материала и его сортировка в нижнем образце (см. табл. 2) позволяют говорить об аллювиальном генезисе осадка; характеристики верхнего образца больше напоминают селевые отложения, но граница между горизонтами четко не выражена. Глубокое выветривание отложений *in situ* не позволяет сделать однозначного вывода.

На противоположном борту долины расположен еще один фрагмент уровня высокой поймы (2.5 м) — 737С (рис. 5). Его протяженность около 200 м при ширине до 70–100 м, на поверхности

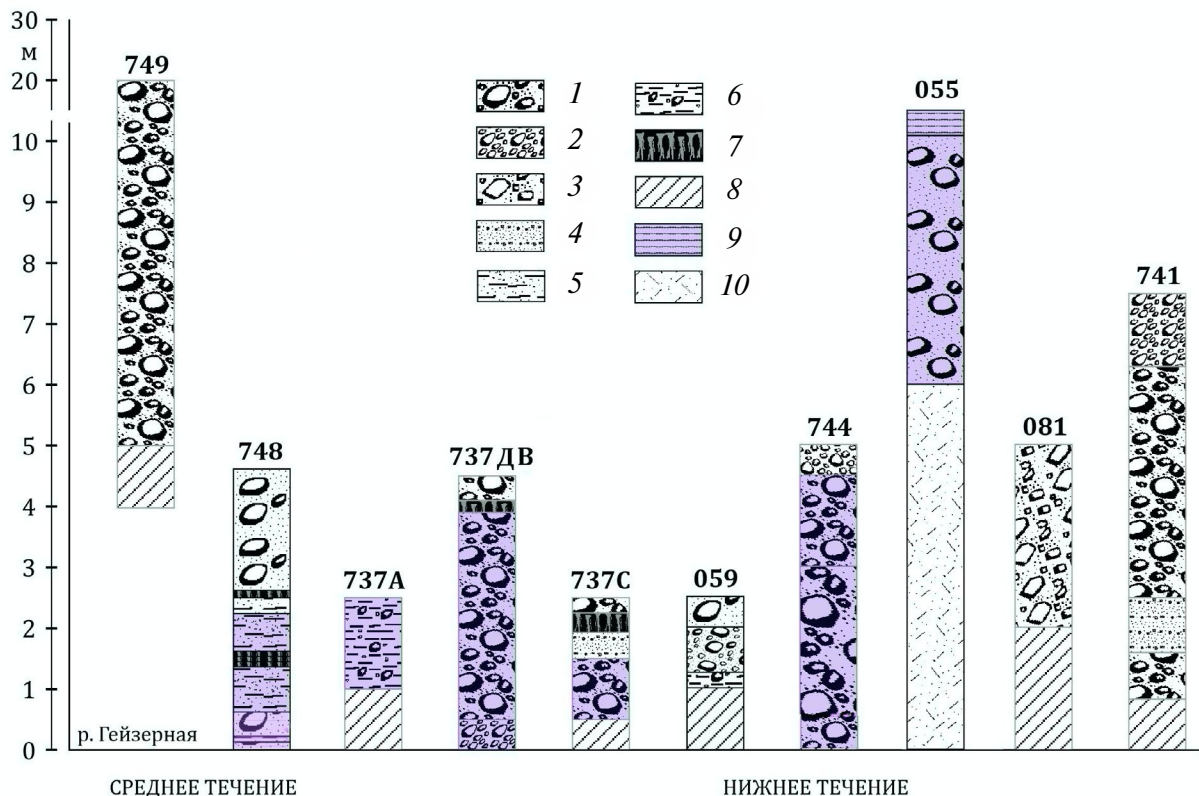


Рис. 4. Литологическое строение изученных разрезов и их положение относительно уреза р. Гейзерной. 1 — галечно-валунный материал с глыбами и плохо сортированным песчано-гравийным заполнителем; 2 — галечно-мелковалунный материал; 3 — щебнисто-глыбовый материал; 4 — переслаивание гравийно-песчаных фракций; 5 — оглиненные пески; 6 — суглинистый до глинистого материал с включением дресвы, гальки и мелких валунов; 7 — почвенно-пирокластический чехол; 8 — осыпь; 9 — горизонты, подвергшиеся гидротермальной проработке; 10 — вулканогенно-озерные отложения гейзерной свиты.

Fig. 4. Lithological structure of the studied sections and their position above the Geysernaya river level. 1 — pebble-boulder material with blocks and poorly sorted sand and gravel filler; 2 — pebble-small boulder material; 3 — crushed stone-block material; 4 — interlayering of gravel-sand fractions; 5 — clayey sands; 6 — loamy to clayey material with the inclusions of debris, pebbles and small boulders; 7 — soil-pyroclastic cover; 8 — scree; 9 — horizons subjected to hydrothermal treatment; 10 — volcanogenic-lacustrine deposits of the geysernaya formation.

Таблица 2. Характеристика вещественного состава отложений низких террасовидных поверхностей долины р. Гейзерной
Table 2. Characteristics of the Geysernaya River valley low terrace-like surfaces sediments

№ изот.	Положе- ние ТП, высота над уре- над зом, м	Основные горизонты, их глубина (м), характер отложений	Особенности литификации / выветривания и залегания	№ образца и глуби- на отбо- ра, м	Характеристика вещественного состава отложений			Наличие гидротер- мальных проявлений	Генезис и возраст отложений (по горизонтам)
					Грубообломоч- ный материал	Md (мм)/Kсорт	Характеристика песчано- гравийного материала (2-10 мм)		
749	Левый борт, выше устья руч. Польем, 20.0	0,0–6,0 – галечно-валунный м-л с глыбами до 3–4 м с сулли- нисто-супесчаным заполнителем с древесой и гравием; с 6,0 – осыпь	Рыхлые, свежие, плохо сортированные	1 – 0,5 2 – 5,0	1–2 КО, пест- рый петро- графический состав	1 – 0,07/13,99 2 – 0,3/13,5	Много неокатанных обломков лав с признаками дробления, на глубине 5,0 м – 28% из них заме- щены гидроксидами Fe	Выше по лево- му борту долины	Селевая терраса 2014 г. – зона трансформации обвала в сель
748	Левый борт, выше устья руч. Игруска, 4,6	I – 0–2 – валунно-галечный м-л плохо сортированный с песча- но-суллинистым заполнителем; II – 2–2,05 – гумусированный горизонт (почва); III – 2,05–3,96 – чередова- ние суллинисто-супесчаных слоев от 2–5 до 15 см рых- вато-бурых с включениями гравия, дресвы, щебня и беже- вато-палевых слоев 2–3 см суллинисто-глинистых; IV – 3,96–4,6 – рыхловато-бурая гравийно-галечная неслоистая толща с многочисленным вклю- чением валунов, заполнитель: от КЗ песка до гравия	I–III – рыхлые; III – слабо выраженная горизонтальная слоистость; IV – сцементи- рованная, плотная толща, выветрелая, сильно измене- на газотидро- термальными процессами	I 1 – 1,8 II 2 – 2,0 III 3 – 2,2 4 – 2,4 5 – 2,6 6 – 2,8 7 – 3,0 8 – 3,2 9 – 3,4 10 – 3,6 11 – 3,8 IV 12 – 4,0 13 – 4,2	I – 0 – 1 КО IV – 2 КО	1 – 0,32/4,11 2 – 0,1/3,69 3 – 0,05/4,84 4 – 0,05/5,4 5 – 0,18/6,25 6 – 0,01/4,31 7 – 0,14/7,1 8 – 0,12/1,96 9 – 0,1/8,34 10 – 0,13/7,29 11 – 0,16/10,4 12 – 0,67/3,22 13 – 0,54/11,42	I – свежие обломки лав и туфов, угловатые, следы дробления, не- которые окрашены серой; II – обилие почвенных агрегатов; III – не окатаны, наросты Fe-глинистого цемента, агрегаты с пузырчато-дырчатой поверх- ностью, смектиты и опал-смек- тит-цеолитовые агрегаты распа- дуются в воде; 4 – до 100% рыхлые песчано-глинистые агрегаты; 5 – доминируют выветрелые об- ломки; 6, 7 – доминируют туфы и песчано-глинистые агрегаты, гейзерит; 8 – 100% – слабо ли- тифицированные песчаные агре- гаты с сетью трубчатых ходов; 9 – обломки почковидного гейзе- рита; 10, 11 – доминируют туфы, есть пироксены с внутрислойным растворением; IV – некоторые обломки туфов и лав окатаны до 2-3 класса, интен- сивно выветрелые. Fe-глинистые пленки-наросты – как остатки цемента, некоторые окрашены серой	Выше по левому борту долины	I – селевой м-л 2014 г., перерабо- танный рекой; II – почва; III – отложения подпрудного озера, где накапливался селевой и скло- новый материал и шла активная га- зогидротермальная проработка; 8 – пепел; IV – аллювиаль- но-селевые (?) от- ложения с переме- жом выветрелого хорошо окатанного м-ла. Постели- ментационная га- зогидротермальная проработка

Таблица 2. Продолжение

737А	Левый борт, выше устья руч. Ступенчатого, 2,5	0,0–1,5 – суглинисто-дресвяный до глинистого м-л с включением мелких валунов и гальки, плохо сортированный, пестрой окраски – от охристо-рыжего до белесого и лимонно-желтого; с 1,5 – осыпь	Рыхлые, гидро-термально про-работанные, выветрелые до глины без переотложения	1 – 0,2 2 – 0,7	1–3 КО, валуны до 0,2 м, с коркой выветривания; галька редкелопатой	1 – 0,13/14,6 2 – 2,23/2,81	Единичные зерна лав окатаны, но преобладают отщепы от окатанных; Fe корочки выветривания, некоторые обломки полностью замещены гидроксидами Fe; в углублениях – глинистые пленки; туфы сильно выветрелые, замещены смектитам	1 – 4,9, M ³⁰ P ²⁴ /Atr ⁵² 2 – 3,1, Cu ³⁸ M ²⁵ P ²² /Atr ⁵⁶	Рядом множественные гидро-термальные проявления	Гидротермально измененные на месте, трудно идентифицируемые отложения: 1 – сел (?) , 2 – аллювий (?)
737ДВ	Правый борт, начало “поворотного” участка, 4,5	I – 0,0–0,4 – галечно-мелководный валунный материал с щебнем с дресвяно-суглинистым заполнителем; II – 0,4–0,6 – почва, супесь, пелел; III – 0,6–4,0 – галечно-валунный материал с глыбами до 1–1,5 м с дресвяно-супесчаным-суглинистым заполнителем; IV – 4,0–4,5 – галечник с мелкими валунами	I – рыхлые, свежие, плохо сортированные; II – рыхлые; III – слабо сцементированные, плохо сортированные; IV – сцементированные, плотные	I – 0,1 II – 0,45 III – 2,5 IV – 3,0 V – 4,1 VI – 4,5	I, III – 0–2 КО IV – 1–3 КО	1 – н/д 2 – 0,04/11,7 3 – 0,78/10,47 4 – 0,15/17,9 5 – 1,18/15,6 6 – 2,15/2,6	I – Fe-глинистые пленки и наросты, обломки лав не окатаны; II – зерна угловатые, в охристой присыпке; III – окатанных зерен нет, наросты Fe-глинистого цемента, корки гейзерита, есть пироксены с внутрислоистым растрескиванием, гидро-термальная проработка на месте; IV – все обломки окатаны до 3–4 кл., лавы окатаны лучше, есть углообразной формы; на поверхности Fe-глинистые пленки и наросты, обломки выветрелые, раздробленные при переотложении, гидро-термально проработанные; пироксены выветрелые, трещиноватые, с внутри-слоистым растрескиванием	1 – 4,4, M ⁴⁵ P ²⁵ /Atr ⁴⁴ Ka ²² 2 – 1,1, P ⁵⁶ /Atr ⁸⁷ 3 – 4,1, P ³¹ M ²⁸ /Atr ⁵⁰ P ²⁵ 4 – 2,1, M ⁴² P ²⁹ /P ³² Ka ²⁷ Atr ²⁶ 5 – 4,4, M ⁴⁵ P ²⁸ /Atr ⁴⁷ Ka ²⁶ 6 – 7,0, M ⁴⁵ P ²⁹ /Atr ⁶²	Выше по склону есть прогретые участки, ниже по течению – много-стенные гидро-термальные проявления	I – сел 2014 г.; II – ППЧ; III – селевые, сильно гидро-термально измененные; IV – аллювий, образованный при перемыве и переотложении выветрелого хо-рошо окатанного м-ла. Постседиментационная гидро-термальная проработка
737С	Правый борт, “поворотный” участок, 2,5	I – 0,0–0,25 – галечно-мелководный м-л с щебнем; II – 0,25–0,57 – ППЧ; прослой торфа, пелла, песка ТЗ, тefры, почва; III – 0,57–90 – переслаивание песка р/з с супесью, дресвой; отрубление вниз по разрезу; IV – 90–200 – галечно-валунный м-л с щебнем и гравийно-супесчаным заполнителем	I – III – рыхлые; II – плохо сортированные; III – III – горизонтально-слоистые; IV – слабо сцементированные, плохо сортированные, теплые	I – 0,2 II – 0,26 III – 0,27 IV – 0,35 V – 0,45 VI – 0,5 VII – 0,8 VIII – 1,2		1 – 0,06/13,6 2 – 0,06/3,77 3 – 0,09/5,3 4 – 0,04/2,8 5 – 0,04/2,02 6 – 0,03/6,75 7 – 0,11/2,67 8 – 2,28/1,39	I – неокатанные, с наростами Fe-глинистого цемента; II – слабо литифицированные агрегаты, шлаки, следы почвенных процессов; III – много сильно измененных зерен туфов; IV – 1–3 КО, разлитая выветрелость и состав, Fe-глинистые пленки и наросты	1 – 5,5, M ⁴⁰ P ³⁰ M ²² /Atr ⁴³ 2 – 7,1, M ³⁸ Atr ³² /Atr ⁸⁰ 3 – 5,5, Atr ⁴⁶ /Atr ⁵⁶ 4 – 29,1, P ⁴¹ M ²³ /Atr ⁸⁷ 5 – 27,2, P ³⁸ Atr ⁷ /Atr ⁷⁵ 6 – 2,9, P ⁶⁷ /P ³¹ 7 – 10,2, M ⁴⁵ P ³¹ /Atr ⁸⁶ 8 – 25,7, M ⁴⁸ P ²⁷ /Atr ⁵⁹	Выше по склону – прогретые участки (термоземы), рядом ниже по течению – много-стенные гидро-термальные проявления	I – сел 2014 г.; II – ППЧ с горизонтами пойменного аллювия; III – отложения подпружного водоема; IV – аллювий с участием селевого м-ла, перетолженные выветрелые хорошо окатанных осадков. Постседиментационная гидро-термальная проработка

Таблица 2. Продолжение

059	Левый борт, напротив устья руч. Лавовый, 2.5м	I – 0.0–0.5 – галечно-мелко-валунный м-л с щебнем и дре-вой с супесчано-суглинистым заполнителем; II – 0.5–1.2 – валунно-галечный м-л с РЗ песчано-гравийным заполнителем; III – 1.2–1.5 – желто-серый су-глинок с включением мелкообло-мочного м-ла разной окатанности	Рыхлые, плохо сортированные	I – 0.2 III – 30% – выветрелая, 37% – ожелезненная	I – 0–2 КО, 10% – битая, 30% – выветрелая, 37% – ожелезненная	1 – 0.02/3.7 2 – 0.19/5.44	I – глинистые и Fe пленки и наросты с включением гейзерита, материал не окатанный; 2 – интенсивно выветрелые, выщелоченные, ожелезненные с наростами цемента, есть окатанные зерна до 2-3 класса, в том числе лавы. Есть корочки гейзерита	1 – 3.0, M ³⁵ Pt ²⁹ /Atr ²⁵ 2 – 13.1, P ⁵⁴ /Гз ²⁶ Atr ²⁵	I – селёвый м-л переработанный рекой; II – аллювий; III – аллювий с перерождением выветрелых хорошо окатанных осадков	Рядом множественные гидротер-мальные проявления	1 – селёвый м-л 2014 г., переработанный рекой; II – аллювий; III – аллювий с перерождением выветрелых хорошо окатанных осадков
744	Правый борт, близ гейзера Крепость, 5.0 м	I – 0.0–0.5 м – галечно-мелко-валунный м-л с щебнем и дре-вой с супесчано-суглинистым заполнителем; II – 0.5–2.0 – галечно-валунный м-л с супесчано-суглинистым заполнителем; III – 2.0–5.0 галечно-валунный м-л с глыбами до 1 м с супесча-но-гравийным заполнителем (до 10–15% объема). Ниже по течению мощность отложений увеличивается до 9 м над урезом	I – рыхлый, плохо сортиро-ванный, теплый; II – слабо це-ментирован, теплый; III – плотно сцементирован- ный, теплый (T = 40°С)	I – 0.1 2 – 0.25 III – 3 – 2.0 III – 4 – 2.5 III – 5 – 3.5	I – 0–3 КО II – 2–3 КО III – 0–3 КО	1 – 0.02/4.9 2 – 0.05/10.5 3 – 0.02/3.5 4 – н/д 5 – 2.18/2.75	I – Fe-глинистые пленки, наро-сты, корочки гейзерита; туфы – есть окатанные, со следами дробления, гидротермально измененные; II – Fe-глинистые присыпки и наросты, смектиты и опал-смектитовые агрегаты III – корочки, примазки, цемент из опал-смектит-кристобалито-вых и гидрослюдистых агрегатов; около 30% обломков ожелезнены. Сколы окатанных лав, зерна вы-ветрелых туфов. Пироксены с внутрислоидным растворением	1 – 2.6, M ³⁵ Pt ³⁵ /Atr ³⁰ 2 – 4.4, M ³⁰ Pt ³² /Atr ⁴⁵ Ka ²⁵ 3 – 2.6, M ²² Atr ²⁰ /Atr ³⁸ 4 – 4.0, P ³³ Pa ²⁵ M ²⁰ /Atr ⁹⁵ 5 – 3.3, P ⁴⁷ /Atr ⁸³	Рядом термоземы, серые бугры, гейзер	1 – селёвый м-л 2014 г., перерабо-танный рекой; II – аллювий; III – аллювий с перерождением выветрелых хорошо окатанных осадков	
055	Правый борт, между руч. Скользкий и Двуглавый, 14–16.0м	I – 0–2(4) м – обломки туфов; II – 2–8 м – галечно-валунный м-л с включением глыб до 2 м, заполнитель древесно-песчаный с включением гравия, есть обломки опала – построек гейзеров; III – 8–14(16) м – вулканогенно-озерные отложения	I – прогретые; II – сцементи-рованные; III – горизон-тально-слоистые, со стороны реки ныряют под урез	II – 1 (около 8 м над урезом)	II – плохо сортированы и окатаны (1, реке 2 КО)	н/д	II – обломки песчаников, граве-литов, прочные, состоят из боль-шого количества обломков пород и минералов. Оболочки, корочки, наросты слоистого строения – чередуются железистые и гейзе-ритовые (опал?) прослои. Пузы-ристые образования гейзерита на поверхности обломков. Пироксе-ны сильно корродированы.	I – 7.08, P ⁷¹ /Гз ⁸¹	Рядом гидротер-мальные проявления (стенка Пийта), сверху – термоземы	I – склоновые (?); II – селёвые (?); III – коренные вулканогенно-озерные. Пост-седиментационная газоидротермаль-ная проработка	
081	Левый борт, ниже устья руч. Водопад-ного, 5.0	0.0–3.0 – щебнисто-глыбовый м-л раздробленных палевых туфов с супесчано-суглинистым заполнителем с древесой; с 3.0 – осыпь. Ниже по течению мощность отложений увеличива-ется до 50 м над урезом.	Рыхлый, плохо сортированный	1 – 0.1 2 – 1.5	Неокатанный, выветрелый; глыбы до 2–4 м	1 – 0.02/4.0 2 – 0.03/9.3	Неокатанные туфы с глинистыми присыпками и ожелезнением, с глинистыми пленками-наро-стами, следы Fe цемента; есть стойкие и распадающиеся в воде агрегаты	1 – 4.4, M ⁴⁵ Pt ²⁰ /Atr ⁷⁹ 2 – 4.3, M ³⁵ I ²² /Atr ³⁰ Ka ³⁵	Смещенный селё м-л частично гидротер-мально проработан	Селёвая плотина 2007 г.	

Таблица 2. Окончание

741	Устье Гейзерной, левый борт р. Шум-ной, близ гейзера Первенец, 7.5	Рыхлые, плохо сортированные отложения, близ гейзера – слабо сцементированные, с коркой выветривания	I – 0.2 II – 2 – 1.4 3 – 4.6 4 – 5.0 III – 5 – 5.3 6 – 5.5 IV – 7 – 6.0	I – II – 0–2 КО III – 1–3 КО IV – 0–2 КО	I – 0.5/6.56 2 – 2.22/1.5 3 – 2.22/2.77 4 – 2.1/1.6 5 – 1.08/3.55 6 – 1.26/2.49 7 – 2.06/4.45	I – II – с глинистыми корками и наростами, материал гравийной размерности плохо окатан; III – без глинистых корок и примазок, материал гравийной размерности окатан; IV – с глинистыми корками и примазками	1 – 3.9, M ⁴⁵ /Atp ⁸³ 2 – 4.2, M ³⁵ P ²⁰ /Atp ⁸¹ 3 – 5.9, M ⁵⁰ /Atp ⁷⁵ 4 – 6.8, M ⁵⁰ /Atp ⁸¹ 5 – 20.4, M ⁶⁰ /Atp ⁵⁷ Пш ²² 6 – 18.9, M ⁴⁸ /Atp ⁵⁰ Пш ²⁹ 7 – 10.1, M ⁵⁰ /Atp ⁶⁶	У уступа террасы – гейзер Первенец. Отложения в устье террасы над танного рекой, на гейзером – гл. 1.4 и 5.0 м – темные, выветрелые	Селевый конус выноса 2007 г. в устье р. Гейзерной: I – II – разные фации селевого м-ла, переработанного рекой, на гл. 1.4 и 5.0 м – осадки заполнения небольших русел; III – пойменный аллювий; IV – аллювиально-селевый материал (?)
-----	--	---	---	--	---	---	--	---	---

Примечания: Римскими цифрами обозначены номера горизонтов, арабскими – номера образцов; н/д – нет данных; КО – класс окатанности; кл – класс; м-л – материал; Тф – тяжелая фракция; Лф – легкая фракция; КЗ – крупнозернистый; РЗ – мелкозернистый; Fe – железо; М – магнетит и титаномангит; П – пироксены; Па – пироксены в сростках с опал-сметитовыми агрегатами; Су – сульфиды неизмененные; И – ильменит; Пш – полевые шпаты; Аtp – смектит-цеолитовые агрегаты с опалом, иногда с включением рудных минералов; Вс – вулканическое стекло; Шл – шлаки; Ка – каолинит; Пз – пемза; Гз – гейзерит с включением рудных минералов. Цифры соответствуют процентному содержанию.

многочисленные выходы термальных вод: кипящие котлы и ручейки, а также участки термального болота и просто прогретого грунта. В уступе расчисткой 737С под свежими селевыми отложениями 2014 г. вскрыт почвенно-пирокластический чехол с прослоями пойменного аллювия. Он сформировался на более тонких по составу горизонтально-слоистых песчано-супесчаных отложениях, накапливавшихся, по-видимому, в условиях временного подпрудного водоема. Подстилают данную толщу грубые валунно-галечные отложения с гравийно-супесчаным заполнителем; они теплые, слабо сцементированные, с высоким выходом тяжелых минералов во фракции 0.1–0.25 мм (25.7%) и с присутствием окатанных до 3 класса зерен размерности крупного песка и гравия, что свидетельствует о переотложении хорошо обработанного водным потоком материала (рис. 5, (б)). В тяжелой фракции доминируют магнетит и пироксены. В условиях подпрудного озера формировалось большое количество обломков слабелитифицированных агрегатов различного состава, которые в зависимости от примесей (в том числе темноцветных минералов) попадали не только в легкую (до 86%), но и в тяжелую фракцию (до 46%). Практически все обломки породообразующих минералов покрыты корками таких агрегатов.

В строении расположенного рядом разреза низкой террасы т. 737ДВ (рис. 5, (г)) выделяются несколько горизонтов: сверху залегает тонкий слой свежих селевых отложений 2014 г., на глубине 0.4–0.6 м вскрывается маломощный ППЧ, ниже – плохо сортированные ($S_0 > 10$) и плохо окатанные галечно-валунные отложения с глыбами. Осадки претерпели гидротермальную проработку и плотно сцементированы, под ними вскрывается также плотно сцементированный, но более хорошо окатанный галечник преимущественно с мелкими валунами. Он отличается от вышележащих отложений лучшей сортировкой ($S_0 = 2.6$) и по своим характеристикам и минералогическому составу заполнителя близок с нижним горизонтом 737С. Здесь много хорошо окатанного материала размерности песка и гравия, обломки выветрелые, раздробленные при переотложении; пироксены с внутрислойным растворением. Верхняя плохо сортированная часть сцементированного материала скорее всего имеет селевое происхождение, а нижнюю можно отнести к русловому аллювию Гейзерной (см. табл. 2).

Ниже по течению “поворотного” участка (см. рис. 2) фрагменты низкой ТП прослеживаются по обоим берегам реки. На левом борту (т. 059) это слабо наклоненная (5–6°) к руслу реки поверхность с многочисленными проявлениями газоги-

дротермальной активности: гейзерами, кипящими источниками и др. В ее уступе напротив устья руч. Лавовый вскрываются плохо окатанный галечно-мелковалунный материал с щебнем и дресвой (переработанные рекой отложения селя 2014 г.), подстилаемые хорошо промытым валунно-галечным материалом, ниже которого залегает прослой суглинка с включением мелкообломочного материала различной окатанности. Обломки размерности гравия и крупного песка интенсивно выветрелые, выщелоченные, ожеженненные, с наростами цемента, есть окатанные зерна до 2–3 класса, в том числе лавы, а также корочки гейзерита. Обломки гейзерита составляют 26% легкой фракции, в тяжелой фракции появляется кристаллический и тонкоагрегатный пирит (12%). В формировании ТП принимали участие и склоновые отложения – в ограничивающем ее тыловой шов уступе склона прослеживаются небольшие (3–5 м) задернованные оползневые ниши.

На противоположном борту долины хорошо выражен фрагмент низкой террасы (**т. 744**), в нижней по течению части которой находится гейзер Крепость (рис. 7). Поверхность ее прогрета, на ней наблюдаются небольшие серные бугры высотой 0.2–0.3 м и диаметром около 1.5 м.

На поверхности террасы доминируют высыпки обломочного материала преимущественно размерности гальки средней и плохой окатанности. На фотографиях, сделанных сразу после события 2014 г. сотрудником заповедника к.г.н. А.В. Завадской, видны свежие селевые отложения, которые перекрыли террасу слоем 0.2–0.3 м. В настоящее время часть обломков уже изменена активными гидротермальными процессами (на них наблюдаются корки ожежнения и серные присыпки) и даже раздроблена в результате температурного воздействия. Перекрывавший террасовидную поверхность маломощный ППЧ, который подстилает селевый материал 2014 г. на фрагментах террас выше по течению, в данном случае нами не обнаружен: видимо, он частично переработан термальными процессами при формировании серных бугров, а частично удален в результате антропогенного воздействия (в 1970–1980-е гг. террасу использовали как вертолетную площадку). ТП была опробована в верхнем по течению участке, где высота уступа составляет около 4.5–5.0 м. Под отложениями селя 2014 г. (рис. 5, д)) прослеживается лучше сортированный галечно-валунный материал с супесчано-суглинистым заполнителем. Среди минералов тяжелой фракции обоих горизонтов доминируют магнетит и пироксены. На обломках пород размерности гравия и крупного песка прослеживаются железисто-глинистые

пленки и наросты, в нижнем горизонте отмечено большое количество смектитов и опал-смектитовых агрегатов не только в легкой фракции, где они составляют до 98%, но и в тяжелой (20%). В основании уступа террасы залегают плотно сцементированные теплые галечно-валунные отложения с включением глыб – вероятно, материал древнего селя. Толща теплая (~40 °С), плотно сцементированная. На обломках размерности гравия и крупного песка – корочки и примазки, следы цемента из опал-смектит-кristобалитовых и гидрослюдистых агрегатов. В тяжелой фракции доминируют пироксены, появляются сульфиды, в легкой – агрегаты различного состава, гейзерит, в том числе ожеженненный. Пироксены с внутрислойным растворением, около 30% обломков ожежены. В связи с более пологим уклоном поверхности террасы вниз по долине, нежели уклон современного русла реки, нижний по течению ее уступ имеет высоту 8–9 м над урезом последней, и там под отложениями древнего селя вскрываются вулканогенно-озерные отложения устьевой свиты (Сугробов и др., 2009).

Ниже по течению на правом борту долины на ее повороте между ручьями Скользящий и Двуглавый опробована ТП высотой 14–16 м – **т. 055**. Ее поверхность наклонена до 5–7° в сторону русла, прогрета, местами лишена растительности. Сверху вскрываются измененные обломки светлых туфов – склоновый чехол, под которыми залегает 6-метровая пачка прогретого сцементированного крупнообломочного плохо окатанного материала галечно-валунной размерности с включением глыб (рис. 8, табл. 2). Обломки прочные, покрыты корочками и наростами слоистого строения – чередуются ожеженненные прослои и прослои гейзерита. Есть пузыристые образования гейзерита на поверхности обломков, корродированные пироксены. Ниже вскрываются горизонтально-слоистые вулканогенно-озерные отложения гейзерной свиты (Сугробов и др., 2009), которые “ныряют” под урез р. Гейзерной. Рядом – на поверхности ТП, у ее подножия и в уступе – многочисленные гидротермальные проявления.

Ниже по течению близ нового устья руч. Водопадного, сформировавшегося после оползня 2007 г. (см. рис. 3, б)), по левому борту долины опробована рыхлая глыбово-щебнистая толща, сложенная в различной степени раздробленным материалом вулканогенно-озерных туфов (**т. 081**), которая протягивается вниз по течению не менее чем на 500 м. Аналогичные отложения встречаются и по правому борту долины. В месте впадения бывшей долины руч. Водопадного, заполненной в 2007 г. смещенным склоновым и селевым материалом

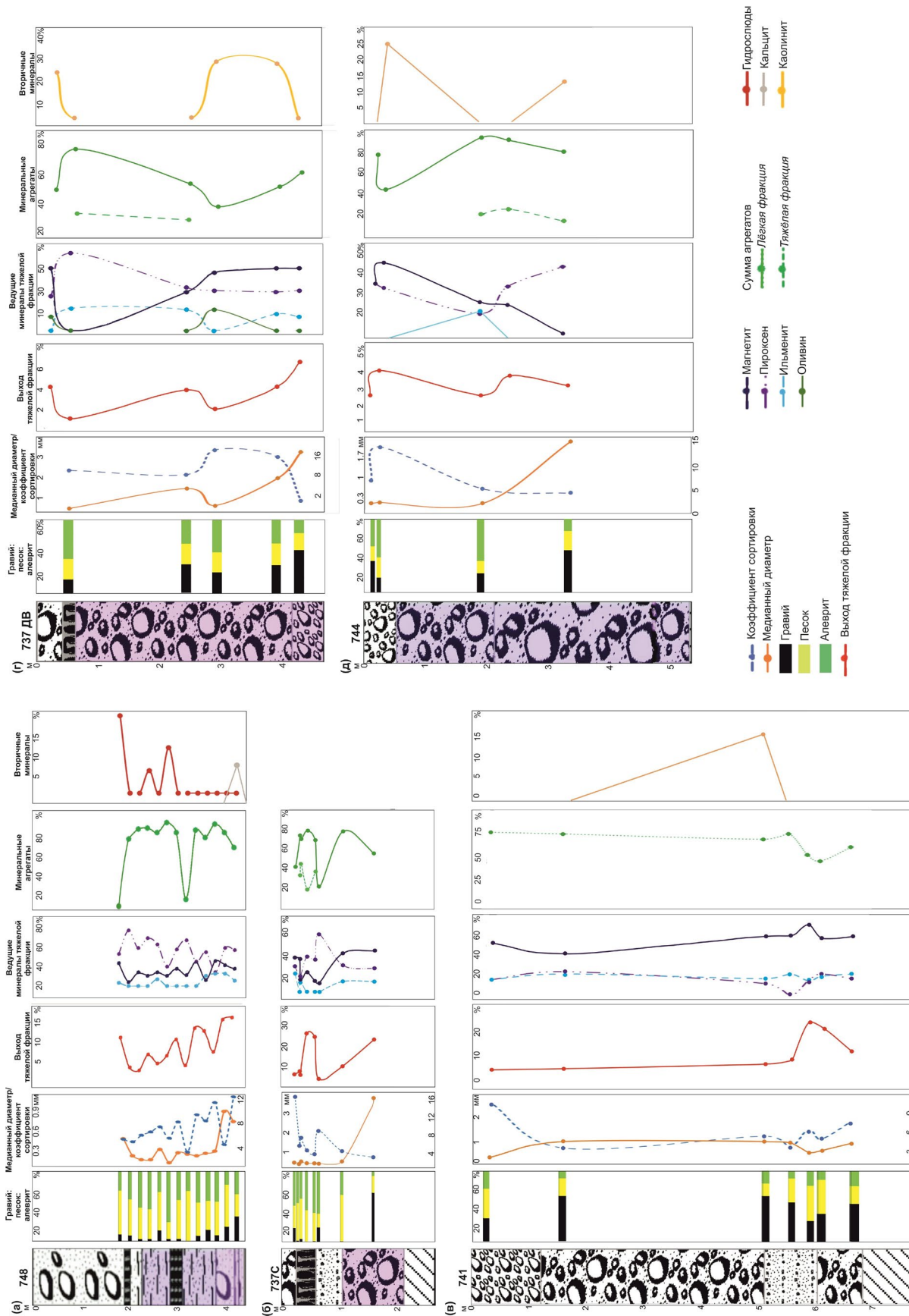


Рис. 5. Результаты гранулометрического и минералогического анализов. Усл. обозначения к литологическим колонкам — см. рис. 4.
Fig. 5. Results of granulometric and mineralogical analyses. Conventional symbols for lithological columns — see fig. 4.



Рис. 6. Положение разрезов (здесь и далее — прямоугольники) высокой поймы (А и С) и 4.5 м террасы (ДВ) в т. 737. Здесь и далее фото Е. Лебедевой.

Fig. 6. The positions of sections (rectangles) of the high floodplain (A and C) and the 4.5 m terrace (ДВ) at the point 737. Here and further, photos by E. Lebedeva.



Рис. 7. Положение секций разреза в т. 744. 1 — гейзер Крепость; 2 — серные бугры.

Fig. 7. The position of the section (rectangles) at the point 744: 1 — geyser Krepost'; 2 — sulfur mounds.

(см. рис. 3, (б)) мощность отложений увеличивается до 50 м, далее уменьшаясь до 10–15 м. Это селевые отложения 2007 г., перегородившие долину и сформировавшие временную плотину (рис. 9). Характерная черта — более слабый, а в верхней по течению части и обратный уклон бывшей плотины относительно уклона русла р. Гейзерной. На поверхности плотины хаотично чередуются бугры и западины с перепадом высот до 5–7 м. В тяжелой фракции опробованных отложений преобладают магнетит, пироксены и ильменит, в легкой — от 50 до 79% составляют опал-смектитовые и опал-смектит-цеолитовые агрегаты, а также смектит и каолинит. Зерна минералов и обломки пород покрыты глинистыми пленками-наростами, многие ожелезнены.

В самом нижнем изученном створе, близ устья р. Гейзерной (левобережье р. Шумной) в т. 741 (рис. 5, (в)) опробована террасовидная поверхность высотой 7.5 м, сложенная также в основном раздробленным вулканогенно-озерным туфом. Это фрагмент селевого конуса выноса в устье реки, сформировавшегося в результате катастрофического события 2007 г. и последующего поэтапного разрушения возникшего подпружного озера. Сверху вниз вскрываются: пачка рыхлого плохо окатанного галечно-валунного материала (преимущественно туфов), ниже аналогичный материал с заполните-

лем несколько лучшей сортировки (табл. 2). Обломки песчано-гравийной размерности покрыты глинистыми корками и наростами, плохо окатаны. Ниже — чередование прослоев гравия, песка и гальки с отдельными валунами. Материал гравийной размерности окатан, глинистые пленки и примазки отсутствуют, что позволяет говорить о лучшей переработке материала водным потоком. Внизу вскрывается галечник с валунами с глинистыми корками и примазками. Минералогический спектр близок по всей толще: тяжелая фракция представлена магнетитом, пироксенами и ильменитом, в легкой — доминируют смектит-цеолитовые агрегаты. У уступа террасы располагается гейзер Первенец, который при формировании конуса выноса в устье Гейзерной изначально был перекрыт селевым материалом, но в дальнейшем последний был размыв водными Шумной и Гейзерной (рис. 10).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ. ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ НИЗКИХ ТЕРРАСОВИДНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Террасовидные поверхности, сложенные обломочным материалом со следами водной обработки, развиты в долине локально: они встречаются в виде непротяженных и маломощных фрагментов.



Рис. 8. Строение ТП в т. 055: селевые отложения (II), залегающие на вулканогенно-озерных туфах гейзерной свиты (III) и перекрытые склоновым материалом (I).

Fig. 8. Structure of the terrace at the point 055: debris flow deposits (II), overlying volcanogenic-lacustrine tuffs of the geysernaya formation (III) and overlain by slope material (I).

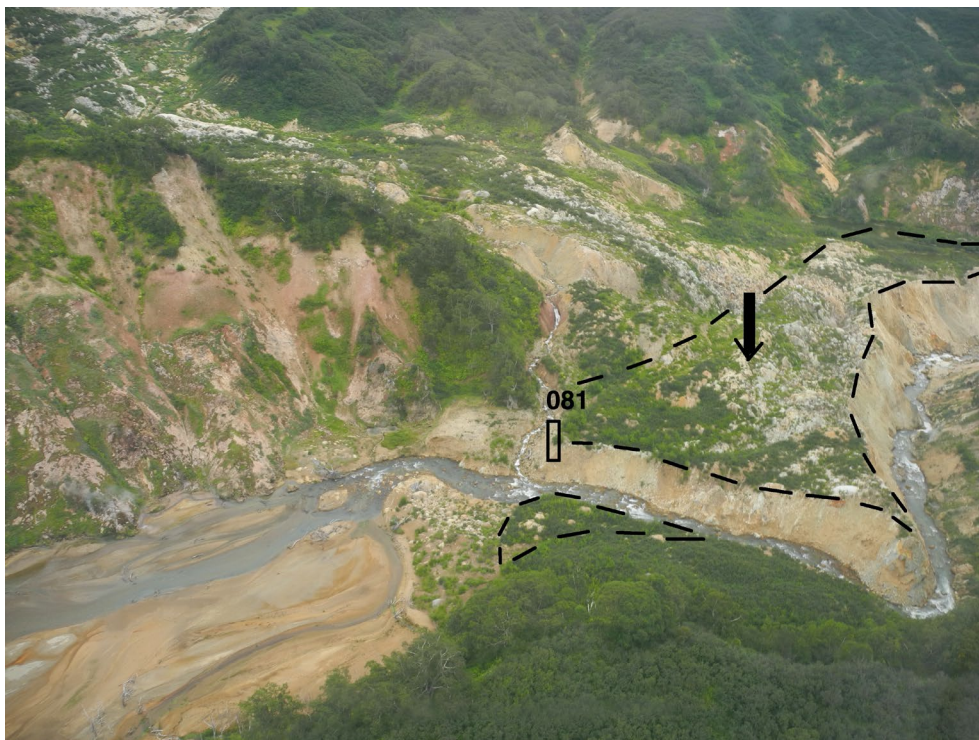


Рис. 9. Положение разреза т. 081 в теле прорезанной р. Гейзерной селевой плотины 2007 г. (черная стрелка, фрагменты плотины ограничены пунктиром) близ нового устья руч. Водопадного.

Fig. 9. Position of section at the point 081 in the body of the debris flow dam (nearby Vodopadny creek mouth) cut through the Geysernaya River in 2007 (black arrow, fragments of the dam are limited by dotted lines).



Рис. 10. Разрез 7.5 м ТП в устье р. Гейзерной (т. 741). На переднем плане (черная стрелка) – парит гейзер Первенец.

Fig. 10. Section of 7.5 m terrace at the Geysernaya River mouth (point 741). In the foreground (black arrow) is the Pervenets geysernaya.

В целом в их строении доминирует грубый слабо окатанный (1, реже 2 класс) галечно-валунный материал с включением щебня и крупных (до 1–1.5 м) глыб с плохо сортированным заполнителем.

Проведенные ранее исследования *руслового аллювия* р. Гейзерной и *селевых отложений* 2007 и 2014 гг. (Lebedeva et al., 2023) позволили установить, что в галечной фракции аллювия вулканогенно-осадочные породы и лавы представлены примерно в равных количествах с небольшим доминированием туфов — 52 и 43% соответственно. Отложения селей 2007 и 2014 гг. различаются по петрографическому составу, который зависит от места локализации гравитационных событий, которые предвещали сход селей: обломочный материал первого представлен вулканогенно-озерными туфами, а во втором доминируют обломки лав (до 70%). Селевый материал размерности гальки окатан хуже, нежели аллювий: $K_{ок} = 1.3–1.5$, тогда как у аллювия — от 1.7 до 2.4. Сортировка мелкообломочной составляющей руслового аллювия плохая ($S_0 = 2–6$), но селевого материала — гораздо хуже, его коэффициент сортировки нередко достигает 10–13. Гравийная и песчаная фракции селевых отложений (в отличие от аллювия) не окатаны, для них типично наличие глинистых и глинисто-железистых пленок, примазок, присыпок, которых, как правило, русловой аллювий лишен, если только на участке опробования не идет перебив селевого материала. Отложения селей включают крупные (1–3 м, а иногда и 4 м) глыбы и валуны (табл. 1).

Минералогический анализ мелкопесчаной фракции современного аллювия показал, что выход тяжелой фракции колеблется в пределах от 2.6 до 9%, в отдельных случаях достигая 25 и даже 50%. В нем преобладают оксиды и гидроксиды железа по пириту, значительную долю составляют неизменные сульфиды, магнетит и пироксены, реже — ильменит. В качестве аксессуаров (до 1–3%) встречаются роговая обманка, оливин, эпидот, ставролит, циркон, гранат. В легкой фракции доминируют продукты преобразования пирокластиков до смектитов, смектит-цеолитовых, опал-кристобалитовых агрегатов или их сочетаний, общее содержание которых может достигать 70%. Для многих агрегатов характерно ожелезнение. Содержание кварца, полевых шпатов обычно не превышает 12–14%. Широко представлены вторичные минералы — цеолит, каолинит, гидрослюда, кальцит, но их доля редко превышает первые проценты. В большинстве проб присутствует гейзерит в виде тонкоагрегатного опала и опал-кристобалитовых агрегатов. Вулканическое стекло представлено преимущественно обсидианом, единичны зерна шлаков и обломки пемзы.

Опираясь на эти данные (табл. 1), литологический состав отложений изученных разрезов, результаты дешифрирования снимков и полевых геоморфологических наблюдений, мы можем заключить, что низкие террасовидные поверхности в долине р. Гейзерной имеют сложное строение разрезов, которые включают несколько генетических типов отложений: селевые, аллювиальные, подпрудно-озерные и переходные — аллювиально-селевые и аллювиальные с переотложением более древнего окатанного материала (см. табл. 2). Исключение составляют разрезы **748** и **081**, целиком сложенные современным селевым материалом.

Сравнение отложений ТП с образцами из вулканогенно-озерных отложений свидетельствует, что основные черты минералогического спектра отложений террас — доминирующие порообразующие минералы — обусловлены именно размывом этих отложений. В целом питающая провинция практически не менялась на протяжении формирования ТП. В минералогическом спектре мелкопесчаной фракции образцов из изученных разрезов по сравнению с современным аллювием резко уменьшается содержание гидроксидов железа по пириту и неизменных сульфидов, при этом набор аксессуаров и вторичных минералов остается прежним. В легкой фракции также доминируют продукты преобразования пирокластиков до опал-смектит-цеолитовых агрегатов, встречается гейзерит. Выход тяжелой фракции в отложениях террас обычно невелик и колеблется в пределах 2–7%.

В ряде разрезов (т. **748**, **737С**) присутствуют прослои горизонтально-слоистого супесчано-гравийного материала — следы существования временных подпрудных водоемов. В минералогических спектрах этих отложений расширяется набор вторичных минералов и спектр агрегатов (табл. 2, рис. 4). В частности, там обнаружены каолинит, кальцит, гидрослюда, гейзерит, гипс, карбонаты, цеолиты, смектит. Наряду с опал-смектит-цеолитовыми агрегатами в различных горизонтах встречаются опал-смектитовые, каолинит-смектитовые, цеолит-смектитовые агрегаты, смектит-опаловидные агломераты. В отдельных горизонтах до 100% легкой фракции составляют слаболитифицированные песчано-глинистые агрегаты, иногда с системой трубчатых ходов, пузырчато-дырчатой поверхностью, что свидетельствует о газогидротермальной деятельности, продолжавшейся в условиях подпрудного водоема. Подобные явления мы наблюдали и на участке спущенного озера 2007–2014 гг. (Lebedeva et al., 2023). Прослеживаются здесь и прослои сортированного песка ($S_0=1.6–2.8$) с повышенным выходом тяжелой

фракции (до 13–29%). Аналогичные по характеристикам прослой встречаются и в разрезе **741**. По заключению Э.Г. Ананьевой (1998), это осадки заполнения небольших русел, типичные для конусов выноса и внутренних дельт в пределах подпрудных озер. Условия осадконакопления в подпрудных водоемах достаточно изменчивы, но аккумуляция идет быстро: в водоеме, просуществовавшем всего лишь около 7 лет, в створе гейзера Большой за это время накопилось около 7–8 м отложений (Lebedeva et al., 2023).

В приурезовой части некоторых из изученных разрезов (**748**, **737ДВ** и **С**, **059**, **744**) присутствует окатанный (1–3 класс) галечно-мелковалунный материал, который по своим характеристикам может быть отнесен к *аллювиальным* отложениям. В гравийно-песчаной фракции здесь наряду со слабоокатанными обломками гравийной и песчаной размерностей обнаружено то или иное количество хорошо окатанных (до 3–4 класса) обломков не только относительно мягких туфов, но и прочных лав, а также продукты их дробления. Большинство окатанных обломков выветрелые, с коркой ожелезнения, иногда целиком проработаны железистыми растворами, выщелоченные; отдельные зерна со следами внутрислойного растворения; часто на них отмечаются следы и наросты железисто-глинистого цемента. Все это свидетельствует о переотложении каких-то древних осадков, по-видимому, флювиального генезиса. В некоторых случаях встречаются обломки лав утюгообразной формы, что, по заключению Э.Г. Ананьевой (1998), свидетельствует о перемыве ледникового материала.

Для отложений *современных селей*, слагающих ТП (т. **748**, **081**, **741**) или перекрывающих их (**737ВД**, **744**), характерна зависимость их петрографического состава от локализации конкретных обвалов, приведших к их формированию, так как в настоящее время обвально-оползневыми процессами в долине затронуты уже не только вулканогенно-озерные отложения, выполнявшие кальдеру и вскрывающиеся рекой, но и борта долины, сложенные вулканогенными образованиями иного генезиса — в частности, лавами.

Мощность сохранившихся селевых отложений в разрезах чаще составляет 2–4 м (**737ДВ**, **744**, **748**), увеличиваясь до 15 м в т. **749** и до 50 м в районе устья руч. Водопадного. В одном разрезе может наблюдаться и два горизонта разновозрастного селевого материала: сверху это отложения селя 2014 г., перекрывающие ТП, ниже — осадки более древних селей.

В разрезе **081** (селевая плотина 2007 г.) вскрыты щебнисто-глыбовые отложения с минимальными

следами обработки — стадия перехода обвала-оползня в селя. Селевая терраса в т. **748** сформировалась также на участке трансформации обвала 2014 г. в селя (Лебедева, Черноморец, 2023), но при этом был захвачен и аллювий р. Гейзерной, что обусловило пестрый петрографический состав обломков и наличие небольшого количества материала, окатанного до 2 класса. В разрезе **741** может быть выделено несколько горизонтов селевых отложений. В основании залегают аллювиально-селевые осадки — результат перемыва рекой материала какого-то раннего селевого события (горизонт IV), перекрытые пойменным аллювием (III). Выше залегает горизонт II — первый мощный выплеск селя 2007 г. по долине Гейзерной с формированием конуса выноса в месте расширения долины на участке слияния с Шумной. В его толще прослеживаются лучше сортированные осадки заполнения мелких русел. Верхний горизонт (I), по-видимому, представляет собой материал более водонасыщенного селя, возможно, сформировавшегося при первом мощном прорыве подпрудного озера 2007 г. (Пинегина и др., 2008).

Выше отмечалось, что для ряда крупных фрагментов изученных террас характерен меньший уклон по сравнению с современным продольным профилем Гейзерной: если среднее падение реки в нижнем ее течении составляет 0.06–0.08, т.е. 4–5°, то уклон, например, ТП в т. **744** — около 0.02, т.е. 1–2°. Не исключено, что эта поверхность, как и разрез **081**, представляет собой фрагмент какой-то древней селевой плотины. Сейчас тело оползня и плотина 2007 г. хорошо дешифрируются на снимках (рис. 3, (б)) и на местности, однако, очевидно, что через несколько десятков — первые сотни лет, когда растительность полностью восстановится и бугристо-западинный микрорельеф частично сnivelуруется, то прорезаемое рекой аккумулятивное тело и слагающий его материал, некогда заполнивший долину руч. Водопадного и перегородивший р. Гейзерную, вполне могут интерпретироваться как терраса, сложенная плохо обработанными селевыми отложениями. Свою роль сыграют и газогидротермальные проявления в долине руч. Водопадного, которые будут способствовать трансформации — цементации или же выветриванию до глины вынесенного селем материала.

На примере отложений современных селей видно, что нет прямой зависимости возраста осадка от высоты его залегания над урезом реки. Отложения селя 2007 г. прослеживаются на отметках от 0 до 50 м над современным урезом, а селя 2014 г. — до высоты 20 м. Галечно-валунный материал селя 2014 г. был обнаружен нами и на отметках около

40 м близ устья руч. Ступенчатого, но, ввиду маломощности отложений, за прошедшие годы он был размыт и снесен со склона.

Таким образом, проведенные исследования позволили сделать вывод о преимущественно селевом генезисе отложений низких террас р. Гейзерной, о разновысотности залегания заведомо одновозрастных отложений, а также о многократности селевых событий в долине.

Гидротермальная проработка. В днище долины р. Гейзерной многочисленны газогидротермальные проявления. Работы Ю.В. Фроловой с коллегами (2015, 2019) показали, что в зонах воздействия гидротерм обломки вулканического стекла в дацитовых туфах замещаются глинистыми минералами и цеолитами. Действительно, даже в большинстве образцов современного аллювия реки отмечается частичное или полное замещение пирокластиков цеолитом и опалом, иногда встречаются смектитовые и цеолитовые агрегаты (Lebedeva et al., 2023).

Полевое обследование низких террас показало, что на многих их фрагментах присутствуют разнообразные проявления газогидротермальной активности: гейзеры, кипящие источники, термальные ручейки и болота, серные бугры и просто прогретые участки грунта (термоземы). Все это привело к трансформации слагающих их пород, которая выражается в разноплановом изменении обломочного материала и цементации (чаще) либо выветривании до глин заполнителя (рис. 4).

Морфологическая сохранность террас лучше в случае цементации отложений. Небольшие фрагменты, сложенные рыхлым или выветрелым до глин материалом (т. 737А), легко размываются и уничтожаются при прохождении паводков или селевых событий. Различная степень *гидротермальной переработки* как исходных отложений, так и флювиальных осадков в днище долины (до и после формирования ТП) привела к значительному изменению вещественного состава отложений с доминированием вторичных минералов и сложных агрегатов, в том числе с включением рудного вещества. Степень измененности (цементации и выветрелости) отложений в результате газогидротермальной деятельности зависит от близости и активности термопроявлений. Газогидротермальные процессы затрудняют определение возраста осадка, так как приводят к его значительной трансформации, в том числе к глубокому выветриванию как крупных обломков, так и отдельных зерен минералов. Органический материал, пригодный для датирования, за исключением современных почв, погребенных под осадками селя 2014 г., в изученных разрезах не обнаружен.

ВЫВОДЫ

1. Террасовидные поверхности, сложенные обломочным материалом со следами водной обработки, представлены в долине локально: они встречаются в виде непротяженных фрагментов. В них вскрывается преимущественно грубый, плохо сортированный и слабо окатанный валунно-галечный материал с включением глыб и щебня, который по своим характеристикам может быть отнесен к селевому. Горизонты лучше обработанного аллювиального галечно-валунного материала разделяют или подстилают осадки селей. Встречаются и горизонтально-слоистые отложения тонкого, преимущественно супесчано-гравийного материала — следы существования кратковременных подпрудных водоемов. Иногда прослеживаются несколько горизонтов селевого материала, разделенных прослоями почвенно-пирокластического чехла, аллювия или озерных отложений, что свидетельствует о разновременности их формирования.

2. Для долины р. Гейзерной часто характерен меньший уклон фрагментов террас по сравнению с современным продольным профилем реки. Вероятно, они формировались в результате образования местных базисов эрозии, возникавших из-за неустойчивости склонов и гравитационных смещений пород с перегораживанием русла. Некоторые ТП представляют собой участки плотин, созданных обвально-оползневыми и селевыми процессами.

3. Роль селевых процессов и, соответственно, селевого материала в формировании ТП весьма значительна. Геоморфологический анализ разновременных снимков показал, что в момент крупных селевых событий в долине происходило образование селевых террас, плотин и конусов выноса. Локализация осадков современных селей показывает, что нет прямой зависимости возраста отложений от высоты их залегания над урезом реки. Осадки селя 2007 г. прослеживаются на отметках от уреза до 50 м над ним, а селя 2014 г. — до +20 м, а в первоначальный момент — и до 40 м. Отложения древних селей сохранились в высотном интервале от 0.5 до 12 м.

4. Отмечается разноплановая гидротермальная проработка отложений террас на соседних участках: если в непосредственной близости имеются гидротермальные проявления либо участки прогретого грунта, то слагающий ТП материал может быть сцементированным или, напротив, выветрелым до глины. Морфологическая сохранность террас лучше в случае цементации отложений. Небольшие фрагменты, сложенные рыхлым или выветрелым до глин материалом, легко размываются и уничтожаются при прохождении паводков или селевых событий по долине реки.

5. Выветривание материала происходило в несколько этапов. Под воздействием газогидротерм выветривались коренные породы на бортах долины, этот процесс продолжался и на стадии аккумуляции осадков в днище, особенно в подпрудно-озерных условиях. Происходит и дальнейшее изменение материала террасовидных поверхностей под воздействием близлежащих термальных источников. Наблюдения показывают, что этот процесс идет достаточно быстро, о чем свидетельствует обилие измененного обломочного материала на непосредственном контакте с различными газогидротермами даже в заведомо свежих аккумулятивных толщах (селевые отложения 2007 и 2014 гг.). Следствием активного газогидротермального воздействия является повсеместная переработка материала, его выветривание, формирование разнообразных агрегатов, агломератов и вторичных (новообразованных) минералов.

6. Накопление аллювиальных отложений, которые вскрываются в основании ряда разрезов, сопровождалось перемывом хорошо окатанного материала каких-то более древних осадков. Однако в настоящее время мы не можем точно определить время данного этапа. Врезание, сменявшее аккумуляцию, способствовало активизации склоновых процессов и селеформирования, вследствие чего аллювиальный режим в долине стал часто сменяться озерным из-за периодического подпруживания русла реки оползневой и/или селевым материалом. Калиброванный радиоуглеродный возраст почвы, погребенной одним из оползней в нижнем течении реки, составляет 6020–6270 лет (Белоусов, Белоусова, 2017). Это позволяет предположить, что во второй половине голоцена склоновые процессы уже активно шли в долине р. Гейзерной. Размыв временных плотин приводил к изменению положения русла реки и формированию террас.

7. Низкие террасы формировались и сохранились в днище долины р. Гейзерной преимущественно на участке ее максимального расширения, которое, по-нашему заключению (Лебедева и др., 2020, 2023), связано с наибольшей активностью склоновых, а соответственно, и селевых процессов в пределах Гейзерного термального поля. В целом близкая картина связи распространения низких террасовидных поверхностей с участками активизации склоновых и селевых процессов в областях развития газогидротерм наблюдалась нами и в долинах иных рек Курило-Камчатского региона, в частности, на склонах вулканов Менделеева (о-в Кунашир) и Баранского (о-в Итуруп).

БЛАГОДАРНОСТИ

Комплексная методика исследований опробована в рамках темы государственного задания Института географии РАН — FMWS-2024-0005. Полевые и аналитические работы проведены за счет гранта Российского научного фонда № 21-17-00216, <https://rscf.ru/project/21-17-00216/>. Авторы глубоко признательны Э.Г. Ананьевой за проведенный морфоскопический анализ, всестороннюю помощь и консультации в процессе исследований, А.В. Григорьевой — за выполнение минералогического анализа, всем участникам полевых исследований, а также сотрудникам и волонтерам Кроноцкого заповедника — за всестороннюю помощь и поддержку. Особая благодарность Н.В. Аникиной за помощь в доработке графических материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ананьева Э.Г. (1998). Литолого-минералогический анализ при геоморфологических и палеогеографических исследованиях. М.-Смоленск: Изд-во СГУ. 140 с.
- Атлас долины реки Гейзерной в Кроноцком заповеднике. (2015). Ред. А.В. Завадская. М.: КРАСАНД. 88 с.
- Балдина Е.А., Лебедева Е.В., Аникина Н.В. (2023). Активность геоморфологических процессов на склонах речных долин в условиях газогидротермальных проявлений (по разновременным снимкам и ЦМР). В сб.: *ИнтерКарто. ИнтерГИС*. Т. 29. С. 272–287. <http://dx.doi.org/10.35595/2414-9179-2023-1-29-272-287>
- Балдина Е.А., Лебедева Е.В., Медведев А.А. (2022). Методика дешифрирования архивных и современных космических снимков для изучения динамики склоновых процессов в долине р. Гейзерная (Камчатка). В сб.: *ИнтерКарто. ИнтерГИС*. Т. 28. № 1. С. 266–283. <http://dx.doi.org/10.35595/2414-9179-2022-1-28-266-283>
- Белоусов А.Б., Белоусова М.Г. (2017). Роль оползней в формировании гейзеров Долины Гейзеров, Камчатка. В сб.: *Материалы конференции “Вулканизм и связанные с ним процессы”*. Петропавловск-Камчатский: ИВиС. С. 155–157.
- Геологическая карта. Лист N-57, масштаб 1:1 000 000, 3-е издание. (2011). [Электронный ресурс]. URL: https://vsegei.ru/ru/info/ggk_1000ns/ (дата обращения: 10.11.2023).
- Геологическая карта. Лист N-57-XXI, N-57-XXII, масштаб 1:200 000, 1-е издание. (1981). [Электронный ресурс]. URL: https://vsegei.ru/ru/info/pub_ggk200-1/ (дата обращения: 10.11.2023).
- Двигало В.Н., Мелекесцев И.В. (2009). Геолого-геоморфологические последствия катастрофических обвалов и обвально-оползневых процессов в Камчатской Долине Гейзеров (по данным аэрофотограмметрии). *Вулканология и сейсмология*. № 5. С. 24–37.
- Двигало В.Н., Свирид И.Ю., Шевченко А.В., Жарков Р.В. (2014). Мониторинг и прогноз селевых процессов в камчатской Долине гейзеров на основе фото-

- грамметрических исследований. В сб.: *Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита: материалы III Международной конференции, Южно-Сахалинск, 22–26 сентября 2014 г.* Южно-Сахалинск: Сахалинский филиал Дальневосточного геологического института ДВО РАН. С. 105–108.
- Зеркаль О.В., Гвоздева И.П., Фролова Ю.В. (2019). Развитие оползневых процессов в долине р. Гейзерной. В сб.: *Геодинамические процессы и природные катастрофы: тезисы докладов III Всероссийской научной конференции с международным участием, г. Южно-Сахалинск, 27–31 мая 2019 г.* Южно-Сахалинск: Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН. С. 138.
- Колосова Г.Н., Ананьева Э.Г. (1974). Методика минералогического анализа рыхлых отложений для палеогеоморфологических построений (на примере Северо-Востока СССР). *Геоморфология*. № 4. С. 26–35.
- Ладыгин В.М., Фролова Ю.В., Рычагов С.Н. (2014). Преобразование эффузивных пород под воздействием кислотного выщелачивания поверхностными термальными водами (геотермальная система Баранского, о. Итуруп). *Вулканология и сейсмология*. № 1. С. 20–37.
- Лебедева Е.В. (2022). Влияние газогидротермальной деятельности на формирование рельефа речных долин геотермальных зон. *Геоморфология*. Т. 53. № 5 (спецвыпуск). С. 116–126.
- Лебедева Е.В., Сугробов В.М., Чижова В.П., Завадская А.В. (2020). Долина р. Гейзерной (Камчатка): гидротермальная деятельность и особенности рельефообразования. *Геоморфология*. № 2. С. 60–73. <https://doi.org/10.31857/S0435428120020066>
- Лебедева Е.В., Черноморец С.С. (2023). Селевая активность и особенности селеформирования в долине р. Гейзерной (Камчатка). *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. № 3. Вып. 59. С. 5–19. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2023-3-59-5-19>
- Леонов В.Л., Гриб Е.Н., Карпов Г.А. и др. (1991). Кальдера Узон и Долина Гейзеров. В сб.: *Действующие вулканы Камчатки*. Т. II. М.: Наука. С. 94–141.
- Пинегина Т.К., Делемень И.Ф., Дрознин В.А. и др. (2008). Камчатская Долина гейзеров после катастрофы 3 июня 2007 г. *Вестник ДВО РАН*. № 1. С. 33–44.
- Сугробов В.М., Сугрובה Н.Г., Дрознин В.А. и др. (2009). Жемчужина Камчатки — Долина Гейзеров. Научно-популярный очерк, путеводитель. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс. 108 с.
- Устинова Т.И. (1955). Камчатские гейзеры. М.: Географгиз. 120 с.
- Фролова Ю.В., Гвоздева И.П., Чернов М.С., Кузнецов Н.П. (2015). Инженерно-геологические аспекты гидротермальных преобразований туфогенных пород Долины гейзеров (полуостров Камчатка). *Инженерная геология*. № 6. С. 30–42.
- Фролова Ю.В., Зеркаль О.В., Гвоздева И.П. (2019). Влияние гидротермальных преобразований на физико-механические свойства туфогенных пород Долины гейзеров и их роль в формировании оползней. В сб.: *Геодинамические процессы и природные катастрофы: тезисы докладов III Всероссийской научной конференции с международным участием, г. Южно-Сахалинск, 27–31 мая 2019 г.* Южно-Сахалинск: Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН. С. 186.
- Шевченко А.В., Двигало В.Н., Свирид И.Ю. (2018). Дистанционные исследования геоморфологических процессов на вулканических объектах Камчатки. В сб.: *XXXVI Пленум ГК РАН: Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием “Геоморфология — наука XXI века”*. Барнаул: Изд-во АГУ. С. 403–410.
- Eshel G., Levy G.J., Mingelgrin U., Singer M.J. (2004). Critical Evaluation of the Use of Laser Diffraction for Particle-Size Distribution Analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* V. 68. P. 736–743. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.7360>
- Lebedeva E.V., Baldina E.A., Medvedev A.A. (2022). Dynamics of Slope Processes in the Geysernaya River Valley (Kamchatka) According to the Interpretation Data of Multi-Temporal Space Images. *Dokl. Earth Sci.* V. 507 (Suppl. 1). S9–S18. <http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X22601262>
- Lebedeva E.V., Zharkov R.V. (2022). Accumulative Landforms in Valleys with Gas-Hydrothermal Occurrences (from the Example of Watercourses of Some Volcanic Massifs in the Kuril-Kamchatka Region). *Dokl. Earth Sci.* V. 506 (Suppl. 1). P. 7–18. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22700131>
- Lebedeva E.V., Zakharov A.L., Mikhalev D.V. (2023). The Geysernaya River Alluvium (Kamchatka): Composition and Features of Formation. *Dokl. Earth Sci.* V. 513 (Suppl. 1). P. 1–11. <https://doi.org/10.1134/S1028334X23602432>

FORMATION OF TERRACES IN A RIVER VALLEY WITH ACTIVE GAS-HYDROTHERMAL MANIFESTATIONS (THE GEYSERNAYA RIVER VALLEY, KAMCHATKA PENINSULA AS AN EXAMPLE)²

E. V. Lebedeva^{a, #}, A. L. Zakharov^{a, ##}, and A. V. Kotenkov^{a, ###}

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

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

^{##}*E-mail: zaanleo@gmail.com*

^{###}*E-mail: avkotenkov@yandex.ru*

The morphology, structure and composition of sediments at low terraces which occur in the form of non-extended fragments in the Geysernaya River valley have been studied. Coarse, poorly sorted and weakly rounded debris flow material of different age generations are dominated in the sections. Layered sand and gravel deposits that accumulated under dammed reservoir conditions were exposed in some areas. Alluvial deposits are represented by thin layers of pebbles with boulders of better roundness and sorting with sand and gravel filler, underlying and/or overlying debris flow deposits. Some fragments of terrace-like surfaces are characterized by a smaller slope compared to the longitudinal profile of the river: apparently, they represent areas of former debris flow – landslide dams. Sediments of modern debris flows can be traced from 0 up to 50 m and of ancient once from 0.5 to 12 m above the river, which indicates the absence of a direct dependence of the age of sediments from the level of their occurrence. The change in loose material is due to the proximity and activity of thermal manifestations of the Geysernoe thermal field. Gas-hydrothermal processes lead to a significant transformation of the composition and properties of the analyzed sediments – mainly to their cementation, which makes it difficult to determine the time of sediment formation. The structure of the studied sections indicates the repeated occurrence of debris flows along the valley and the formation of temporary dammed reservoirs there as a result of the landslides and debris flow dams. The active supply of material from the slopes and its redeposition by debris flows causes poor rounding and sorting of sediment, and its weak disintegration. Among the rock-forming minerals of the fine sand fraction, magnetite and pyroxenes dominate with the participation of ilmenite. The light fraction is represented mainly by opal-smectite-zeolite aggregates, and to a lesser extent by geyselite. In the mineralogical spectra of sediments accumulated in dammed lake conditions, the set of secondary minerals and aggregates is expanding. In the alluvium units underlying the mudflow material there are signs of redeposition of ancient well-rounded sediments.

Keywords: fluvial processes, debris flow formation, weathering, hydrothermally altered deposits, secondary (newly formed) minerals, dammed reservoirs

ACKNOWLEDGMENTS

Research approach were developed within the framework of the state assignment of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences – FMWS-2024-0005. Field and analytical works were carried out with the support of the Russian Science Foundation grant № 21-17-00216, <https://rscf.ru/project/21-17-00216/>. The authors are deeply grateful to E.G. Ananyeva for the morphoscopic analysis, comprehensive assistance and consultations during the research process, to A.V. Grigorieva for performing the mineralogical analysis, to all participants in the field research, as well as to the staff and volunteers of the Kronotsky Nature Reserve for their comprehensive assistance and support. Special thanks to N.V. Anikina for assistance in finalizing graphic materials.

REFERENCES

- Ananyeva E.G. (1998). *Litologo-mineralogicheskii analiz pri geomorfologicheskikh i paleogeograficheskikh issledovaniyakh* (Lithological and mineralogical analysis for geomorphological and paleogeographic studies). Moscow-Smolensk: SGU (Publ.). 140 p. (in Russ.)
- Baldina E.A., Lebedeva E.V., Anikina N.V. (2023). Activity of geomorphological processes on the slopes of river valleys in the conditions of gas-hydrothermal occurrences (based on multi-temporal images and DEM analysis). In: *InterCarto.InterGIS*. V. 29. P. 272–287. (in Russ.). <http://dx.doi.org/10.35595/2414-9179-2023-1-29-272-287>
- Baldina E.A., Lebedeva E.V., Medvedev A.A. (2022). Technic for interpretation of archive and recent satellite images to study the slope processes dynamics in the Geysernaya River valley (Kamchatka). In: *InterCarto.InterGIS*. V. 28. № 1. P. 266–283. (in Russ.). <http://dx.doi.org/10.35595/2414-9179-2022-1-28-266-283>

²For citation: Lebedeva E.V., Zakharov A.L., Kotenkov A.V. (2024). Formation of terraces in a river valley with active gas-hydrothermal manifestations (the Geysernaya River valley, Kamchatka Peninsula as an example). *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. V. 55. № 3. P. 123–145. <https://doi.org/10.31857/S2949178924030071>; <https://elibrary.ru/PLGCWB>

- Belousov A.B., Belousova M.G. (2017). The role of landslides in the formation of geysers in the Valley of Geysers, Kamchatka. In: *Materialy konferentsii "Vulkanizm i svyazannyye s nim protsessy"*. Petropavlovsk-Kamchatsky: IViS (Publ.). P. 155–157. (in Russ.)
- Dvigalo V.N., Melekestsev I.V. (2009). The geological and geomorphic impact of catastrophic landslides in the Geyser Valley of Kamchatka: aerial photogrammetry. *J. of volcanology and seismology*. V. 3. № 5. P. 24–37. <https://doi.org/10.1134/S0742046309050029>
- Dvigalo V.N., Svirid I.Yu., Shevchenko A.V., Zharkov R.V. (2014). Monitoring and forecasting of mudflow processes in the Kamchatka Valley of Geysers based on photogrammetric studies. In: *Selevye potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita: materialy III Mezhdunarodnoi konferentsii, Yuzhno-Sakhalinsk, 22–26 sentyabrya 2014g.* Yuzhno-Sakhalinsk: Sakhalinskii filial Dal'nevostochnogo geologicheskogo instituta DVO RAN (Publ.). P. 105–108. (in Russ.)
- Eshel G., Levy G.J., Mingelgrin U., Singer M.J. (2004). Critical Evaluation of the Use of Laser Diffraction for Particle-Size Distribution Analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* V. 68. P. 736–743. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.7360>
- Frolova Yu.V., Gvozdeva I.P., Chernov M.S., Kuznetsov N.P. (2015). Geotechnical aspects of hydrothermal transformations of tuffaceous rocks of the Valley of Geysers (Kamchatka Peninsula). *Inzhenernaya geologiya*. № 6. P. 30–42. (in Russ.)
- Frolova Yu.V., Zerkal' O.V., Gvozdeva I.P. (2019). The influence of hydrothermal transformations on the physico-mechanical properties of tuffogenic rocks of the Valley of Geysers and their role in the formation of landslides. In: *Geodinamicheskie protsessy i prirodnye katastrofy: tezisy dokladov III Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*. Yuzhno-Sakhalinsk: Yuzhno-Sakhalinsk: Institut morskoi geologii i geofiziki DVO RAN (Publ.). P. 186. (in Russ.)
- Geologicheskaya karta. List N-57, masshtab 1:1 000 000, 3-e izdanie. (2011). (Geological map. Sheet N-57, scale 1 : 1 000 000, 3rd edition, 2011) [Electronic data]. Access way: https://vsegei.ru/ru/info/ggk_1000ns/ (access date: 10.11.2023).
- Geologicheskaya karta. List N-57-XXI, N-57-XXII, masshtab 1 : 200 000, 1-e izdanie. (1981). (Geological map. Sheet N-57-XXI, N-57-XXII, scale 1:200 000, 1st edition, 1981). [Electronic data]. Access way: https://vsegei.ru/ru/info/pub_ggk200-1/ (access date: 10.11.2023).
- Kolosova G.N., Ananyeva E.G. (1974). Methods of mineralogical analysis of unconsolidated deposits for paleogeomorphological studies (with reference to the North-East of the USSR). *Geomorfologiya*. № 4. P. 26–35. (in Russ.)
- Ladygin V.M., Frolova Yu.V., Rychagov S.N. (2014). Transformation of effusive rocks under the influence of acid leaching by surface thermal waters (geothermal system of Baransky volcano, Iturup Is.). *Vulkanologiya i seismologiya*. № 1. P. 20–37. (in Russ.)
- Lebedeva E.V. (2022). Gas-hydrothermal activities impact on the relief formation of river valleys geothermal zones. *Geomorfologiya*. V. 53. № 5 (Special issue). P. 116–126. <https://doi.org/10.31857/S043542812205008X>
- Lebedeva E.V., Baldina E.A., Medvedev A.A. (2022). Dynamics of Slope Processes in the Geysernaya River Valley (Kamchatka) According to the Interpretation Data of Multi-Temporal Space Images. *Dokl. Earth Sci.* V. 507 (Suppl. 1). P. 9–18. <http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X22601262>
- Lebedeva E.V., Chernomorets S.S. (2023). Debris flow activity and specificity of debris flow formation in the Geysernaya River valley (Kamchatka). *Vestnik KRAUNTC. Nauki o Zemle*. № 3. Iss. 59. P. 5–19. (in Russ.). <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2023-3-59-5-19>
- Lebedeva E.V., Sugrobov V.M., Chizhova V.P., Zavads-kaya A.V. (2020). The valley of the river Geysernaya (Kamchatka): hydrothermal activity and features of relief forming. *Geomorfologiya*. № 2. P. 60–73. (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0435428120020066>
- Lebedeva E.V., Zharkov R.V. (2022). Accumulative Landforms in Valleys with Gas-Hydrothermal Occurrences (from the Example of Watercourses of Some Volcanic Massifs in the Kuril-Kamchatka Region). *Dokl. Earth Sci.* V. 506 (Suppl. 1). P. 7–18. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22700131>
- Lebedeva E.V., Zakharov A.L., Mikhalev D.V. (2023). The Geysernaya River Alluvium (Kamchatka): Composition and Features of Formation. *Dokl. Earth Sci.* V. 513 (Suppl 1). P. 1–11. <https://doi.org/10.1134/S1028334X23602432>
- Leonov V.L., Grib E.N., Karpov G.A. et al. (1991). Caldera Uzon and the Valley of Geysers. In: *Deistvuyushchie vulkany Kamchatki (Active volcanoes of Kamchatka)*. V. II. Moscow: Nauka (Publ.). C. 94–141. (in Russ.)
- Pinegina T.K., Delemen' I.F., Droznin V.A. et al. (2008). Kamchatka Valley of Geysers after the catastrophe on 3 June 2007. *Vestnik DVO RAN*. № 1. P. 33–44. (in Russ.)
- Shevchenko A.V., Dvigalo V.N., Svirid I.Yu. (2018). Remote Studies of Geomorphological Processes at Volcanic Objects of Kamchatka. In: *XXXVI Plenum GK RAN: Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiyem "Geomorfologiya – nauka XXI veka"*. Barnaul: AGU (Publ.). P. 403–410. (in Russ.)
- Sugrobov V.M., Sugrobova N.G., Droznin V.A. et al. (2009). Zhemchuzhina Kamchatki – Dolina Geizerov. Nauchno-populyarnyi ocherk, putevoditel' (The Pearl of Kamchatka is the Valley of Geysers. Popular science essay, guide). Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatpress (Publ.) 108 p. (in Russ.)
- Ustinova T.I. (1955). Kamchatskie geizery (Kamchatka geysers). Moscow: Geografiz (Publ.). 120 p. (in Russ.)
- Zavads-kaya A.V. (Ed.). (2015). Atlas doliny reki Geizernoi v Kronotskom zapovednike (Atlas of the valley of the River Geysernaya in Kronotsky Reserve). Moscow: KRASAND (Publ.). 88 p. (in Russ.)
- Zerkal' O.V., Gvozdeva I.P., Frolova Yu.V. (2019). The development of landslide processes in the valley of the river Geysernaya. In: *Geodinamicheskie protsessy i prirodnye katastrofy: tezisy dokladov III Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, g. Yuzhno-Sakhalinsk, 27–31 maya 2019 g.* Yuzhno-Sakhalinsk: Institut morskoi geologii i geofiziki DVO RAN (Publ.). P. 138. (in Russ.)