

УДК 551.312.3/551.21.217(-925.18)

АЛЛЮВИЙ р. ГЕЙЗЕРНОЙ (КАМЧАТКА): ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ И ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ[#]

© 2023 г. Е. В. Лебедева^{1,*}, А. Л. Захаров^{1,**}, Д. В. Михалёв^{1,2,***}

¹ Институт географии РАН, Москва, Россия

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

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

**E-mail: zaanleo@gmail.com

***E-mail: mikhalev.dmitry@gmail.com

Поступила в редакцию 07.07.2022 г.

После доработки 18.11.2022 г.

Принята к публикации 22.12.2022 г.

Впервые проведен комплексный анализ вещественного состава аллювия реки с активными газогидротермальными проявлениями. Его общими чертами являются: плохая окатанность валунов и гальки (1–2 класс), слабая сортировка мелкообломочной составляющей, обилие обломков пород и сростков минералов даже во фракции тонкого песка. Все это указывает на слабую дезинтеграцию осадка и значительную долю в нем склонового материала, в том числе переотложенного селями. Большое содержание смектит-цеолитовых и иных агрегатов, состоящих из вторичных минералов (до 70% легкой фракции размерности 0.1–0.25 мм), и измененных обломков пород (до 70–80% в галечной фракции) свидетельствует о значительном влиянии газогидротермальной деятельности на переработку размываемых рекой пород, а также о вторичном выветривании аллювия в пределах термальных полей. Аккумуляция материала в русле носит фрагментарный характер и доминирует на участках: (1) активного поступления материала со склонов (временные плотины), (2) выполаживания продольного профиля в местах подпрудных водоемов и (3) выноса селевого материала. Возникновение двух подпрудных водоемов за последние 15 лет, а также находки прослоев тонкого песчаного материала в осадках низких террасовых уровней свидетельствуют о том, что для долины р. Гейзерной типично периодическое формирование подобных кратко живущих бассейнов. Условия накопления мелкопесчаных отложений на участках однорукавного русла и в пределах подпрудных водоемов различаются, что сказывается на соотношении ведущих минералов тяжелой фракции. Обилие хорошо окатанного гравия и крупного песка, выветрелый облик окатанных зерен в аллювии свидетельствуют о том, что наряду с переработкой больших объемов поступающего склонового и селевого материала, р. Гейзерная продолжает врезаться и размывает древние флювиальные осадки.

Ключевые слова: минералогический анализ, морфоскопия зерен, вторичные (новообразованные) минералы, аккумуляция, выветривание, газогидротермальные проявления

DOI: 10.31857/S2949178923020056, **EDN:** ECGHJU

ВВЕДЕНИЕ

Одним из слабо изученных вопросов флювиальной геоморфологии является формирование долин водотоков геотермальных зон с активными газогидротермальными проявлениями. Подобные долины имеют ряд особенностей строения и развития, что позволяет выделить их в особую группу. Работами предыдущих лет (Лебедева, 2021; Лебедева, Жарков, 2022) установлено, что в

таких долинах под воздействием многочисленных газогидротерм происходит: (1) формирование специфических аккумулятивных форм микро- и мезорельефа; (2) вторичная проработка аллювиальных отложений и коренных пород с кардинальным изменением их свойств; (3) активизация склоновых процессов и, как следствие — (4) переотложение смещенного склонового материала селями. Все это не может не сказываться и на составе и характере аллювия подобных водотоков. Однако данный вопрос не привлекал ранее внимания исследователей. Поэтому представляется важным оценить влияние вышеперечисленных факторов на формирование подобных аллювиальных отложений. Результаты такого ис-

[#] Ссылка для цитирования: Лебедева Е.В., Захаров А.Л., Михалёв Д.В. (2023). Аллювий р. Гейзерной (Камчатка): вещественный состав и особенности формирования // Геоморфология и палеогеография. Т. 54. № 2. С. 36–50. <https://doi.org/10.31857/S2949178923020056>; <https://elibrary.ru/ECGHJU>

следования помогут ответить на многие вопросы о развитии водотоков вулканических регионов, в том числе об особенностях протекания флювиальных процессов и эволюции долин. В качестве объекта исследований нами выбрана долина р. Гейзерной (Камчатка) — наиболее хорошо изученная в геологическом плане. Подобный комплексный анализ отложений проводится впервые не только для данной долины, но и для водотоков геотермальных зон в целом.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование опирается на комплекс анализов, среди которых основными являются изучение морфологии и петрографии галечного материала, гранулометрический анализ мелкообломочной составляющей, минералогический мелкопесчаной фракции и морфоскопия зерен крупнопесчаной и мелкогравийных фракций. В течение полевых сезонов 2020–2021 гг. был проведен отбор образцов русловых отложений р. Гейзерной в ее среднем и нижнем течении — от подпрудного озера 2014 г. до устья. Общее количество точек опробования — 15, расстояние между точками — от 100 до 1000 м в зависимости от изменения характера русла. В случае, если отбор проб проводился в соседних протоках реки или же на близлежащих участках, характеризовавшихся различными гидротермальными проявлениями, и расстояние между местами опробования не превышало 20–50 м, то к номеру точки добавлялся индекс 1 или 2. Аллювиальные отложения изучались на участках различного типа: *преимущественной аккумуляции* (с разветвленными руслами в пределах спущенного подпрудного водоема 2007–2014 гг.) и *эрозионно-аккумулятивных* с прямолинейным руслом. В данных случаях отбор материала проводился на площадках размером 1 м² на песчано-галечных и валунно-галечных прирусловых косах соответственно. На участках *преимущественного врезания*, где прирусловые косы отсутствовали, мелкообломочный материал отбирался непосредственно из русла.

Наряду с этим были проанализированы русловые отложения ряда притоков р. Гейзерной: ручьев Лавового, Скользкого, Каскадного и Игрушка (рис. 1), а также материал, отобранный в верхних частях селевых потоков 2007 и 2014 г.

Комплекс применяемых методов. Для анализа галечного материала случайным образом отбирались 30–50 галек, определялись характер их морфологии (окатанность¹, размеры по трем осям, коэффициенты удлинения и уплощения), петрографический состав (доля эффузивных и экструзивных, вулканогенно-осадочных и иных образо-

ваний, в том числе гидротермально измененных), выветрелость обломочного материала. Всего было отобрано 11 образцов из руслового аллювия и 2 — из селевых отложений.

Для изучения *гранулометрического состава* бралась проба около 100 г мелкообломочной составляющей аллювия (включая гравий). Гранулометрический анализ выполнялся в лаборатории палеоархивов природной среды отдела палеогеографии ИГ РАН на лазерном дифракционном анализаторе (ЛДГ) Malvern Mastersizer 3000. Материал в объеме 2 чайные ложки образца подвергался просеиванию через сита 2.0 и 1.1 мм. Крупные фракции (гравий и грубый песок) собирались в стаканы и высушивались при температуре 40–105° до визуального сухого состояния, после чего они взвешивались. Аналогичные процедуры проводились с тонкой фракцией (глина, алеврит и песок). Полученный осадок смешивался с 4% раствором пирофосфата натрия, нагревался до 90° в течение двух часов с помешиванием до разрушения агрегатов. В дальнейшем полученный образец измерялся на ЛДГ с протоколом на основе теории Фраунгофера, путем добавления пипеткой из стакана в диспергатор. Полученные данные обрабатывались статистически в MS Office с пакетом Gradistat. Всего проанализировано 22 образца.

Для *минералогического и морфоскопического анализа* тонкообломочной составляющей было отобрано 22 образца весом около 500 г. В полевых условиях проведено отмучивание (удалялась глинистая фракция), затем материал высушивался и просеивался на ситах. Морфоскопический анализ зерен и обломков пород под биноклем выполнялся Э.Г. Ананьевой для размерности гравия (10–5, 5–2 мм) и песка (1–0.5, 0.5–0.25 мм). Уделялось внимание форме зерен, характеру их поверхности, петрографическому и минералогическому составам, окатанности, вторичному изменению, наличию 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. Изучались состав и доля тяжелой и легкой фракций (разделение которых проводилось в бромформе), степень выветрелости и корродированности зерен минералов, наличие вторичных минералов, особенности строения агрегатов.

ХАРАКТЕРИСТИКА БАССЕЙНА р. ГЕЙЗЕРНОЙ

Геологическое строение и гидротермальные проявления. Долина расположена на восточной границе Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии. В геологическом строении исследуемой территории принимают участие три ком-

¹ По шкале А.В. Хабакова (Атлас текстур и структур ..., 1962).

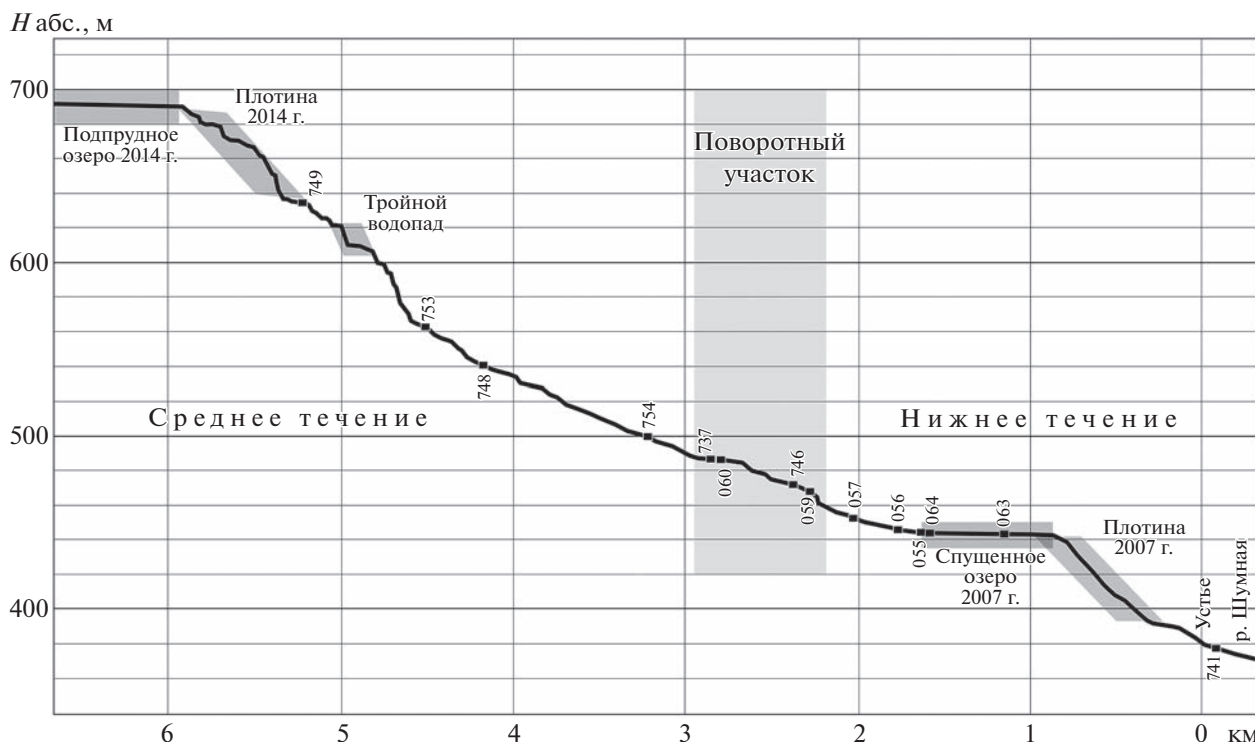


Рис. 2. Продольный профиль р. Гейзерной (среднее и нижнее течение) и точки отбора проб.

Fig. 2. The Geysernaya River longitudinal profile (middle and lower reaches) and sampling points.

ненных и нагретых до различных температур пород. Все поверхностные термопроявления бассейна реки объединены в 3 группы термальных полей: в верховьях (у подножия одноименного вулкана) — Кихпиничевское, в среднем течении — Верхнегейзерное (протяженность около 2 км) и в низовье — Гейзерное (протяженность около 5 км) (Атлас ..., 2015). Высокотемпературные напорные хлоридно-натриевые воды (Сугробов и др., 2009) в виде многочисленных источников и паровых струй выходят в долине по трещинам в водоупорной кровле, тем самым позволяя проследить разрывные нарушения (Кирюхин и др., 2012). Термопроявления представлены струями насыщенного пара, в местах выхода которых фиксируются отложения серы, грязевыми и газизирующими котлами, серными буграми, разнообразными источниками и гейзерами. Основная разгрузка высокотемпературных подземных вод в настоящее время происходит на самом нижнем по течению Гейзерном термальном поле. Большинство гейзеров и источников расположено в днище долины и на ее левом борту, который непосредственно прилегает к краю кальдеры. На правом борту гидротермальная деятельность проявляется только до высот 10–15 м над урезом реки (Сугробов и др., 2009).

Геоморфологическое строение бассейна и гидрологический режим. Река Гейзерная является водо-

током 5 порядка, левым притоком р. Шумной (бассейн Тихого океана) и берет свое начало на высоте около 900 м на склонах вулкана Кихпинич. 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 (рис. 2). Площадь бассейна 57.8 км².

В верховьях долина ориентирована на ЮЗ, имеет глубину около 200 м и примерно такую же ширину. Далее она поворачивает на ЮЮВ и расширяется до 1 км. В месте расширения на ее левом борту расположены термальные площадки и горячие источники Верхнегейзерной группы. Ниже долина опять круто поворачивает к ЮЗ, ее уклон возрастает: в русле прослеживаются три ступени водопада общей высотой около 30 м; после этого она опять расширяется — уже до 3.5 км. К участку расширения приурочены многочисленные источники и гейзеры Гейзерной группы. Глубина долины в приустьевой части превышает 400 м.

Гидрологический режим реки характеризуется хорошо выраженным весенне-летним половодьем, многоводной летней и зимней меженью; питание — смешанное. Среднегодовое количество стока равно 30–35 л/км. По наблюдениям 2008 г. (Воробьевский и др., 2010), 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. Глубина и ширина реки изменчивы: наибольшая ширина русла в межень отмечается в приустьевой части, где она достигает 10–15 м, глубина колеблется от 0.5 до 1.2 м; скорость течения около 1.5–2 м/с. В пределах спущенного подпрудного водоема 2007 г. русло реки разбивается на 2–3 рукава.

Низкая пойма имеет высоту 0.5–1 м при ширине до 50–100 м, высокая – 2.0–2.5 м при ширине 5–20 м. Периодически прослеживается 1 терраса высотой 4–6 м – в среднем течении преимущественно по левому борту, в нижнем – по правому. Эти уровни сложены в основном грубообломочным плохо сортированным галечно-валунным материалом, но иногда в уступах встречается более тонкий, горизонтально слоистый супесчаный материал. Если в непосредственной близости имеются термальные проявления либо участки прогретого грунта, то слагающие террасы отложения могут быть сцементированы или, напротив, выветрелыми до глины (Лебедева, Жарков, 2022). В среднем течении к этому уровню привязаны также подрезаемые рекой фрагменты конусов выноса в устьях левых притоков реки (руч. Каскадный, Дальний), сложенные, по-видимому, селевым материалом. Хорошо 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 – террасовидными площадками, которые не выдержаны по простира-нию.

Только за последние 40 лет на территории Долины гейзеров произошло три крупных обвально-оползня, сопровождавшихся селеобразованием (1981, 2007 и 2014 г.) общим объемом около 24 млн м³ (Двигало и др., 2014; Шевченко и др., 2018; Лебедева и др., 2020). И, если в первом случае обломочная масса была быстро переработана рекой и вынесена вниз по течению, то в двух последующих сформировались подпрудные водоемы. В 2007 г. после обвала обширного участка склона, сложенного озерными туфами гейзерной свиты, и схода селя по долине руч. Водопадного, сформировался подпрудный водоем в нижнем течении реки, который просуществовал до конца 2014 г. (Атлас..., 2015). Протяженность селевой плотины, сложенной в различной мере раздробленными туфами, вдоль по долине превышала 500 м, мощность отложений составляла около 50 м. Первоначальная глубина подпрудного озера – 27 м (Пинегина и др., 2008). В январе 2014 г. произо-

шел обвал лав и пирокластики андезитодацитового состава, гидротермально измененных пород и туфов на участке левого борта долины в ее среднем течении. Обвал повлек за собой сход нового селя, который достиг нижнего подпрудного озера, в результате чего плотина последнего была частично разрушена и уровень озера упал на 1 м, а затем в течение нескольких месяцев оно было спущено. В настоящее время в теле плотины существует врез (проран) шириной до 40–70 м. В 2014 г. в результате вышеописанного обвала сформировался новый подпрудный водоем в среднем течении реки с плотиной, сложенной преимущественно крупными блоками лав (размер 2–5 м). Протяженность плотины вниз по долине около 700 м, ее высота достигает 22 м над руслом реки; в настоящее время происходит аккумуляция обломочного материала в подпрудном водоеме и вынос мелкозема из тела плотины.

В процессе полевых работ нами были изучены геоморфологическое строение участков среднего и нижнего течения р. Гейзерной (ниже плотины подпрудного озера 2014 г.) и накапливавшиеся там рыхлые отложения. К среднему течению мы относим участок до поворота долины после руч. Ступенчатого, к нижнему – от устья реки до устья руч. Лавового (рис. 1). Данные фрагменты долины, ориентированные преимущественно на ЮЗ, разделены поворотным участком – от руч. Ступенчатого до руч. Лавового, где река течет на ЗСЗ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. ХАРАКТЕРИСТИКА ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА АЛЛЮВИЯ

Анализ галечного материала (табл. 1) показал, что в аллювии реки по петрографическому составу в целом преобладают вулканогенно-осадочные породы: вскрываемые рекой на глубину более 300 м озерные туфы, туфопесчаники и туфогравелиты; в среднем их содержание 52%. Доля лавового материала (как экструзивных, так и эффузивных фаций, слагающих водоразделы и выходящих в левом борту долины в среднем течении реки) несколько меньше – 43%. Однако при этом лавовый материал доминирует близ устья руч. Лавового и на участке спущенного озера 2007 г. (50–87%), а туфовый (до 80–83%) – выше и ниже селевой плотины 2007 г.

Средние размеры гальки из аллювия составляют 5.78–3.97–2.15 см по осям а–b–с, коэффициенты удлинения и уплощения соответственно 0.69 и 0.54. Окатанность колеблется от 1.7 до 2.4 (в среднем $K_{ок} = 1.89$), наихудшая окатанность – 1.53 – отмечается на месте подпрудного озера 2007 г. (т. 064) напротив устья руч. Скользкого. В целом и на других участках спущенного озера

Таблица 1. Характеристика галечного материала из руслового аллювия р. Гейзерной и отложений селя 2014 г.
Table 1. Characteristics of pebbles from the Geysernaya River alluvium and 2014 debris flow

Русловой аллювий		Средний размер по осям			Коэффициенты			Петрографи-ческий состав, %		Измененная галька, %			Битая галька, %
		a	b	c	b/a удлине-ния	c/b уплоще-ния	K _{ок}	туфы-туфобрекчии	лавы	выветре-лая	ожелез-ненная	всего	
Среднее	значения	5.78	3.97	2.15	0.69	0.54	1.89	51.8	42.7	24.5	26.4	55.1	6
Мини-мальное		4.4	2.9	1.49	0.65	0.39	1.53	10	7	7	7	27	0
Макси-мальное		6.8	4.9	2.8	0.76	0.66	2.4	83	87	43	47	80	17

Отложения села 2014 г.													
Среднее	значения	5.83	4.29	2.78	0.74	0.66	1.4	26.7	66.7	26.7	26.7	53.4	8.4
Мини-мальное		4.73	3.41	2.32	0.72	0.63	1.3	23.3	63.3	23.3	16.7	40	6.7
Макси-мальное		6.92	5.17	3.23	0.75	0.68	1.5	30	70	30	36.7	66.7	10

окатанность не слишком хорошая ($K_{ок} = 1.7$). Более половины всего обломочного материала аллювия (55.1%) — это выветрелая и ожелезненная галька; ее количество увеличивается до 80% в центральной части днища спущенного озера 2007 г., где особенно активны термальные проявления, а также непосредственно ниже плотины 2014 г. (на участке Верхнегейзерного термального поля) и в нижнем течении реки (приустьевая часть). Количество битой гальки невелико — в среднем 6%, максимальное (10–17%) — у плотины подпрудного озера 2007 г., близ устья руч. Лавового и ниже плотины 2014 г.

Результаты анализа гранулометрического состава руслового аллювия р. Гейзерной представлены на рис. 3. Медианный диаметр мелкообломочной фракции в среднем составляет 0.225 мм и колеблется от 0.082 до 0.354 мм, резко возрастающая в районе плотины 2014 г. и Тройного водопада. В целом сортировка мелкообломочной составляющей руслового аллювия плохая: коэффициент сортировки колеблется от 2 до 9.

Минералогический анализ мелкопесчаной фракции. Материал проб аллювия в нижнем и среднем течении реки Гейзерной, несмотря на значительную дифференциацию по количественному содержанию минеральных фаз, имеет много общего по качественным характеристикам. Выход тяжелой фракции в целом невелик и колеблется в пределах от 2.58 до 10%, резко увеличиваясь до 25 и даже 50% в двух точках — 055—2 и 060—1 (рис. 4, (а)). Основная часть проб состоит из продуктов преобразования пирокластики до смектитов, смектит-цеолитовых, опал-кристобалитовых агрегатов

или их сочетаний. Их общее содержание в легкой фракции достигает 70% (рис. 5, (а, в)). Вторичные минералы представлены также цеолитом, каолинитом, серпентинитом и гидрослюдами, но их доля, как правило, составляет первые проценты. В большинстве проб присутствует гейзерит, представленный как тонкоагрегатным опалом, так и опал-кристобалитовыми агрегатами (рис. 5, (б)). Как в легкой, так и в тяжелой фракциях встречаются обломки измененных эффузивных пород (до 10–11%), в которых сохранились только очень мелкие (менее 10–20 мкм) реликты первичных минералов, а матрикс превращен в опал-смектитовую массу.

В среднем течении р. Гейзерной до 50–80% тяжелой фракции составляют сульфиды, представленные, в основном, пиритом в кубических кристаллах, зернистых агрегатах, в сростках или в тонкозернистых агрегатах, сцементированных смектитами (рис. 4, (в)). Практически во всех пробах сульфиды в разной степени окислены — от поверхностных пленок оксидов железа на кристаллах пирита до лимонитовых образований, содержащих реликтовые частицы тончайших зерен пирита, а также пиритовых агрегатов, полностью замещенных гетит-лимонитовыми образованиями. Ожелезнение характерно и для многих смектит-цеолитовых агрегатов. В нижнем течении содержание сульфидов в пробах несколько ниже и, как правило, составляет от 18 до 40%. Практически противоположная картина наблюдается с пироксенами (рис. 4, (г)), доля которых, напротив, увеличивается в нижнем течении р. Гейзерной. Магнетит и титаномagnetит составляют до 30%

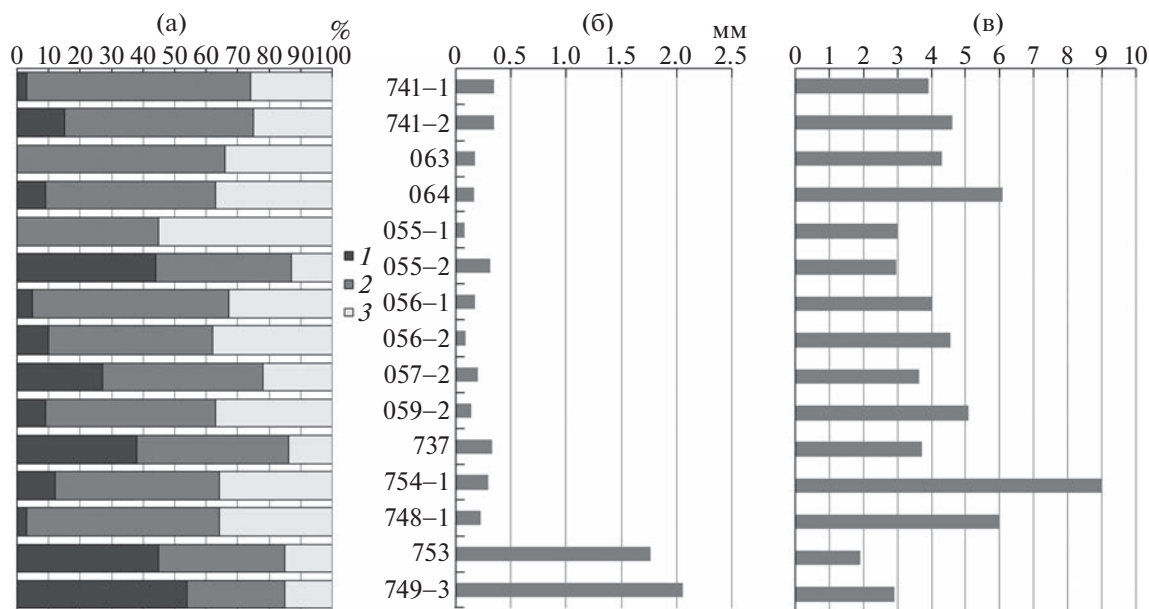


Рис. 3. Гранулометрический состав руслового аллювия р. Гейзерной: (а) — соотношение: 1 — гравия, 2 — песка, 3 — алеврита; (б) — медианный диаметр; (в) — коэффициент сортировки.

Fig. 3. The Geysernaya River channel alluvium granulometric composition: (a) — ratio: 1 — gravel, 2 — sand, 3 — silt; (б) — median diameter; (в) — sorting factor.

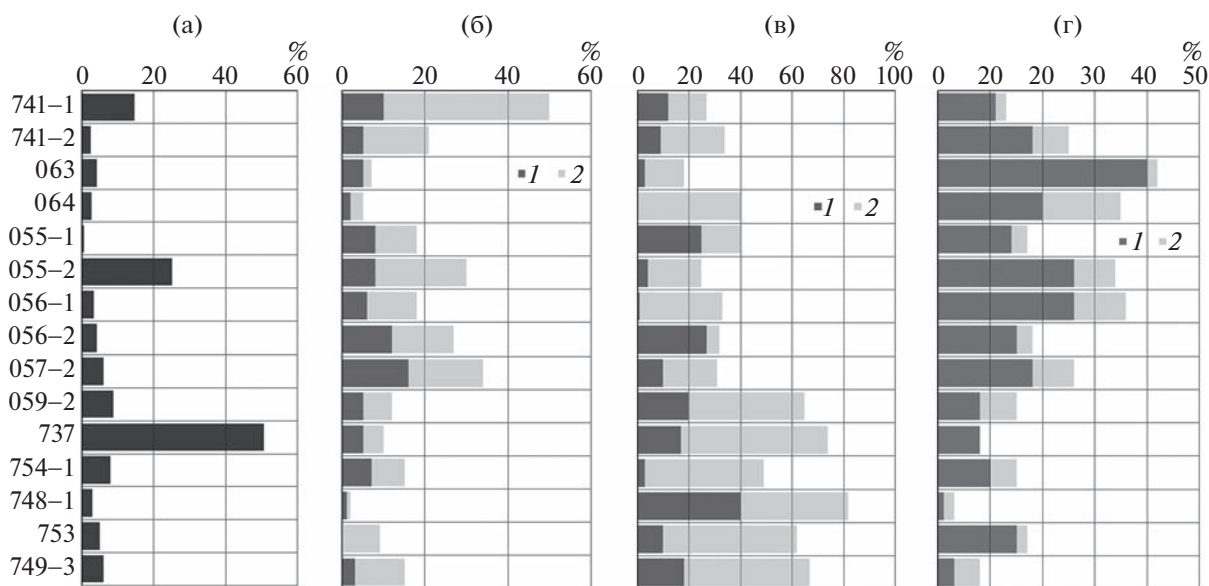


Рис. 4. Выход тяжелой фракции в образцах руслового аллювия р. Гейзерной (а) и содержание в ней ведущих минералов и их соединений (размерность 0.1–0.25 мм): (б) — магнетит и титаномагнетит (1) и магнетит в сростках и включениях (2), (в) — сульфиды (1) и псевдоморфозы гидроксидов железа по пириту (2), (г) — пироксены ромбические (1) и моноклинные (2).

Fig. 4. Yield of heavy fraction in the Geysernaya River alluvium samples (а) and the content of leading minerals and their compounds in it (size 0.1–0.25 mm, %): (б) magnetite and titanium-magnetite (1) and magnetite in intergrowths and inclusions (2), (в) sulfides (1) and iron hydroxides after pyrite (2), (г) orthorhombic (1) and monoclinic (2) pyroxenes.

тяжелой фракции, но в свободном виде их, как правило, не более трети, остальная часть находится в виде включений и сростаний с мелкозернистыми ожелезненными агрегатами (рис. 4, (б)).

Большинство обломочных минералов тяжелой фракции (за исключением пироксенов) — роговая обманка, оливин, эпидот, ставролит, циркон, гранат, освобожденных из разрушаемых эффу-

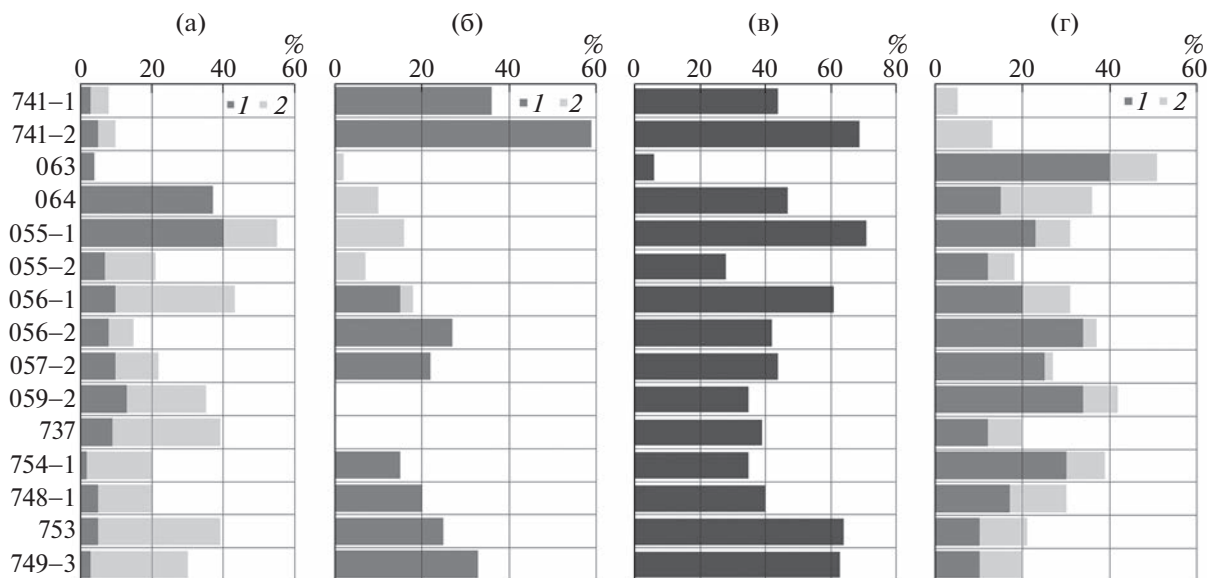


Рис. 5. Содержание агрегатов и вторичных минералов в легкой фракции руслового аллювия р. Гейзерной (размерность 0.1–0.25 мм): (а) – смектит-цеолитовые (1) и опал-смектитовые (2) агрегаты, (б) – опал-кристобалитовые агрегаты (1) и тонкоагрегатный опал (2), (в) – совокупное содержание различных агрегатов, (г) – вторичные минералы: смектит (1) и иные (2 – каолинит, гидрослюда).

Fig. 5. Percentage of aggregates and newly formed minerals in the Geysernaya River alluvium light fraction (size 0.1–0.25 mm): (а) – smectite-zeolite (1) and opal-smectite (2) aggregates, (б) – opal-cristobalite aggregates (1) and fine-aggregate opal (2), (в) – total content of various aggregates, (г) – newly formed minerals: smectite (1) and others (2 – kaolinite, hydromicas).

живных пород, содержатся в очень небольшом количестве: от менее 1 до 2–3%. То же касается и минералов легкой фракции: содержание кварца не превышает 12–14%, а полевых шпатов достигает 30–35% лишь в отдельных точках. Вулканическое стекло (до 15% легкой фракции) представлено преимущественно обсидианом – очень плотными темноцветными обломками овальных и близких к ним форм с гладкой поверхностью и раковистым изломом. В пробах встречаются единичные зерна шлаков и обломки пемзы.

Доля гравия в изучаемых отложениях составляет до 54%, поэтому анализ этой составляющей весьма важен. *Морфоскопический анализ зерен и обломков пород* имеет большое значение для определения генезиса отложений и особенностей их накопления. Установлено, что в значительной части образцов аллювия наряду с неокатанными или слабоокатанными обломками данной размерности присутствует большое количество хорошо и даже идеально окатанных (3–4 класс) обломков не только относительно мягких туфов, но и прочных лав, а также продуктов их дробления. Наиболее высокое содержание хорошо окатанных обломков, в первую очередь лав (до 20–24%), отмечается в образцах 060–1 и 055–2. Большинство окатанных обломков выветрелые, с коркой ожелезнения, иногда целиком проработаны железистыми растворами, выщелоченные; отдельные зерна со следами внутрислойного растворе-

ния; часто на них отмечаются следы и наросты железисто-глинистого цемента. Все это свидетельствует о переотложении каких-то древних осадков, по-видимому флювиального генезиса. Важно отметить, что легкая фракция данных проб представлена преимущественно полевыми шпатами (до 30%) и кварцем (12–14%) при практически полном отсутствии смектитовых и иных агрегатов, что весьма нехарактерно для современного аллювия реки. Перемыв древнего аллювия обусловил здесь и аномально высокий выход тяжелой фракции (25–50%).

В процессе работ были опробованы аллювиальные отложения главных притоков р. Гейзерной, минералогический спектр мелкопесчаной фракции аллювия своеобразен в каждом из них и отличается от такового основной реки (табл. 2).

Изученные отложения селей 2007 и 2014 г. совершенно разные по петрографическому составу: в 2007 г. обвал-оползень и сель переместили преимущественно материал озерных туфов, а в 2014 г. – в основном обломки лав (63–70%). Селевый материал размерности гальки (см. табл. 1) несколько крупнее, нежели русловой аллювий (средние размеры 5.83–4.29 – 2.78 см по осям а–b–с) и окатан хуже ($K_{ок} = 1.3–1.5$). Для гравийной и песчаной фракций селевых отложений типично наличие глинистых и глинисто-железистых пленок, примазок, присыпок, которых лишены аллювиальные отложения.

Таблица 2. Минералогический состав тяжелой фракции аллювия (размерность 0.1–0.25 мм) р. Гейзерной и ее притоков**Table 2.** Alluvium heavy fraction mineralogical composition (size 0.1–0.25 mm) of the Geysernaya River and its tributaries

№	Точка	Места отбора проб руслового аллювия		Формула минералогического состава тяжелой фракции	
1	741—1	Русло Шумной ниже устья Гейзерной		$M^{50} \text{ гж}^{15} \text{ п}^{12} \text{ cy}^{12}$	
2	741—2	русло Гейзерной	Однорукавное русло	$\text{Гж}^{25} \text{ П}^{25} \text{ М}^{21}$	
3	063		Многорукавное русло в пределах бывшего подпрудного озера 2007 г., зона аккумуляции	в 100 м выше плотины 2007 г.	$\text{П}^{48} \text{ гж}^{15} \text{ оп}^{11} \text{ м}^7$
4	064			выше устья руч. Скользкого	$\text{Гж}^{40} \text{ П}^{35} \text{ м}^5$
5	055—1			близ гейзера Большой	$\text{Cy}^{25} \text{ п}^{18} \text{ м}^{18} \text{ гзр}^{12} \text{ гж}^{10}$
6	055—2			выше гейзера Большого	$\text{П}^{34} \text{ М}^{30} \text{ Гж}^{21}$
7	056—1			место выклинивания озера, 1-я протока	$\text{П}^{36} \text{ Гж}^{31} \text{ м}^{18}$
8	056—2			место выклинивания озера, 2-я протока	$\text{М}^{27} \text{ Cy}^{25} \text{ п}^{18}$
9	057—2		у стенки Витраж (правый берег)	$\text{М}^{34} \text{ П}^{26} \text{ Гж}^{21} \text{ cy}^{10}$	
10	059-2		Однорукавное русло	выше устья руч. Лавового (лев. берег)	$\text{Гж}^{45} \text{ п}^{15} \text{ cy}^{12} \text{ м}^{12}$
11	060—1 (737)			выше устья руч. Ступенчатого	$\text{Гж}^{57} \text{ cy}^{15} \text{ м}^{10} \text{ п}^8$
12	754—1	выше устья руч. Каскадного		$\text{Гж}^{46} \text{ м}^{15} \text{ п}^{15}$	
13	748—1	выше устья руч. Игрушка		$\text{Гж}^{42} \text{ М}^{35} \text{ п}^3$	
14	753	ниже Тройного водопада		$\text{Гж}^{49} \text{ cy}^{18} \text{ м}^9 \text{ п}^8$	
15	749—3		выше устья руч. Подъем	$\text{Гж}^{52} \text{ п}^{17} \text{ м}^{15}$	
Аллювий притоков					
1	734—1	Скользкий (верхнее течение)		$\text{П}^{42} \text{ М}^{37} \text{ и}^{12}$	
2	745	Скользкий (нижнее течение)		$\text{П}^{60} \text{ М}^{20} \text{ агр}^{15}$	
3	755	Лавовый (приустьевая часть)		$\text{М}^{50} \text{ П}^{31} \text{ и}^{12}$	
4	766	Игрушка (среднее течение)		$\text{М}^{50} \text{ И}^{22} \text{ п}^{18}$	
5	768	Каскадный (среднее течение)		$\text{И}^{28} \text{ гж}^{15} \text{ гзр}^{10} \text{ м}^9$	

Примечание. М – магнетит и титаномагнетит, Гж – псевдоморфозы гидроксидов железа по пириту, П – пироксены, Су – сульфиды неизменные, И – ильменит, оп – обломки пород, гзр – гейзерит с включением рудных минералов, агр – смектит-цеолитовые агрегаты с включением рудных минералов. Цифры соответствуют процентному содержанию.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ. ДОМИНИРУЮЩИЕ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ХАРАКТЕР ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА АЛЛЮВИЯ

Проведенные исследования позволяют заключить о фрагментарной аккумуляции рыхлых отложений в долине и чередовании участков аккумуляции и врезания русла с преобладанием последних. На участках преимущественного врезания в русло р. Гейзерной вскрываются вулканогенно-озерные отложения (Q_3^4) или сцементированные галечно-валунные отложения более ранних этапов аккумуляции (в том числе, относящиеся к устье-

вой пачке докальдерного комплекса (Q_3^3), дайки риодацитов. Для эрозионно-аккумулятивных участков характерны галечно-валунные косы. Аккумуляция более тонкого рыхлого материала наблюдается в пределах бывших и существующих подпрудных водоемов: с поверхности эти отложения представлены песчано-галечным материалом с включением отдельных валунов.

Анализ минералогического состава мелкопесчаной фракции руслового аллювия показал, что на участках (1) однорукавного русла с преобладанием эрозионных процессов (среднее течение, поворотный участок и приустьевая часть долины) и (2) многорукавного с доминированием аккумуляции (бывшее подпрудное озеро 2007–2014 гг.)

распределение ведущих минералов в мелкопесчаной фракции несколько различается (табл. 2). На участках 1-го типа минералогический спектр схож во всех точках опробования: здесь преобладают окислы и гидроокислы железа по пириту (42–52%), значительную долю составляют неизменные сульфиды (до 12–18%), магнетит (9–35%) и пироксены (3–17%). На участках 2-го типа, хотя общий набор минералов в целом остается прежним, но доминируют то магнетит (27–34%), то пироксены (34–48%), то неизменные сульфиды (25%). Количество гидроксидов железа по пириту резко сокращается, они преобладают лишь в центральной протоке выше устья руч. Скользкого (40%). В створе гейзеров Большой и Печка до 12% тяжелой фракции составляет гейзерит с включением обломков рудных минералов (12%). Сравнение аллювия основной реки и ее притоков показало, что подобное распределение не связано с выносом материала притоками, а видимо, свидетельствует о большей изменчивости условий осадконакопления мелкопесчаной фракции в зоне бывшей озерной аккумуляции.

Несмотря на то что все изученные притоки р. Гейзерной (руч. Скользкий, Лавовый, Каскадный, Игрушка) на большем своем протяжении пререзают озерные отложения посткальдерного этапа, минералогический спектр их аллювия весьма разнообразен и отличается от такового р. Гейзерной (см. табл. 2). Вероятно, это обусловлено рядом причин: с одной стороны, заложением самих долин по зонам разломов с выходами различных по составу газогидротерм, с другой, — выходами лав и пирокластических пород в верховьях некоторых из них, а также с большей или меньшей активностью оползневых и селевых процессов в долинах, поставляющих в русло значительные объемы рыхлого материала того или иного состава. Однако существенного влияния на характер минералогического спектра основной реки притоки не оказывают.

Ранее были отмечены особенности строения и развития долин рек геотермальных зон, среди которых главные: наличие гидротермальных проявлений в бассейне; активизация склоновых процессов на бортах долин и, как следствие, значительное поступление материала со склонов в русло; а также масштабное развитие селевых процессов (Лебедева, 2021). Попробуем проанализировать, как эти особенности повлияли на характер аллювия р. Гейзерной.

Роль гидротермальных проявлений. 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 относи-

тельно мягкие глины. Благодаря притоку эндогенного тепла трансформация твердого вещества на участках термального воздействия протекает в долине р. Гейзерной круглый год, чему способствует и высокая минерализация термальных вод. Инженерно-геологические работы в бассейне р. Гейзерной (Фролова и др., 2019) показали, что в зонах воздействия гидротерм обломки вулканического стекла в дацитовых туфах замещаются здесь глинистыми минералами и цеолитами. При этом в процессе лабораторных исследований образцов этими специалистами было установлено снижение плотности породы практически вдвое и возрастание ее пористости, что приводит к резкому уменьшению сцепления. Очевидно, что данная трансформация пород не может не повлечь за собой и активизацию склоновых процессов на бортах глубоко врезанной долины. Рядом с многочисленными выходами газогидротерм формируются и специфические аккумулятивные формы микрорельефа (Лебедева, Жарков, 2022). Все это повлияло и на характер рассматриваемого аллювия. На участках, где особенно активны термальные проявления, резко увеличивается количество измененной гальки: например, в центральной части спущенного озера 2007 г., где, несмотря на активную аккумуляцию материала, сохранились как гейзеры (Большая Печка и др.), так и значительное количество более мелких газогидротерм, которые мы можем фиксировать по выходам газа и выпотам серы, ее содержание достигает 80%. В большинстве образцов мелкогравийной и грубопесчаной фракций отмечается частичное или полное замещение зерен цеолитом и опалом, иногда встречаются смектитовые и цеолитовые агрегаты такой же размерности. Содержание смектитов, смектит-цеолитовых, опал-кристобалитовых образований или их сочетаний в изученных образцах мелкопесчаной фракции аллювия достигает 35–70%, особо увеличиваясь на участках Верхнегейзерного и Гейзерного термальных полей.

Склоновые процессы и роль селевой составляющей в формировании руслового материала. В результате активного развития склоновых процессов под воздействием газогидротерм долина реки постепенно расширяется на участках их наиболее мощного проявления — в пределах упомянутых термальных полей. На ее бортах фиксируются смещения пород различного масштаба, в том числе, с перегораживанием днища долины. Формируются локальные оползневые террасы, что обуславливает ступенчатое строение бортов долины. Характер ступеней — их невыдержанность по простиранию и продолжающееся смещение на отдельных участках — свидетельствует о том, что данные формы являются оползневыми террасами. Поступающий в днище долины материал выносится в основном селями, которые провоциру-

ются ливневыми осадками. Для долины типично периодическое возникновение кратко живущих (годы) подпрудных водоемов, при прорыве которых также возникают сели. Заплески селевого материала при их прохождении по долине достигают высоты 15 и даже 40 м на поворотных участках (Сугробов, 2009; Атлас..., 2015). Соответственно, селевым материалом перекрыты большинство низких террасовых уровней.

Аккумуляция значительной части осадков последнего селя произошла при входе потока в подпрудное озеро, сформированное в 2007 г. Об этом свидетельствует плохая окатанность здесь галечного материала ($K_{ок} = 1.53$), доминирование обломков лав, характерных для этого селя, и повышение содержания битой гальки. Обломочный материал селя 2014 г. в нижнем течении обнаружен также на поверхности низких террас (4–7 м). Кроме того, в русле реки много глыб размером до 2–5 м, представленных в основном лавами, — это перенесенные селем 2014 г. фрагменты обвалившегося борта долины. В нижнем течении на петрографический состав аллювия оказал влияние сел 2007 г., вынесший в долину громадные объемы обломков туфов, туфопесчаников и туфобрекчий гейзерной пачки (Q_3^4).

В целом обилие склонового материала, перемещенного селями, обуславливает плохую окатанность аллювия, слабую дезинтеграцию песчаной фракции, плохую сортировку материала. Селевая составляющая приводит к изменению петрографического состава аллювия в зависимости от того, материал какого селя попадал в русло на данном участке.

Роль подпрудных водоемов в формировании руслового материала. В пределах временных подпрудных водоемов идет активное накопление переносимого рекой мелко- и крупнообломочного материала — формируется внутренняя дельта. В ее проксимальной части накапливается более крупный галечно-валунный материал, а в дистальной — более тонкие песчано-гравийные и даже песчано-суглинистые отложения. Здесь также аккумулируются селевые массы, выносимые с верхних по течению участков долины. О мощности осадков в центральной части нижнего подпрудного озера на участке близ гейзера Большой можно судить по высоте постройки этого гейзера относительно уреза реки: до формирования озера в 2007 г. она составляла около 11 м (Леонов, 2017), а в 2021 г. была порядка 5 м. На данном участке активная аккумуляция продолжалась с 2007 по 2014 г., при этом по результатам проведенного летом 2007 г. эхолотирования возникшего подпрудного водоема (Пинегина и др., 2008) мощность рыхлых отложений в его днище в 600 м выше плотины (рассматриваемый нами участок) составляла от 7 до 15 м, что, видимо, было обусловлено забросом се-

левого материала 2007 г. вверх по долине. При спуске озера в 2014 г. часть материала была вынесена, началось постепенное врезание реки в аккумулятивную толщу и ее размыв, к августу 2021 г. мощность отложений составляла около 6 м. На месте спущенного озера сформировалось много-рукавное русло с 2–3 протоками, разделенными песчаными и песчано-галечными косами. Условия осадконакопления в подпрудном водоеме были достаточно изменчивыми на разных его участках, что сказалось на распределении ведущих минералов мелкопесчаной фракции.

ВЫВОДЫ

Выявленные в результате исследований признаки позволили разделить анализируемые осадки на аллювиальные и селевые и подтвердить значительное участие селевого материала в формировании современного аллювия р. Гейзерной.

Общими чертами аллювия в нижнем и среднем течении реки являются: плохая окатанность обломков пород размерности валунов и гальки (1–2 класс), слабая сортировка мелкообломочной составляющей аллювия, обилие обломков пород и сростков минералов даже во фракции тонкого песка. Все это свидетельствует о слабой дезинтеграции осадка и значительной доли в нем склонового материала, в том числе переотложенного селями.

Большое содержание вторичных агрегатов (до 70% легкой фракции размерности 0.1–0.25 мм) и измененных обломков пород (до 80%) в галечной фракции аллювия свидетельствует о значительном влиянии газогидротермальной деятельности на переработку размываемых пород и о повсеместном развитии гидротермально измененных толщ в бассейне реки. А также о вторичном выветривании обломочного материала на участках термальных полей.

Аккумуляция материала в русле носит фрагментарный характер, доминирует на участках: (1) активного поступления материала со склонов (временные плотины), (2) выполаживания продольного профиля в местах подпрудных водоемов и (3) выноса селевого материала. Наблюдается чередование участков аккумуляции и врезания русла с доминированием последних.

Возникновение двух подпрудных водоемов за последние 15 лет, а также находки прослоев тонкого песчаного материала в осадках низких террасовых уровней свидетельствуют о том, что для долины р. Гейзерной типично периодическое формирование подобных короткоживущих бассейнов в днище долины.

Условия накопления мелкопесчаных отложений на участках однорукавного русла и в пределах подпрудных водоемов различаются, что сказыва-

ется на соотношении ведущих минералов тяжелой фракции.

Обилие хорошо окатанного гравия и крупного песка, дряхлый облик окатанных зерен свидетельствуют о том, что наряду с активным поступлением склонового и селевого материала р. Гейзерная размывает древние флювиальные осадки. Скорее всего это отложения докальдерного этапа развития территории. Собранные данные позволяют провести последующий анализ более древних аккумулятивных толщ в бассейне реки и наметить основные этапы его эволюции. Однако и на этом этапе исследований очевидно, что несмотря на значительные объемы поступающего со склонов материала, река успевает его перерабатывать и продолжает врезаться.

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 важным фактором их развития и во многом обуславливает морфологию их бортов и днища, а также наряду с гидротермальными процессами влияет на характер аллювия.

БЛАГОДАРНОСТИ

Методики исследований разрабатывались в рамках темы государственных заданий Института географии РАН – АААА-А19-119021990091-4 (FMGE-2019-0005), а также географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова – № 121051100167-1. 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 всестороннюю помощь и консультации при проведении исследований, А.В. Григорьевой за выполнение аналитических работ, участникам полевых исследований 2021 г. А.Л. Гуринову, А.А. Медведеву и А.С. Цыпленкову, а также сотрудникам Кроноцкого заповедника за помощь и поддержку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас долины реки Гейзерной в Кроноцком заповеднике / А.В. Завадская. (2015). М.: КРАСАНД, 88 с.
- Атлас текстур и структур осадочных горных пород. Часть 1. Обломочные и глинистые породы / А.В. Хабаков. (1962). М.: Госгеолтехиздат, 578 с.
- Воробьевский И.Б., Дроздин В.А., Фролова Н.Л., Чижова В.П. (2010). Гидрологические и рекреационные последствия катастрофического селя в Долине гейзеров (Камчатка) // Вестник Моск. ун-та. Серия 5. География. № 2. С. 46–52.
- 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: 10.10.2022).
- 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: 10.10.2022).
- Двигало В.Н., Мелекесцев И.В. (2009). Геолого-геоморфологические последствия катастрофических обвалов и обваловно-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 фотограмметрических исследований // 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.
- Егорова И.А. (1993). Возраст и палеогеографические условия формирования вулканогенно-осадочных отложений Узон-Гейзерной кальдерной депрессии на Камчатке (по результатам палинологических исследований) // Вулканология и сейсмология. № 2. С. 27–43.
- Зеркаль О.В., Гвоздева И.П., Фролова Ю.В. (2019). Развитие оползневых процессов в долине р. Гейзерной // 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.
- Краевая Т.С., Брайцева О.А., Шеймович В.С. и др. (1979). Отложения четвертичных кальдер Камчатки // Вулканология и сейсмология. № 4. С. 3–11.
- Кременецкая Т.Н. (1977). Речные, лагунные, озерные отложения в вулканических районах (Камчатка) // Труды ГИН АН СССР. Вып. 299. 100 с.
- Лебедева Е.В. (2018). Цепочки катастрофических геоморфологических процессов в речных долинах вулканических регионов // Геоморфология. № 4. С. 36–52. <https://doi.org/10.7868/S0435428118040041>
- Лебедева Е.В. (2019). Виды воздействия вулканической деятельности на флювиальный рельеф // Геоморфология. № 4. С. 49–66. <https://doi.org/10.31857/S0435-42812019449-66>
- Лебедева Е.В., Жарков Р.В. (2022). Аккумулятивные формы рельефа в долинах с газогидротермальными проявлениями (на примере водотоков ряда вулканических массивов Курило-Камчатского региона) // Геоморфология. № 1. С. 81–100. <https://doi.org/10.31857/S0435428122010096>
- 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>

- Леонов А.В. (2017). Каталог гейзеров Кроноцкого заповедника. Долина гейзеров и кальдера вулкана Узон: история и современность. М.: Изд-во ООО "Реарт", 384 с.
- Леонов В.Л. (2007). Геологические предпосылки и возможность прогноза оползня, произошедшего 3 июня 2007 г. в Долине гейзеров, Камчатка // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Первая региональная научно-техническая конференция. Петропавловск-Камчатский: Камчатский филиал геофизической службы РАН, С. 19–27.
- Леонов В.Л. (2014). Обвал и оползень, произошедшие 4 января 2014 г. в Долине Гейзеров, Камчатка, и их последствия // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. Вып. 23. № 1. С. 7–20.
- Леонов В.Л., Гриб Е.Н., Карнов Г.А. и др. (1991). Кальдера Узон и Долина Гейзеров // Действующие вулканы Камчатки. Т. II. М.: Наука, С. 94–141.
- Пинегина Т.К., Делемень И.Ф., Дроздин 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., Дроздин 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.: Географиз, 120 с.
- 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 // 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 // XXXVI Пленум ГК РАН: Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием "Геоморфология – наука XXI века". Барнаул: Изд-во АГУ, С. 403–410.

GEYSERNAYA RIVER ALLUVIUM (KAMCHATKA): COMPOSITION AND FEATURES OF FORMATION²

E. V. Lebedeva^{a,*}, A. L. Zakharov^{a,##}, and D. V. Mikhalev^{a,b,###}

^a Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

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

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

##E-mail: zaanleo@gmail.com

###E-mail: mikhalev.dmitry@gmail.com

A comprehensive compositional analysis of the alluvium from the river with active gas-hydrothermal manifestations was carried out for the first time. Geysernaya river alluvium is characterized by: poor roundness of boulders and pebbles (grades 1–2), poorly sorted fine-clastic component, abundance of rock fragments and intergrown minerals even in the fine sand fraction. All these indicate the sediment weak disintegration with significant amount of slope material in it, including redeposited by mudflows. The high content of smectite-zeolite and other newly formed (secondary) minerals aggregates (up to 70% of the light fraction 0.1–0.25 mm in size) and altered rock fragments (up to 70–80% in the pebble fraction of alluvium) indicate that a gas-hydrothermal activity significantly impact the bedrock and alluvium weathering within the thermal fields. The material accumulates predominant in the areas of: (1) active delivery of slope material (temporary dams), (2) the longitudinal profile flattening in dammed reservoirs, and (3) mudflow material removal. Formation of two dammed reservoirs over the past 15 years, as well as layers of fine sand found in the low terrace's sediments, indicate that such short-lived basins form periodically in the Geysernaya river valley. The conditions of the fine sand deposition in sections of a single-branch channel and within dammed reservoirs are differ, which affects the heavy fraction leading minerals ratio. The well-rounded gravel and abundance of coarse sand, and their decrepit appearance indicates that, along with the processing of incoming slope and mudflow material large volumes the Geysernaya river continues to cut in and erodes the ancient fluvial sediments.

Keywords: mineralogical analysis, grain morphoscopy, secondary (newly formed) minerals, accumulation, weathering, gas-hydrothermal manifestations

² Lebedeva E.V., Zakharov A.L., Mikhalev D.V. (2023). Geysernaya River alluvium (Kamchatka): composition and features of formation. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. Vol. 54. No. 2. P. 36–50 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S2949178923020056>; <https://elibrary.ru/ECGHJU>

ACKNOWLEDGEMENTS

Research methods were developed within the framework of the topic of state assignments of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences – AAAA-A19-119021990091-4 (FMGE-2019-0005), as well as the Faculty of Geography of Moscow State University by M.V. Lomonosov – No. 121051100167-1. Field and analytical works were carried out with the support of the Russian Science Foundation grant No. 21-17-00216, <https://rscf.ru/project/21-17-00216/>. The authors are deeply grateful to E.G. Ananyeva for her comprehensive assistance and advices during the research, to A.V. Grigoryeva for performing analytical work, to 2021 field research participants A.L. Gurinov, A.A. Medvedev and A.S. Tsyplov, as well as the staff of the Kronotsky Reserve for their help and support.

REFERENCES

- Dvigalo V.N., Melekestsev I.V. (2009). The geological and geomorphic impact of catastrophic landslides in the Geyser Valley of Kamchatka: Aerial photogrammetry-Geological and geomorphological consequences of catastrophic rockfall and rockfall – landslides processes in the Kamchatka Valley of Geysers (according to aerial photogrammetry). *Vulkanologiya i seismologiya (Volcanology and Seismology)*. No. 5. P. 24–37. <https://doi.org/10.1134/S0742046309050029> (in Russ.)
- 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. *Selevye potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita: materialy III Mezhdunarodnoi konferentsii, Yuzhno-Sakhalinsk, 22–26 sentyabrya 2014 g.* (Mudflows: disasters, risk, forecast, protection: Materials III Int. conf.). Yuzhno-Sakhalinsk: Sakhalinskiy filial Dal'nevostochnogo geologicheskogo instituta DVO RAN (Sahal. Phil. Far East. Geol. Institute of FEB RAS) (Publ.), P. 105–108. (in Russ.)
- Egorova I.A. (1993). Age and paleogeography of formation of volcano-sedimentary deposits in the Uzon-Geyser-naya caldera depression, Kamchatka (according to palynological data). *Vulkanologiya i seismologiya (Volcanology and Seismology)*. No. 2. P. 27–43. (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. *Geodinamicheskie protsessy i prirodnye katastrofy: tezisy dokladov III Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*. Yuzhno-Sakhalinsk: Institut morskoi geologii i geofiziki DVO RAN (Publ.), P. 186. (in Russ.)
- Geologicheskaya karta* (Geological map). Sheet N-57, scale 1 : 1,000,000, 3rd edition, 2011 [Electronic resource data]. Access way URL: https://vsegei.ru/ru/info/ggk_1000ns/ (date of access: 10.10.2022).
- Geologicheskaya karta* (Geological map). Sheet N-57-XXI, N-57-XXII, scale 1 : 200,000, 1st edition, 1981. [Electronic resource data]. Access way URL: https://vsegei.ru/ru/info/pub_ggk200-1/ (date of access: 10.10.2022).
- Khabakov A.V. (Ed.). (1962). *Atlas tekstur i struktur osadochnykh gornykh porod. Chast' 1. Oblomochnye i glinistyye porody* (Atlas of Textures and Structures of Sedimentary Rocks. Part 1. Clastic and clayey rocks.). Moscow: Gosgeoltekhizdat (Publ.), Part 1. Clastic and clayey rocks. 578 p. (in Russ.)
- Kraevaya T.S., Braitseva O.A., Sheimovich V.C. et al. (1979). Deposits of the Quaternary calderas of Kamchatka. *Vulkanologiya i seismologiya (Volcanology and Seismology)*. No. 4. P. 3–11. (in Russ.)
- Kremenetskaya T.N. (1977). *Rechnye, lagunnye, ozernye otlozheniya vulkanicheskikh regionov (Kamchatka)*. (Fluvial, lagoonal, lacustrine deposits of volcanic regions (Kamchatka)). Moscow: Nauka (Publ.), Vol. 299. 100 p. (in Russ.)
- Lebedeva E.V. (2018). Sequences of catastrophic geomorphic processes in the river valleys of volcanic regions. *Geomorfologiya*. No. 4. P. 36–52. (in Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0435428118040041>
- Lebedeva E.V. (2019). Kinds of impacts of volcanic and post volcanic activity on fluvial relief. *Geomorfologiya*. No. 4. P. 49–66. (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0435-42812019449-66>
- Lebedeva E.V., Sugrobov V.M., Chizhova V.P., Zavadskaya A.V. (2020). The valley of the river Geyser-naya (Kamchatka): hydrothermal activity and features of relief forming. *Geomorfologiya*. No. 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 manifestations (the Kuril-Kamchatka region as an example). *Geomorfologiya*. Vol. 53. No. 1. P. 81–100. (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0435428122010096> (in Russ.)
- Leonov V.L. (2007). Geological preconditions and the possibility of forecasting a landslide that took place on 3 June 2007 in the Valley of Geysers, Kamchatka. *Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa Dal'nego Vostoka Rossii. Pervaya regional'naya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya*. Petropavlovsk-Kamchatskiy: Kamchatskii filial geofizicheskoi sluzhby RAN (Publ.), P. 19–27. (in Russ.)
- Leonov V.L. (2014). The collapse and landslide that occurred on January 4, 2014 in the Valley of Geysers, Kamchatka, and their consequences. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle*. No. 1. Vol. 23. P. 7–20. (in Russ.)
- Leonov A.V. (2017). *Katalog geizerov Kronotskogo zapovednika. Dolina geizerov i kal'dera vulkana Uzon: istoriya i sovremennost'* (Catalog of geysers in the Kronotsky Reserve. Valley of Geysers and Uzon Volcano Caldera: Past and Present). M.: OOO Reart (Publ.), 384 p. (in Russ.)
- Leonov V.L., Grib E.N., Karpov G.A. et al. (1991). Caldera Uzon and the Valley of Geysers. *Deistviyushchie vulkany Kamchatki* (Active volcanoes of Kamchatka). Iss. II. Moscow: Nauka (Publ.), P. 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*. No. 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. *XXXVI Plenum GK RAN: Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem "Geomorfologiya – nauka XXI veka"*. Barnaul: ASU Publishing House, 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.)
- Vorob'evsky I.B., Droznin V.A., Frolova N.L., Chizhova V.P. (2010). Hydrological and recreational consequences of catastrophic mudflow in the Valley of Geysers (Kamchatka). *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya* (Bulletin of Moscow Univ. Series 5. Geography). No. 2. P. 46–52 (in Russ.)
- Zavadskaya A.V. (Ed.). (2015). *Atlas doliny reki Geizernoi v Kronotskom zapovednike* (Atlas of the valley of the River Geysernaya in Kronotsky Reserve). M.: 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. *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.)