

## Внутригодовые изменения водного, твердого и растворенного стока реки Гейзерной

Школьный Д.И.<sup>1</sup>, Цыпленков А.С.<sup>2</sup>, Лебедева Е.В.<sup>3</sup>, Ефимова Л.Е.<sup>1</sup>

### Intra-annual changes in runoff, sediment yield and dissolved load of the Geysernaya River

Shkolnyi D.I., Tsyplenkov A.S., Lebedeva E.V., Efimova L.E.

<sup>1</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва;

e-mail: danila.hydro@yandex.ru

<sup>2</sup> Manaaki Whenua – Landcare Research, г. Палмерстон-Норт, Новая Зеландия

<sup>3</sup> Институт географии РАН, г. Москва

Описываются результаты стационарных и маршрутных наблюдений за элементами стока реки Гейзерной и ее притоков по данным 2021-2023 гг. Приводится количественное описание режимов жидкого, твердого и растворенного стока реки и факторов их изменчивости.

**Введение.** Долина р. Гейзерная с расположенным в ее нижнем течении участком Гейзерного термального поля, получившим название «Долина Гейзеров», благодаря своей уникальности является одним из наиболее геологически и геоморфологически изученных районов Камчатки, в том числе – среди зон с гидротермальными проявлениями. Специализированных долгосрочных наблюдений за режимом р. Гейзерная ранее не производилось, существуют лишь отрывочные данные [1]. Характерной особенностью Долины является высокая скорость рельефообразования, которая связана с малой прочностью вулканогенно-осадочных пород, наличием многочисленных газогидротермальных проявлений и сейсмичностью, в связи с чем формирование рельефа долины реки во многом определяется гравитационными склоновыми процессами [3]. Современный облик долины сформировался в результате двух катастрофических обвалов-оползней и последовавших за ними селей 2007 и 2014 гг. [4, 5], сформировавших подпрудные озера. Активные процессы, происходящие в долине, значительно трансформируют сток р. Гейзерная, в связи с этим особенности его внутригодовых колебаний тесно связаны с изменяющимся ландшафтом.

Представленные в настоящей статье результаты получены в ходе экспедиционных работ в летние сезоны 2021-2023 гг. В створе кордона Кроноцкого заповедника «Долина Гейзеров» был оборудован временный гидрологический пост, действовавший на протяжении весенне-летнего сезона каждого года. Наблюдения за уровнем воды производились барометрическими самописцами Novo, установленными в реке и на берегу. Дополнительно в поток устанавливался нефелометр Odeon, синхронно с самописцами уровня фиксирующий оптическую мутность воды. Для расчетов стока при различных уровнях измерялись расходы воды гидрометрической вертушкой, что позволило получить кривую связи расходов и уровней воды. Помимо наблюдений на посту, в меженный период производились маршрутные обследования, в ходе которых измерялись расходы воды на притоках р. Гейзерная и, дополнительно, производился отбор проб воды на посту и в притоках, позволивший получить значения объемной мутности путем фильтрования. Содержание основных ионов в фильтрате анализировалось при помощи капиллярного электрофореза на приборе «Капель-105М». Пробы из верхней части бассейна р. Гейзерная (т.н., «Долина смерти») были подвергнуты детальному анализу содержания более широкого перечня химических веществ методом газовой хроматографии. Также в августе 2022 г. были выполнены детальные промеры глубин верхнего подпрудного озера с помощью эхолота Deeper.

**Влияние подпрудных озер.** До 2007 г. р. Гейзерная представляла собой небольшой водоток со ступенчатым продольным профилем и постоянным расходом воды, увеличивавшемся вниз по течению за счет разгрузки притоков и термальных источников. Площадь водосборного бассейна – 27 км<sup>2</sup>, принимающий водоток – р. Шумная, вытекающая из кальдеры Узон. Оползень, сошедший в 2007 г. по долине

левого притока (руч. Водопадный) перегородил реку, создав подпрудное озеро длиной 1.2 км и объемом около 520 тыс. м<sup>3</sup> (значение получено по топографической карте и данным из [2, 5]). Отложения оползня были вовлечены в селевой поток, спустившийся на 2 км до устья р. Гейзерная и далее по р. Шумная. Образовавшееся озеро постепенно заполнялось наносами, поступающими с верхней части бассейна реки (с 2007 по 2013 г., 12 % от общего объема заполнения в 264 тыс. м<sup>3</sup>). В результате селей, вызванных ливневыми дождями осенью 2013 г., было заполнено еще 70 % объема. Оставшаяся часть заполнена отложениями селя, сформировавшегося после обвала 2014 г. В летний сезон 2015 г. озеро окончательно исчезло из-за расширения створа стока через тело запруды за счет его размыва до крупных валунных пород.

Оползень-обвал, сошедший в январе 2014 г., перекрыл долину реки в 4 км выше по течению и также сформировал подпрудное озеро первоначальной длиной 600 м и объемом 314 тыс. м<sup>3</sup> (по состоянию на 2022 г., по данным промеров глубин). За 8 лет после формирования плотины объем заполнения озера, происходящего за счет роста дельты реки в верхней части водоема, составил около 47 тыс. м<sup>3</sup>. В настоящий момент озеро, имея период водообмена 13-40 часов (в зависимости от сезона), оказывает регулирующее воздействие на сток реки.

**Гидрологический режим.** Сток вод р. Гейзерная имеет сложный гидрологический режим (рисунок), значительно трансформируясь по длине реки в пределах бассейна – в первую очередь, за счет фильтрации в подрусовой сток в верхнем и среднем течении, активной разгрузки в нижнем течении, а также путем регулирования стока подпрудным озером 2014 г. Базисный сток реки формируется при разгрузке грунтовых водоносных комплексов, различающихся в пределах бассейна по дебиту и химическому составу – преимущественно, из экстрозивно-трещинных источников в притоках р. Гейзерная, а также через термальные выходы, сосредоточенные, в основном, на склонах вулкана Кихпинич и по дну Долины Гейзеров. Стоит отметить бассейн ручья Лавовый – в его верховьях находятся наиболее мощные источники холодных вод, наличие которых значительно повышает модуль стока ручья, выделяя его среди остальных участков бассейна. С большой вероятностью, из-за глубокого вреза, ручей перехватывает подземный сток из соседних водосборов (руч. Игрушка, Сестренка и более мелких). Основной объем стока поступает в реку в процессе снеготаяния, а также при выпадении ливневых осадков – как за счет непосредственного склонового стекания, так и путем просачивания в подземные горизонты и дальнейшей их разгрузки в нижних частях бассейнов. По данным наблюдений в створе поста, базисный сток колеблется в течение года от 0.3-0.5 м<sup>3</sup>/с в феврале (преобладающее питание термальными водами) до 3 м<sup>3</sup>/с (летом при максимальном наполнении грунтовых горизонтов за время снеготаяния).

Зимняя межень начинается в первой-второй декаде ноября. Перемерзания реки не наблюдается по всей длине из-за разгрузки термальных вод. С первой декады марта по середину мая происходит постепенный сход снежного покрова в днище долины с периодическим выпадением твердых осадков без значительных подъемов уровня – основным источником питания реки по-прежнему остаются термальные воды, о чем свидетельствует значительная температура воды (до 20 °С) в течение данного периода. К концу июня температура воды устойчиво понижается ниже 10 °С, что свидетельствует о переходе к фазе постоянной разгрузки в реку вод подпрудного озера, наполнившегося за счет снеготаяния. К концу июня – началу июля приурочено таяние основной массы снега на верхней части склонов долины, что выражается в максимальной за год суточной изменчивости уровня (до 10-30 см), после чего уровень постепенно понижается. Ливневые паводки в этот период сглаживаются озером, крупнейшие из них характеризуются резким понижением температуры воды (как, например, 18-19 августа 2023 г.). Уровень и расход воды имеют суточный ход, что связано с преимущественной ролью снеготаяния в питании реки. В течение дня

поступающая вода накапливается в верхнем озере, ближе к вечеру начинается перелив через плотину, сформированную оползнем 2014 г. Суточный пик уровня смещается с 18 часов в июне до 2 часов ночи в июле-августе, что говорит о постепенном смещении снеговой линии в верховьях водосбора и, соответственно, увеличении времени добегания воды из верховьев в озеро.

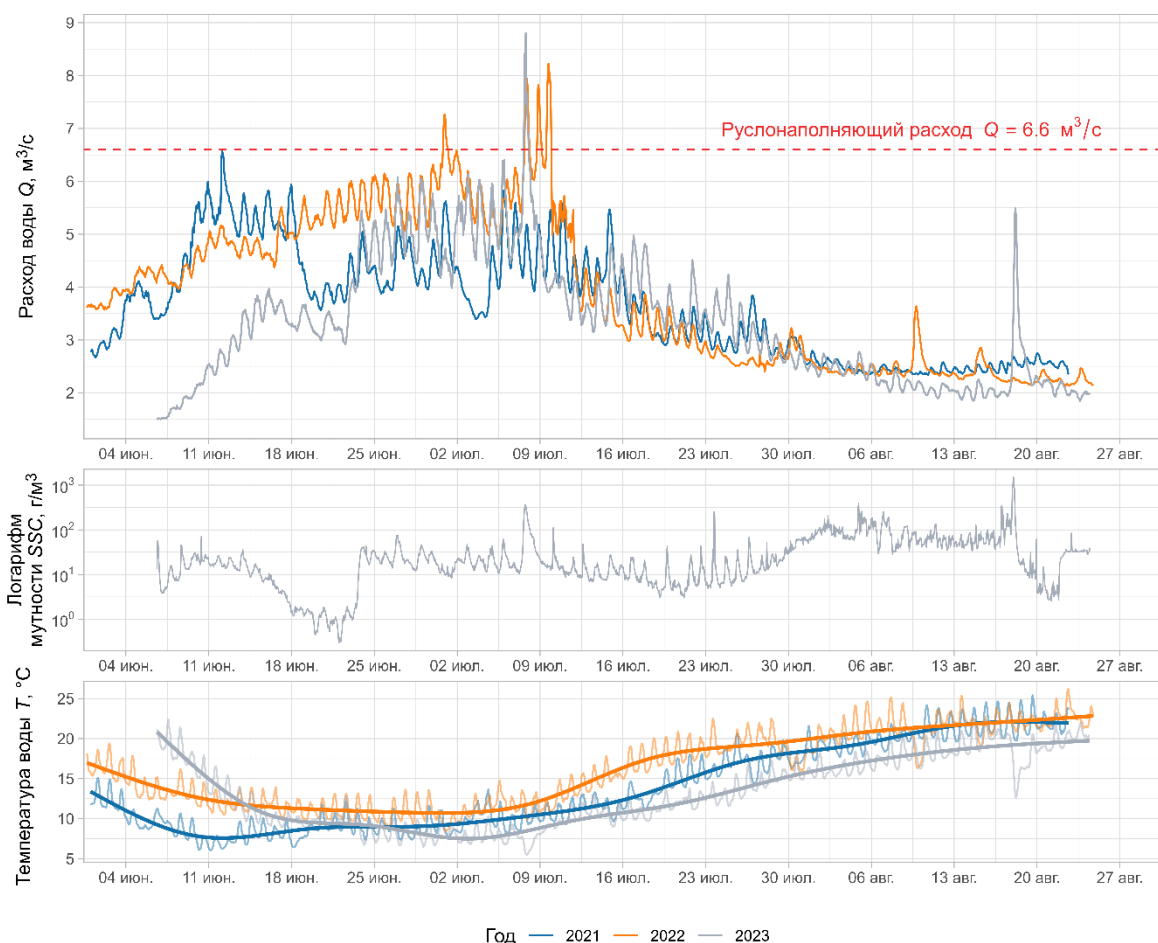


Рисунок. Изменения элементов водного режима на посту в 2021-2023 гг.

**Растворенный сток.** Общий оценочный объем выноса с растворенным стоком к устью р. Гейзерная составляет 16.9-31.8 тыс. т/г., из них лишь 5.1 тыс. т выносятся с верхней части водосбора. Основной объем выносимых рекой веществ поступает в результате разгрузки термальных минерализованных вод на приустьевом участке, особенно увеличиваясь в теле оползня. Внутри водосбора основной источник растворенного стока – бассейн р. Левая Гейзерная, дренирующей склоны вулкана Кихпиныч, с которого поступает около 4 тыс. т растворенных веществ в год. Модуль растворенного стока на левобережной части водосбора (от 3 до 16 г/с/км<sup>2</sup>) значительно выше правобережной (до 2 г/с/км<sup>2</sup>), эти части также отличаются и по преобладающим ионам. Воды правобережной части бассейна – гидрокарбонатные натриево-кальциевые, с изменением содержания преобладающего катиона в сторону устья. Воды верхней части и левого борта долины Гейзерной, в основном, сульфатно-кальциевые. Ближе к устью р. Гейзерная класс воды меняется на хлоридно-натриевый, что говорит о постепенном просачивании вод с верхней части бассейна и их замещении водами из гейзеров и других горячих источников, разгружающимися из более глубоких подземных горизонтов как в днище Долины Гейзеров, так и по длине многих ее притоков, и имеющими в 4-5 раз более высокую минерализацию. Ниже основных гейзеров (в районе кордона) минерализация в начале лета 2023 г. (отражающая практически исключительное «гейзерное» питание) составила 299 мг/л против 67 мг/л в

августе 2022 г., когда базисный сток был значительно разбавлен за счет подпитки от просачивающихся поверхностных вод. Между кордоном и устьем реки днище долины преобразовано, частично являясь ложем спустившегося подпрудного озера, частично протекая через оползневый материал, переотложенный селем, в результате чего минерализация на данном участке кратно растет (в 4 раза в августе 2022 г.), что свидетельствует об упомянутом ранее замещении поверхностных вод. Согласно расчетам, основанным на детальном химическом составе вод верхней части бассейна и связи между содержанием основных ионов в отобранных пробах и измеренными при их отборе концентрациями растворенного вещества, примеси (подавляющая доля которых  $Si$  и  $Al$ ) составляют около 15 % объема растворенного стока, незначительно понижаясь в правобережной части бассейна и увеличиваясь в левобережной.

**Сток наносов.** Основной источник взвеси в воде р. Гейзерная – перемыв рыхлых селевых отложений, в связи с чем максимальные модули стока наносов наблюдаются в руч. Лавовый и на участке транзита реки через отложения нижнего оползня. Пик мутности, в отличие от пика уровней воды, не смещается во времени в течение летнего сезона, что подтверждает практически полный перехват взвеси верхним подпрудным озером. Общий современный сток взвешенных наносов через устьевой створ реки, восстановленный по данным наблюдений на посту и данным пробоотбора, составляет около 7 тыс. т/г., что соответствует модулю в  $7.9 \text{ г/с/км}^2$ . Оценки скоростей заполнения подпрудных озер позволили оценить фоновые объемы влекомой составляющей стока наносов в 38 % от общего стока наносов. При этом, эти значения означают усредненные данные за годы наблюдений, во время которых не наблюдалось значимых эрозионных событий. Их прохождение приводит к импульсному поступлению материала в речную сеть, значительно увеличивая сток наносов. В период наблюдений растворенный сток преобладал над твердым и составлял более 90 % от общего объема перемещаемого вещества практически во всех пробах, понижаясь только для бассейна руч. Лавовый (где твердый сток наибольший) и для р. Правая Гейзерная (где характерна наименьшая минерализация в пределах бассейна).

Результаты получены при финансовой поддержке проекта Министерства высшего образования и науки (075-15-2024-614).

#### Список литературы

1. Воробьевский И.Б., Дроздин В.А., Фролова Н.Л., Чижова В.П. Гидрологические и рекреационные последствия катастрофического селя в Долине гейзеров (Камчатка) // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2010. № 2. С. 46-52.
2. Кирюхин А.В., Рычкова Т.В., Дубинина Е.О. Анализ гидрогеологического режима гидротермальной системы Долины Гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка) после катастрофы 3.06.2007 // Вулканология и сейсмология. 2015. № 1. С. 3-20.
3. Лебедева Е.В., Сугробов В.М., Чижова В.П., Завадская А.В. Долина р. Гейзерной (Камчатка): гидротермальная деятельность и особенности рельефообразования // Геоморфология. 2020. № 2. С. 60-73.
4. Леонов В.Л. Обвал и оползень, произошедшие 4 января 2014 г. в Долине Гейзеров, Камчатка, и их последствия // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014. № 1. Вып. 23. С. 7-20.
5. Пинегина Т.К., Делемень И.Ф., Дроздин В.А. и др. Камчатская Долина Гейзеров после катастрофы 3 июня 2007 г. // Вестник ДВО РАН. 2008. № 1. С. 33-44.