

doi: 10.24412/2687-1092-2024-11-708-712



## ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ОБЛАСТЕЙ С АКТИВНЫМИ ГАЗОГИДРОТЕРМАЛЬНЫМИ ПРОЯВЛЕНИЯМИ (УЗОН-ГЕЙЗЕРНАЯ ДЕПРЕССИЯ, ВОСТОЧНАЯ КАМЧАТКА)

✉ Котенков А.В.<sup>1,2</sup>, Лебедева Е.В.<sup>1</sup>, Харченко С.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

✉ avkotenkov@yandex.ru

В работе приведены результаты исследований 2024 года, включая экспедиционные, в долине р. Гейзерной и Шумной, расположенных в восточной части Узон-Гейзерной кальдеры (Восточная Камчатка). В ходе полевых работ дополнено геоморфологическое описание долин, проведена верификация контуров обвально-оползневых тел и очагов зарождения оползней, по итогам которых была составлена карта типов склоновых процессов. Для долины р. Гейзерной характерны сложные обвально-оползневые процессы, для Шумной – солифлюкция и осыпи. По имеющейся полевой инвентаризации за 2021–2024 гг. и данным по геологическому строению, сейсмо-тектоническим процессам, морфометрическим параметрам было проведено моделирование предрасположенности территории к оползням. Установлено, что с наибольшей вероятностью оползни сойдут в пределах левого борта долины р. Гейзерной с активными газогидротермальными проявлениями, при этом для долины р. Шумной, где подобных проявлений нет, оползневая активность не характерна.

Ключевые слова: *долина Гейзерной, долина Шумной, геоморфологическая съёмка, склоновые процессы, моделирование оползнеопасности*

**Введение.** Узон-Гейзерная депрессия представляет собой сложную кальдеру обрушения, состоящую из серии вложенных друг в друга разновозрастных кальдер [Вулканизм, 1974]. Наиболее активны газогидротермальные системы, вскрытые эрозией р. Гейзерной, в восточной части кальдеры [Сугробов и др., 2009], связанные с близко расположенным к поверхности магматическим очагом под вулканом Молодой Кихпиныч [Кугаенко, 2015]. Газогидротермальные преобразования вулканитов и вулканогенно-озёрных отложений, в особенности — аргиллизация [Фролова и др., 2015] приводят к сильному увеличению неустойчивости материала на склонах и к дальнейшей активизации масштабных склоновых процессов, часто трансформирующихся в сели. В 2024 году цель работ заключалась в выявлении роли газогидротермальных процессов в морфодинамике вулканической горной территории (на примере долины реки Гейзерной) — координаты: 54° 24' и 54° 28' с. ш; 160° 10' в. д. и 160° 12' в. д. (рис. 1 А). Нужно было провести *типизацию и оценить потенциальную активность склоновых процессов в речных долинах Камчатки в условиях газогидротермальных проявлений (долина р. Гейзерной) и без таковых (долина р. Шумной).*

**Методы исследований.** В рамках экспедиционных работ проведена геоморфологическая съёмка, дополняющая описание морфологии долин рек Гейзерной и Шумной и осложняющих их форм — в ходе чего были верифицированы контуры обвально-осыпных тел, очагов зарождения голоценовых и современных оползней, изначально выделенные по результатам дешифрирования [Балдина и др., 2023].

На следующем этапе была произведена оценка предрасположенности территории к оползням (landslide susceptibility modeling—LSM) на основе алгоритма Random forest. LSM базируется на анализе пространственных закономерностей между фактическими проявлениями оползней в прошлом и комплексом природных факторов [Reichenbach et al., 2018; Харченко., Шварёв, 2020; Gantimurova et al., 2021]. В модели учитывались геологические, геоморфологические и гидро-геоморфологические характеристики, а также термальные аномалии земной поверхности, рассчитанные по данным Landsat-8 за

2017-2021 гг. за вычетом топографических эффектов (т.е. только как следствия земного теплового потока, альбедо и погодных различий).

**Результаты и обсуждение.** Была составлена карта типов склоновых процессов на выбранные участки долин. Установлено, что долина р. Гейзерной с газогидротермальными проявлениями характеризуется наиболее активным развитием склоновых процессов, что приводит к появлению многочисленных разновысотных оползневых террасовидных поверхностей [Лебедева и др., 2020]. Здесь чаще всего отмечаются комплексные обвалы-оползни (события 1981, 2007 и 2014 гг., а также более древние), которые включают сочетание оползневых и обвальных процессов и порождают мощные сели [Пинегина и др., 2008; Леонов, 2014; Lebedeva, Chernomorets, 2024]. На участках выходов лав и в зонах их контакта с вулканогенно-озерными туфами отмечено множество обвалов и осыпей. Блоковые оползни представлены единично. Солифлюкция наблюдается на пологих приводораздельных склонах крутизной  $<5-10^\circ$ . В долине р. Шумной, где нет газогидротермальных проявлений, следов масштабных обвалов-оползней не наблюдается. Здесь выявлено несколько хорошо морфологически выраженных уступов, образованных в результате схода небольших обвалов и оползней.

По результатам моделирования предрасположенности территории к оползням было также установлено, что оползневая морфодинамика наиболее активна на нижнем и среднем участках долины р. Гейзерной. Она в основном сконцентрирована в пределах прибровочной части левого борта долины, где представлено благоприятное сочетание эндогенных факторов: литолого-структурных неоднородностей пород (контакт прочных пород экструзий со слаболитифицированными вулканогенно-озёрными отложениями посткальдерного комплекса), тектоники (зона кольцевого разлома вдоль края кальдеры) и геотермии (повышенные температурные аномалии ( $>3^\circ$ )). Здесь и в дальнейшем наиболее вероятен сход оползней (рис. 1 Б), в том числе крупных ( $p > 0,7$ ). В пределах правого борта выделяется два участка с повышенной активностью склоновых процессов: «нижний» — в местах термальных проявлений (от  $+1^\circ\text{C}$  сверх погрешности) и «верхний», выраженный фрагментарно — в пределах краев экструзий плато Круглого и г. Гейзерной. Они также приурочены к контакту пород лавового комплекса и вулканогенно-озерных отложений.

В долине р. Шумной наиболее высока вероятность схода оползней только в прибровочной части плато Круглого и Широкого на контакте вулканогенно-озёрных туфов и экструзивных пород, в особенности вдоль кольцевого разлома края кальдеры. Также небольшие по размеру оползни в основном связаны с проявлением экзогенных процессов, что подтверждается высокой значимостью «не эндогенных» предикторов в итоговой оценке оползневой опасности долины по модели Random forest. При этом выше по течению вероятности проявления склоновых процессов крайне низкие ( $p < 0,5$ ), что объясняется отсутствием здесь выходов скальных пород, являющихся зеркалом скольжения. По результатам полевых работ также не было зафиксировано оползневых тел на этом участке долины. В целом результаты моделирования были подтверждены предыдущими работами [Балдина и др., 2023], а также результатами полевых исследований.

**Выводы.** Таким образом, для долины реки Гейзерной с активными газогидротермальными проявлениями характерны многочисленные обвальные, осыпные, селевые процессы, а также крупномасштабные комплексные смещения склонового материала. В то время как для долины реки Шумной без проявления газогидротерм в основном типичны солифлюкция и осыпные процессы.

Согласно результатам моделирования, наиболее опасные в оползневом отношении участки сконцентрированы вдоль левого борта долины р. Гейзерной, в пределах зон разломов, повышенных термальных аномалий и контакта слаболитифицированных вулканогенно-озерных отложений с более прочными породами экструзий. В то же время, для участка долины р. Шумной, характеризующегося схожими геолого-

геоморфологическими условиями, но без активных газогидротерм, получены существенно более низкие вероятности формирования оползней.

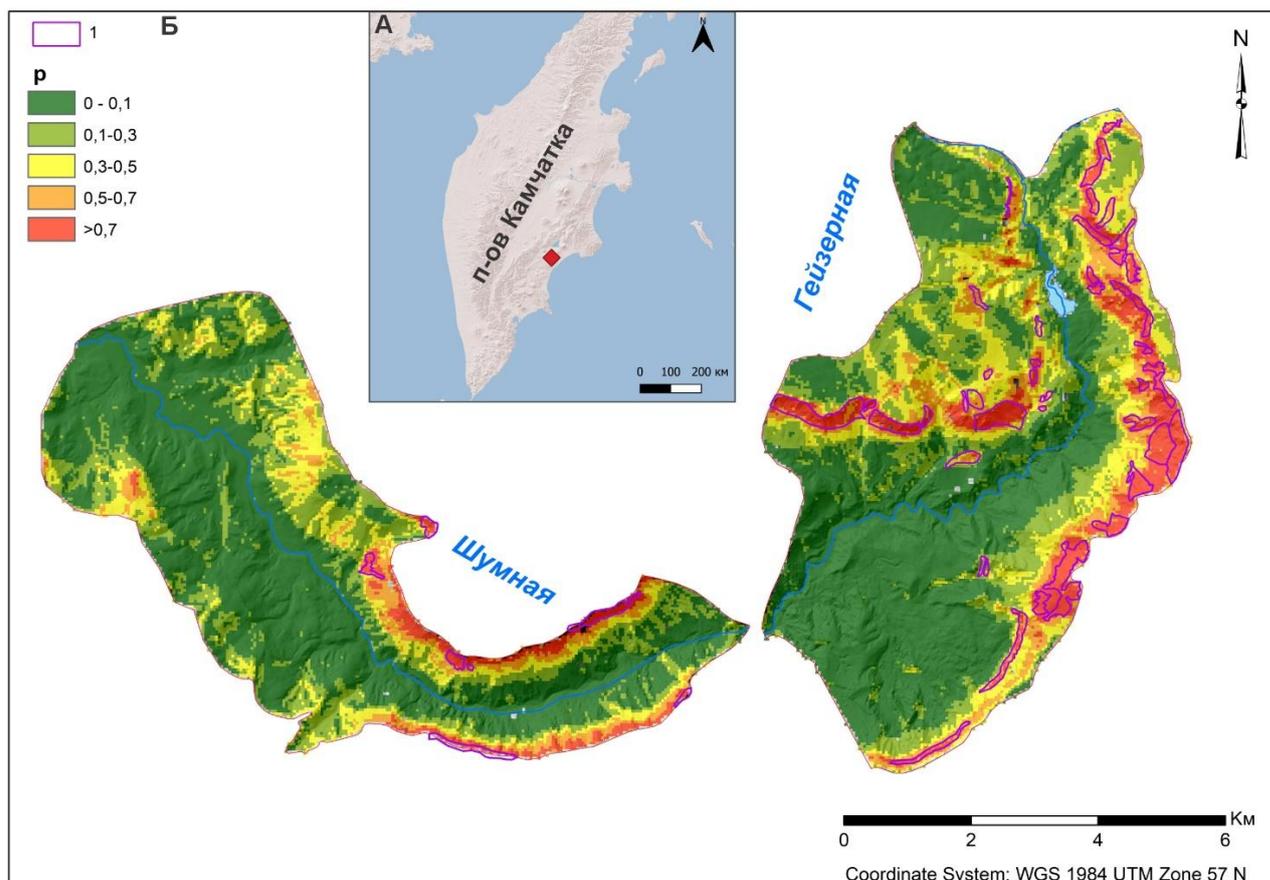


Рис.1. А. Положение Узон-Гейзерной кальдеры в пределах Камчатского п-ова. Б. Прогнозные карты предрасположенности территорий долин р. Гейзерной и верхнего течения р. Шумной к оползням. 1 – очаги зарождения оползней; р – вероятности предрасположенности территории к оползням.

**Благодарности.** Исследование выполнено по теме государственного задания Института географии РАН - FMWS-2024-0005. Полевые исследования выполнены при поддержке гранта РНФ № 21-17-00216, мегагранта № 075-15-2024-554 «Глобальные климатические вызовы на территории России: ретроспективный анализ, прогноз и механизмы адаптации» и ФГБУ «Кроноцкий государственный заповедник» по программе научно-исследовательских работ по договору № 02/2020 «Особенности формирования флювиального рельефа вулканических регионов». Разработка подхода к учету термальных аномалий при моделировании предрасположенности к оползням проведена за счет гранта РНФ (проект № 23-77-01027).

## ЛИТЕРАТУРА

Балдина Е.А., Лебедева Е.В., Аникина Н.В. Активность геоморфологических процессов на склонах речных долин в условиях газогидротермальных проявлений (по разновременным снимкам и ЦМР) // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2023. Т. 29. Ч.1 С.272–287. doi: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-272-287

Вулканизм, гидротермальный процесс и рудообразование. М.: Недра, 1974. 264с.

Кугаенко Ю.А., Салтыков В. А., Горбатиков А.В., Степанова М.Ю. Глубинная структура района Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии по данным микросейсмического зондирования // Доклады РАН. 2010. Т.435. №1. С.96-100.

Лебедева Е.В., Сугробов В.М., Чиждова В.П., Завадская А.В. Долина р. Гейзерной (Камчатка): гидротермальная деятельность и особенности рельефообразования // Геоморфология. 2020. № 2. С. 60–73. doi: 10.31857/S0435428120020066

Леонов В.Л. Обвал и оползень, произошедшие 4 января 2014 г. в Долине Гейзеров, Камчатка, и их последствия // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2014. №1 (23). С. 7–20.

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.

Сугробов В.М., Сугрובה Н.Г., Дроздин В.А. и др. Жемчужина Камчатки – Долина Гейзеров. Научно-популярный очерк, путеводитель. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс. 2009. 108 с.

Фролова Ю.В., Гвоздева И.П., Чернов М.С., Кузнецов Н.П. Инженерно-геологические аспекты гидротермальных преобразований туфогенных пород Долины гейзеров (полуостров Камчатка) // Инженерная геология. 2015. № 6. С. 30–42.

Харченко С.В., Шварёв С.В. Прогнозирование оползневой опасности в окрестностях Красной Поляны на основе линейного дискриминантного анализа // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2020. № 3. С. 22–33.

Lebedeva E. V., and Chernomorets S. S. Debris Flow Activity and Specific Features of Debris Flow Formation in the Geisernaya River Valley (Kamchatka) // Russian Journal of Pacific Geology. 2024. Vol. 18. Suppl. 1. P. S15–S27. doi: 10.1134/S1819714024700179

Gantimurova S., Parshin A., Erofeev V. GIS-Based Landslide Susceptibility Mapping of the Circum-Baikal Railway in Russia Using UAV Data // Remote Sensing. 2021. Vol. 18. Is. 13, 3629. 17 p. doi: 10.3390/rs13183629

Reichenbach P., Rossi M., Malamud B.D., Mihir M., Guzzetti F. A review of statistically-based landslide susceptibility models // Earth-Science Reviews. 2018. Vol. 180. P. 60–91. doi: 10.1016/j.earscirev.2018.03.001

## GEOMORPHIC PROCESSES OF VOLCANIC AREAS WITH ACTIVE GAS-HYDROTHERMAL MANIFESTATIONS (UZON-GEYSERNAYA DEPRESSION, EAST KAMCHATKA)

Kotenkov A.V.<sup>1,2</sup>, Lebedeva E.V.<sup>1</sup>, Kharchenko S.V.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Geography RUS, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

The paper presents the results of research in 2024, including expedition studies, in the Geysernaya and Shumnaya River valleys that are located in the eastern part of the Uzon-Geysernaya Caldera (E Kamchatka). During the field observation we improved a geomorphic description of valleys, verified the boundaries of landslides and scarps. As a result, we compiled a map of the types of slope processes. The Geysernaya River valley is characterized by complex landslide movements, while the Shumnaya One is distinguished by helifluction and scree. We conducted the landslide susceptibility modeling based on the available field inventory carried out in 2021–2024, and data on the geological structure, seismic-tectonic processes and morphometric parameters. We found out that landslides would occur with high probability within the left side of the Geysernaya River valley with active gas-hydrothermal manifestations, while for the Shumnaya River valley, where there are no such occurrences, landslides are not typical.

Keywords: *Geysernaya River valley, Shumnaya River valley, geomorphological survey, slope processes, landslide susceptibility modeling*

### REFERENCES:

Baldina E.A., Lebedeva E.V., Anikina N.V. 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) // InterCarto.InterGIS. 2023. Vol. 29. P. 272–287. doi: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-272-287 (in Russ.).

Volcanism, hydrothermal process and ore formation. M.: Nedra, 1974. 264 p. (in Russ.).

*Kugaenko Yu.A., Saltykov V. A., Gorbatikov A.V., Stepanova M.Yu.* Deep structure of the Uzon-Geysernaya volcano-tectonic depression area according to microseismic sounding data // *Doklady Earth Sciences*. 2010. Vol. 435. № 1. P. 1460-1465. doi: 10.1134/S1028334X10110115

*Lebedeva E.V., Sugrobov V.M., Chizhova V.P., Zavadskaya A.V.* The valley of the river Geysernaya (Kamchatka): hydrothermal activity and features of relief forming // *Geomorfologiya*. 2020. № 2. P. 60–73. doi: 10.31857/S0435428120020066 (in Russ.).

*Leonov V.L.* The collapse and landslide that occurred on January 4, 2014 in the Valley of Geysers, Kamchatka, and their consequences // *Vestnik KRAUNTC. Nauki o Zemle*. 2014. №1 (23). P. 7–20.

*Pinegina T.K., Delemen' I.F., Droznin V.A. et al.* Kamchatka Valley of Geysers after the catastrophe on 3 June 2007 // *Vestnik DVO RAN*. 2008. № 1. P. 33–44. (in Russ.)

*Sugrobov V.M., Sugrobova N.G., Droznin V.A. et al.* Zhemchuzhina Kamchatki – Dolina Geizerov. Nauchnopolulyarnyi ocherk, putevoditel' (The Pearl of Kamchatka is the Valley of Geysers. Popular science essay, guide). Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatpress (Publ.). 2009. 108 p. (in Russ.)

*Frolova Yu.V., Gvozdeva I.P., Chernov M.S., Kuznetsov N.P.* Geotechnical aspects of hydrothermal transformations of tuffaceous rocks of the Valley of Geysers (Kamchatka Peninsula) // *Inzhenernaya geologiya*. 2015. № 6. P. 30–42. (in Russ.)

*Kharchenko C.V., Shvarev S.V.* Landslide hazard prediction in the vicinity of Krasnaya Polyana based on linear discriminant analysis // *Bulletin of the Moscow University. Ser. 5: Geography*. 2020. № 3. P. 22–33. (in Russ.).

*Lebedeva E. V., and Chernomorets S. S.* Debris Flow Activity and Specific Features of Debris Flow Formation in the Geisernaya River Valley (Kamchatka) // *Russian Journal of Pacific Geology*. 2024. Vol. 18. Suppl. 1. P. S15–S27. doi: 10.1134/S1819714024700179

*Gantimurova S., Parshin A., Erofeev V.* GIS-Based Landslide Susceptibility Mapping of the Circum-Baikal Railway in Russia Using UAV Data // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 18, N 13, 3629. 17 p. doi: 10.3390/rs13183629

*Reichenbach P., Rossi M., Malamud B.D., Mihir M., Guzzetti F.* A review of statistically-based landslide susceptibility models // *Earth-Science Reviews*. 2018. Vol. 180. P. 60–91. doi: 10.1016/j.earscirev.2018.03.001