

Геоморфологические процессы на вулканоморфоструктурах Восточного пояса Камчатки, связанные с сейсмическими событиями и крупными вулканическими извержениями

Котенков А.В.^{1,2}, Лукашов А.А.¹

Geomorphological processes in volcanic morphostructures of the Kamchatka Eastern belt associated with seismic events and large volcanic eruptions

Kotenkov A.V., Lukashov A.A.

¹ *Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва;*

e-mail: avkotenkov@yandex.ru

² *Институт географии РАН, г. Москва*

В статье рассмотрено влияние малоэнергетических ($M=2-3$) и сильных ($M=8.7$) землетрясений на рельеф Восточного вулканического пояса Камчатки. По полевым данным 2022-2025 гг. показаны морфологические последствия: микрообвалы, оползни. Установлена триггерная роль слабых событий. Предложены сценарии развития склоновых процессов в долине р. Гейзерная.

Введение

Район Курило-Камчатской островной дуги характеризуется динамично меняющимся рельефом, геоморфологическими и геологическими процессами, связанными как напрямую, так и косвенно с сейсмическими событиями и эпизодическими извержениями вулканов. Проблему рельефообразования, вызванную тектоно-магматическими процессами, рассматривали ведущие исследователи геологии Камчатки XX века [4, 8], но они в основном уделяли внимание эндогенной составляющей рельефообразования. Исследователи XXI века [2] показали в своих работах, что результатом сейсмических событий и значимых вулканических извержений являются, в том числе, многие экзогенные процессы: масштабные гравитационные события, распространяющиеся на десятки километров от вулканической постройки, лахаровые потоки и др. Извержения приводят к перестройкам речных сетей, перегораживанию русел и созданию подпрудных озер [9]. Результатом проявления экстрезивного магматизма являются ступени структурных террас, связанные с этапами излияния вязкой кислой магмы, а также крупные селевые конусы выноса (например, у подножья сопки Белой в Узон-Гейзерной депрессии). Основное влияние на рельефообразование, преимущественно экзогенное, оказывают не глубокофокусные землетрясения высоких энергий ($M>6$), а малоэнергетические события ($M=2-3$). Именно они являются триггерами крупных обвалов-оползней (например, оползней-обвалов 2007 и 2014 гг. в долине р. Гейзерная) [6].

Целью работы является показать некоторые морфологические результаты проявлений малоэнергетических сейсмических событий в Восточном вулканическом поясе, в основном в Узон-Гейзерной депрессии, где с 2022 по 2025 гг. работал А.В. Котенков. Также необходимо показать некоторые морфологические изменения, связанные с «мегаземлетрясением» 29-30 июля 2025 г и его афтершоками. Их запечатлел А.А. Лукашов.

Геоморфологические методы, использующиеся для изучения процессов в вулканических областях

Для исследования рельефообразования и морфодинамики в Восточном поясе Камчатки применяются традиционные и современные методы. Среди первых выделим полевую геоморфологическую съемку, куда входят описание точек наблюдений, фиксация видимых смещений на поверхности, связанных с предыдущими сейсмическими и вулканическими событиями, и оценка их значений; среднемасштабное геоморфологическое картографирование, результатом которого является составление общей геоморфологической карты с характеристикой морфологии, генезиса и возраста рельефа; морфоструктурный анализ – анализ связи

вулканической структуры с выраженностью ее в рельефе, выделение морфолинеаментов и блоков, оценка их тенденций – к поднятию и опусканию. Полный набор методов был применен в Узон-Гейзерной депрессии, в дальнейших исследованиях планируется их использовать и на других вулканоморфоструктурах Восточного вулканического пояса Камчатки (Авачинский, Мутновский вулканы, кальдера Западного вулкана в составе Кошелевского вулканического массива). К современным методам исследований, уже примененным в отношении вулканоморфоструктур, относится количественное моделирование оползневых процессов на востоке Узон-Гейзерной депрессии – оценка предрасположенности территории долин р. Гейзерная и р. Шумная к развитию оползней [11]. Установлено, что с наиболее высокой вероятностью ($p > 0.7$) оползни сойдут в прибровочной части всего левого борта долины р. Гейзерная, а также правого борта – в местах контакта прочных экструзивных пород плато Круглое и горы Гейзерная и слабо литифицированных туфогенных отложений [10].

Влияние землетрясений низких энергий на геоморфологические процессы в кальдерных комплексах (на примере Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии)

Землетрясения, в основном малоэнергетические ($M=2-3$), оказывают как прямое влияние на рельеф (микроуступы, рвы и трещины шириной в несколько см), так и косвенное. Через новые трещины реализуется газогидротермальная активность и возникает линейная неустойчивость в массивах слабо литифицированных вулканогенно-озерных отложений, что приводит к значимым смещениям материала на склонах [9]. Многочисленные сейсмические события в Узон-Гейзерной депрессии в предшествующие годы до самих склоновых явлений в 2006 г. [7] и 2013 г. являлись триггерами оползней-обвалов 2007 и 2014 гг. в долине р. Гейзерная, которые существенно изменили морфологию долины, создав новые крупные оползневые тела, плотины и селевые конусы выноса.

В феврале 2023 г. зафиксированы два землетрясения $M \sim 2.3$ и $M \sim 2.6$ [3] в южной части Кроноцкого озера (рис. 1а), результатом которых стали обвалы некоторых даек в нижнем течении долины р. Гейзерная, обвал небольшой части постройки Пика Слияния в месте слияния рек Гейзерная и Шумная (рис. 1б) и незначительные смещения в нижнем течении ручья Тундровый при впадении его в р. Левая Гейзерная. В августе 2025 г., после значимого сейсмического события в Авачинском заливе, в долине р. Гейзерная, проявившегося в виде малоэнергетического события $M=3-4$ (сообщение инспектора кордона «Долина Гейзеров» Е.Л. Субботиной), произошли частные обрушения построек даек в нижнем течении р. Гейзерная (рис. 1в). Также постоянные микрообвалы в течение 2023, 2024 и 2025 гг. отмечались в районе стенки срыва обвала-оползня 2007 г. Общие объемы смещений, вызванные сейсмическими событиями, составили первые сотни куб. м.

Морфологические последствия в Восточном вулканическом поясе после землетрясения 30 июля 2025 г.

Энергия рельефа гор Восточной Камчатки отличается выдающимися количественными параметрами. В.М. Котляков подчеркивает, что здесь «... значительная разница уровней между высокими горами и глубокими океаническими желобами способствует возникновению сокрушительных землетрясений, сопровождающихся цунами» [5]. «Реакция» рельефа и вулканогеохимических систем на мощные сейсмические события, в частности – на сильное ($M=8.7$) верхнемантийное (гипоцентр на глубине 32 км) мегаземлетрясение 30.06.2025 г. с эпицентром в 161 км к востоку от г. Петропавловск-Камчатский включала следующее: 1) пробуждение – после многовекового сна (с 1463 г.) вулкана

Крашенинникова [1] и активизация многих вулканов (Ключевская сопка, Шивелуч, Авачинский и др.); 2) сейсмообвалы на отрогах вулканов в створе эпицентра (рис. 2а); 3) оживление оползневой деятельности на склонах, в том числе – в краевом центре (рис. 2б); 4) обильные свежие эксгаляции самородной серы галоидно-сернисто-углекислой стадии на внешних западных и юго-западных привершинных склонах Авачинского вулкана, вне контура кратерной ранее сформированной серной пробки.

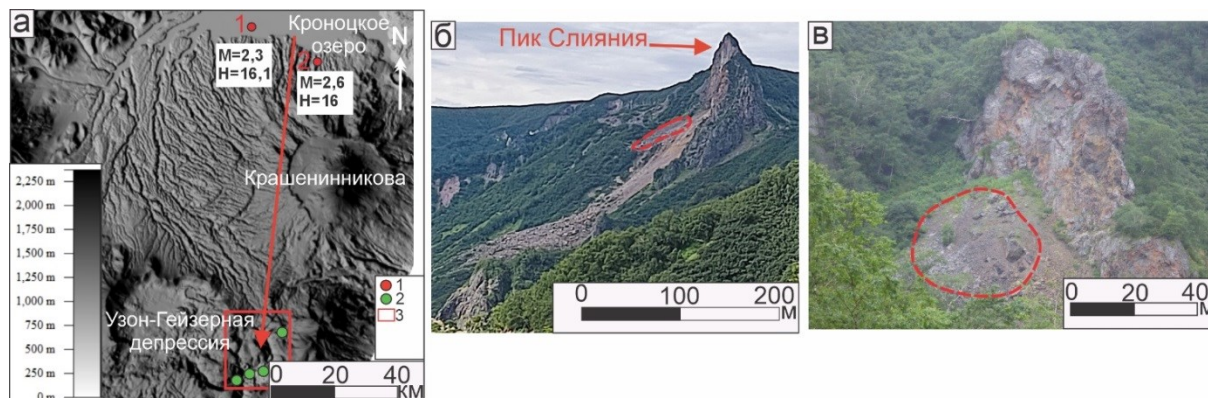


Рис. 1. Морфологические следствия землетрясений низких магнитуд: а) Эпицентры малоэнергетических землетрясений в 2023 г.: 1 – эпицентры 1 и 2 афтершоки землетрясения 23.02.2023 г.; 2 – точки наблюдаемых смещений, вызванных сейсмической активностью, 3 – область наблюдаемых морфологических изменений на востоке Узон-Гейзерной депрессии; Н – глубина гипоцентра в км; б) Обвал пика Слияния в 2023 г.; в) микрообвал дайки на правом борту долины р. Гейзерная в 2025 г. (фото А.Б. Белоусова).

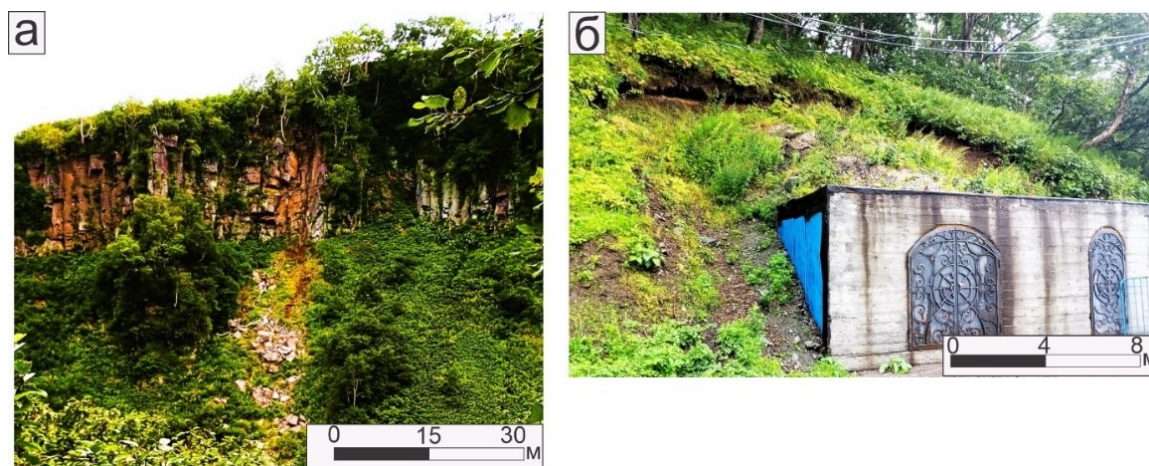


Рис. 2. Свежие морфологические следы результатов землетрясения 29-30 июля 2025 г. и последующих афтершоков: а) сейсмообвалы на отрогах вулканов в створе эпицентра; б) оживление оползневой деятельности на склонах, в том числе – в краевом центре. Фото А.А. Лукашова.

Выводы

Таким образом, рельеф в областях проявлений интенсивных сейсмических событий и вулканической активности сильно меняется. Благодаря извержениям создаются не только новые вулканические постройки, но также возбуждаются масштабные экзогенные процессы: обвалы, оползни, лахары, обломочные лавины. Особенно активно сейсмические события, в основном регулярные малоэнергетические и малоглубинные, влияют на гравитационные процессы на склонах вулканов и на внутренних склонах кальдерных комплексов. Например, большое число сейсмических событий в 2006 и в 2013 гг. послужило триггерами схода оползней-обвалов 2007 и 2014 гг. в долине р. Гейзерная, на востоке Узон-Гейзерной депрессии. Повышенная фоновая активность в Курило-Камчатской зоне, начиная с 2023 г., спровоцировала ряд

небольших обвалов поверхностей даек и построек в среднем и нижнем течении долины р. Гейзерная. Значимых новых гравитационных смещений, однако, не произошло, что говорит об их высокой вероятности в последующие 2026-2027 годы. Возможны два сценария развития склоновых процессов в долине р. Гейзерная: 1) благодаря регулярным сейсмическим толчкам и разрядке напряжения с 2023 г. и по настоящее время, большая часть материала уже сместилась в виде небольших обвалов и микрооползней; 2) как и в случае с оползнями 2007 и 2014 гг., очень высокая сейсмическая активность в 2025 г. только подготовила материал на склонах долины р. Гейзерная к сносу, и уже на спаде фоновой активности можно ожидать новых крупных смещений. Однако для выбора сценария дополнительно требуется исследования повышения температурных аномалий и усиления гидротермальной активности в прибрежной части левого борта долины р. Гейзерная.

Авторы признательны в.н.с. лаборатории геоморфологии к.г.н. Е.В. Лебедевой – руководителю гранта РФФИ № 21-17-00216 – за возможность побывать в период с 2022 по 2024 гг. в Узон-Гейзерной депрессии и за всестороннюю помощь и руководство в проведении геоморфологических работ. Особую благодарность выражаем с.н.с. Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН к.г.н. А.Б. и М.Г. Белоусовым за предоставленные фотоматериалы по долине р. Гейзерная в 2025 г.

Список литературы

1. *Гирина О.А., Мельников Д.В., Романова И.М. и др.* Первое историческое извержение вулкана Крашенинникова (Камчатка) в 2025 г. по данным спутникового мониторинга в информационной системе VolSatView // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 4. С. 397-404. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2025-22-4-397-404>
2. *Зеленин Е.А., Гуринов А.Л., Захаров А.Л. и др.* Геоморфологические процессы в Центрально-Камчатской депрессии (п-ов Камчатка, Северо-Западная Пацифика) в последние 30 тыс. лет // Геоморфология и палеогеография. 2023. Т. 54. № 4. С. 226-237. <https://doi.org/10.31857/10.31857/S2949178923040175>
3. Землетрясения за последнюю неделю. [Электронный ресурс] // Камчатский филиал ФГБУН Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН». URL: <https://kam.emsd.ru/> (дата обращения 24.09.2023).
4. Камчатка, Курильские и Командорские острова. История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока / И.В. Мелекесцев и др. М.: Наука, 1974. 440 с.
5. *Котляков В.М., Баденков Ю.П.* Горные районы России на рубеже веков. Исследования и развитие // Вопросы географии. Вып. 158. М.: Медиа-ПРЕСС, 2024. 560 с.
6. *Кузаенко Ю.А., Салтыков В.А., Горбатиков А.В., Степанова М.Ю.* Глубинная структура района Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии по данным микросейсмического зондирования // Доклады Академии наук. 2010. Т. 435. № 1. С. 96-100.
7. *Левина В.И., Ландер А.В., Митюшкина С.В., Чеброва А.Ю.* Сейсмичность Камчатского региона 1962-2011 гг. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 41-64.
8. *Мелекесцев И.В.* Вулканизм и рельефообразование. М.: Наука, 1980. 209 с.
9. *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.
10. *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.
11. *Харченко С.В., Котенков А.В., Лебедева Е.В.* Предрасположенность территории с газогидротермальными проявлениями к развитию оползней (на примере долины р. Гейзерной, Камчатка) // География и природные ресурсы. 2025. № 3. С. 102-114. <https://doi.org/10.15372/GIPR20250310>