



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

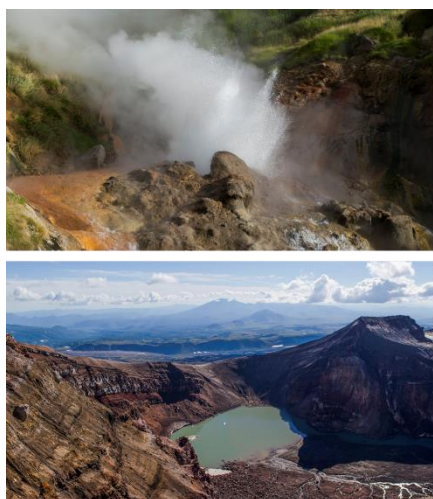
**ИНСТИТУТ ВУЛКАНОЛОГИИ И СЕЙСМОЛОГИИ
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

**Всероссийская научная конференция
с международным участием
«Геотермальная вулканология,
гидрогеология, геология нефти и газа»
(Geothermal Volcanology Workshop 2023)**

4 – 10 сентября 2023 г.

Конференция проведена при поддержке РФФИ по проекту № 21-55-50003

Материалы конференции



**ПЕТРОПАВЛОВСК-КАМЧАТСКИЙ
2023**



**MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
OF THE RUSSIAN FEDERATION**

INSTITUTE OF VOLCANOLOGY AND SEISMOLOGY

**FAR EASTERN BRANCH
OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES**

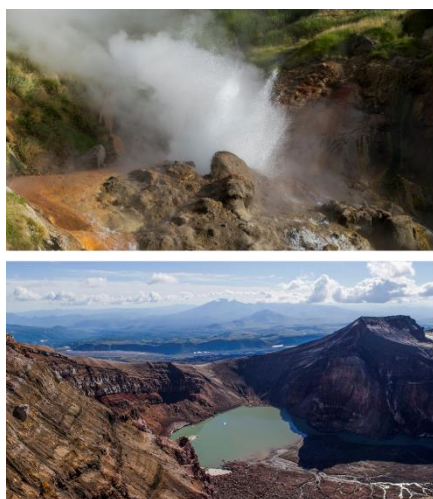
PROCEEDINGS

**of All-Russian Scientific Conference
with International Participation**

**«Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil and Gas Geology»
(Geothermal Volcanology Workshop 2023)**

Conference was supported by RFBR project № 21–55–50003

**Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS,
Petropavlovsk-Kamchatsky
September 4 – 10, 2023**



**PETROPAVLOVSK-KAMCHATSKY
2023**

УДК 550.36+551.21+553.6+556.3

Научное издание

Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2023), 4 – 10 сентября 2023 г. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2023. – 181 с.

Proceedings of All-Russian Scientific Conference with International Participation «Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil and Gas Geology» (Geothermal Volcanology Workshop 2023), September 4 – 10, 2023 – Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia: Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, 2023. – 181 p.

ISBN 978-5-902424-40-6

This Proceedings of All-Russian Scientific Conference with International Participation «Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil & Gas Geology» (Geothermal Volcanology Workshop 2023) was held in Petropavlovsk-Kamchatsky in 2023 by Institute of Volcanology & Seismology FEB RAS. The results of geothermofluidmechanics studies of the volcanic, hydrothermal & hydrocarbon systems are presented.

В сборнике представлены материалы всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2023), проведенной Институтом вулканологии и сейсмологии ДВО РАН в 2023 г. Освещаются результаты исследований по геотермофлюидомеханике вулканических, гидротермальных и углеводородных систем.

Утверждено к печати

Ученым советом

Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

Редакционная коллегия:

**д.г.-м.н., проф. А.В. Кирюхин, д.г.-м.н. Г.Н. Копылова, д.г.-м.н. В.Ю. Лаврушин,
доктор, проф. Н. Тсучия**

Dr., Prof. A.V. Kiryukhin, Dr. G.N. Kopylova, Dr. V.Y. Lavrushin, Dr., Prof. N. Tsuchiya

Отв. редактор:

д.г.-м.н., проф. А.В. Кирюхин

Ответственные секретари:

О.А. Гололобова, Е.В. Черных, М.В. Кузнецова

ISBN 978-5-902424-40-6

© ИВиС ДВО РАН, 2023

Особенности формирования и механизмы развития оползневых процессов в геотермальных районах

Ю.В. Фролова, О.В. Зеркаль, И.Е. Большаков

*Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
ju_frolova@mail.ru*

Рассматриваются особенности образования оползней в геотермальных районах. Показано, что одним из важных факторов, способствующих активизации оползней, является интенсивная переработка горных пород, причем наиболее опасна гидротермальная аргиллизация, вызывающая резкое снижение физико-механических свойств. Установлено, что на термальных полях и прилегающих к ним территориях наиболее часто формируются мелко-среднемасштабные оползни, среди которых выделяются оползни скольжения и оползни течения; реже происходят крупномасштабные гравитационные события со сложным механизмом, которые наносят значительный ущерб как окружающей среде, так и социально-экономической инфраструктуре.

Ключевые слова: оползень, геотермальный район, гидротермальная аргиллизация, прочность

Peculiarities of Formation and Development Mechanisms of Landslides in Geothermal Areas

Julia V. Frolova, Oleg V. Zerkal, Ilya E. Bolshakov

Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Peculiarities of landslide formation in geothermal areas are considered. It is shown that one of the important factors contributing to the activation of landslides is hydrothermal alteration of rocks, and the most dangerous is argillization, which causes a sharp decrease in physical and mechanical properties. It has been established that small-medium-scale landslides are most often formed, among which slip landslides and flow landslides stand out; less common are large-scale complex gravitational events that can cause severe damage to both the environment and socio-economic infrastructure.

Keywords: landslide, geothermal area, hydrothermal argillization, strength

Введение

В настоящее время отмечается устойчивая тенденция освоения геотермальных районов, что в первую очередь связано с возросшей мировой потребностью в использовании нетрадиционных видов энергетических и тепловых ресурсов. Это предполагает строительство различных сооружений геотермальных станций и сопутствующей инфраструктуры. Помимо этого, геотермальные районы привлекают большое число туристов, по их территориям проходят многочисленные туристические маршруты, в связи с чем, возникают вопросы безопасности. Закономерно, что инженерно-хозяйственное и туристическое освоение геотермальных районов требует оценки инженерно-геологических условий соответствующих территорий, в том числе, вероятности возникновения опасных геологических процессов.

Геологические процессы и явления в геотермальных районах

Спецификой геотермальных площадей являются масштабные преобразования толщи пород под действием циркулирующих гидротерм. Они охватывают большие объемы от поверхности до глубины сотен метров, вплоть до первых километров. В итоге формируются пространственно-неоднородные толщи, в составе которых могут быть представлены породы с очень контрастными физико-механическими свойствами. В свою очередь, изменение свойств пород влечет за собой ряд геологических последствий, в том числе и опасных, что отмечается многими специалистами для различных геотермальных районов мира. К ним относятся локальные изменения рельефа, активизация обвально-оползневых и эрозионных процессов; деформации поверхности, миграция и изменение режима термопроявлений, гидротермальные взрывы, изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) и

иные. Среди перечисленных процессов наиболее масштабное воздействие на геологическую среду оказывают оползни. Известны случаи, когда они наносили экономический ущерб, нарушая работу эксплуатационных и реинжекционных скважин, повреждая сооружения геотермальных станций, и даже приводили к человеческим жертвам (Табл. 1).

Таблица 1. Некоторые примеры оползней в геотермальных районах мира и их последствия

Авторы публикации	Регион	Время	Склоновые процессы, последствия и ущерб
Flynn et al.(1991); Voight (1992)	Зуни I, Гватемала	1991	Оползень > 800 тыс. м ³ Жертвы – 23 чел.; разрушение нескольких ферм
Pioquinto and Caranto (2005)	Филиппины	XX – XXI в.	Оползни различных типов и масштабов, обвалы, камнепады. Повреждение трубопроводов, дорог и зданий электростанций
Huang and Tian (2006)	Китай	XX – XXI в.	Оползни различных типов и масштабов. Повреждение трубопроводов, дорог и зданий электростанций
Reid et al. (2001) Suemnicht et al (2007)	Лонг-Вэлли, США	Q ₄	«Древние» блоковые оползни определяют структуру гидротермальной системы
Wijaya et al. (2017)	Камоянг, Западная Ява, Индонезия	2013	Оползень сложного типа: оползень скольжения трансформировался в оползень-поток. V ~33 тыс. м ³ . Всего 28 оползней. Нарушение работы реинжекционной скважины
Kristianto et al. (2013)	Термальное поле Салак, Индонезия	2003, 2010–2011	Крупномасштабные оползни. 2003 г. – остановка части операций на 3 месяца. 2010–2011 гг. – повреждение трубопроводов, дорог и зданий электростанций; нарушение обратной закачки.
Yuhendar et al. (2016)	Ваянг-Винду. Западная Ява, Индонезия	2015	Крупномасштабный оползень скольжения. Жертвы – 6 чел., повреждение геотермального газопровода (300 м), разрушение 8 домов.
Della Seta et al. (2015) Marmoni et al. (2017)	о. Искья, Италия	Q ₄	Многочисленные оползни: от мелких поверхностных до глубоких оползней скольжения, обвалов и каменных лавин (0.5–1.5 км ³). Прогноз – возможен оползень 190 млн. м ³ – угроза г. Форно

Оползневые процессы в геотермальных районах Курило-Камчатской дуги

Оползневые процессы и явления широко распространены в геотермальных районах Курило-Камчатской дуги. Во многом это связано с сильно расчлененным горным рельефом, активной тектоникой и высокой сейсмичностью. Помимо этого, их развитию способствует климатический фактор, поскольку регион относится к категории избыточно увлажненных. Вместе с тем, имеется определенная специфика в особенностях формирования оползней в геотермальных регионах, обусловленная, во-первых, гидродинамическим эффектом циркулирующих в массиве гидротерм, а во-вторых, масштабными преобразованиями пород, сопровождающимися резким изменением их физико-механических свойств. С инженерно-геологической точки зрения наиболее опасным процессом является гидротермальная аргиллизация, поскольку развитие глинистых минералов по первичным компонентам вулканических пород сопровождается значительным разуплотнением и резким снижением прочностных и деформационных свойств. Например, при сильной аргиллизации андезитов модуль упругости снижается в 3–4 раза, прочность на одноосное сжатие в среднем уменьшается в 7 раз, а при водонасыщении породы и вовсе теряют структурную прочность. Аргиллизация может охватывать большие объемы пород, распространяясь на глубину до нескольких сотен метров, однако наиболее интенсивные преобразования происходят в пределах термальных полей, в местах разгрузки термальных вод на поверхности. В итоге прочные вулканические массивы трансформируются в пространственно-неоднородные толщи, которые включают ослабленные горизонты гидротермальных глин. Это является одной из главных причин перераспределения напряжений в склоновом массиве и в конечном итоге приводит к его ослаблению и потере устойчивости.

Многолетние полевые работы в различных геотермальных районах Курило-Камчатского региона (термальные поля Кошелевского вулканического массива, Камбального

хребта; Паужетская, Мутновская, Больше-Банная, Гейзерная гидротермальные системы, вулкан Баранского) показали, что оползни различных типов и масштабов происходят практически на всех термальных полях и прилегающих территориях, приуроченных к склонам вулканических массивов или бортам речных долин, сложенных гидротермально измененными породами.

Наибольшую известность имеют *крупномасштабные события*. Ярким примером является оползень в Долине гейзеров, произошедший в июне 2007 г. Его объем составил порядка 20 млн. м³. Оползень изменил рельеф, перекрыл реку Гейзерную, образовав завальную плотину и подпрудное озеро, разрушил или изменил режим ряда гейзеров, разрушил вертолетные площадки и хозяйственные постройки и только по счастливой случайности не привел к человеческим жертвам. Его изучению посвящен ряд работ (Леонов, 2007; Пинегина и др., 2008; Двигало, Мелекесцев, 2009; Kiryukhin et al, 2010, 2012; Лебедева, 2022), в том числе и авторов (Gvozdeva et al, 2015; Zerkal, Gvozdeva, 2019). Установлено, что помимо «классических» причин, способствующих возникновению оползня, дополнительным важным фактором явилась интенсивная гидротермальная аргиллизация пород, слагающих склон, что вызвало резкое снижение прочностных свойств, вплоть до формирования в массиве отдельных горизонтов и линз гидротермальных глин (Frolova et al, 2014). Детальное изучение разреза в стенке оползневого цирка показало, что толща сложена высокопористыми пемзовыми и витрокластическими туфами, причем в верхней части они не переработаны, а нижняя часть вмещает термальные воды и поэтому в значительной степени аргиллизирована и цеолитизирована. В местах разрывных нарушений туфы полностью превращены в гидротермальные глины, что привело к разупрочнению и снижению сдвиговой прочности: сцепление уменьшилось на два порядка; угол внутреннего трения – в 2–3 раза. Таким образом, линзы и прослои сильно аргиллизированных туфов и новообразованных глин представляют собой наиболее ослабленные участки массива. С учетом падения слоев в направлении склона можно предположить, что именно в этих горизонтах сформировалась поверхность скольжения. По-видимому, начальная фаза деформаций заключалась в переходе части водонасыщенных аргиллизированных туфов, залегавших на глубинах около 50–70 м, в вязкопластичное состояние с последующим отчленением и смещением крупного блока склонового массива.

Другое крупное обрушение произошло в январе 2014 г. в левом борту реки, выше по течению от основного участка с гейзерами (Леонов, 2014). При обрушении склона образовалась каменная лавина ($L \sim 1.5$ км), отложения которой перекрыли русло реки, образовав завальную плотину и подпрудное озеро. Лавина уперлась в противоположный борт и развернулась вдоль русла реки. Она поспособствовала образованию грязекаменного потока, который устремился вниз по течению реки. В отличие от оползня 2007 г., обрушились прочные вулканогенные породы (риодациты), под которыми находились выходы гидротерм и сформировалась ослабленная зона гидротермально измененных пород.

Помимо крупномасштабных событий, в Долине гейзеров постоянно происходят обвально-оползневые процессы меньшего масштаба: 1) обвалы, камнепады и осыпи у стенки отрыва оползня 2007 г.; 2) вторичные оползни течения на поверхности оползневых отложений 2007 г., формирование которых происходит, по-видимому, очень быстро, с практически мгновенным переходом грунтов в текучее состояние (разжижение), возможно вследствие сейсмических событий; 3) многочисленные мелкие оползни скольжения по бортам речной долины, приуроченные к гидротермально-измененным туфам.

Оползни малого и среднего масштаба характерны практически для всех термальных полей. Обычно это мелкие оползни, которые формируются в приповерхностных горизонтах, ослабленных гидротермальной деятельностью. Среди них по механизму смещения выделяются оползни скольжения и оползни течения. *Оползни скольжения* образуются в сильно аргиллизированных вулканиках или плотных гидротермальных глинах часто с высоким содержанием кремнистых минералов, а также реликтивными остатками первичных минералов, которые придают им определенную жесткость. У таких оползней обычно хорошо выражены морфологические элементы – стенка отрыва и оползневое тело или их серия.

Оползни течения образуются в увлажненных гидротермальных глинистых грунтах, которые в виде вязкопластических потоков смещаются по подстилающему их прочному «скальному основанию», сложенному вулканогенными породами. Мощность оползневых отложений обычно не превышает первых метров. Сценарии их формирования могут быть различны. В одних случаях это медленный процесс с постепенным развитием пластических деформаций, в других – быстрое смещение в результате разжижения водонасыщенных глинистых грунтов. По долинам ручьев нередко встречаются отложения русловых (канализированных) оползней течения, которые формируются при сильном увлажнении гидротермальных глинистых отложений в результате снеготаяния или при обильных атмосферных осадках, с последующим их смещением в виде потоков.

Заключение

При освоении геотермальных районов необходимо учитывать повышенную вероятность возникновения опасных склоновых процессов, связанных с аргиллизацией и ослаблением пород при гидротермальной переработке. Для надежного моделирования и прогноза этих процессов необходимы данные о физико-механических свойствах исходных, гидротермально-измененных и новообразованных пород; информация о пространственной изменчивости свойств в разрезах гидротермальных систем; знания о динамике изменения свойств во времени в ходе гидротермального процесса. Необходимо также отметить тот факт, что оползни активно влияют на пространственное расположение, динамику и режим поверхностных термопроявлений, а в некоторых случаях крупные оползневые тела могут оказывать влияние и на структуру гидротермальной системы в целом.

Список литературы

1. *Двигало В.Н.* Геолого-геоморфологические последствия катастрофических обвальных и обвально-оползневых процессов в Камчатской Долине гейзеров (по данным аэрофотограмметрии) / *В.Н. Двигало, И.В. Мелекесцев* // Вулканология и сейсмология. 2009. № 5. С. 24–37.
2. *Леонов В.Л.* Обвал и оползень, произошедшие 4 января 2014 г. в Долине Гейзеров, Камчатка, и их последствия / *В.Л. Леонов* // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014. № 1(23). С. 7–20.
3. *Пинегина Т.К.* Камчатская Долина Гейзеров после катастрофы 3 июня 2007 г. / *Т.К. Пинегина, И.Ф. Делемень, В.А. Дроздин и др.* // Вестник ДВО РАН. 2008. № 1. С. 33–45.
4. *Фролова Ю.В.* Инженерно-геологические аспекты гидротермальных преобразований туфогенных пород Долины Гейзеров (полуостров Камчатка) / *Ю.В. Фролова, И.П. Гвоздева, М.С. Чернов, Н.П. Кузнецов* // Инженерная геология. 2015. № 6. С. 30–43.
5. *Gvozdeva I.P.* Slope processes hazards in geothermal areas: a case study of the Geysers Valley, Kamchatka / *I.P. Gvozdeva, J.V. Frolova, O.V. Zerkal* // Proceedings of WGC 2015. – Australia, elbourne2015.<http://www.geothermalenergy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2015/12090.pdf>
6. *Frolova J.V.* Effects of hydrothermal alterations on physical and mechanical properties of rocks in the Kuril–Kamchatka island arc / *J. Frolova, V. Ladygin, S. Rychagov, D.Z. Zukhubaya* // Engineering Geology. 2014. Vol. 183. P. 80–95. DOI 10.1016/j.enggeo.2014.10.011.
7. *Frolova J.V.* The Impact of Hydrothermal Alteration on the Geological Environment, Kamchatka Peninsula, Far East, Russia / *J.V. Frolova, M.S. Chernov, S.N. Rychagov, O.V. Zerkal* // Proceedings World Geothermal Congress 2020+1. Reykjavik, Iceland, April – October 2021.
8. *Voight B.* Causes of landslides: Conventional factors and special considerations for geothermal sites and volcanic regions. / *B. Voight* // Geothermal Resources Council Transactions. 1992. Vol. 16. P. 529–533.
9. *Zerkal O.V.* Landslide activity and landslide hazard in Geyser Valley (Kamchatka Peninsula, Russia). In book: Natural hazards and risk research in Russia, Innovation and discovery in Russian science and engineering. / *O.V. Zerkal, I.P. Gvozdeva*. Switzerland: Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2019. Vol. 1. P. 317–344.

Научное издание

**Материалы всероссийской научной конференции с международным участием
«Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа»
(Geothermal Volcanology Workshop 2023)
4 – 10 сентября 2023 г.**

**Proceedings of All-Russian Scientific Conference with International Participation
«Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil&Gas Geology»
(Geothermal Volcanology Workshop 2023),
September 4 – 10, 2023**

Подписано к печати __.10.2023

Формат 60х84/8

Бумага типографская

Усл.-печ. л. 19,75

Тираж 23 экз.

Заказ № ~~30306~~

Отпечатано с готового оригинал-макета, подготовленного в ИВиС ДВО РАН,
в ООО «ФОН», 683024, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Владивостокская д. 37