

DEBRIS FLOWS: Disasters, Risk, Forecast, Protection

Proceedings
of the 7th International Conference

Chengdu, China, 23–27 September 2024



Edited by
S.S. Chernomorets, K. Hu, K.S. Viskhadzhieva

Geomarketing LLC
Moscow
2024

СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ: катастрофы, риск, прогноз, защита

Труды
7-й Международной конференции

Чэнду, Китай, 23–27 сентября 2024 г.



Ответственные редакторы
С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева

ООО «Геомаркетинг»
Москва
2024

泥石流： 灾害、风险、预测、防治

會議記錄

第七届国际会议

中国成都, 2024年9月23日至27日



編輯者

S.S. Chernomorets, K. Hu, K. Viskhadzhieva

Geomarketing LLC

莫斯科

2024

УДК 551.311.8
ББК 26.823
С29

Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). – Ed. by S.S. Chernomorets, K. Hu, K.S. Viskhadzhieva. – Moscow: Geomarketing LLC. 622 p.

Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – Москва: ООО «Геомаркетинг», 2024. 622 с.

泥石流：灾害、风险、预测、防治。 會議記錄 第七届国际会议. 中国成都。 編輯者 S.S. Chernomorets, K. Hu, K.S. Viskhadzhieva. – 莫斯科: Geomarketing LLC. 622 p.

ISBN 978-5-6050369-6-8

Ответственные редакторы: С.С. Черноморец (МГУ имени М.В. Ломоносова), К. Ху (Институт горных опасностей и окружающей среды Китайской академии наук), К.С. Висхаджиева (МГУ имени М.В. Ломоносова).

Edited by S.S. Chernomorets (Lomonosov Moscow State University), K. Hu (Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS), K.S. Viskhadzhieva (Lomonosov Moscow State University).

При создании логотипа конференции использован рисунок из книги С.М. Флейшмана «Селевые потоки» (Москва: Географгиз, 1951, с. 51).

Conference logo is based on a figure from S.M. Fleishman's book on Debris Flows (Moscow: Geografgiz, 1951, p. 51).

© Селевая ассоциация

© Debris Flow Association



Каскадность оползневых и селевых процессов в Долине гейзеров (Камчатка, Россия)

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

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва,
Россия, igzov@mail.ru*

Аннотация. Селевые и оползневые процессы могут формировать каскадные парагенетические ряды, когда проявление одного процесса выступает триггером развития другого. Каскадность селевых и оползневых процессов, при котором сель является «первичным» процессом, заключается в реализации цикла, включающего три фазы – эрозионный размыв подножья склона селом, смещение оползня с перекрытием селевого русла, прорыв оползневой дамбы с образованием нового селевого вала, размывающего склон. Также возможно образование каскада селевых и оползневых процессов, когда первичной причиной являются оползневые смещения, провоцирующие формирование селя. Каскадность оползневых и селевых процессов рассмотрена на примере развития опасных природных процессов в Долине гейзеров (долина р. Гейзерной, Камчатка, Россия), расположенной на территории Кроноцкого государственного заповедника, являющегося одним из уникальных объектов природы России. Показано, что в рассмотренном случае формирование селя, прошедшего 04.01.2014 г., явилось следствием смещения каменной лавины, выступившей первичным процессом при образовании каскадопроявлений опасных геологических процессов.

Ключевые слова: каскадность, сели, оползни, Долина гейзеров, Камчатка

Ссылка для цитирования: Зеркаль О.В., Барыкина О.С., Фролова Ю.В., Большаков И.Е. Каскадность оползневых и селевых процессов в Долине гейзеров (Камчатка, Россия). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 526–534.

Cascading mode of landslide and debris flow processes in the Valley of Geysers (Kamchatka, Russia)

O.V. Zerkal, O.S. Barykina, J.V. Frolova, I.E. Bolshakov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, igzov@mail.ru

Abstract. Debris flows and landslides can form cascading paragenetic series, when one geological process acts as a trigger for another. The cascade of debris flows and landslides, in which debris flows are the "primary" process, represents a cycle, that includes three phases such as erosion of the foot of the slope by the debris flow, displacement of the landslide in flow channel with the overlap its, and the breakthrough of the landslide dam with formation of a new debris flow, eroding the slope. The cascade of debris flows and landslides is also possible when landslide displacements occur first and then it contributes to the formation of a debris flow. The cascade of landslides and debris flows is considered on the example of the activity of hazardous geological processes in the Geyser valley Kamchatka Peninsula, Russia), located on the territory of the Kronotsky State Reserve, which is one of the most unique objects of nature in Russia. It is shown, that the debris flow that occurred on January 4, 2014 was a consequence of the displacement of a rock avalanche, which was the primary process in the cascade of hazardous geological processes.

Key words: cascading mode, debris flows, landslides, Geyser Valley, Kamchatka



Cite this article: Zerkal O.V., Barykina O.S., Frolova J.V., Bolshakov I.E. Cascading mode of landslide and debris flow processes in the Valley of Geysers (Kamchatka, Russia). In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 526–534.

Введение

Современные геологические процессы отличаются многообразием и находятся в сложной взаимосвязи и взаимозависимости. Селевые и оползневые процессы относятся к наиболее опасным геологическим процессам, нередко приводя к существенным жертвам и экономическим потерям. Изучение этих опасных процессов проводится в рамках самостоятельных научных направлений – селеведения и оползневедения, соответственно. Вместе с тем, в природных условиях, в особенности в тектонически активных горных регионах, нередко наблюдается сложное сочетание проявления селевых и оползневых процессов. В то же время, при изучении селей и оползней нередко отмечается определенная последовательность развития этих опасных процессов, когда либо селевые процессы являются триггерным фактором для оползнеобразования, либо оползневые процессы выступают причиной селей. Такого рода взаимообусловленная последовательность в развитии опасных природных процессов рассматривается как каскадность в их образовании [Зеркаль, 2022]. Учет каскадности в развитии селевых и оползневых процессов позволяет более полно и всесторонне проводить оценку геологической опасности, дает возможность полнее характеризовать геологические риски.

В настоящей работе проведен анализ каскадности развития оползневых и селевых процессов в Долине гейзеров (Камчатка, Россия) (рис. 1). Уникальный район распространения гейзеров на Камчатке – Долина гейзеров (рис. 2), был открыт Т.И. Устиновой в апреле 1941 г. на территории Кроноцкого государственного заповедника, история создания которого начинается с 1882 г. [Устинова, 1955, Сугробов, 2009]. В настоящее время Кроноцкий заповедник является одним из крупнейших природных резерватов в мире и внесен в Список объектов Всемирного природного наследия ЮНЕСКО. Сохранение уникальной природы этого региона является одной из важнейших задач.



Рис. 1. Район проведения работ



Рис. 2. Долина гейзеров (Камчатка, Россия). Фото О.В. Зеркаля

Представление о каскадности геологических процессов

Современные опасные геологические процессы могут образовывать каскадные парагенетические ряды (т.е. группы генетически связанных процессов), представляющие собой серию последовательно формирующихся геологических событий (одного или близкого масштабного уровня), зачастую перетекающих (дискретно во времени) один в другой, в наследуемых природных условиях, нередко представляя собой самонарастающий процесс. В этом случае проявление одного процесса либо выступает непосредственной причиной (триггерным фактором) развития другого процесса (перетекание), либо создает условия для его последующего возникновения (наследуемость).

Среди процессов, развивающихся в горно-складчатых областях, особое место занимает каскадное проявление оползней и селей, нередко имеющее катастрофический характер, обусловленный усилением масштабности проявлений в результате самонарастающего развития рассматриваемых опасных геологических процессов. Наиболее часто каскадность селевых и оползневых процессов, при котором селевой поток является "первичным" процессом, заключается в реализации цикла, включающего три фазы:

- эрозионный размыв движущимся селевым потоком основания склона;
- оползневые смещения, формирующие дамбу, перекрывающую (полностью или частично) селевое русло;
- прорыв оползневого перекрытия с образованием селевого вала с дальнейшим размывом основания склона.

На рис. 3 показано общее схематическое представление о каскадности развития селевых и оползневых процессов при реализации описанного цикла взаимодействия этих процессов.

Вместе с тем, каскадность оползневых и селевых процессов может иметь и иной вид, когда причиной образования селя выступает непосредственное развитие оползня. В этом случае реализации вышеописанного цикла не происходит, а наблюдается "простая" последовательность геологических процессов, включающая на начальном этапе смещение оползня, достигающего водного объекта (либо реки, либо озера), что провоцирует на следующем этапе селеобразование. Примером проявления такого рода каскадности является последовательное развитие склоновых процессов в Долине



гейзеров (Камчатка, Россия), где формирование несколько крупномасштабных оползней (в 2007 г. и в 2014 г.) сопровождалось последующим селеобразованием.



Рис. 3. Схематическое представление о каскадности развития селевых и оползневых процессов (по О.В. Зеркало)

Таким образом, можно сделать вывод, что в развитии селевых и оползневых процессов каскадность возможна двух типов:

- I тип, при котором "первичным" процессом каскада является селеобразование, а дальнейшая последовательность формирования геологических событий носит циклический, описанный выше (см. рис. 3) характер;
- II тип, в составе которого "первичным" процессом каскада выступает оползнеобразование, провоцирующее в дальнейшем формирование геологических событий в виде "простой" последовательности геологических процессов.

Каскадное развитие оползневых и селевых процессов в Долине гейзеров

Природно-климатические условия района Долины гейзеров

Природно-климатические особенности территории определяются ее положением вблизи Тихоокеанского побережья Камчатки, для которого характерна активная циклоническая деятельность и смена атмосферной циркуляции над материковой частью и прилегающей акваторией Тихого океана. Удаление Долины Гейзеров от побережья почти на 40 км и превышение отметок рельефа над уровнем моря на 600–1400 м приводит к более контрастным температурам воздуха и меньшей облачности, чем на побережье. Среднегодовая температура воздуха на рассматриваемой территории составляют порядка +1,9°C при годовой амплитуде температур 20–25°C [Кондратюк, 1974]. Среднегодовое количество осадков в рассматриваемом районе составляет порядка 1240 мм, достигая в отдельные годы 2000 мм. Большая часть осадков выпадает в виде снега в холодный период года, а устойчивый снежный покров имеет высоту до 2 м, а в понижениях рельефа – до 3 м, держится с ноября по май. Пиковое выпадение осадков для рассматриваемой территории характерно для осеннего периода, когда суточные значения сумм осадков могут достигать 60–80 мм. Так, например, в период прохождения циклона "Эльза" (04–06.10.1981) сумма осадков составила 92 мм, в то время как в предшествующий циклону месяц количество осадков в районе Долины Гейзеров составило 200 мм [Сугрובה, 1985].

Распределение растительного покрова территории подчиняется высотной зональности. Прирусловые части долин рек заняты пойменными лесами. Средние части



склонов долин (до высоты около 600 м) покрыты березовым лесом с участками кедрового и ольхового стланика, занимающего обычно верхние части склонов долин. Водораздельные пространства вулканического нагорья характеризуются разреженной растительностью горных тундр с обширными пространствами с лишайниково-моховым покровом, со стелющимися низкорослыми зарослями стланика и отдельными кустарниками.

Геоморфологические и геологические условия

«Долина гейзеров» располагается в нижней и средней части долины реки Гейзерной, выработанной в восточной части Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии, представляющей собой типичную кальдеру обрушения со сложной структурой. Образование Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии произошло в пределах обширного вулканического нагорья, сформировавшегося в пределах Восточно-Камчатской грабен-синклинали в результате современной вулканической деятельности. Абсолютные отметки рельефа в пределах вулканического плато в рассматриваемом районе составляют 900–1100 м. Борты депрессии представляют собой тектонически обусловленные практически отвесные ($>70^\circ$ в верхней части) уступы в современном рельефе, имеющие высоту до 400–500 м. Верхняя и средняя части долины р. Гейзерной имеют форму каньона глубиной от 120–150 м в верховьях и до 300–350 м в средней части при ширине 900–1000 м.

Для рассматриваемого района характерно наличие длительно существующего (начиная с плейстоцена) корового магматического очага, предопределяющего формирование гидротермальных систем Долины гейзеров.

Изучение экструзивно-эффузивных образований в пределах рассматриваемой территории позволили выделить три цикла магматической активности. Первый цикл (начало среднего неоплейстоцена) сопровождался излияниями лав андезитового и липарит-дацитового (в заключительной стадии) состава, потоки и экструзии которых формируют водораздельные поверхности долины р. Гейзерной вдоль юго-восточного обрамления Узон-Гейзерной депрессии [Белоусов, 1983]. Для второго цикла магматической активности характерно излияние лав и формирование экструзий дацит-липаритового состава, происходившее во внутренних частях Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии [Белоусов, 1983]. Третий цикл магматической активности, представляющий собой этап кислого вулканизма, проявляется в последние 30–40 тыс. лет.

Каменная лавина 04.01.2014 г.

Образование каменной лавины 04.01.2014 г. произошло в восточной части сопки Желтая (в верховьях ручья Горячая речка, Верхнегейзерное поле), представляющей собой лавовый купол риодацитового состава. Общая высота склона на участке формирования склоновых деформаций составляет около 300–350 м, а протяженность склона (от бровки уступа до русла р. Гейзерной) – 650–680 м. Уклон наиболее крутого участка склона в его верхней части достигал 70° при перепаде высот порядка 100 м. Протяженность зоны обрушения (поперек направления смещения) составила около 250–270 м, при ширине массива (по склону) – до 80–100 м. Таким образом, объем первичного обвала достигал 2,2–2,7 млн м³. Ранее, начиная с 1975–76 гг., на этом участке отмечалось большое количество трещин растяжения [Leonov, 2014]. При обрушении на склоне сформировался шлейф общей шириной до 380–410 м, достигший русловой части р. Гейзерной (рис. 4). Можно предположить, что на начальной стадии смещений деформации развивались по механизму топлинга, на что указывает наличие отложений каменной лавины, «перехлестнувших» через локальный водораздел на склоне (между долинами ручья Горячая речка и ручья Теплый, высотой до 30 м) и перекрывших соседнюю долину ручья Теплый. Такое залегание не могло бы образоваться, если бы



смещения, развивавшиеся в верховьях Горячей реки, на начальной стадии происходили бы по механизму сдвига [Zerkal, 2019].

Следует отметить, что нижняя треть массива смещенных отложений отделена от верхней части полосой шириной 40–70 м с минимальными мощностями гравитационных образований. Наблюдаемая ситуация характерна для каменных лавин, при движении которых между областью обрушения и областью аккумуляции образуется зона транзита (с практически полным отсутствием обвальнo-оползневых отложений) за счет высокой энергии движения обвальных масс. Незначительная ширина зоны транзита (несколько десятков метров) объясняется небольшой общей протяженностью склона. Вместе с тем, энергия обрушения была достаточной для того, чтобы обвальнo-оползневые массы, достигнув русла реки и перекрыв его, частью "поднялись" на противоположный борт долины на 15–18 м, а частью изменили траекторию движения, трансформировавшись во вдольрусловую каменную лавину. Вдольрусловое перемещение оползневого материала привело к образованию водного вала перед фронтом быстро движущегося оползневого языка, скорость смещения (расчетная) которого достигала 17–19 м/с, что в дальнейшем способствовало формированию селевого потока [Zerkal, 2019]. Пройдя вдоль русла р. Гейзерной порядка 680–700 м, смещенные оползневые массы образовали конус протяженностью 140–160 м (по долине), шириной (поперек долины) до 120 м и высотой до 40–50 м. Таким образом, объем обвальнo-оползневых масс в «зоне торможения» оценивается в 800–850 тыс. м³.

Образование каменной лавины 04.01.2014 г., отложившиеся в русловой части долины р. Гейзерной, сформировали завальную плотину, выше которой образовалось озеро глубиной (вблизи завала) до 15–18 м и протяженностью до 400 м и средней шириной до 80–90 м (максимальная ширина – до 180 м) (рис. 4). В дальнейшем прорыва озера не произошло.

Основными предпосылками формирования каменной лавины 04.01.2014 г. в средней части долины р. Гейзерной следует считать геолого-геоморфологические условия на участке обрушения. Среди факторов, также внесших свой вклад в подготовку, дестабилизация склона, несомненно, выступают климатическое влияние (циклон 17–19 сентября 2013 г.) и сейсмическая активность в рассматриваемом районе. Не менее важным фактором явилась интенсивная гидротермальная деятельность в виде разгрузки кислых парогазовых струй с температурой более 100°C, в результате которой в средней и нижней частях склона сформировалась ослабленная зона гидротермально измененных пород [Gvozdeva, 2016, Фролова, 2023]. Соответственно, эти породы активно разрушались вследствие эрозионной деятельности реки, выветривания, мелкомасштабных гравитационных процессов, что постепенно ослабляло основание всего массива и привело к его обрушению.

Сель 04.01.2014 г.

Смещение каменной лавины, достигшей р. Гейзерной и прошедшей вдоль ее русла порядка 0,7 км, привело к формированию селевого потока по руслу реки ниже оползневого завала (рис. 5). Протяженность селевого потока, двигавшегося вниз по долине, составила более 3 км. Объем селевого материала, перемещавшегося с весьма большой скоростью, оценивается в 2,5 млн м³ [Лебедева, 2020]. Значительный объем твердого материала, вовлеченного в селевой поток, по-видимому, объясняется наличием малопрочных, легко размываемых гидротермально измененных пород, как вовлеченных в смещение и дезинтегрированных в составе каменной лавине, так и слагающих нижнюю часть склона бортов долины р. Гейзерной ниже оползневого завала.

При движении селевого потока на поворотах русла р. Гейзерной сформировались заплески высотой до 15 м, указывая на то, что скорость движения селя (до 16–17 м/с) была сопоставима (наследуема) скорости смещения (расчетной) каменной лавины. В результате прохождения селевого потока в нижней части долины реки (в районе Трехкаскадного водопада) были срезаны несколько гейзеритовых построек, а также частично перекрыты и забиты селевыми массами несколько гейзеров.



Рис. 4. Общий вид каменной лавины, образовавшейся 04.01.2014 г. в средней части долины р. Гейзерной (фото И.Е. Большакова, 2022 г.)

Селевой поток достиг озера Гейзерного, образованного завальной плотиной оползня 3 июня 2007 г., где сформировал конус мощностью от 3–4 м до 10–15 м, практически заполнив селевыми отложениями озерную котловину (рис. 6, 7). Ударное воздействие селевой волны способствовало окончательному разрушению завальной плотины 2007 г., после чего озеро постепенно стало спускаться и к настоящему времени практически перестало существовать как постоянный водоем (рис. 6, 7).

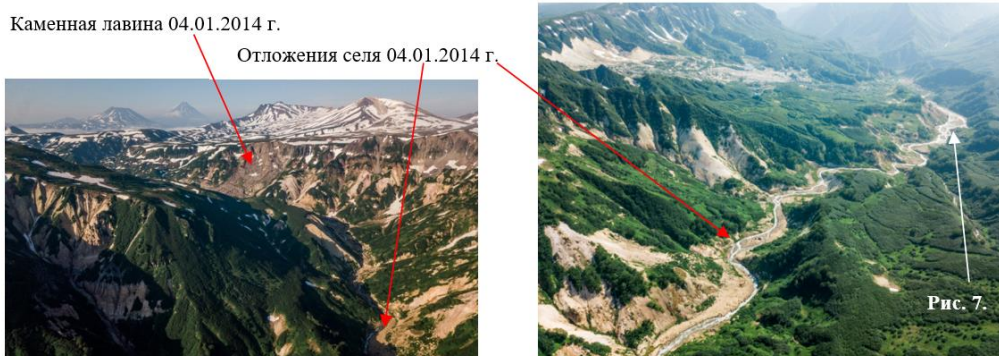


Рис. 5. Общий вид долины р. Гейзерной после прохождения селевого потока, каскадно образовавшегося в результате каменной лавины 04.01.2014 г. (фото И.Е. Большакова, 2022 г.)



Рис. 6. Озеро, образованное в 2007 г., в результате оползневого перекрытия долины р. Гейзерной. Фото О.В. Зеркаля, 2010 г.



Рис. 7. Заполнение селевым материалом озерной котловины в долине р. Гейзерной в 2014 г. Фото И.Е. Большакова, 2022 г.

Заключение

Селевые и оползневые процессы, являясь одними из наиболее опасных геологических процессов, нередко, в особенности в тектонически активных горных регионах, характеризуются взаимообусловленностью, когда либо селевые процессы являются триггерным фактором для оползнеобразования, либо оползневые процессы выступают причиной селей. Такого рода последовательность в формировании геологических событий, зачастую представляя собой самонарастающий процесс, определяется как каскадность в развитии геологических процессов.

Каскадность в развитии селевых и оползневых процессов может быть двух типов:

I тип – «первичным» процессом каскада является селеобразование и дальнейшая последовательность формирования геологических событий носит циклический (трехфазный) характер;

II тип – «первичным» процессом каскада является оползнеобразование с последующим формированием геологических событий в виде «простой» последовательности геологических процессов.

Рассмотрение развития оползневых и селевых процессов в Долине гейзеров (долина р. Гейзерной, Камчатка, Россия) в 2014 г. показало, что на анализируемой территории имел место II тип каскадности. Образованию селя в Долине гейзеров 04.01.2014 г. предшествовало смещение каменной лавины, выступившей первичным процессом при образовании каскада проявлений опасных геологических процессов.

Список литературы

- Белоусов В.И., Гриб Е.Н., Леонов В.Л. Геологические позиции гидротермальных систем Долины гейзеров и кальдеры Узон // Вулканология и сейсмология. – 1983. – № 1. – С. 65–79
- Зеркаль О.В., Калинин Э.В., Барыкина О.С. и др. Склоновые геологические процессы/Под ред. В.Т. Трофимова, О.В. Зеркаля. – М.: Изд-во «Перо», 2022. – 724 с.
- Кондратюк В.И. Климат Камчатки. – М.: Гидрометеиздат, 1974. – 204 с.
- 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
- Сугробов В.М. Жемчужина Камчатки – Долина гейзеров. – Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2009. 108 с.
- Сугрובה Н.Г., Сугробов В.М. Изменение режима термопроявлений Долины гейзеров под влиянием циклона "Эльза"//Вопросы географии Камчатки. – Петропавловск-Камчатский, 1985. – Вып. 8. – С. 88–94



- Устинова Т.И. Камчатские гейзеры. – М.: Географгиз, 1955. – 120 с.
- Фролова Ю.В., Зеркаль О.В., Большаков И.Е. Гидротермальные преобразования пород как фактор развития оползневых процессов в геотермальных районах Курило-Камчатской вулканической дуги // Грунтоведение. – 2023. – № 2. – С. 36–43
- Gvozdeva I.P., Zerkal O.V. Hydrothermally altered rocks as a field of dangerous slope processes (the Geysers Valley, Kamchatka peninsula, Russia)//Volcanic Rocks and Soils: Proc. of the Internat. Workshop on Volcanic Rocks and Soils. – London: CRC Press, 2016. – pp. 115–118
- Leonov A.V, Leonov V.L. Valley of Geysers, Kronotsky Reserve, Kamchatka: Features Seen by the 1991 GOSA Expedition and Changed by the 2007 Landslide, 2013 Cyclone and 2014 Landslide//The Geyser Gazer Sput. The Newsletter of The Geyser Observation and Study Association. – 2014. – 28(2). – pp. 5–26
- Zerkal O.V., Gvozdeva I.P. Landslide Activity and Landslide Hazard in Geyser Valley (Kamchatka Peninsula, Russia)//Natural Hazards and Risk Research in Russia: Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering. – Springer, 2019. – pp. 317–344