

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



Селевые потоки как причины аварий на объектах инфраструктуры

Е.Г. Петрова

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

Аннотация. Селевые потоки относятся к числу наиболее опасных природных процессов и явлений. За последние десятилетия катастрофические селевые потоки нанесли большой экономический и социальный ущерб во многих горных регионах мира. Помимо прямого разрушительного воздействия на здания и объекты инфраструктуры, они также служат своеобразным «спусковым крючком» различных аварий в инфраструктуре, приводящих к нарушению нормальных условий жизни людей, штатной работы транспорта, энергетики, связи и других объектов системы жизнеобеспечения. Такие негативные последствия селевых событий приводят к возникновению чрезвычайных ситуаций (ЧС). Селевые потоки активны на 20% территории Российской Федерации. В основном они встречаются в горных районах, но могут также происходить и на возвышенных участках равнин. В отличие от предыдущих исследований селевых потоков, данная работа направлена на изучение воздействий селевых потоков на инфраструктуру, приводящих к авариям. В качестве исходных данных для анализа использовалась информация созданной автором базы данных. В базе данных регистрируются аварии на объектах техносферы, вызванные опасными природными процессами и явлениями, в том числе селями различного генезиса и типа. Задачи исследования: оценить долю селевых потоков среди других природных факторов возникновения аварий и чрезвычайных ситуаций в инфраструктуре, выделить основные типы объектов инфраструктуры, наиболее уязвимых к их воздействию, предложить типологию природно-техногенных ЧС, обусловленных селевыми потоками, и выявить территории с наибольшим риском их возникновения. На этих территориях и объектах инфраструктуры должны быть сосредоточены основные усилия по предотвращению аварий и чрезвычайных ситуаций и ликвидации их последствий.

Ключевые слова: селевые потоки, объекты инфраструктуры, природно-техногенные аварии и ЧС, база данных

Ссылка для цитирования: Петрова Е.Г. Селевые потоки как причины аварий на объектах инфраструктуры. 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. 376–383.

Debris flows as triggers of accidents in the infrastructure

E.G. Petrova

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

Abstract. Debris flows are among the most dangerous natural processes and phenomena. Over the last decades, catastrophic debris flows produced large economic and social losses in many mountain regions of the world. In addition to direct destructive impacts on buildings and infrastructure facilities, they also serve as a kind of "trigger" of various accidents in the infrastructure, leading to disruption of normal living conditions of people and normal operation of transport, energy, communication, and other lifeline systems. Such negative consequences of debris flow events lead to emergency situations. Debris flows are active on 20% of the territory of the Russian Federation. Mostly, they occur in the mountain areas, but also within the uplands of plains. Unlike previous studies on debris flows, this work aims at analyzing impacts of debris flows on the infrastructure leading to



accidents. Information of the database created by the author was used as initial data for the analysis. The database registers accidents, which were caused by hazardous natural phenomena and natural hazards including debris flows of various genesis and types. The research objectives are to assess the share of debris flows among other natural factors of accidents and emergency situations in the infrastructure, highlight the main types of the facilities most vulnerable to their impacts, propose a typology of natural-technological events due to debris flows, and reveal areas with the highest risk of their occurrence. On these areas and infrastructures, the main efforts to prevent accidents and emergency situations or mitigate their consequences should be focused.

Key words: *debris flows, infrastructure facilities, natural-technological accidents and emergencies, data base*

Cite this article: Petrova E.G. Debris flows as triggers of accidents in the infrastructure. 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. 376–383.

Введение

Опасные природные процессы различных типов, особенно в случаях катастрофического их проявления, могут не только приводить к разрушительным последствиям и наносить значительный материальный, социальный и экологический ущерб, но и выступать в роли так называемых «триггеров» для создания аварийных ситуаций на объектах техносферы. К числу таких опасных природных процессов, способных провоцировать техносферные аварии и приводить к усилению природно-техногенного риска, относятся, в том числе, и селевые потоки.

Под термином «природно-техногенный риск» разными авторами понимается как техногенно (антропогенно) усиленный природный риск, так и техногенный риск, провоцируемый какими-либо природными событиями [Мягков, 1995]. Соответственно, аварии и чрезвычайные ситуации на объектах техносферы, которые провоцируются или усиливаются воздействием на них различных природных факторов, понимаются как «природно-техногенные». В данной статье рассматриваются природно-техногенные события, возникновение которых было вызвано воздействиями селевых потоков на различные объекты инфраструктуры.

В отличие от предыдущих исследований других авторов, в которых основное внимание уделялось физическим параметрам [Jacob and Hungr, 2005; Takahashi, 2014; Zegers et al., 2020; Riedel and Sarrantonio 2021], региональным особенностям проявления [Hilker et al., 2009; Perov et al. 2017; Marchi et al., 2021] и моделированию селевых потоков [D'Agostino and Tecca, 2006; Naef et al., 2006; Rickenmann et al., 2006; Sosio et al., 2007; Cesca and D'Agostino, 2008; Calvo and Savi, 2009; Lin et al., 2011; Frank et al., 2015; Gregoretti et al., 2019; Pudasaini and Mergili, 2019], данная работа направлена на изучение их воздействия на инфраструктуру. В качестве исходных данных для анализа использовалась авторская электронная база данных.

В предлагаемом исследовании решались следующие задачи:

- попытаться оценить вклад селевых потоков среди других природных факторов возникновения аварий и чрезвычайных ситуаций на объектах инфраструктуры,
- выделить основные типы инфраструктурных объектов, наиболее уязвимых к их воздействию,
- предложить типологию природно-техногенных ЧС на объектах инфраструктуры, обусловленных селевыми потоками,
- выявить территории с наибольшим риском их возникновения.



Методы

Основным методом настоящего исследования является мониторинг аварий и чрезвычайных ситуаций, возникающих на объектах техносферы в России в результате воздействия на них опасных природных процессов и явлений различных типов, с последующим их географическим и статистическим анализом. Мониторинг таких природно-техногенных событий осуществляется в научно-исследовательской лаборатории снежных лавин и селей географического факультета МГУ на регулярной основе, начиная с событий 1991 г. по настоящее время. Все происходящие природно-техногенные аварии и чрезвычайные ситуации отслеживаются и включаются в авторскую электронную базу данных [Петрова, 2009; Petrova 2020]. Главным источником исходной информации служат ежедневные оперативные сводки МЧС РФ, которые дополняются сообщениями средств массовой информации. Вся используемая и заносимая в базу данных информация является открытой. В базе данных она структурируется определенным образом, позволяющим производить дальнейшую компьютерную обработку массива данных. Помимо непрерывного ряда данных за указанный выше период, в базе зафиксированы также наиболее крупные по своим масштабам события и за более ранний период наблюдений, однако они носят отрывочный характер.

В целом электронная база данных является достаточно эффективным инструментом, предоставляющим очень широкие возможности для хранения, поиска, обработки и использования различной информации. Она позволяет собирать и накапливать сведения о прошлых событиях, совершившихся в течение продолжительного периода времени на той или иной территории. Используя такие многолетние ряды данных о неблагоприятных и опасных природных воздействиях на объекты техносферы, можно исследовать особенности проявления этих процессов во времени и пространстве, рассчитывать и анализировать среднесреднегодную повторяемость изучаемых событий, оценивать тяжесть их последствий, отслеживать пространственно-временные изменения различных параметров. Информация о динамике предыдущих неблагоприятных и опасных событий, собранная в базе данных за достаточно большой промежуток времени, может быть интерполирована на перспективу и использована для прогнозирования будущего развития исследуемых процессов, а также для оценки природных и природно-техногенных рисков.

В используемой в этой статье авторской базе данных вся информация о природно-техногенных событиях фиксируется по следующим основным параметрам: 1) время возникновения события; 2) место возникновения события; 3) тип ЧС; 4) социальный ущерб (число пострадавших, жертвы); 5) материальный ущерб; 6) причины аварии и другие имеющиеся сведения; 7) источник информации.

Формат базы данных позволяет осуществлять различную автоматическую обработку накопленного массива данных в соответствии с целями и задачами проводимого исследования. Основными ее инструментами являются тематические запросы по ключевым словам или параметрам, а также сортировка данных.

Для целей данного исследования из базы данных была выбрана и проанализирована информация об аварийных и чрезвычайных ситуациях, произошедших за весь период наблюдений на различных объектах инфраструктуры в результате схода селевых потоков.

Результаты и их обсуждение

Доля селевых потоков среди других природных факторов техногенных аварий

В базе данных было зафиксировано 3267 событий природно-техногенного характера – аварий и ЧС, произошедших на территории России с 1991 по 2022 г. в результате воздействия на объекты техносферы опасных природных процессов и



явлений разного типа. Были проанализированы основные природные причины, которые привели к возникновению всех этих событий. Результаты анализа показаны на рис. 1.

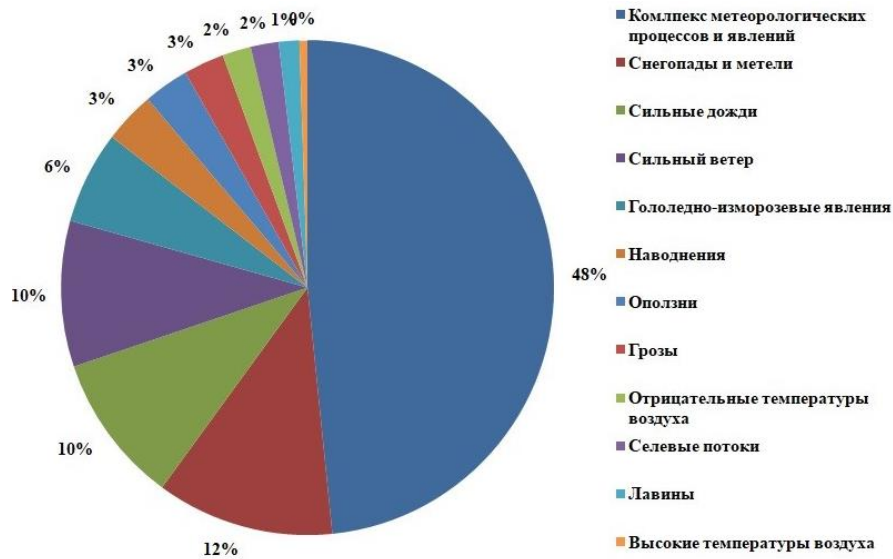


Рис. 1. Соотношение основных природных факторов аварий и ЧС природно-техногенного характера в России за 1991–2022 гг.

Как видно на диаграмме на рис. 1, почти половина всех событий (48%) была вызвана воздействием на техносферу целого комплекса опасных процессов и явлений метеорологического характера, к которым относятся неблагоприятные сочетания различных климатических параметров и процессов, таких как сильные ветры, жидкие и твердые атмосферные осадки и другие. Кроме того, значительную роль среди причин природно-техногенных аварий и ЧС играли также отдельные гидрометеорологические процессы и явления, такие как снегопады и метели – 12%; сильные дожди и сильный ветер – по 10%; гололедно-изморозевые явления – 6%; наводнения и грозы – по 3%. Доля селевых потоков среди всех остальных природных факторов техногенных аварий относительно невелика – 2%, однако их вклад в техногенную аварийность обязательно необходимо учитывать при проектировании различных объектов, поскольку в случае особенно крупных масштабов схода селевых потоков при их внезапности последствия могут носить катастрофический характер.

Типы инфраструктурных объектов, наиболее уязвимых к воздействию селевых потоков

За рассматриваемый период в базе данных было зарегистрировано 64 события природно-техногенного характера, основной причиной возникновения которых явился сход селевых потоков. Все эти 64 события были проанализированы с точки зрения затронутых в них типов инфраструктурных объектов. Как показал проведенный анализ, наиболее уязвимыми к селевым воздействиям оказываются линейные сооружения, такие как транспортные коммуникации (автомобильные и железные дороги), линии электропередачи и связи, водопроводы, газопроводы, а также другие объекты инфраструктуры. Их уязвимость по отношению к селевым потокам обусловлена, прежде всего, значительной протяженностью этих объектов. В районах высокой селевой активности такие линейные объекты неизбежно оказываются на пути следования селевых масс.

Были выделены основные типы объектов инфраструктуры, наиболее уязвимых к воздействию селевых потоков, на которых были зафиксированы аварии за период 1991–2022 гг. Результаты анализа отражены в таблице 1.



Таблица 1. Типы объектов инфраструктуры и регионы, где были зарегистрированы аварии на этих объектах под воздействием селевых потоков за 1991–2022 гг.

Типы объектов инфраструктуры	Регионы возникновения ЧС
Жилые дома и другие здания	Алтайский край, Магаданская и Сахалинская области, Республика Бурятия, Ингушетия, Кабардино-Балкария, Чукотский АО
Системы энергоснабжения	Краснодарский и Приморский края, Магаданская и Сахалинская области, Республика Дагестан, Кабардино-Балкария, Карачаево-Черкесия, Северная Осетия – Алания
Линии связи	Сахалинская область, Республика Кабардино-Балкария
Водопроводы, системы теплоснабжения и другие объекты ЖКХ	Краснодарский край, Магаданская и Сахалинская области, Республики Дагестан, Кабардино-Балкария и Ингушетия.
Автомобильные дороги, мосты и другие объекты автодорожной инфраструктуры	Алтайский, Краснодарский и Приморский края, Сахалинская область, Республики Дагестан, Кабардино-Балкария, Карачаево-Черкесия, Крым, Северная Осетия-Алания и Чеченская Республика.
Объекты железнодорожной инфраструктуры	Краснодарский, Приморский и Забайкальский края, Сахалинская область
Газопроводы	Краснодарский край, Республики Дагестан, Кабардино-Балкария и Северная Осетия – Алания.
Сельскохозяйственные объекты	Сахалинская область, Республики Дагестан, Кабардино-Балкария, Крым

На рис. 2 показано соотношение количества аварий, произошедших за рассматриваемый период на разных типах объектов инфраструктуры. Общее количество аварий превышает указанное выше число зарегистрированных событий – 64, поскольку природно-техногенные ЧС, как правило, носят комплексный, синергетический характер, когда одно и то же селевое событие может одновременно или последовательно вызвать несколько аварий на разных объектах.

Наибольшее число аварий или нарушений транспортного сообщения из-за воздействий селевых потоков было зафиксировано на объектах инфраструктуры автомобильного транспорта – 40 событий, за ними следуют системы энергоснабжения (ЛЭП) и объекты железнодорожной инфраструктуры – по 17 событий.

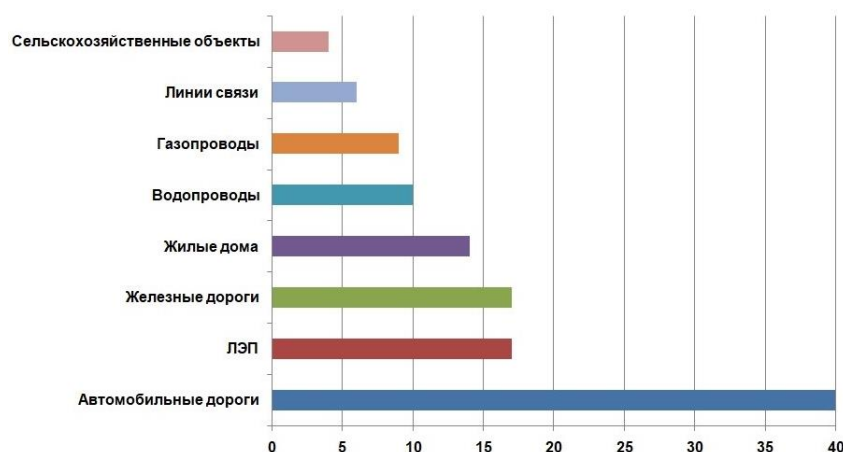


Рис. 2. Соотношение числа аварий, вызванных селевыми потоками на разных типах объектов инфраструктуры в России за 1991–2022 гг.

Типология природно-техногенных ЧС на объектах инфраструктуры, обусловленных селевыми потоками



В результате анализа всех зафиксированных в базе данных за рассматриваемый период природно-техногенных событий, обусловленных сходом селевых потоков, была предложена типология этих событий. Поскольку главным природным фактором возникновения всех анализируемых ЧС были селевые потоки, за основную типологическую характеристику был принят тип инфраструктурного объекта, на котором происходила данная ЧС.

Предложена следующая типологическая группировка ЧС на объектах инфраструктуры в результате селевых воздействий:

- обрушение различных зданий в результате ударного воздействия селевых потоков;
- нарушение электроснабжения вследствие повреждения селевыми потоками опор высоковольтных линий электропередачи (ЛЭП), разрывов проводов ЛЭП, разрушения или отключения трансформаторных подстанций;
- нарушение коммуникации из-за повреждения селевыми потоками различных линий связи;
- нарушение водоснабжения, теплоснабжения и других систем жизнеобеспечения населения из-за повреждения селями водопроводов, канализации и других объектов ЖКХ;
- автомобильные аварии и нарушения автомобильного сообщения по причине попадания в селевые потоки автомобилей, повреждения или затопления обломочным материалом дорожного полотна, разрушения мостов и других объектов автотранспортной инфраструктуры;
- железнодорожные аварии и нарушения железнодорожного сообщения из-за повреждения или затопления селевыми потоками полотна железных дорог, разрушения мостов, линий электроснабжения, железнодорожной сигнализации и других объектов железнодорожной инфраструктуры;
- нарушение газоснабжения в результате повреждения селевыми потоками газопроводов;
- ЧС на объектах сельского хозяйства в связи с повреждением селевыми потоками сельхозугодий или разрушением различных сельскохозяйственных объектов.

Территории с наибольшим риском возникновения ЧС выделенных типов

За рассматриваемый период ЧС выделенных типов были зарегистрированы на территории 15 субъектов РФ. В их числе: Республика Дагестан, Бурятия, Ингушетия, Кабардино-Балкария, Карачаево-Черкесия, Крым, Северная Осетия–Алания и Чеченская Республика; Алтайский, Забайкальский, Краснодарский и Приморский края; Сахалинская и Магаданская области; Чукотский АО.

Наиболее велика среднемноголетняя повторяемость ЧС всех выделенных типов на территории следующих регионов РФ: Сахалинская область – более 0,4 ЧС в среднем за год (один раз в 2 года), Краснодарский край, Республика Дагестан и Северная Осетия – Алания – более 0,3 ЧС в среднем за год (один раз в 3 года) и Кабардино-Балкария – более 0,2 ЧС в среднем за год (один раз в 4–5 лет). На территории Сахалинской области были зарегистрированы события практически всех выделенных типов (за исключением аварий на газопроводах). В Краснодарском крае наиболее велика повторяемость транспортных ЧС (нарушений автомобильного и железнодорожного сообщения), а также повреждений селевыми потоками ЛЭП и трубопроводов. На территориях Республики Дагестан, Северной Осетии – Алании и Кабардино-Балкарии наиболее часто происходят нарушения автомобильного сообщения, разрушения систем энергоснабжения, газопроводов и сельскохозяйственных объектов.

Наиболее велик риск повторения этих событий в указанных регионах и в будущем, что связано как с высокой степенью селевой активности в них, так и с повышенной



уязвимостью по отношению к воздействиям селевых потоков расположенных на их территории объектов инфраструктуры.

Выводы

Селевые потоки относятся к числу наиболее опасных природных процессов и явлений, способных не только нанести значительный материальный, социальный и экологический ущерб, но и выступать в роли своеобразного «спускового крючка» для аварий на объектах инфраструктуры. Доля селевых потоков среди других природных факторов техносферных аварий, зафиксированных в авторской базе данных, составляет около 2%.

За рассматриваемый период в базе данных было зарегистрировано 64 события природно-техногенного характера, основной причиной возникновения которых были селевые потоки. Наиболее уязвимыми к селевым воздействиям оказываются линейные сооружения, такие как транспортные коммуникации (автомобильные и железные дороги), линии электропередачи и связи, водопроводы, газопроводы, а также некоторые другие объекты инфраструктуры.

Наибольшее число аварий и ЧС из-за воздействий селевых потоков было зафиксировано на объектах автотранспортной инфраструктуры – 40 событий, а также системы энергоснабжения (ЛЭП) и железнодорожной инфраструктуры – по 17 событий. Выделены основные типы ЧС, которые возникают на инфраструктурных объектах в результате селевых воздействий. К ним относятся обрушения зданий; нарушения электроснабжения и связи; нарушения автомобильного и железнодорожного сообщения; нарушения систем жизнеобеспечения населения и газоснабжения; ЧС на объектах сельского хозяйства.

Наиболее велика среднемноголетняя повторяемость и риск возникновения ЧС всех выделенных типов на территории Сахалинской области, Краснодарского края, Республики Дагестан, Северной Осетии–Алании и Кабардино-Балкарии.

Благодарности

Работа выполнена по ГЗ по теме 1.7 121051300175-4 «Опасность и риск природных процессов и явлений».

Список литературы

- Calvo, B. and Savi, F.: A real-world application of Monte Carlo procedure for debris flow risk assessment, *Comput. Geosci.*, 35, 967–977, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.04.002>, 2009.
- Cesca, M. and D'Agostino, V.: Comparison between FLO-2D and RAMMS in debris-flow modelling: a case study in the Dolomites, in: *Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense Debris Flows II*, vol. I of WIT Transactions on Engineering Sciences, WIT Press, Southampton, UK, 197–206, <https://doi.org/10.2495/DEB080201>, 2008.
- D'Agostino, V. and Tecca, P. R.: Some considerations on the application of the FLO-2D model for debris flow hazard assessment, in: *Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense and Debris Flows*, vol. 1 of WIT Transactions on Ecology and the Environment, Vol. 90, WIT Press, Southampton, UK, 159–170, <https://doi.org/10.2495/DEB060161>, 2006.
- Frank F, McArdeall BW, Huggel C, Vieli A (2015) The importance of entrainment and bulking on debris flow runout modeling: examples from the Swiss Alps. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 15, 2569–2583, <https://doi.org/10.5194/nhess-15-2569-2015>.
- Gregoretto C, Stancanelli L, Bernard M, Degetto M, Boreggio M, Lanzoni S (2019) Relevance of erosion processes when modeling in - channel gravel debris flows for efficient hazard assessment, *Journal of Hydrology*, 568, 575–591.
- Hilker, N., Badoux, A., and Hegg, C.: The Swiss flood and landslide damage database 1972–2007, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 913–925, <https://doi.org/10.5194/nhess-9-913-2009>, 2009.
- Jacob M and Hunge O (Eds) (2005) *Debris-flow hazards and related phenomena*. Springer, New York.



- Lin, P.-S., Lee, J., and Chang, C.: An application of the FLO-2D model to debris-flows simulation – A case study of Song-Her district in Taiwan, *Ital. J. Eng. Geol. Environ.*, 3, 947–956, <https://doi.org/10.4408/IJEGE.2011-03.B-103>, 2011.
- Marchi, L., Cazorzi, F., Arattano, M., Cucchiaro, S., Cavalli, M., and Crema, S.: Debris flows recorded in the Moscardo catchment (Italian Alps) between 1990 and 2019, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 21, 87–97, <https://doi.org/10.5194/nhess-21-87-2021>, 2021.
- Naef, D., Rickenmann, D., Rutschmann, P., and McArdeU, B. W.: Comparison of flow resistance relations for debris flows using a one-dimensional finite element simulation model, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 6, 155–165, <https://doi.org/10.5194/nhess-6-155-2006>, 2006.
- Perov V., Chernomoretz S., Savernyuk E. et al. Debris flow hazards in Russia: regional features and key events // *Natural Hazards*. 2017. V. 88. № 1. Suppl 1. P. S199–S235. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2841-3>
- Petrova E (2020) Natural hazard impacts on transport infrastructure in Russia, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 20, 1969–1983, <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1969-2020>.
- Pudasaini SP, Mergili M (2019) A multi-phase mass flow model. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 124, 1–23, <https://doi.org/10.1029/2019jg005204>
- Riedel JL, Sarrantonio SM (2021) Debris flow magnitude, frequency, and precipitation threshold in the eastern North Cascades, Washington, USA. *Nat Hazards* 106, 2519–2544. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04553-8>
- Rickenmann, D., Laigle, D., McArdeU, B. W., and Hübl, J.: Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events, *Comput. Geosci.*, 10, 241–264, <https://doi.org/10.1007/s10596-005-9021-3>, 2006.
- Sosio, R., Crosta, G. B., and Frattini, P.: Field observations, rheological testing and numerical modelling of a debris-flow event, *Earth Surf. Proc. Land.*, 32, 290–306, <https://doi.org/10.1002/esp.1391>, 2007.
- Takahashi, T. *Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2014.
- Zegers, G., Mendoza, P. A., Garces, A., and Montserrat, S.: Sensitivity and identifiability of rheological parameters in debris flow modeling, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 20, 1919–1930, <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1919-2020>, 2020.
- Мягков С.М. География природного риска. М.: МГУ, 1995. 224 с.
- Петрова Е.Г. Природно-техногенные ЧС в России: опыт составления и анализа базы данных. // *Снежные лавины, сели и оценка риска.* / Под ред. А.Л. Шныпаркова. Вып. 2. М: Университетская книга, 2009. С.152–162.