



Источник фото: Pixabay.com.
The photo source: Pixabay.com.

КРАТКИЙ ОБЗОР ВЛИЯНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ КАМНЕПАДОВ

ПЕРЕС-РЕЙ И.

Лаборатория геотехники Испанского национального научно-исследовательского центра по гражданскому строительству (CEDEX), г. Мадрид, Испания;

Группа исследований по безопасному и устойчивому управлению минеральными ресурсами (GESSMin Group) отдела природных ресурсов и инженерных методов защиты окружающей среды Научно-исследовательского центра технологий, энергетики и производственных процессов (CINTECX) Университета Виго, г. Виго, Испания
ignacio.perez@cedex.es

САРРО Р.

Департамент природных опасностей Геологической службы Испании (IGME), г. Мадрид, Испания

ТОМАС Р.

Факультет гражданского строительства Университета Аликанте, г. Аликанте, Испания

АННОТАЦИЯ

Представляем вниманию читателей немного сокращенный и адаптированный перевод доклада испанских специалистов «Краткий обзор влияния лесных пожаров на возникновение камнепадов» (Perez-Rey et al., 2023). Этот доклад был сделан в 2022 году в Хельсинки (Финляндия) на Региональном симпозиуме Международного общества по механике скальных грунтов «Механика скальных грунтов и разрушений в горном деле». Он также был опубликован в 2023 году в виде статьи в журнале *Earth and Environmental Science* («Науки о Земле и окружающей среде») издательством британской благотворительной научной организации IOP (Institute of Physics – «Институт физики»), ставшей фактически международной. Эта статья находится в открытом доступе по лицензии CC BY 3.0, которая позволяет распространять, переводить, адаптировать и дополнять ее при условии указания типов изменений и ссылки на первоисточник. В нашем случае полная ссылка на источник для представленного перевода (Perez-Rey et al., 2023) приведена в конце.

Лесные пожары и камнепады являются одними из основных опасностей в покрытых лесами горных регионах Европы. Поэтому очень важно понимать процессы и условия, которые приводят к камнепадам во время и после лесных пожаров при различных геологических условиях.

Увеличение количества камнепадов в результате лесных пожаров связано с рядом факторов. Лесные пожары приводят к изменениям механических свойств скальных грунтов и разрывов их сплошности, а также к утрате защищающей от камнепадов роли растений. Свой вклад вносят также воздействие мер по пожаротушению и нарушения в имеющихся сооружениях инженерной защиты из-за экстремальных температур.

АЛЕХАНО Л.Р.

Группа исследований по безопасному и устойчивому управлению минеральными ресурсами (GESSMin Group) отдела природных ресурсов и инженерных методов защиты окружающей среды Научно-исследовательского центра технологий, энергетики и производственных процессов (CINTECX) Университета Виго, г. Виго, Испания

ЭРНАНДЕС ГУТЬЕРРЕС Л.Э.

Региональная служба исследований экологических воздействий Правительства Канарских островов, провинция Тенерифе, Испания

МАТЕОС Р.М.

Департамент природных опасностей Геологической службы Испании (IGME), г. Мадрид, Испания

РИКЕЛЬМЕ А.

Факультет гражданского строительства Университета Аликанте, г. Аликанте, Испания

После лесного пожара в зоне гари увеличиваются частота и интенсивность камнепадов, что оказывает серьезные воздействия на дорожные сети и населенные пункты. Кроме того, из-за уничтожения растительности и обнажения блоков и массивов скальных грунтов обычно увеличивается информированность и беспокойство населения по поводу возможных камнепадов.

В данном обзоре кратко рассмотрены основные факторы, которые влияют на возникновение камнепадов после лесного пожара.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

горные регионы; лес; лесной пожар; зона гари; скальные грунты; механические свойства; нарушения сплошности; камнепады; частота; интенсивность; сооружения инженерной защиты.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Перес-Рей И., Сарро Р., Томас Р., Алехано Л.Р., Эрнандес Гутьеррес Л.Э., Матеос Р.М., Рикельме А. Краткий обзор влияния лесных пожаров на возникновение камнепадов (пер. с англ.) // Геоинфо. 2024. Т. 6. № 3. С. 6–14 DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-3-6-14

A BRIEF REVIEW OF THE EFFECT OF WILDFIRES ON ROCKFALL OCCURRENCE

PEREZ-REY I.

Geotechnical Laboratory, Spanish National Public Works Research Centre (CEDEX), Madrid, Spain;

Research Group on Safe and Sustainable Mineral Resources Management (GESSMin Group), Department of Natural Resources and Environmental Engineering, Research Center in Technologies, Energy and Industrial Processes (CINTECX), University of Vigo, Vigo, Spain
ignacio.perez@cedex.es

SARRO R.

Department of Natural Hazards, Geological Survey of Spain (IGME), Madrid, Spain

TOMAS R.

Department of Civil Engineering, University of Alicante, Alicante, Spain

ALEJANO L.R.

Research Group on Safe and Sustainable Mineral Resources Management (GESSMin Group), Department of Natural Resources and Environmental Engineering, Research Center in Technologies, Energy and Industrial Processes (CINTECX), University of Vigo, Vigo, Spain

ABSTRACT

We present a slightly abridged and adapted translation of the report “A brief review of the effect of wildfires on rockfall occurrence” by Spanish specialists (Perez-Rey et al., 2023). This report was presented at the Regional Symposium of International Society for Rock Mechanics “Rock and Fracture Mechanics in Rock Engineering and Mining” (“Eurock 2022”) in Helsinki, Finland. It was also published as an article in the journal “Earth and Environmental Science” by the publishing company of the British scientific society “Institute of Physics” (IOP) that is now virtually international. It is an open access article under the CC BY 3.0 license that allows it to be distributed, translated, adapted, and supplemented, provided that the types of changes are noted and the original source is referred to. In our case, the full reference to the original paper (Perez-Rey et al., 2023) used for the presented translation is given in the end.

Wildfires and rockfalls are among the major hazards in forested mountainous regions across Europe. Understanding processes and conditions that lead to rockfalls during and after a wildfire in different geological contexts is, therefore, of great relevance.

The increase of rockfalls associated with the occurrence of wildfires is connected to several factors. Wildfires cause changes in the mechanical properties of rocks and discontinuities as well as the loss of protective capacity from vegetation, complemented by the effect induced by firefighting activities and by extreme temperatures that may deteriorate the installed protective measures.

After the occurrence of a wildfire, there is an increase in the frequency and intensity of rockfalls in the burned area, causing a major impact of rockfalls on road networks and inhabited areas. Additionally, the rockfall risk perception is usually increased due to the removal of vegetation by wildfires, exposing both rock blocks and the rock mass.

In this review, the main factors that influence the occurrence of rockfalls after a wildfire are briefly reviewed.

HERNANDEZ GUTIERREZ L.E.

Regional Service of Studies of Ecological Impacts of the Canary Islands Government, Tenerife, Spain

MATEOS R.M.

Department of Civil Engineering, University of Alicante, Alicante, Spain

RIQUELME A.

Department of Civil Engineering, University of Alicante, Alicante, Spain

KEYWORDS:

mountainous regions; forest; wildfire; burned area; rocks; mechanical properties; discontinuities; rockfalls; frequency; intensity; installed protective measures.

FOR CITATION:

Perez-Rey I., Sarro R., Tomas R., Alejano L.R., Hernandez Gutierrez L.E., Mateos R.M., Riquelme A. Kratkiy obzor vliyaniya lesnyh pozharov na vozniknoveniye kamnepadov [A brief review of the effect of wildfires on rockfall occurrence] (translated from English into Russian) // Geoinfo. 2024. T. 6. № 3. S. 6–14 DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-3-6-14 (in Rus.).

ВВЕДЕНИЕ ▶

При полусушливом и засушливом климате лесные пожары случаются очень часто, особенно в летний сезон, когда одновременно наблюдаются высокие температуры, сильные ветры и малое количество или отсутствие осадков. Во время пожаров температура может достигать примерно 400 °С, оказывая серьезные физические и химические воздействия на дисперсные и скальные грунты [1].

Согласно «Ежегодному отчету по лесным пожарам в Европе, на Ближнем Востоке и в Северной Африке за 2019 год» [2] Испания, Португалия и Польша являются европейскими странами с наибольшим количеством лесных пожаров.

В Испании за последние 50 лет было зарегистрировано почти 600 тыс. лесных пожаров, охвативших примерно 7,5 млн га. При этом 1990-е годы характеризовались самым большим количеством пожаров: в среднем за год происходило 19 тыс. пожаров на общей площади 160 тыс. га [3]. За последние годы их количество уменьшилось. Тем не менее частота крупных лесных пожаров (с площадью поражения более 500 га) остается высокой. И активность лесных пожаров опасно меняется, поскольку климатические условия, вызванные глобальным потеплением, явно влияют на частоту, тяжесть и масштабы этих явлений.

В дополнение к экологическим воздействиям лесные пожары увеличивают частоту оползней, в частности потоков обломочных материалов и камнепадов, а также селей [4–7]. Это увеличивает риски для инфраструктуры и людей на территориях влияния гарей.

В нескольких исследованиях, проведенных за последнее десятилетие, анализировалась подверженность возникновению потоков обломочных материалов и селей территорий водоразделов, где прошли пожары [8–12].

В результате лесного пожара меняются грунтовые, гидрогеологические и

гидрологические условия за счет изменений в скоростях эвапотранспирации и инфильтрации. Это увеличивает вероятность возникновения на склонах потоков обломочных материалов и селей [13], которые могут быть очень опасными – способными привести к гибели людей и значительному материальному ущербу [10, 14].

Но по исследованиям камнепадов как последствий лесных пожаров нет исчерпывающих публикаций.

Камнепады являются опасными явлениями из-за высокой кинетической энергии падающих блоков пород. Это часто объясняет сложность принятия быстрых и эффективных мер противодействия, а также разработки соответствующих мер инженерной защиты [15, 16].

После отделения от поверхности склона блоки пород, валуны и булыжники стремительно перемещаются вниз по склону путем падения, отскоков, перекатывания или скольжения. При ударе об землю или об деревья один блок или камень может расколоться на несколько. Когда камень теряет достаточное количество кинетической энергии, он останавливается, достигнув конечного устойчивого положения [17].

Понимание условий, приводящих к камнепадам во время и после лесных пожаров при различных геологических условиях [16], имеет решающее значение, поскольку эти явления и без того очень часты на горных, береговых и других склонах, скалах и обрывах.

Есть опубликованные работы, в которых сообщается о росте камнепадной активности во время и после лесных пожаров [7, 17, 18]. Эта активность увеличивается в результате фрагментации скальных грунтов под воздействием высоких температур, изменений механических свойств грунтов и потери защитной роли древесных растений.

В несвязных дисперсных грунтах происходят химико-минералогические изменения: дегидратация (обезвожива-

ние), дегидроксилирование или окисление. В то время как в скальных грунтах в основном происходят изменения механических свойств за счет теплового расширения [19]. Кроме того, пожары усиливают эрозионные процессы на склонах, в результате чего меняется исходный рельеф [20–22], а это может существенно изменить траектории камнепадов [20, 23].

Лесные пожары приводят к серьезным социальным последствиям, таким как потеря жилья, материальный ущерб, большое количество эвакуированных жителей и отрицательные экологические последствия. Когда лесные пожары происходят в горных районах, при сгорании растительного покрова обнажаются скальные грунты, что приводит к осознанию населением рисков возникновения камнепадов. Это основные причины, требующие понимания опасности камнепадов с двух точек зрения – физической и социальной – и особого внимания к гражданскому строительству и к защите людей, инфраструктуры и окружающей среды на уже застроенных территориях.

Влияние лесных пожаров на возникновение камнепадов схематично представлено на рисунке 1. Склон и прилегающие участки разделены на три основные части: зону зарождения камнепада, зону его перемещения вниз по склону и зону его потенциального воздействия, где останавливается большая часть обломочного материала.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛЕСНОГО ПОЖАРА НА МАССИВ СКАЛЬНОГО ГРУНТА: ЗОНА ЗАРОЖДЕНИЯ КАМНЕПАДА ▶

Высокие температуры, вызванные лесными пожарами, могут существенно повлиять на минеральный скелет скального грунта. Тепловое расширение слагающих его минералов вызывает увеличение поверхностей контакта между ними, приводя к структурным изменениям, влияющим на прочность грунта

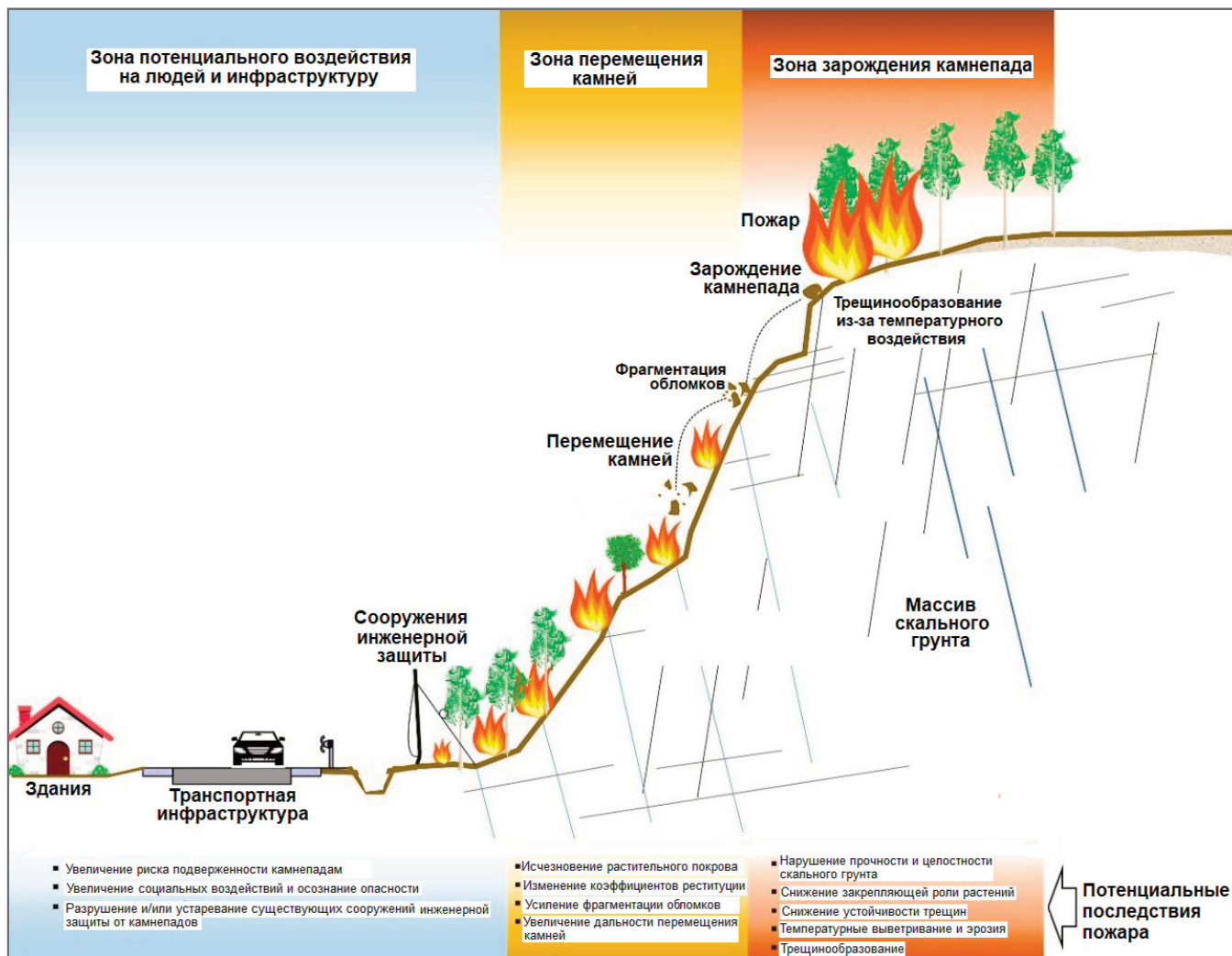


Рис. 1. Схематическое изображение влияния лесных пожаров на возникновение камнепадов

[24–26]. Такие процессы, как дегидратация (обезвоживание) или декарбонизация (обезуглероживание), могут привести к соответствующим изменениям механических свойств пород [25, 26]. Минерально-химические изменения также вызывают полиморфные превращения, расплавление и даже исчезновение некоторых минералов [27–29]. Эти процессы лежат в основе развития новых микротрещин, а также коалесценции (слияния) и увеличения существующих трещин, что приводит к важным изменениям физико-механических свойств скальных грунтов после пожара. Потеря прочности, особенно при сжатии, была подробно изучена для гранитоидов и песчаников, которые при температурах примерно от 800 до 1000 °C показывали снижение предела прочности при одноосном сжатии на величину до 80%.

Влияние температуры на ненарушенные скальные грунты широко изучалось в лабораторных условиях [30–33]. Результаты этих исследований позволяли оценивать изменения химических, фи-

зических и механических свойств пород при нагревании. В большинстве работ использовались обычные ненарушенные образцы скальных грунтов. Их нагревали в печи, следуя стандартным кривым нагрева, которые отражали изучаемые явления. Эти кривые обычно состояли из трех основных этапов, таких как:

1) первоначальное нагревание со скоростью от 1 до 15 °C/мин., начиная с комнатной температуры и достигая типичных значений от 200 до 1000 °C (эта часть кривой соответствует началу пожара);

2) поддержание постоянной температуры в течение интервала времени от 1 до 24 ч (эта часть кривой соответствует дальнейшему процессу пожара);

3) охлаждение, воспроизводимое поразному: иногда путем медленного охлаждения образцов в печи до комнатной температуры, чтобы имитировать естественное охлаждение породы, а иногда и более быстрым способом – путем погружения образцов в воду или даже в жидкий азот, чтобы вызвать тер-

мический удар, соответствующий результатам мер по пожаротушению.

Влияние способа охлаждения также является важным фактором в грунтовых массивах, пострадавших от лесных пожаров. Предыдущие исследования показали, что снижение параметров прочности и упругости более характерно для быстро охлаждаемых образцов по сравнению с медленно охлаждаемыми на воздухе, поскольку из-за резкого температурного удара увеличивается плотность расположения трещин [34–36].

Влияние температуры на прочность при сдвигах по трещинам практически не изучено. Некоторые исследования были направлены на оценку прочности при сдвигах по нарушениям сплошности пород, подвергнутых воздействиям разных температур (до 800 °C), с помощью испытаний на прямой сдвиг [37–39]. Полученные результаты показали постепенное снижение пиковой прочности на сдвиг по мере повышения температуры при нормальном нагружении. Однако этот температурный эффект по-



Рис. 2. Блок скальной породы, «пойманный» сосной во время камнепада на курорте Каладе-Сан-Висент на острове Ибица в Испании

степенно уменьшался по мере увеличения нормального напряжения.

Лесные пожары в основном воздействуют на массивы скальных грунтов, расширяя их внешние части, что вызывает внутренние напряжения, превышающие пределы прочности на разрыв в зонах трещин.

Наличие заполнителя в детритовых породах смягчает эффект расширения минеральных кристаллов.

Однако в массивных скальных грунтах отсутствие заполнителя и более высокая плотность упаковки кристаллов увеличивают напряжения между ними, поскольку они расширяются, что приводит к растрескиванию. При исследованиях поведения массивных скальных грунтов со схожими пористостью и упаковкой минеральных кристаллов было обнаружено, что карбонатные породы менее чувствительны к воздействию огня, чем кремнистые [19].

ИЗМЕНЕНИЯ НА СКЛОНЕ: ЗОНА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ КАМНЕЙ ▶

Лесные пожары приводят к уничтожению растительного покрова и изменениям свойств дисперсных и скальных грунтов, влияя на соответствующие факторы. Это должно отражаться на входных параметрах численных моделей, используемых для оценки устойчивости склонов до и после пожаров.

Уничтожение растительного покрова ▶

Деревья и подлесок выступают естественным барьером, защищающим от

камнепадов, поскольку позволяют существенно уменьшить дальность перемещения камней вниз [40] и способствуют устойчивости склона [18]. Растительный покров не только снижает интенсивность камнепадов, уменьшая энергию и скорость падения камней, но и сокращает частоту этих явлений [41, 42].

На защитный эффект растений влияют распределение и типы деревьев. Сообщалось, что увеличение среднего диаметра деревьев на высоте груди улучшает их способность задерживать движение падающих обломков пород [43, 44] (рис. 2).

Кроме того, в изначальном укреплении грунта и удержании его фрагментов на месте чрезвычайно важна роль корней.

Таким образом, опасность камнепадов на склонах, заросших лесом, следует анализировать, уделяя особое внимание как характеристикам леса, так и динамике камнепадов.

Когда происходит лесной пожар, естественная защита, обеспечивавшаяся до этого растениями, теряется. Пожары повреждают деревья от кроны до корней, а кустарники обычно сгорают полностью. Более того, сгорание корней в трещинах скальных грунтов ускоряет физическое выветривание.

Воздействие лесного пожара на растительный покров зависит от его интенсивности и продолжительности. Полное восстановление окружающей среды после пожара может занять от нескольких лет до нескольких десятилетий в за-

висимости от погоды и климатических условий [12].

В работе [45] было продемонстрировано критическое влияние изменений климата на возникновение пожаров высокой интенсивности, а также на более медленное восстановление растительности после этих событий [45].

Увеличение частоты камнепадов ▶

Из геомеханических характеристик на первое место выходят количество сетей трещин в массиве скальных грунтов, характер их заполнителя (если он есть), наличие или отсутствие воды [96]. Во время лесного пожара эти условия изменяются. Кроме того, происходит ухудшение свойств минерального скелета породы, снижающее прочность массива и увеличивающее его трещиноватость, а также вероятность фрагментации породы при возникновении камнепадных процессов.

Увеличение частоты и интенсивности камнепадов после лесного пожара связано не только с его воздействием на грунтовый массив, но и с потерей растительного покрова. Доррен с соавторами [46] объяснили это тем, что деревья уменьшают энергию падающих камней, прежде всего вызывая вращение камней и перемещение их по корням, а также деформирование и «разбивание» обломков при ударах о стволы. В этом отношении существует связь между типом леса (то есть диаметром стволов на уровне груди и плотностью расположения деревьев) и его способностью сдерживать движение камней определенных размеров. Авторы некоторых исследований [44, 47] предполагают, что если одна треть деревьев имеет диаметр на уровне груди, равный среднему размеру падающих обломков, то это приводит к снижению скорости камней в среднем на 26% и к уменьшению максимальной высоты отскока в среднем на 75%.

Влияние на параметры моделирования ▶

Численное моделирование может помочь определить траектории камнепада и оценить кинематическое поведение падающих камней. Наиболее важными входными параметрами в этом случае являются коэффициенты реституции и динамического трения. Оба этих коэффициента отражают количество энергии, теряемой при ударе падающего камня о поверхность склона.

Коэффициент реституции зависит в основном от угла удара и свойств по-

крывающего склон грунта, а коэффициент динамического трения определяет силу, противоположную направлению скольжения блока. Величина второго коэффициента зависит не только от формы падающего обломка, но и от характеристик поверхности склона.

Оценка коэффициентов реституции и динамического трения представляет собой сложную задачу, до сих пор еще не стандартизованную. Это связано со сложностями калибровки и валидации параметров грунта, используемых в моделях.

В любом случае, если моделирование проводится для сторевшей территории, влияние пожара является фактором, который необходимо учитывать. Лесные пожары оказывают воздействие на свойства грунта. Тяжесть этого влияния зависит от их продолжительности, интенсивности и частоты [48]. При пожарах малой интенсивности, при которых температуры не очень высоки, воздействие на растительный покров невелико и затрагивает только самый верхний слой грунта. Однако во время пожаров высокой интенсивности, при которых достигаются более высокие температуры, растительный покров уничтожается в значительной степени, что может привести к серьезным изменениям свойств грунта.

Тем не менее из публикаций по моделированию камнепадов видно, что лишь в немногих исследованиях учитывалось то, как после лесных пожаров изменяются коэффициенты реституции и динамического трения.

Сабатакакис с коллегами [49] в пяти случаях оценили значения коэффициентов реституции при исследованиях в Западной Греции, показав, что из-за уничтожения растительного покрова исходные значения этих коэффициентов снизились после пожаров на 15–25%.

ПОТЕНЦИАЛЬНОЕ ПОРАЖЕНИЕ ВО ВРЕМЯ И ПОСЛЕ ЛЕСНОГО ПОЖАРА ▶

Тушение пожаров и противокаменные мероприятия ▶

Тушение лесных пожаров является опасным делом. Хотя проводится множество исследований, касающихся подверженности пожарным воздействию газов или высоких температур во время тушения, мало что известно об их подверженности камнепадам.

Основным статистическим показателем для оценки влияния камнепадов на

деятельность по тушению пожаров является количество погибших. Данные, представленные Управлением пожарной охраны США (US Fire Administration, USFA), показали общую тенденцию к росту числа погибших пожарных. В период с января 2000 года по октябрь 2019 года в результате пожаров на природных территориях погибло 99 человек. При этом 32,3% смертельных исходов произошли из-за попадания в огненную ловушку, 23,2% – из-за столкновений транспортных средств, 20,2% – из-за стресса/перенапряжения, 16,2% – из-за поражения падающими камнями или деревьями. Почти 70% всех этих смертей произошли во время тушения лесных пожаров [50].

В Испании практически отсутствует информация о погибших пожарных. По официальной информации, за последние 10 лет было зафиксировано 3 случая гибели людей в результате камнепадов [51]. По сведениям, полученным от испанских пожарных, некоторые действия, совершаемые при тушении пожара, могут спровоцировать камнепады. Основные причины этого: дестабилизация камней из-за разворачивания и натяжения пожарных рукавов; перемещение пожарного оборудования (например, пожарных машин) и персонала вблизи бровок склонов или на склонах; воздействие на склоны и обрывы струй воды из пожарных рукавов или из средств пожаротушения с воздуха.

Воздействие на инфраструктуру ▶

Подверженность камнепадам можно оценить для разных элементов: населения, зданий, транспортной инфраструктуры, природных территорий, объектов культурного наследия и пр. Для этого необходимо знать характеристики камнепадов, провоцирующие их факторы, а также их пространственно-временное распределение.

Во многих случаях для борьбы с камнепадами используется инженерная защита: укрепление каменных блоков на склоне нагелями, их удерживание сетчатыми покрытиями, драпировками, завесами или торкрет-бетоном, установкой камнеулавливающих ограждений (противокаменных барьеров, которые обычно включают в себя системы металлических опор с опорными пластинами, оттяжек, несущих тросов, сеток, амортизирующих элементов и анкеров). Однако высокие температуры при пожаре могут повлиять на эти средства и сооружения инженерной защиты.

Одними из основных последствий воздействия лесного пожара на противокаменные барьеры являются повреждение тросов, оттяжек, амортизирующих элементов и сеток, что ухудшает или уничтожает защитные функции этих сооружений. В таких случаях все поврежденные элементы нуждаются в замене.

Пожары также могут повредить сетчатые покрытия склонов, драпировки, завесы и нагели, сделав их более хрупкими и слабыми в зависимости от их состава и достигнутых температур.

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ ▶

Лесные пожары могут вызывать физические и химические изменения в массивах скальных грунтов, увеличивая их фрагментацию и уменьшая их прочность в местах нарушений сплошности, что повышает частоту возникновения и интенсивность камнепадов. А из-за уничтожения пожаром растительного покрова изменяются траектории и дальность перемещения камней.

Леса чрезвычайно важны для защиты от камнепадов, поскольку деревья снижают скорость падающих камней и высоту их отскоков.


При моделировании камнепадов надо учитывать изменения входных параметров (в частности, коэффициентов реституции) при уничтожении растительности. Сопоставление моделей до и после пожара могло бы быть эффективным инструментом для оценки новой опасности склона.

Особое внимание следует уделять сопоставлению характеристик лесного пожара (интенсивности, продолжительности и т. д.) с частотой, интенсивностью и дальностью распространения камнепадов. Картирование интенсивности лесных пожаров и тяжести обгорания территории в сочетании с инвентаризацией камнепадов до и после пожаров поможет понять корреляционную связь между ними.

Средства и сооружения по стабилизации и инженерной защите склонов от камнепадов могут потерять свою функциональность из-за высоких температур, в результате чего потребуются их замена или ремонт. К тому же после лесных пожаров повышается осведомленность населения о социальных рисках – и люди начинают требовать срочного применения дорогостоящих мер защиты.

Кроме того, меры по пожаротушению также могут повысить актив-

ность камнепадов. Пожарные организации и управления по чрезвычайным ситуациям в сотрудничестве с научным сообществом должны разработать стратегии по снижению рисков

камнепадов во время и после лесных пожаров. 

Авторы выражают благодарность компаниям *Paramassi* и *V-Traverca* за

разрешение использовать их изображения и Консорциуму пожарных провинции Аликанте (Испания) за поддержку и ценную информацию, предоставленную для подготовки этой работы.

ИСТОЧНИК ДЛЯ ПЕРЕВОДА ►

(SOURCE FOR THE TRANSLATION) ►

Perez-Rey I., Sarro R., Tomas R., Alejano L.R., Hernandez Gutierrez L.E., Mateos R.M., Riquelme A. A brief review of the effect of wildfires on rockfall occurrence // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2023. Vol. 1124. Rock and Fracture Mechanics in Rock Engineering and Mining (Eurock 2022): a Regional Symposium of International Society for Rock Mechanics (ISRM), 11.09.2022 – 15.09.2022, Helsinki, Finland. Article 012122. DOI: 10.1088/1755-1315/1124/1/012122.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, ИСПОЛЬЗОВАННОЙ АВТОРАМИ ПЕРЕВЕДЕННОЙ СТАТЬИ ►

(REFERENCES USED BY THE AUTHORS OF THE TRANSLATED ARTICLE) ►

1. Wotton B.M., Gould J.S., McCaw W.L., Cheney N.P., Taylor S.W. // Int. J. Wildland Fire. 2012. Vol. 21. P. 270–281.
2. San Miguel J., Durrant T., Boca R., Maianti P., Liberta G., Artes T., Jacome D., Branco A., De Rigo D., Ferrari D., Pfeiffer H., Grecchi R., Nuijten D., Leray T. Forest fires in Europe, Middle East and North Africa 2019. Publications Office of the European Union, 2020. ISBN 978-92-76-23208-7.
3. Andrade A., Bello J., Chopo S., Elazar J.M., Enriquez E., Hernandez E., Lopez-Santalla A., Munoz A. Los incendios forestales en Espana: decenio 2006–2015. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2019. ISBN 003190315.
4. Cannon S.H., Gartner J.E., Rupert M.G., Michael J.A., Rea A.H., Parrett C. Predicting the probability and volume of postwildfire debris flows in the intermountain western United States // Geological Society of America Bulletin. 2010. Vol. 122. № 1/2. P. 127–144. DOI:10.1130/B26459.1.
5. Santi P., Cannon S., DeGraff J. Treatise on Geomorphology (ed. by J.F. Shroder). San Diego: Academic Press, 2013. P. 262–287. ISBN 978-0-08-088522-3.
6. Staley D.M., Tillery A.C., Kean J.W., McGuire L.A., Pauling H.E., Rengers F.K., Smith J.B. Estimating post-fire debris-flow hazards prior to wildfire using a statistical analysis of historical distributions of fire severity from remote sensing data // Int. J. Wildland Fire. 2018. Vol. 27. P. 595–608.
7. De Graff J.V., Gallegos A.J. The challenge of improving identification of rockfall hazard after wildfires // Environmental & Engineering Geoscience. 2012. Vol. 18. P. 389–397.
8. Parise M., Cannon S.H. Wildfire impacts on the processes that generate debris flows in burned watersheds // Nat. Hazards. 2012. Vol. 61. № 1. P. 217–227. DOI:10.1007/s11069-011-9769-9.
9. Nyman P., Sheridan G.J., Smith H.G., Lane P.N.J. Evidence of debris flow occurrence after wildfire in upland catchments of south-east Australia // Geomorphology 2011. Vol. 125. № 3. P. 383–401. DOI:10.1016/j.geomorph.2010.10.016.
10. Cui Y., Cheng D., Chan D. Investigation of Post-Fire Debris Flows in Montecito // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2019. Vol. 8. № 1. Article 5. URL: <https://doi.org/10.3390/ijgi8010005>.
11. Kean J.W., Staley D.M., Cannon S.H. In situ measurements of post-fire debris flows in southern California: comparisons of the timing and magnitude of 24 debris-flow events with rainfall and soil moisture conditions // Journal of Geophysical Research F: Earth Surface. 2011. Vol. 116. № 4. DOI:10.1029/2011JF002005.
12. Carabella C., Miccadei E., Paglia G., Sciarra N. Post-Wildfire Landslide Hazard Assessment: The Case of The 2017 Montagna Del Morrone Fire (Central Apennines, Italy) // Geosciences. 2019. Vol. 9. Article 175. URL: <https://doi.org/10.3390/geosciences9040175>.
13. Rengers F.K., McGuire L.A., Oakley N.S., Kean J.W., Staley D.M., Tang H. Landslides after wildfire: initiation, magnitude, and mobility // Landslides. 2020. Vol. 17. P. 2631–2641.
14. Dowling C.A., Santi P.M. Debris flows and their toll on human life: A global analysis of debris-flow fatalities from 1950 to 2011 // Nat. Hazards. 2014. Vol. 71. № 1. P. 203–227. DOI:10.1007/s11069-013-0907-4.
15. Jaccard C.J., Abbruzzese J.M., Howald E.P. An evaluation of the performance of rock fall protection measures and their role in hazard zoning // Nat. Hazards 2020. Vol. 104. P. 459–491.
16. Sarro R., Mateos R.M., Garcia-Moreno I., Herrera G., Reichenbach P., Lain L., Paredes C. The Son Poc rockfall (Mallorca, Spain) on the 6th of March 2013: 3D simulation // Landslides. 2014. Vol. 11. P. 493–503. ISSN 1612-5118.
17. Melzner S., Shtober-Zisu N., Katz O., Wittenberg L. Brief communication: post-wildfire rockfall risk in the eastern Alps // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2019. Vol. 19. P. 2879–2885. DOI:10.5194/nhess-19-2879-2019.
18. Gehring E., Maringer J. Disturbance calls for disaster: why forest fires increase landslides and rockfall hazards // Research Outreach. 2020. URL: <https://researchoutreach.org/articles/disturbances-disaster-forest-fires-increase-landslides-rockfall-hazards/>.

19. Gomez-Heras M., McCabe S., Smith B.J., Fort R. Impacts of fire on stone-built heritage // *Journal of Architectural Conservation*. 2009. Vol. 15. № 2. P. 47–58.
20. Vick L.M., Zimmer V., White C., Massey C., Davies T. Significance of substrate soil moisture content for rockfall hazard assessment // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2019. Vol. 19. P. 1105–1117. ISSN 1561-8633. URL: <https://doi.org/10.5194/nhess-19-1105-2019>.
21. Rammer W., Brauner M., Ruprecht H., Lexer M.J. Evaluating the effects of forest management on rockfall protection and timber production at slope scale // *Scandinavian Journal of Forest Research* 2015. Vol. 30. № 8. P. 719–731. ISSN 0282-7581. URL: <https://doi.org/10.1080/02827581.2015.1046911>
22. Stoffel M., Wehrli A., Kuhne R., Dorren L.K.A., Perret S., Kienholz H. Assessing the protective effect of mountain forests against rockfall using a 3D simulation model // *Forest Ecology and Management*. 2006. Vol. 225. № 1. P. 113–122. ISSN 03781127. DOI:10.1016/j.foreco.2005.12.030.
23. Sarro R., Maria Mateos R., Reichenbach P., Aguilera H., Riquelme A., Hernandez-Gutierrez L.E., Martin A., Barra A., Solari L., Monserrat O., Alvioli M., Fernandez-Merodo J.A., Lopez-Vinielles J., Herrera G. Geotechnics for rockfall assessment in the volcanic island of Gran Canaria (Canary Islands, Spain) // *Journal of Maps*. 2020. Vol. 16. P. 605–613. DOI:10.1080/17445647.2020.1806125.
24. David C., Menendez B., Darot M. Influence of stress-induced and thermal cracking on physical properties and microstructure of la peyrate granite // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1999. Vol. 4. P. 433–448. ISSN 0148-9062.
25. Sygala A., Bukowska M., Janoszek T. High temperature versus geomechanical parameters of selected rocks – the present state of research // *Journal of Sustainable Mining*. 2013. Vol. 12. № 4. P. 45–51. ISSN 2300-3960. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2300396015300689>.
26. Zhao Zh. Thermal influence on mechanical properties of granite: a microcracking perspective // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016. Vol. 49. № 3. P. 747–762. DOI:10.1007/s00603-015-0767-1.
27. Hajpal M., Torok A. Mineralogical and colour changes of quartz sandstones by heat // *Env. Geol.* 2004. Vol. 46. P. 311–322. ISSN 1432-0495 URL <https://doi.org/10.1007/s00254-004-1034-z>.
28. Vazquez P., Shushakova V., Gomez-Heras M. Influence of mineralogy on granite decay induced by temperature increase: Experimental observations and stress simulation // *Engineering Geology*. 2015. Vol. 189. P. 58–67. ISSN 0013-7952.
29. Martinez-Ibanez V., Benavente D., Hidalgo Signes C., Tomas R., Garrido M.E. Temperature-induced explosive behaviour and thermochemical damage on pyrite-bearing limestones: causes and mechanisms // *Rock Mech. Rock Eng.* 2021. Vol. 54. P. 219–234. ISSN 1434-453X.
30. Gomez-Heras M., Vazquez P., Fort R., Carrizo L., Alonso F.J. Effects of high temperatures in building granites: micro-cracking patterns and ultrasound velocity attenuation // 19th Congress of the Carpathian-Balkan Geological Association. Thessaloniki, Greece, 23–26 September 2010: Abstracts Volume. 2010.
31. Liu S., Xu J. Mechanical properties of Qinling biotite granite after high temperature treatment // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014. Vol. 71. P. 188–193. ISSN 1365-1609. DOI:10.1016/j.ijrmmms.2014.07.008.
32. Yin T.B., Shu R.H., Li X.B., Wang P., Liu X.L. Comparison of mechanical properties in high temperature and thermal treatment granite // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2016. Vol. 26. № 7. P. 1926–1937. ISSN 1003-6326. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S100363261664311X>.
33. Biro A., Hlavicka V., Lubloy E. Effect of fire-related temperatures on natural stones // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 212. № 7. P. 92–101. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.333.
34. Kumari W.G.P., Ranjith P.G., Perera M.S.A, Chen B.K., Abdulgatov I.M. Temperature-dependent mechanical behaviour of Australian Strathbogie granite with different cooling treatments // *Engineering Geology*. 2017. Vol. 229. P. 31–44. ISSN 0013-7952 URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795217304593>.
35. Shao S., Wasantha P.L.P., Ranjith P.G., Chen B.K. Effect of cooling rate on the mechanical behavior of heated Strathbogie granite with different grain sizes // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014. Vol. 70. P. 381–387. ISSN 1365-1609. DOI:10.1016/j.ijrmmms.2014.04.003.
36. Zhang F., Zhao J., Hu D., Skoczylas F., Shao J. Laboratory investigation on physical and mechanical properties of granite after heating and water-cooling treatment // *Rock Mech. Rock Eng.* 2018. Vol. 51. P. 677–694. ISSN 1434-453X. URL: <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1350-8>.
37. Khamrat S., Thongprapha T., Fuenkajorn K. Thermal effects on shearing resistance of fractures in Tak granite // *Journal of Structural Geology*. 2018. Vol. 111. P. 64–74. ISSN 0191-8141.
38. Tang Z.C. Experimental investigation on temperature-dependent shear behaviors of granite discontinuity // *Rock Mech. Rock Eng.* 2020. Vol. 53. № 9. P. 4043–4060. ISSN 1434-453X.
39. Kim T., Jeon S. Experimental study on shear behavior of a rock discontinuity under various thermal, hydraulic and mechanical conditions // *Rock Mech. Rock Eng.* 2019. Vol. 52. P. 2207–2226. ISSN 1434-453X. URL: <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1723-7>.
40. Zabota B., Mikos M., Kobal M. Rockfall modelling in forested areas: the role of digital terrain model spatial resolution // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. Preprint. European Geosciences Union, 2019. Preprint nhess-2019-372. URL: <https://doi.org/10.5194/nhess-2019-372>.

41. Moos C., Dorren L., Stoffel M. Quantifying the effect of forests on frequency and intensity of rockfalls // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2017. Vol. 17. № 2. P. 291–304. ISSN 1684-9981. DOI:10.5194/nhess-17-291-2017.
42. Dupire S., Bourrier F., Monnet J.M., Bigot S., Borgniet L., Berger F., Curt T. The protective effect of forests against rockfalls across the French Alps: Influence of forest diversity // Forest Ecology and Management. 2016. Vol. 382. P. 269–279. ISSN 03781127. DOI:10.1016/j.foreco.2016.10.020.
43. Jonsson M.J.O. Energy absorption of trees in a rockfall protection forest: Ph.D. thesis. ETH Zurich, 2007.
44. Dorren L.K.A., Berger F., Putters U.S. Real-size experiments and 3-D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2006. Vol. 6. P. 145–153. ISSN 1684-9981. URL: <https://nhess.copernicus.org/articles/6/145/2006/nhess-6-145-2006.pdf>.
45. Davis K.T., Dobrowski S.Z., Higuera P.E., Holden Z.A., Veblen T.T., Rother M.T., Parks S.A., Sala A., Maneta M.P. Wildfires and climate change push low-elevation forests across a critical climate threshold for tree regeneration // PNAS. 2019. Vol. 116. № 13. P. 6193–6198. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.1815107116>.
46. Dorren L., Berger F., Jonsson M., Krautblatter M., Molk M., Stoffel M., Wehrli A. State of the art in rockfall – forest interactions // Schweizerische Zeitschrift fur Forstwesen. 2007. Vol. 158. № 6. P. 128–141. ISSN 0036-7818. URL: <https://doi.org/10.3188/szf.2007.0128>.
47. Jancke O., Berger F., Dorren L.K.A. Mechanical resistance of coppice stems derived from full-scale impact tests // Earth Surface Processes and Landforms. 2013. Vol. 38. № 9. P. 994–1003. ISSN 1096-9837. DOI:10.1002/esp.3381. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/esp.3381>.
48. Zavala L.M., De Celis R., Jordan A. How wildfires affect soil properties. A brief review // Cuadernos de Investigacion Geografica. 2014. Vol. 40. № 2. P. 311–332. ISSN 1697-9540, 0211-6820. URL: <https://publicaciones.unirioja.es/ojs/index.php/cig/article/view/2522>.
49. Sabatakakis N., Depountis N., Vagenas N. Evaluation of Rockfall Restitution Coefficients //: Engineering Geology for Society and Territory. Springer International Publishing, 2015. Vol. 2. P. 2023–2026. ISBN 978-3-319-09056-6 978-3-319-09057-3.
50. Administration U.S.F. Firefighters fatalities: report. 2020
51. MAP. Fallecidos en incendios forestales en (Espana), 1991-2015: tech. rep. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentacion, 2016.

Независимый электронный журнал ГеоИнфо

С 2022 года журнал «ГеоИнфо»
выходит в формате *PDF.
10 выпусков в год.



WWW.GEOINFO.RU