

Описание камнепадов и инженерная защита от них: обзор. Часть 2



Фото на заставке: interdag.ru/news/7473/dorogu-veduschuyu-k-18-selam-raschistili-ot-kamnerada

Продолжаем публиковать немного сокращенный адаптированный перевод статьи «Описание камнепадов и инженерная защита от них: обзор» [1], написанной группой ученых из Швейцарии, Италии и Франции. Эта большая работа была опубликована в 2011 году в рецензируемом международном интернет-журнале NHESS (Natural Hazards and Earth System Sciences – «Природные опасности и науки о Земле»), издаваемом под эгидой Европейского союза специалистов в области наук о Земле (EGU – European Geosciences Union).

Указанная статья находится в открытом доступе в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution 3.0 (CC BY 3.0), поэтому ее можно использовать в некоммерческих и коммерческих целях, переводить или изменять при условии ссылки на первоисточник и указания типа изменений.

Сегодня представляем вторую часть указанной работы, посвященную зонам зарождения камнепадов. Отметим, что нумерация рисунков соответствует таковой в оригинальной статье.

Консультационную помощь редакции при подготовке перевода оказали специалисты российского представительства компании Trumer Shutzbauten.

ФОЛЬКВАЙН АКСЕЛЬ (VOLKWEIN AXEL)

Швейцарский федеральный институт лесных, снежных и ландшафтных исследований, г. Бирменсдорф, Швейцария, volkwein@wsl.ch

ШЕЛЛЕНБЕРГ КРИСТИАН (SCHELLENBERG KRISTIAN)

Компания Gruner+Wepf Ingenieure AG, г. Цюрих, Швейцария

ЛАБИУЗ ВИНСЕНТ (LABIOUSE VINCENT)

Лаборатория механики горных пород Швейцарского федерального технологического института Лозанны, г. Лозанна, Швейцария

АЛЬЯРДИ ФЕДЕРИКО (AGLIARDI FEDERICO)

Кафедра геологических наук и геотехнологий Миланского университета Бикокка, г. Милан, Италия

БЕРГЕР ФРЕДЕРИК (BERGER FREDERIC)

Отдел исследований горных экосистем и ландшафтов Национального исследовательского института в сферах наук и технологий по охране окружающей среды и сельскому хозяйству (IRSTEA, ранее Cemagref), г. Сен-Мартен-д'Эр, Франция

БУРЬЕ ФРАНК (BOURRIER FRANCK)

Группа исследований горных экосистем Национального исследовательского института в сферах наук и технологий по окружающей среде и сельскому хозяйству (IRSTEA, ранее Cemagref), г. Сен-Мартен-д'Эр, Франция

ДОРРЕН ЛУУК (DORREN LUUK)

Отдел оползней, лавин и защиты лесов Федерального управления по окружающей среде, г. Берн, Швейцария

ГЕРБЕР ВЕРНЕР (GERBER WERNER)

Швейцарский федеральный институт лесных, снежных и ландшафтных исследований, г. Бирменсдорф, Швейцария

ЖАБОЕДОФФ МИШЕЛЬ (JABOYEDOFF MICHEL)

Институт геоинформатики и анализа рисков Лозаннского университета, г. Лозанна, Швейцария

ЗОНЫ ЗАРОЖДЕНИЯ КАМНЕПАДОВ

Факторы, влияющие на возникновение камнепадов

Как уже отмечалось в предыдущем разделе, опасность камнепада определенной интенсивности и определенной величины в данном месте (H_{ijk}) зависит от вероятности его начала, или временной частоты его возникновения ($P(L)_j$), и от вероятности достижения им указанного места ($P(T|L)_{ijk}$) (см. формулу (1) в разделе 2) (Jaboyedoff et al., 2001).

Величину $P(T|L)_{ijk}$ можно оценить с помощью моделирования распространения падающих камней или путем полевых наблюдений.

Чтобы оценить значение $P(L)_j$, сначала необходимо определить потенциальные зоны зарождения камнепадов, чувствительность которых к нарушению стабильности в основном основана на анализе устойчивости склонов, сложенных скальными породами, и также может быть оценена с помощью моделирования или полевых наблюдений.

В любом случае надо иметь в виду, что анализ списков зарегистрированных событий – единственный прямой способ определить истинную опасность на небольших участках. Для камнепадов ограниченных объемов (например, менее 100 тыс. куб. м из не крупных фрагментов скальных пород) хорошо зарекомендовал себя анализ устойчивости скальных склонов, который относительно легко применять, если склон и зона зарождения камнепадов хорошо охарактеризованы (Hoek, Bray, 1981; Norrish, Wyllie, 1996; Wyllie, Mah, 2004). Однако такой анализ не дает никакой информации о временной зависимости, и его трудно применять в региональных масштабах (Guenther et al., 2004).

Методы оценки зон зарождения камнепадов в большинстве своем основаны на оценке устойчивости склонов или на количественной оценке активности камнепадов. Чтобы оценить активность камнепадов, необходимы либо списки зарегистрированных для данного места событий, либо косвенные методы, например дендрохронология (Perret et al., 2006; Corominas et al., 2005).

Для создания карты опасности возникновения камнепадов в зонах их возможного зарождения можно использовать несколько параметров, но в большинстве случаев применяется картирование предрасположенности территорий к началу камнепадов (Guzzetti et al., 1999). Используемые параметры зависят в основном от наличия соответствующих документов или необходимого бюджета для сбора полевой информации (Jaboyedoff, Derron, 2005).

Для анализа предрасположенности того или иного участка к зарождению камнепадов часто используются многопараметрические рейтинговые системы, полученные на основе проектирования тоннелей и шахт, например RMR (Rock Mass Rating – «рейтинг массивов скальных грунтов») (Bieniawski, 1973, 1993). Эволюция системы RMR до SMR (Slope Mass Rating – «рейтинг массивов скальных грунтов, слагающих склоны») (Romana, 1988, 1993) привела к более подходящим результатам, добавив явную зависимость от ориентации трещин относительно склона. Затем для упрощенной оценки качества породы был введен геологический индекс прочности (GSI – Geological Strength Index) (Hoek, 1994), и его стали успешно применять для анализа устойчивости склонов (Brideau et al., 2007). Аналогичный подход был предложен для использования в геоморфологии (Selby, 1980, 1982). Позже, с увеличением доступности цифровых моделей рельефа (ЦМР) (Wentworth et al., 1987; Wagner et al., 1988) и геоинформационных систем (ГИС), было разработано и испытано несколько других методов (эвристических и вероятностных) (Van Westen, 2004).

Однако предрасположенность участка к зарождению камнепадов можно подтвердить на качественном уровне, поскольку систему склона можно описать в терминах внутренних и внешних факторов, которые обеспечивают концептуальную основу для описания потенциала нестабильности с использованием имеющихся данных (рис. 5).



Рис. 5. Внешние и внутренние факторы, влияющие на возникновение камнепадов (по Jaboyedoff, Labiouse, 2003; Jaboyedoff, Derron, 2005)

Обнаружение нестабильности прежде всего требует определения:

- мест локализации процессов, предшествующих разрушению;
- участков, предрасположенных к быстрой потере прочности, ведущей к разрушению склона (Jaboyedoff et al., 2005a; Leroueil and Locat, 1998).

Внутренние факторы – это неотъемлемые характеристики склонов (Jaboyedoff, Derron, 2005), такие как:

- а) морфология: тип склона (угол наклона, высота, профиль и т. д.), обнажения на нем, тип рельефа (зависит от эрозионных процессов) и т. д.;
- б) геология: типы скальных пород, выветривание, изменчивость геологического строения, напластование, типы отложений, складчатые зоны и т. д.;
- в) трещиноватость: системы трещин, расстояния между трещинами, интенсивность трещиноватости и т. д.;
- г) механические свойства скальных и дисперсных грунтов: сцепление, угол внутреннего трения и т. д.;
- д) активность склоновых процессов и явлений: смещения, камнепады и т. д.
- е) гидрогеология: водопроницаемость грунтов, водопроницаемость трещин и т. д.

Заметим, что в рамках рассматриваемой темы разрывы сплошности или системы трещин являются анизотропными особенностями, которые в основном и контролируют стабильность склона (Ноек, Врай, 1981). В приведенном выше списке с ними связаны пункты б–г. Например, была продемонстрирована связь между активностью камнепада и интенсивностью ранее существовавшей трещиноватости, такой как в замках складок слоев с крутыми перегибами (Сое, Нарп, 2007).

Внутренние факторы могут меняться во времени из-за воздействия *внешних факторов* (Jaboyedoff, Derron, 2005), таких как:

- сила тяжести;
- циркуляция воды (гидрология, гидрогеология, климат, осадки в виде дождя или снега, скорость инфильтрации воды в грунт, грунтовые воды);
- выветривание;

- эрозия;
- сейсмические события;
- активная тектоника;
- микроклимат, в том числе замерзание и оттаивание, солнечное облучение, многолетняя мерзлота, все чаще используемые для объяснения возникновения камнепадов (Frayssines, 2005; Matsuoka, Sakai, 1999; Matsuoka, 2008; Gruner, 2008);
- близлежащие нестабильные зоны;
- деятельность человека (антропогенные факторы) и т. д.;

Приведенные выше списки внутренних и внешних факторов не являются исчерпывающими, но позволяют ввести ключевые моменты для методов, которые были предложены для оценки вероятности возникновения камнепадов (или временной частоты их возникновения) $P(L)$ с использованием карты подверженности территорий камнепадам. Геоинформационные системы и соответствующее программное обеспечение позволяют учитывать большинство из перечисленных факторов на региональном уровне. Например, в Швейцарии на топографических векторизованных картах масштаба 1 : 250 000 территории с обрывистыми границами указываются в виде многоугольников (Jaboyedoff, Labiouse, 2003; Loye et al., 2009).

Методы идентификации и описания зон зарождения камнепадов

Методы, в которых используются региональные геомеханические подходы

Такие методы, как RFHRS (RockFall Hazard Rating System – «система рейтинга опасности камнепадов», Pierson et al., 1990) или MRFHRS (Missouri Rockfall Hazard Rating System – «система рейтинга опасности камнепадов штата Миссури», Maerz et al., 2005), по сути, сочетают оценки $P(L)$ и $P(T|L)$ на таком же уровне, как и для риска. Оба указанных метода были разработаны для осыпных склонов, близких к дорогам, и были улучшены двумя способами, то есть путем уменьшения количества параметров с 12 (или 18) до 4 для RHRS (Santi et al., 2008) или путем их сочетания с параметрами RMS (Rock Mass Strength – «прочности массива скальных грунтов») (Budetta, 2004). Эти методы сочетают внутренние и внешние факторы на одних и тех же уровнях.

В дополнение к классической характеристике массива горных пород (Bieniawski, 1973; Romana, 1988) были предложены некоторые методы для районирования параметров подверженности территорий камнепадам. Например, была разработана рейтинговая система (Mazzoccola, Hudson, 1996) на основе использования сочетания внутренних и внешних факторов и применения подхода матричного взаимодействия по методу RES (Rock Engineering System – «система горной инженерии», Hudson, 1992). Эта рейтинговая система позволяет создать модульный метод характеристики массива скальных грунтов для ранжирования предрасположенности склонов к камнепадам. На основе аналогичного подхода было предложено (Vangeon et al., 2001) откалибровать шкалу предрасположенности с использованием геотехнического рейтинга по региональным спискам событий, разработанного для линейной обрывистой зоны (Carere et al., 2001). Также была разработана система рейтинга подверженности камнепадам, основанная на 7 критериях, сочетающих внутренние и внешние факторы (Rouiller et al., 1998).

Методы анализа на основе ГИС и ЦМР

Первые исследования камнепадов с помощью ЦМР или ГИС были выполнены с использованием такого критерия, как угол наклона поверхности грунта (Торпе, 1987а), или структурных данных для моделирования склонов (Wagner et al., 1988; Wentworth et al., 1987; Wu et al., 1996; Soeters, Van Westen, 1996). Конечно, самый простой способ обнаружить зону зарождения камнепада – применить пороговое значение угла наклона (Guzzetti et al., 2003) или добавить некоторые другие критерии, такие как наличие обрывистых участков (Jaboyedoff, Labiouse, 2003). Пороговый наклон может быть получен путем детального статистического анализа углов наклона, позволяющего идентифицировать обрывистые участки склонов (Strahler, 1954; Baillifard et al., 2003, 2004; Loye et al., 2009). Кроме того, можно использовать некоторые другие подходы для оценки предрасположенности тех или иных зон к зарождению камнепадов, например применение показателя, полученного в результате обратного анализа протекания камнепада. Этот показатель связывает зону зарождения с зоной аккумуляции камнепада путем подсчета количества пересечений траекторий камней со склоном. Это может быть выполнено либо с помощью метода угла «сектора тени» (Baillifard, 2005), либо в программе NY STONE с использованием пересечений смоделированных траекторий с поверхностью грунта (Fratini et al., 2008).

Для получения хороших результатов с использованием простого классического ГИС-подхода вдоль одной из дорог в Швейцарии было использовано пять характеристик: близость к разломам, осыпным склонам и дороге, высота обрыва, крутизна склона (Baillifard et al., 2003).

Основное усовершенствование, связанное с использованием ГИС и/или ЦМР, – это автоматический кинематический анализ (Wagner et al., 1988; Rouiller et al., 1998; Gokceoglu et al., 2000; Dorren et al., 2004; Gunther, 2003; Guenther et al., 2004), который позволяет определить, могут ли системы разрывов сплошности создавать нестабильные ситуации.

С использованием стандартного критерия устойчивости (Norrish, Wyllie, 1996) и статистического анализа результатов кинематических испытаний были составлены карты вероятности возникновения оползней, обвалов или призм обрушения (Gokceoglu et al., 2000).

Другие авторы применили поэлементный (partial) анализ устойчивости с использованием критерия Мора – Кулона и оценку напряженного состояния на заданной глубине около 20 м в каждом пикселе ЦМР, а также включили в анализ районирование разрывов сплошности, связанных со складчатым залеганием слоев, геологией и пр. (Gunther, 2003; Guenther et al., 2004).

Количество разрушений склонов, связанных с системами трещин, зависит от кажущейся плотности разрывов сплошности на поверхности земли, что также может использоваться в качестве входных данных для оценки опасности склона в отношении возникновения камнепадов и для определения наиболее вероятной зоны разрушения (Jaboyedoff et al., 2004b).

В дополнение к испытаниям на прочность (structural tests) для получения рейтингового показателя также можно скомбинировать несколько внешних и внутренних факторов, таких как фильтрация воды, объем подверженного эрозии материала и т. д. (Baillifard et al., 2004; Oppikofer et al., 2007).

Разрушение скальных грунтов в основном зависит от разрывов сплошности в них. Основные системы трещин можно определить по ориентации форм рельефа на ЦМР с использованием различных методов и программного обеспечения (Derron et al., 2005; Jaboyedoff et al., 2007; Kemeny et al., 2006; Voyat et al., 2006) и потом выполнить кинематические испытания на соответствующей площадке (Oppikofer et al., 2007).

Новые методы, такие как использование цифровых моделей рельефа, полученных с помощью лидаров наземного базирования, позволяют полностью распознавать структуру даже недоступных участков, например скальных обрывов (Lato et al., 2009; Sturzenegger et al., 2007a; Voyat et al., 2006).

При оценке опасности возникновения оползней в настоящее время используется множество статистических или других современных методов (Van Westen, 2004). Например, была выполнена классификация предрасположенности тех или иных зон к зарождению камнепадов с помощью оценки на основе нечеткой логики (fuzzy logic) (Aksoy, Ergcanoglu, 2006).

Заключительные замечания по выявлению зон возможного зарождения камнепадов

До сих пор устойчивость большинства склонов, сложенных скальными грунтами, описывалась с учетом внешних и внутренних факторов. Но такая процедура давала только приблизительные результаты – в основном из-за ограниченности доступа ко многим участкам скальных склонов. Более того, оценить опасность камнепадов по картам предрасположенности к ним территорий по-прежнему очень сложно. Однако недавно разработанные технологии, такие как фотограмметрия или лидарная съемка (Kemeny et al., 2006), позволяют получать цифровые модели рельефа, которые по крайней мере в некоторых точках отражают ситуацию лучше, чем построенные на основе стандартных полевых исследований, особенно для описания геологических структур (разрывов, систем трещин). Из таких ЦМР можно извлекать очень качественные данные. Но все же для проведения полного детального анализа того или иного участка неизбежно требуется полевая проверка с использованием техник альпинизма, чтобы правильно оценить количество зияющих и заполненных трещин, шероховатость их стенок или проверить свойства скальной поверхности, ранее определенные автоматически.

Попытки извлечь значения геологического индекса прочности (GSI) из цифровых моделей рельефа, полученных с помощью лидарной съемки, пока еще утопичны (Sturzenegger et al., 2007b), но, вероятно, будущие поколения лидаров наземного базирования позволят получать и такую информацию. Для обнажений уже проводился анализ геологического строения по ЦМР высокого разрешения и выполнялось моделирование всех возможных нестабильных участков на склоне (Grenon, Hadjigeorgiou, 2008). Можно ожидать, что такие методы будут применимы и в региональных масштабах в течение следующих 10 лет с использованием дистанционного зондирования, дополненного ограниченными полевыми съемками, что позволит определять параметры скальных грунтов и структур и выполнять высокоточное моделирование устойчивости склонов. Однако цель оценки опасности возникновения камнепадов не будет достигнута до тех пор, пока при этом анализе не будут учтены временные зависимости. А это произойдет только в том случае, если мы поймем механизмы разрушения склонов, то есть деградацию внутренних параметров под действием внешних факторов, например выветривания (Jaboyedoff et al., 2007). При этом следует отметить, что на внешние факторы обязательно повлияют ожидаемые изменения климата.

Итак, необходимо очень хорошо понимать механизмы воздействий внешних и внутренних факторов на устойчивость склонов, сложенных скальными грунтами, иначе мы либо недооценим, либо переоценим активность возможных камнепадов.

В следующей части статьи, которая будет опубликована через неделю, речь пойдет о моделировании траекторий камнепадов.

Список литературы, использованной авторами переведенного обзора [1], можно посмотреть в конце оригинальной статьи по ссылке nhess.copernicus.org/articles/11/2617/2011/nhess-11-2617-2011.pdf.

Источник

1. Volkwein A., Schellenberg K., Labiouse V., Agliardi F., Berger F., Bourrier F., Dorren L. K. A., Gerber W., Jaboyedoff M. Rockfall characterisation and structural protection – a review // Natural Hazards and Earth System Sciences. European Geosciences Union, Copernicus Publications, 2011. Vol. 11. P. 2617–2651. URL: nhess.copernicus.org/articles/11/2617/2011/.