

Описание камнепадов и инженерная защита от них: обзор. Часть 1



Предлагаем вниманию читателей 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.

Переведенная работа представляет собой обзор результатов исследований разных авторов по основным темам, связанным с камнепадами. В ней главным образом рассматриваются подходы к моделированию разных стадий камнепадов, а также меры по зонированию соответствующих опасностей и по защите от них. Статья [1] написана прежде всего для исследователей и практиков, участвующих в проектах, связанных с защитой домов, объектов инфраструктуры и окружающей среды от рассматриваемых опасных явлений.

Сегодня представляем первую часть указанной работы, посвященную целям и структуре статьи, а также определению, оценке и зонированию опасности камнепадов.

Консультационную помощь редакции при подготовке перевода оказали специалисты российского представительства компании Trumer Shutzbauten (ООО «РТ ТРУМЕР»).

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

АЛЪЯРДИ 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

ВВЕДЕНИЕ

Камнепады – это чрезвычайно опасные природные явления, связанные с падением с крутых склонов камней и перемещением их на большие расстояния с большой скоростью. По сравнению со многими другими опасными явлениями они обычно поражают лишь небольшие участки. Однако наносимый ими ущерб может быть весьма значительным. Поэтому важно обеспечить наилучшую защиту от них людей, домов и объектов инфраструктуры, основанную на строгих методах управления опасностями и рисками.

В настоящей статье приводится обзор оценок параметров, необходимых для эффективного противодействия таким событиям. В ней рассматриваются: подверженность территорий камнепадам вместе с оценкой их опасности и зонированием; моделирование возникновения камнепада, охваченной им зоны, траекторий падающих камней; оценка проектов и эффективности защитных мер, особенно систем инженерной защиты, таких как барьеры, стенки, галереи, земляные дамбы, рвы или лесопосадки.

Опасность (или риск) камнепадов может быть оценена с использованием различных подходов (Einstein, 1988) в зависимости от характеристик исследуемых территорий. Часто необходимо оценивать опасность для путей сообщения. В этом случае нередко используются данные полевых исследований и списки прошлых событий (Luckman, 1976; Bunce et al., 1997; Hungr et al., 1999). Но оказалось, что эти источники информации являются ограниченными. Например, 31 мая 2006 года крупный камнепад (5 тыс. куб. м) унес жизни двух туристов на швейцарской автомагистрали, пересекающей Альпы через Готардский тоннель (Liniger, Vieri, 2006). Тогда в средствах массовой информации начали много писать об этом, а также о других подобных явлениях в Альпах, которые произошли в последующие недели, в том числе на горе Айгер (Эйгер) (Hopkins, 2006; Oppikofer et al., 2008). Трудности их прогнозирования отразило и еще одно недавнее событие. Ночью 29 июля 2008 года мощный камнепад заблокировал шоссе Sea-to-Sky («От моря до неба»), соединяющее канадский город Ванкувер с горнолыжным курортом Уистлер (рис. 1). Фотография этой дороги представлена на обложке известной книги по механике горных пород (Hoek, Bray, 1981). В прошлом этот район широко исследовался на предмет анализа рисков (Bunce et al., 1997), в том числе из-за проведения там Олимпийских игр в 2010 году, и продолжает изучаться из-за увеличения плотности населения (Blais-Stevens, 2008).



Рис. 1. 29 июля 2008 года мощный камнепад заблокировал шоссе Sea-to-Sky («От моря до неба»), соединяющее город Ванкувер с горнолыжным курортом Уистлер в канадской

провинции Британская Колумбия (фотография Canadian Press). Следует обратить внимание на трещиноватость зоны зарождения камнепада

Когда целью является оценка опасностей или рисков для ограниченной области или для целого региона, возникают дополнительные трудности. Как правило, списки зарегистрированных опасных явлений имеются только для населенных районов. Более того, некоторые исследования ложно показывают, что количество таких событий увеличивается пропорционально урбанизации (Baillifard et al., 2004). Поэтому необходимо найти способы, позволяющие обнаруживать возможные зоны зарождения камнепадов при отсутствии каких-либо списков или четких морфологических свидетельств, таких как осыпные склоны или отделившиеся блоки горных пород.

Настоящая статья структурирована в соответствии с типичным рабочим процессом при рассмотрении камнепадов на практике (Vogel et al., 2009) и описывает подходы к моделированию таких событий, а также зонирование их опасности и меры защиты от них.

Когда в результате анализа опасности или риска камнепадов выявляется угроза для людей, домов или объектов инфраструктуры, необходимо выбрать подходящие меры инженерной защиты в соответствии с ожидаемой частотой событий и энергией ударов. Для правильного проектирования и определения масштабов мер защиты важно знать величины ударных нагрузок и характеристики защитных сооружений. Эта информация может быть получена на основе анализа предрасположенности территории к камнепадам (опасности их возникновения), численного моделирования, экспериментов или существующих руководств. Такие знания, в свою очередь, внесут вклад в рекомендации по проектированию крытых галерей, барьеров, земляных дамб и систем естественной защиты (лесопосадок).

Однако меры противодействия включают не только сооружения инженерной защиты, но и недопущение строительства домов и объектов инфраструктуры в зонах, находящихся под угрозой. Сначала необходимо выяснить, почему и где отделяются элементы каменного материала, а также его общий объем или протяженность зон зарождения камнепадов. Инициирование такого события также зависит от различных факторов (выветривания, циклов замерзания/оттаивания, сильных дождей и пр.), которые в большинстве своем еще количественно не определены. Последующий анализ траекторий движения камней определяет области, которые надо защитить. Чтобы учесть высокую чувствительность территорий только к небольшим изменениям в ландшафтах (в коренных породах, сухостое, небольших провалах и т. д.), обычно выполняется вероятностный анализ, предпочтительно с оценкой точности результатов. Однако для быстрого предварительного анализа и оценки опасности камнепадов могут быть полезны более простые и ручные методы расчета.

Существует большое количество инженерных мер защиты от рассматриваемых явлений. К ним относятся: естественная защита с помощью лесопосадок; полунатурные сооружения, такие как земляные дамбы и рвы; полностью искусственные сооружения, такие как барьеры, галереи или стенки.

ОПАСНОСТЬ КАМНЕПАДОВ: ОПРЕДЕЛЕНИЕ, ОЦЕНКА И ЗОНИРОВАНИЕ

Камнепады – основные причины гибели людей в результате оползневых процессов, даже когда задействованы элементы риска с низкой степенью подверженности этим

опасностям, например движение по автомагистралям (Bunce et al., 1997). Несмотря на то что такие события обычно связаны с меньшими объемами материала по сравнению с другими типами оползневых явлений (например, оползнями и обвалами скальных пород, каменными лавинами), они также наносят серьезный ущерб домам, объектам инфраструктуры и инженерным сетям из-за их пространственной и временной частоты, легкости высвобождения элементов каменного материала и его высокой кинетической энергии (Rochet, 1987b).

Эта проблема более актуальна в крупных альпийских долинах и прибрежных районах, характеризующихся высокой плотностью населения, наличием транспортных коридоров, центров туризма и курортов. Поэтому вопросы противодействия камнепадам очень важны для местных администраций и управлений по делам защиты населения, а также для других заинтересованных сторон (Hungr et al., 2005).

Установление приоритетов в отношении защитных мер и их выбор, а также планирование территорий должны подкрепляться оценками опасности камнепадов (Raetzo et al., 2002; Fell et al., 2005, 2008). С другой стороны, для оценки последствий возможных камнепадов, технической осуществимости и экономической эффективности различных мер защиты от них необходим анализ рисков (Corominas et al., 2005; Straub, Schubert, 2008).

Опасность камнепадов: определение

Опасность оползневых явлений определяется как вероятность того, что оползень заданной величины произойдет в данном районе в течение определенного интервала времени (Varnes, 1984; Einstein, 1988). Это определение предусматривает понятия пространственного положения, временной частоты и интенсивности. Но для событий (каменных лавин, камнепадов), при которых каменный материал перемещается на большие расстояния, в процессе определения вероятности их возникновения необходимо учитывать величину перемещения (дальность выброса) от зоны отрыва до места остановки фронтальной части при измерении вдоль пути движения (до десятков километров для каменных лавин и до нескольких сотен метров для камнепадов) (Evans and Hungr, 1993).

Таким образом, опасность камнепадов зависит от следующих факторов (Jaboyedoff et al., 2001; Crosta, Agliardi, 2003; Jaboyedoff et al., 2005b, рис. 2):

- вероятности того, что камнепад заданной величины начнется в данной зоне;
- вероятности того, что падающие камни достигнут определенного места на склоне;
- интенсивности камнепада.

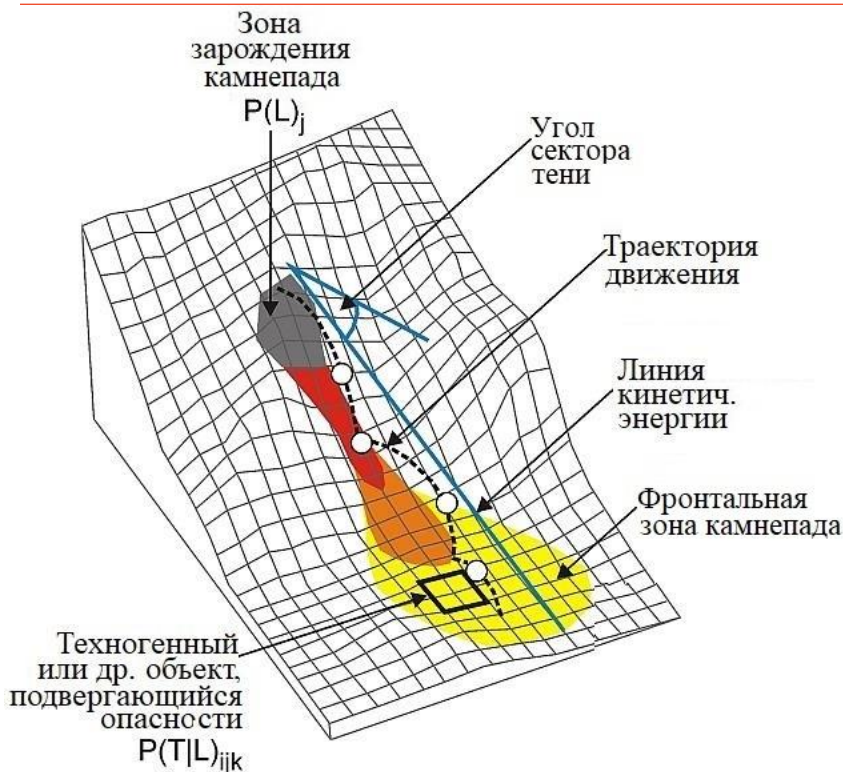


Рис. 2. Определение опасности камнепада и связанных с ней параметров (по Jaboyedoff et al., 2001)

Интенсивность камнепада представляет собой сложную функцию массы, скорости, вращения и высоты отскока камней, которая значительно изменяется как вдоль траекторий движения отдельных элементов, так и в поперечном направлении в зависимости от морфологии склона и динамики события (Broili, 1973; Bozzolo et al., 1988; Azzoni et al., 1995; Agliardi, Crosta, 2003; Crosta, Agliardi, 2004). Таким образом, опасность рассматриваемого явления может быть лучше определена как *вероятность* того, что определенное место на склоне будет достигнуто камнепадом заданной интенсивности (Jaboyedoff et al., 2001):

$$H_{ijk} = P(L)_j \cdot P(T|L)_{ijk}, \quad (1)$$

где $P(L)_j$ – вероятность наступления камнепада класса j по величине (например, по объему);
 $P(T|L)_{ijk}$ – вероятность достижения места i камнями с интенсивностью (кинетической энергией) класса k .

Поскольку как вероятность, так и интенсивность сильно зависят от начальной величины (т. е. массы) падающих камней, опасность камнепада должна оцениваться для различных сценариев (величин), явно или неявно связанных с разными среднегодовыми частотами или периодами повторяемости (Hungry et al., 1999; Dussauge-Peisser et al., 2003; Jaboyedoff et al., 2005b).

Оценка опасности камнепадов

В принципе, оценка опасности камнепадов требует определения:

- временной вероятности (среднегодовой частоты или периода повторяемости) возникновения камнепадов и пространственной подверженности им территорий;
- трехмерных траекторий и максимальной дальности распространения сорвавшихся камней;
- распределения интенсивности камнепадов в каждом месте и вдоль каждой траектории падения их элементов.

Объекты, подверженные риску, не рассматриваются в определении опасности. Однако подходы к ее оценке должны обеспечить решение проблем, связанных с различным пространственным распределением потенциально уязвимых объектов: точечным (домов), линейным (автомобильных и железных дорог) или площадным (населенных пунктов). Более того, объекты разной формы и размера, вероятно, будут подвержены воздействиям камней с разными траекториями и из разных мест начала падения (Jaboyedoff et al., 2005b, см. рис. 2), что повлияет на вероятности их достижения камнепадами. Таким образом, при оценивании опасности должно учитываться ее пространственное распределение (Crosta, Agliardi, 2003).

Но хотя уже предложен ряд методов оценки опасности камнепадов, очень немногие из них удовлетворяют всем этим требованиям. Они отличаются друг от друга способами учета частоты возникновения камнепадов, подверженности им объекта, вероятности его достижения, а также способами объединения всего этого для получения количественных или качественных оценок опасности.

Вероятность возникновения камнепада и подверженность ему объекта

Частоту событий заданной величины (объема) следует оценивать с помощью вероятностного анализа списков зарегистрированных камнепадов с учетом соответствующих соотношений (или кумулятивных распределений) объема и частоты (Dussauge-Peisser et al., 2003; Malamud et al., 2004, Hungr et al., 1999). Хотя этот подход хорошо зарекомендовал себя в области изучения опасных природных явлений (например, землетрясений), его применение к опасностям оползней ограничено скудными доступными данными и статистическими особенностями имеющихся списков зарегистрированных событий (Malamud et al., 2004).

Было показано, что частотное распределение объемов камнепадов хорошо согласуется со степенным законом:

$$\lg N(V) = N_0 - b \cdot \lg V, \quad (2)$$

где $N(V)$ – среднегодовая частота камнепадов объемом, превышающим V ; N_0 – общая среднегодовая частота камнепадов; b – показатель степени в диапазоне от 0,4 до 0,7 (Dussauge-Peisser et al., 2003).

Кумулятивные кривые величины и частоты камнепадов, построенные на основе информации о зарегистрированных событиях, позволяют оценить среднегодовую частоту камнепадов определенных классов по объему (Hungr et al., 1999). Основные ограничения этого подхода – отсутствие полных списков камнепадов для большинства участков, а также пространственная и временная неоднородность распределения событий в имеющихся списках. Возможно, на это влияет и цензура, препятствующая надежному

предсказанию частоты как очень небольших, так и очень крупных событий (Hungr et al., 1999; Dussauge-Peisser et al., 2003; Malamud et al., 2004). Но имеется пример полной оценки опасности камнепадов для участка шоссе с использованием вышеуказанного подхода (Hungr et al., 1999). Есть примеры частичного включения этого подхода в использованный метод оценки в региональном масштабе (Wieczorek et al., 1999; Guzzetti et al., 2003). Можно найти и примеры формализации данного подхода в региональном масштабе путем его объединения с картированием подверженности территорий камнепадам (Dussauge-Peisser et al., 2002, 2003; Vangeon et al., 2001).

Если списки зарегистрированных камнепадов для конкретных участков недоступны или ненадежны, то анализ опасности таких событий можно проводить только с точки зрения подверженности им тех или иных объектов. Речь идет об относительной вероятности того, что камнепад окажет воздействие на любую часть склона, учитывая набор условий окружающей среды (Brabb, 1984). Предрасположенность территории к камнепадам может быть оценена:

- через пространственное распределение посредством эвристического ранжирования выбранных показателей нестабильности (Pierson et al., 1990; Cancelli, Crosta, 1993; Rouiller, Marro, 1997; Mazzoccola, Sciesa, 2000; Budetta, 2004);
- детерминистскими методами (Jaboyedoff et al., 2004a; Guenther et al., 2004; Derron et al., 2005);
- статистическими методами (Frattini et al., 2008).

Вероятность достижения камнепадом объекта и его интенсивность

Вероятность достижения объекта и интенсивность камнепада заданной величины (объема) зависит от физических характеристик события и от топографии. Простейшие методы, описывающие охват территории камнепадом, основаны на подходе с определением угла так называемого сектора тени (максимальной поражаемой зоны), согласно которому максимальная дальность транзита каменного материала определяется пересечением поверхности рельефа с так называемой линией кинетической энергии камней, имеющей эмпирически оцененный наклон (Evans, Hungr, 1993, см. рис. 2). К сожалению, при таком подходе отсутствует модель физического процесса камнепада и его взаимодействия с поверхностью земли вдоль всей траектории и оценивается только максимальная поражаемая зона (рис. 3, а). Однако этот подход был реализован с помощью такого инструмента, как геоинформационные модели (ГИС) (CONEFALL, Jaboyedoff, Labiouse, 2003), позволяющего предварительно оценить подверженность объектов камнепадам и кинетическую энергию последних (рис. 3, б) в соответствии с так называемой энергетической высотой (Evans, Hungr, 1993).

При использовании многих существующих методик оценки опасности определяется вероятность достижения интересующего участка и возможная интенсивность камнепада с помощью двумерного численного моделирования (Matterock, Rouiller, Marro, 1997; RНАР, Mazzoccola, Sciesa, 2000; Cadanav, Jaboyedoff et al., 2005b). Это обеспечивает более точное описание физики камнепада и позволяет лучше оценить вероятность достижения им того или иного объекта (т. е. относительную частоту попадания камней в определенные места) и пространственное распределение кинетической энергии. Однако при 2D-моделировании не учитываются геометрические и динамические эффекты трехмерной

топографии, что приводит к субъективному распространению результатов моделирования на соседние двумерные траектории движения камней (рис. 3, в). И хотя это ограничение было частично преодолено за счет введения псевдотрехмерных допущений (Jaboyedoff et al., 2005b), было показано, что для учета поперечной дисперсии трехмерных траекторий и соответствующего влияния ее на вероятность достижения камнепадом рассматриваемого участка и на его интенсивность требуется полное трехмерное численное моделирование. Однако все же существует несколько методик оценки опасности камнепадов, основанных на 3D численном моделировании (Crosta, Agliardi, 2003, рис. 3, г).

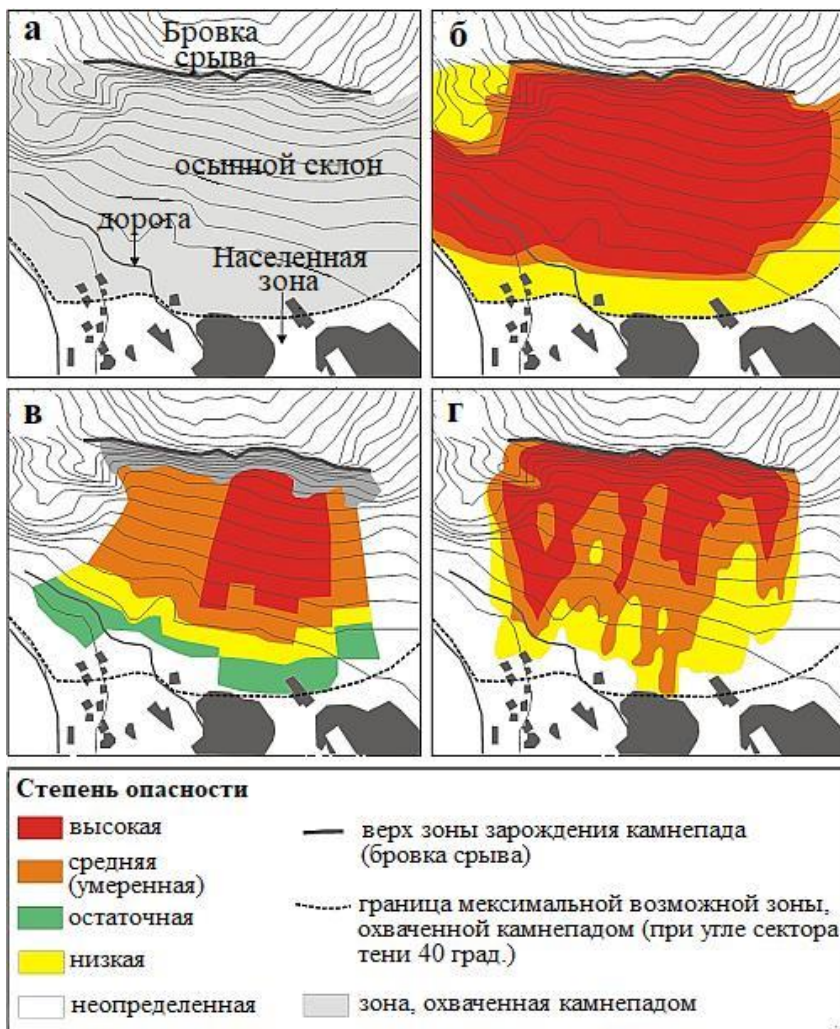


Рис. 3. Сравнение карт опасности камнепадов, построенных для района горы Монте-Сан-Мартино, расположенной в итальянской провинции Лекко (Jaboyedoff et al., 2001; Crosta, Agliardi, 2003), с использованием различных подходов к моделированию и разных методов зонирования: а – максимальная зона, охваченная камнепадом, оцененная методом угла так называемого сектора тени с использованием программы CONEFALL (Jaboyedoff, Labiouse, 2003); б – карта опасности камнепадов, полученная путем применения метода RNV (Rockfall Hazard Vector – вектора опасности камнепадов, Crosta, Agliardi, 2003) к вероятности достижения камнепадом интересующего участка и его кинетической энергии, оцененным в программе CONEFALL; в – карта опасности камнепадов, полученная путем 2D численного моделирования с использованием процедуры оценки опасности камнепадов RHAP (Rockfall Hazard Assessment Procedure, Mazzoccola, Sciesa,

2000); г – карта опасности камнепадов, полученная путем 3D численного моделирования с использованием программы NY-STONE и вышеупомянутого метода RHV (Crosta, Agliardi, 2003).

Зонирование опасности: современная практика и нерешенные вопросы

Картирование/зонирование опасности камнепадов или подверженности им участков местности – это заключительный этап оценки опасности, ведущий к составлению документа, полезного для планирования территорий, определения приоритетов финансирования или предварительной оценки подходящих защитных мер. Основной проблемой зонирования является поиск соответствующих критериев для объединения на карте, приложенной к этому документу, вероятности возникновения камнепада или подверженности его воздействию интересующих объектов, вероятности достижения последних падающими камнями и интенсивности воздействий, особенно когда не могут быть оценены формальные вероятности.

Швейцарские руководства (Raetzo et al., 2002, рис. 4) требуют, чтобы опасность камнепадов зонировалась в соответствии с вероятностью их возникновения (периодами повторяемости) и их интенсивностью (кинетической энергией) и чтобы таким образом определялись три зоны опасности – красная, синяя и желтая. Однако они явно не учитывают вероятность достижения интересующих объектов и пространственную изменчивость кинетической энергии падающих камней. Поэтому для картирования опасности была предложена методика Cadanav, основанная на 2D численном моделировании в соответствии с вероятностью того, что камни, участвующие в событиях с заданным периодом повторяемости, достигнут определенного места вдоль двумерного профиля с заданной кинетической энергией (Jaboyedoff et al., 2005b).

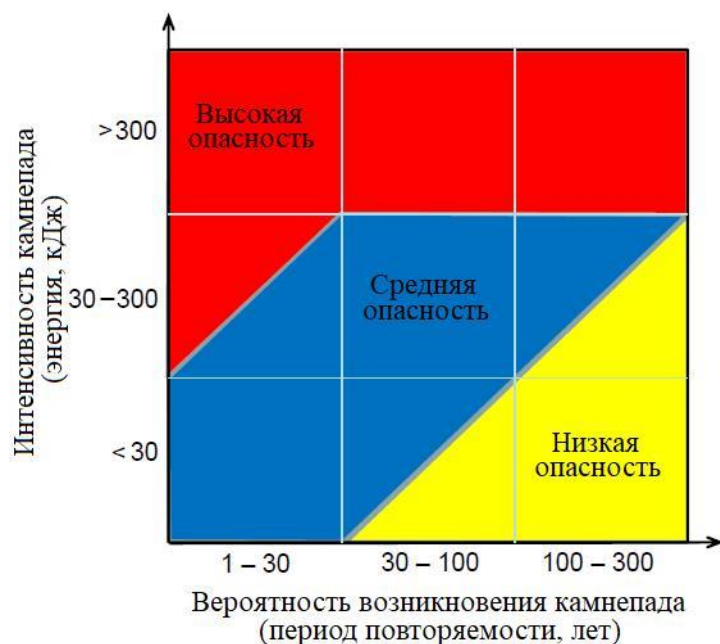


Рис. 4. Классификация опасностей камнепадов в Швейцарии

Когда можно оценить только предрасположенность территорий к возникновению камнепадов, зонирование их опасности основывается на получении подходящих показателей этой опасности на основе комбинирования ее характеристик или влияющих на нее переклассифицированных (переведенных в другие категории) значений параметров.

Некоторые авторы (Rouiller, Marro, 1997; Jaboyedoff et al., 2001; Derron et al., 2005; Corons, Vilaplana, 2008) для крупномасштабного картирования подверженности территорий камнепадам использовали простые методы на основе использования показателей предрасположенности соответствующих участков к возникновению таких событий и угла сектора тени (см. рис. 3, а).

Была также предложена процедура оценки опасности камнепадов (RHAP – Rockfall Hazard Assessment Procedure), в которой используется двумерное численное моделирование для определения вероятностей достижения тех или иных зон вдоль профилей, позже «взвешенных» в соответствии с показателями активности обрывистого склона (Mazzocola, Sciesa, 2000) (см. рис. 3, в).

Другие авторы (Crosta, Agliardi, 2003) объединили переклассифицированные параметры досягаемости объектов камнепадами и такие показатели интенсивности движения камней, как кинетическая энергия или высота отскока, полученные с помощью распределенного трехмерного моделирования, чтобы получить физически обоснованный индекс опасности – так называемый вектор опасности камнепада (Rockfall Hazard Vector – RHV). Такой подход позволяет количественно ранжировать опасности с учетом влияния трехмерной топографии (см. рис. 3, г), сохраняя при этом информацию о параметрах, влияющих на опасность. Затем этот подход был использован для того, чтобы включить количественную оценку предрасположенности территорий к камнепадам с помощью многомерных статистических методов (Frattoni et al., 2008),

При создании карт опасности для практических целей следует иметь в виду, что их надежность (и применимость на практике) зависит от ряда факторов. Для моделирования траекторий камнепадов можно применять различные описания их динамики (например, 2D или 3D, эмпирические, кинематические или динамические). Более того, сложные факторы, такие как фрагментация каменного материала или влияние растительности, могут учитываться по-разному (Crosta et al., 2004; Dorren et al., 2004) и сильно влиять на все компоненты опасности и, таким образом, на окончательную карту ее распределения.

Пространственное разрешение использованного описания топографии, особенно в случаях применения 3D-моделей, отражается в первую очередь на поперечной дисперсии траекторий камней и на вычисляемых динамических величинах, таким образом влияя на получаемые интенсивность и вероятность достижения падающими камнями того или иного места (Crosta, Agliardi, 2004). Применимость моделей опасности, полученных в разных масштабах и целях, также зависит от разрешения модели, поэтому требуются инструменты с возможностями многомасштабной оценки.

Основные неопределенности в зонировании опасности камнепадов также связаны с неопределенностью частоты их возникновения. Последняя часто неизвестна, поэтому требуется создание не одной карты распределения опасности камнепадов, а их набора на основе различных сценариев (Jaboyedoff et al., 2005b). И тут решающее значение имеет выбор расчетного объема падающего камня, чтобы избежать либо рискованной недооценки, либо экономически неэффективной переоценки опасности. И наконец, размер и форма нанесенных на карту зон опасности в значительной степени зависят от субъективности установления специалистами границ между классами для параметров, способствующих возникновению опасности. Эти границы должны определяться

физически обоснованными критериями в зависимости от предполагаемых целей использования карт, например при планировании территорий или при разработке мер защиты (Crosta, Agliardi, 2003; Jaboyedoff et al., 2005b).

От опасности к количественной оценке рисков

Хотя зонирование опасности камнепадов является полезным инструментом для планирования территорий, для поддержки проектирования и оптимизации защитных мер следует проводить анализ рисков (Fell et al., 2005; Straub, Schubert, 2008). Однако стандартный подход к анализу рисков камнепадов пока не предложен из-за все еще сложной оценки опасностей. В действительности, когда опасность выражается как подверженность ей территории, риск можно оценить только с помощью относительных шкал или матриц (Guzzetti et al., 2004; Fell et al., 2005).

Простейшая форма анализа риска камнепадов – это анализ распределения элементов риска с различной предполагаемой уязвимостью объектов в зонах разной степени опасности (Acosta et al., 2003; Guzzetti et al., 2003, 2004). Однако этот подход не полностью учитывает вероятность воздействия камнепадов, уязвимость и ценность подверженных им объектов.

Геотехническим отделом Управления гражданского строительства Гонконга (GEO, 1998) были разработаны руководства по количественному анализу рисков (QRA – Quantitative Risk Analysis), основанные на списках камнепадов, зарегистрированных в Гонконге (Chau et al., 2003). Позже в целях улучшения анализа рисков для проектирования отдельных мер инженерной защиты было предложено объединение теории вероятности и 2D численного моделирования (Straub, Schubert, 2008). Другие авторы количественно оценили риски камнепадов вдоль разных шоссе в канадской провинции Британская Колумбия на основе списков зарегистрированных там событий (Bunce et al., 1997; Hungr et al., 1999).

Однако по-прежнему требуются серьезные усилия для проведения количественной оценки рисков камнепадов в «пространственно распределенных» ситуациях (например, в городских районах, Sorominas et al., 2005), то есть там, где происходят камнепады с большой дальностью выброса и их сложные взаимодействия с отдельными подверженными риску объектами.

В следующей части статьи, которая будет опубликована через неделю, речь пойдет о зонах зарождения 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 для перевода

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/.