

О необходимости инженерной защиты непальской горной дороги от камнепадов

Предлагаем вниманию читателей обзор материалов статьи «Характеристика камнепадов и инженерная защита участка шоссе «Сиддхартха» (Н10) в районе Сиддхабаба (Непал)» [3] с привлечением дополнительной информации. Данная работа была опубликована на английском языке в официальном журнале непальского Инженерного института Трибхуванского университета (*Journal of the Institute of Engineering*) в 2015 году. Ее выполнили молодые специалисты, являющиеся сотрудниками факультета гражданского строительства Инженерного колледжа Хвопа Трибхуванского университета (Непал).

На автодорогах национального значения в Непале периодически случаются камнепады, зачастую приводящие к несчастным случаям со смертельными исходами. В том числе часть шоссе «Сиддхартха» (Н10), проходящая в районе Сиддхабаба, является одной из зон активных камнепадов из-за очень большой крутизны склонов и неблагоприятной ориентации слоев пород по отношению к трассе дороги. Но пока там отсутствует инженерная защита от этих опасных явлений. Авторы указанной статьи [3] (Гнявали и др.) изучили предрасположенность склонов к камнепадам и подверженность им шоссе Н10 в этом районе, проанализировали сценарии камнепадов на моделях в программе Rocscience Rocfall и предложили меры защиты.

Консультационную помощь редакции при подготовке обзора оказали специалисты ООО «РТ ТРУМЕР» – российского представительства австрийской компании Trumer Shutzbauten, производящей конструкции для надежной и экономически выгодной инженерной защиты людей и инфраструктуры от опасных склоновых процессов.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ СЛУЖБА «ГЕОИНФО»

info@geoinfo.ru

Краткая информация о Непале

Непал – южноазиатская страна, граничащая с Индией и Китаем (рис. 1). Численность ее населения составляет примерно 22,5 млн человек. Столица – город Катманду. Главой государства является президент, главой правительства – премьер-министр. С 2008 года страна стала Федеративной Демократической Республикой Непал, которая по своей конституции 2015 года ориентирована на строительство социализма (чем управляют в основном представители коммунистической партии). Но пока это одно из самых бедных и неразвитых государств мира с

низким ВВП и высочайшим уровнем безработицы. Основная отрасль экономики – сельское хозяйство. Промышленность занимается в основном переработкой сельхозпродукции, производством ковров и кирпича. Экспорт ориентирован главным образом на Индию и частично – на США, Турцию и Германию. Импортируются в страну нефтепродукты, промышленные товары, оборудование, транспортные средства, металлические полуфабрикаты, золото, электроника, медикаменты (в основном из Индии и в меньшей степени из Китая и Германии). Основным источником валютных поступлений – иностранный туризм, поэтому почти половину ВВП дает сфера обслуживания.

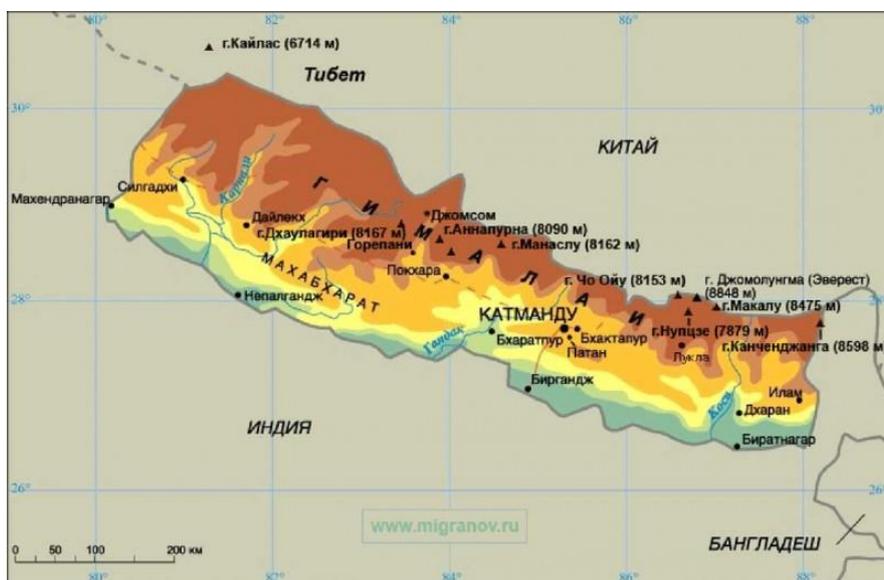


Рис. 1. Непал на картах [4, 6]

Интересно отметить, что, как считается, именно в Непале более 2500 лет назад родился Сиддхартха Гаутама, ставший известным как Будда.

Шесть седьмых территории этой самой высокогорной страны мира заняты Гималайской горной системой. Самая низкая точка расположена на высоте 70 м над уровнем моря, но более 40% территории Непала находятся на высоте более 3000 м. Снегами покрыто более 1300 горных вершин. Страна раскинулась примерно на 800 км с востока на запад и примерно на 250 км с севера на юг.

Вдоль южной границы полосой шириной от 20 до 40 км протянулся предгорный низменный регион Тераи, или Тарай (рис. 2). Севернее находится полого-холмистая гряда Сивалик высотой 500–700 м над уровнем моря, являющаяся нижней ступенью Гималайской горной системы. Еще севернее располагается средняя ступень Гималаев (так называемые Малые Гималаи) высотой до 3000 м и шириной до 16 км. Далее к северу имеется понижение – внутренняя срединная область высотой от 600 до 2000 м и шириной примерно 25 км. И с самого севера страну окаймляет Большой Гималайский хребет, который знаменит рядом вершин выше 8000 м и самой высокой горой на планете, расположенной на границе Непала и Китая, – Эверестом, или Джомолунгмой (8848 м) (рис. 3).



Рис. 2. Предгорный низменный регион Тераи, или Тарай. Раньше это были заболоченные древесно-кустарниковые заросли (джунгли), а сейчас – в основном сельскохозяйственные земли [8]



Рис. 3. Самая высокая в мире гора Эверест (вдалеке левее высокого пика, видимого на переднем плане фотографии) и окружающие его вершины [5]

По своим природно-географическим особенностям территория Непала разделяется на высотные пояса: южный тропический (до высоты 1900 м), субтропический горный (1200–1900 м), горный умеренный (1900–2800 м), умеренно холодный (3000–4000 м), альпийских лугов (4000–5200 м) и ледяной зоны (выше 5200 м).

В этой стране достаточно часто бывают землетрясения. Последняя их серия в 2015 году привела к огромным разрушениям и многотысячным жертвам.

О состоянии дорог и их инженерной защиты в Непале

Непал достаточно изолирован от основных мировых транспортных маршрутов. Но внутри него хорошо развито авиационное сообщение: имеется 47 аэропортов, а частота полетов соответствует потребностям. Морское сообщение осуществляется через порт индийской Калькутты. На юге страны есть две коротких железнодорожных линии, длина которых в сумме

составляет всего 34 км. А вот асфальтированных автомобильных дорог там имеется более 10 тыс. км, дорог без покрытия – более 7 тыс. км.

В таких преимущественно горных и сейсмически опасных странах, как Непал, очень серьезную угрозу для автодорог представляют опасные склоновые процессы и прежде всего камнепады. При этом состояние дорог в этой бедной стране в целом является плохим (рис. 4), поскольку их строительство и поддержание связаны с серьезными трудностями и большими затратами. Более того, даже их самые опасные в отношении камнепадов участки в большинстве случаев никак не защищены, из-за чего гибнет множество людей. Например, наиболее опасное 250-километровое горное шоссе «Карнали» ежегодно отнимает жизни у 50 человек. А имеющаяся в Непале программа «Защита дорог, проходящих под скальными склонами» (Highway Rock Slope) пока не может выбраться из своего зачаточного состояния.



Рис. 4. Горные дороги в Непале в большинстве своем находятся в плохом состоянии, не имеют ограждений и никак не защищены от опасных склоновых процессов [9]

Но неравнодушные непальцы, занимающиеся инженерными изысканиями и инженерной геологией, пытаются что-то изменить, привлекая к этой проблеме внимание общественности и лиц, принимающих решения, с помощью своих публикаций.

И это дает определенные результаты. Например, через несколько месяцев после разрушительного землетрясения 2015 года компания Trumer Schutzbauten GmbH из Зальцбурга при поддержке Австрийского агентства развития установила экономическое партнерство с непальским инженерным бюро для предоставления пострадавшим новейших технологий и решений в сфере защиты от камнепадов. После обучения проектированию и сборке систем защиты от камнепадов двух непальских инженеров, в Непале в ноябре 2015 года было начато проектирование защитных мероприятий [1]. Мы подробно рассказывали об этом [здесь](#). Тогда в этой стране для определения необходимых размеров и характеристик систем защиты от камнепадов впервые использовался стандарт ONR 24810 для технической защиты от камнепада Австрийского института стандартизации (Austrian Standards Institute, 2017).

А сегодня хотелось бы рассмотреть материалы статьи «Характеристика камнепадов и инженерная защита участка шоссе “Сиддхартха” (Н10) в районе Сиддхабаба (Непал)» [3], опубликованную в официальном журнале непальского Инженерного института Трибхуванского университета (Journal of the Institute of Engineering). Эту статью написали молодые специалисты К.Р. Гнявали, Р. Шреста, А. Бхаттарай, П.Р. Магар, А.Р. Дхунгана, И. Сукупайо и Р. Думару, являющиеся сотрудниками факультета гражданского строительства Инженерного колледжа Хвопа Трибхуванского университета (Непал), а также (параллельно) – Инженерного института Университета Британской Колумбии (Канада), факультета гражданского и архитектурного строительства Королевского технологического института (Швеция), отделения гидротехники

Лундского университета (Швеция) и Института гражданского строительства и технологий Международного технологического института Сириндхорна (Таиланд).

Отметим, что автодорога «Сиддхартха» (Н10) – это шоссе национального значения длиной 181 км, соединяющее регион Тераи на юге Непала с горным регионом на севере, начинаясь недалеко от границы с Индией и заканчиваясь в городе Покхара. Оно взяло свое название от настоящего имени Будды – Сиддхартха Гаутама. Его строительство (в том числе возведение 34 мостов) велось на деньги, предоставленные правительством Индии, с 1964 по 1971 год. Сейчас это шоссе входит в пятерку самых загруженных автодорог Непала. Его часть между городом Бутвал и районом Палпа (рис. 5) характеризуется плохим качеством дороги, большим количеством узких поворотов, опасностью частых камнепадов (особенно в результате землетрясений и сильных дождей) и при этом отсутствием инженерной защиты. Это периодически приводит к гибели проезжающих или проходящих там людей. В статье [3] рассмотрен отрезок этой части шоссе, проходящий в районе Сиддхабаба, где фатальные камнепады с большим количеством жертв также имеют долгую историю. Он особенно опасен из-за чрезмерно большой крутизны скальных склонов и неблагоприятной ориентации слагающих их слоев по отношению к трассе автодороги, что вместе с климатическими условиями создало условия для постоянного отделения блоков горных пород и более мелкого обломочного материала от грунтового массива и их обрушения.

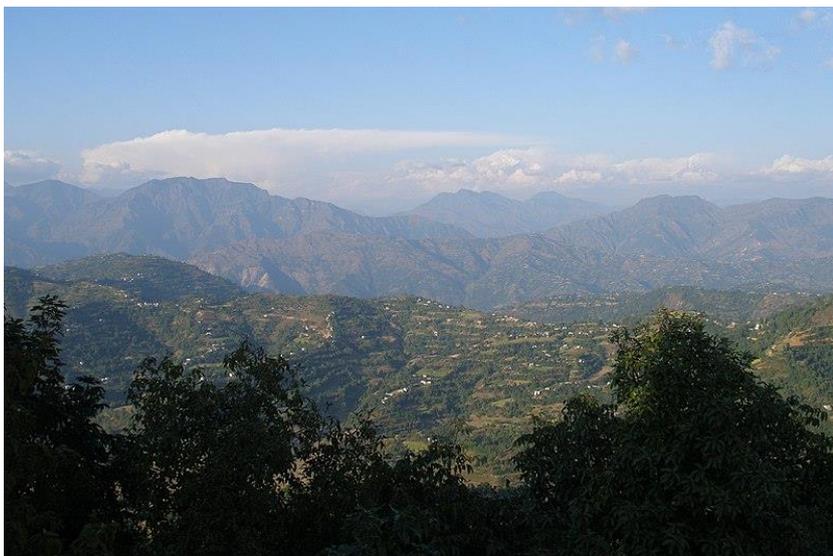


Рис. 5. Вид на район Палпа [7]

Незадолго до написания рассматриваемой статьи [3] под камнепад попала машина скорой помощи, в результате чего погибли два врача, а чуть позже селевым потоком с большим количеством крупнообломочного материала был сметен автобус, что погубило как минимум трех человек, а многие из остальных пассажиров пропали без вести.

Авторы работы [3] (Гнявали и др.) на основе обзора литературных источников и собственного визуального обследования охарактеризовали камнепады в этом районе, выполнили их упрощенный предварительный анализ с помощью двумерного моделирования в программе Rocscience Rocfall и предложили меры инженерной защиты для рассматриваемой части шоссе Н10.

Что такое камнепады

Гнявали с соавторами [3], ссылаясь на книгу Варнеса (Varnes, 1978) и другие источники, пишут, что камнепад – это тип оползня, который может происходить одиночно или в группах, но с небольшими динамическими взаимодействиями между наиболее подвижными движущимися фрагментами, которые взаимодействуют в основном с поверхностью грунта вдоль своих

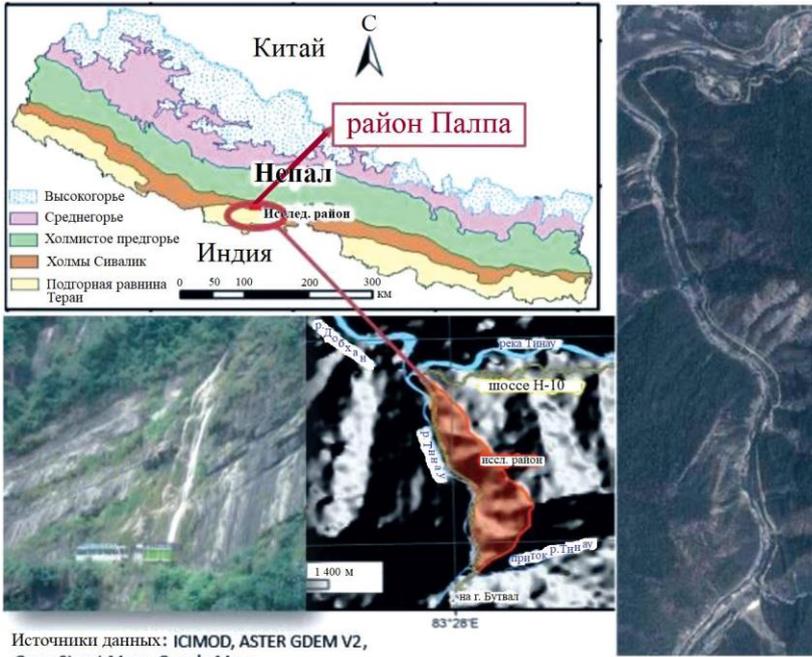
траекторий и обладают чрезвычайно высокими скоростями. Камнепады связаны с откалыванием частей скальных горных пород от массивов или с отделением их обломков от поверхности склонов и их последующим движением вниз путем падений, отскоков, качения или скольжения с остановкой на относительно плоской площадке или перед какой-нибудь преградой. Опасность потенциальных камнепадов для находящихся на их пути сооружений, транспорта и людей может быть вызвана следующими условиями или процессами на скальных склонах: трещиноватостью, выветриванием, эрозией во время сильных дождей, циклами заморозания-оттаивания, повышением порового давления из-за проникновения атмосферных осадков в трещины в скальных грунтах, землетрясениями, ростом корней или влиянием корней растений, колеблющихся при сильных ветрах. Кинематика и динамика камнепадов зависят от геометрии и массы падающих камней, крутизны и формы поверхности склона, слагающих его материалов и покрывающей его растительности.

Возникновение этих опасных явлений в основном контролируется такими геометрическими свойствами трещин в материнской породе, как ориентация, плотность, выдержанность и шероховатость плоскостей разрыва. А когда происходит разрушение и отделение фрагмента от поверхности, он начинает перемещаться вниз по неправильной траектории и набирает скорость на участках свободного падения в воздухе по мере преобразования его потенциальной энергии в кинетическую. При каждом ударе, качении или скольжении полная энергия камня рассеивается до тех пор, пока сила трения при его взаимодействии с поверхностью или реакция барьерного препятствия не преодолеют его энергию и не остановят его.

Частота камнепадов очень изменчива и зависит от характеристик участка, таких как морфология и геология зон их зарождения, наличия там соответствующих материалов, пространственного и временного распределения инициирующих (триггерных) процессов и соответствующих условий на нижележащей части склона.

Изучаемая территория

Территория, исследованная авторами статьи [3], находится недалеко от города Бутвал в районе Палпа зоны Лумбини Западного региона развития Непала (рис. 6, 7). Это участок холмов Сивалик, простирающийся примерно на 2,6 км от ворот с надписью «Добро пожаловать в Палпу» до примерно 700 м от парковой зоны «Рамапитекас». Прежде всего важно, что массив скальных грунтов на этом участке характеризуется тремя отчетливо выраженными системами трещин и трещинами напластования (четвертой системой трещин) (рис. 8). Типичным типом породы здесь является песчаник с плотностью от 2,45 до 2,60 г/куб. см в зависимости от степени выветривания, и вместе с этим в некоторых местах между пластами песчаника встречаются слои аргиллита.



Источники данных: ICIMOD, ASTER GDEM V2, Open Street Maps, Google Maps

Рис. 6. Исследуемый район (по [3])

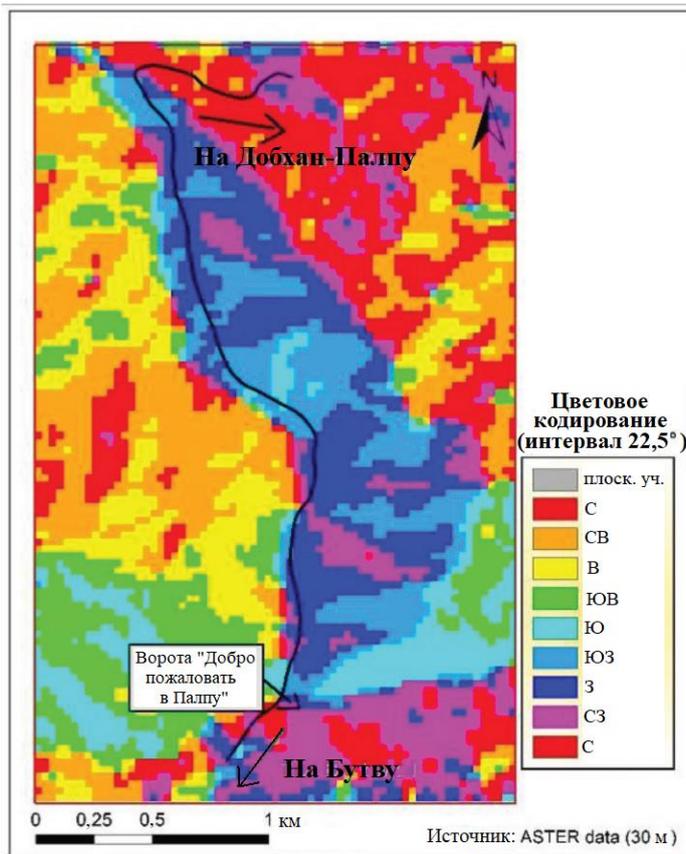


Рис. 7. Карта исследованной территории с цветовым кодированием экспозиций склонов (по [3])

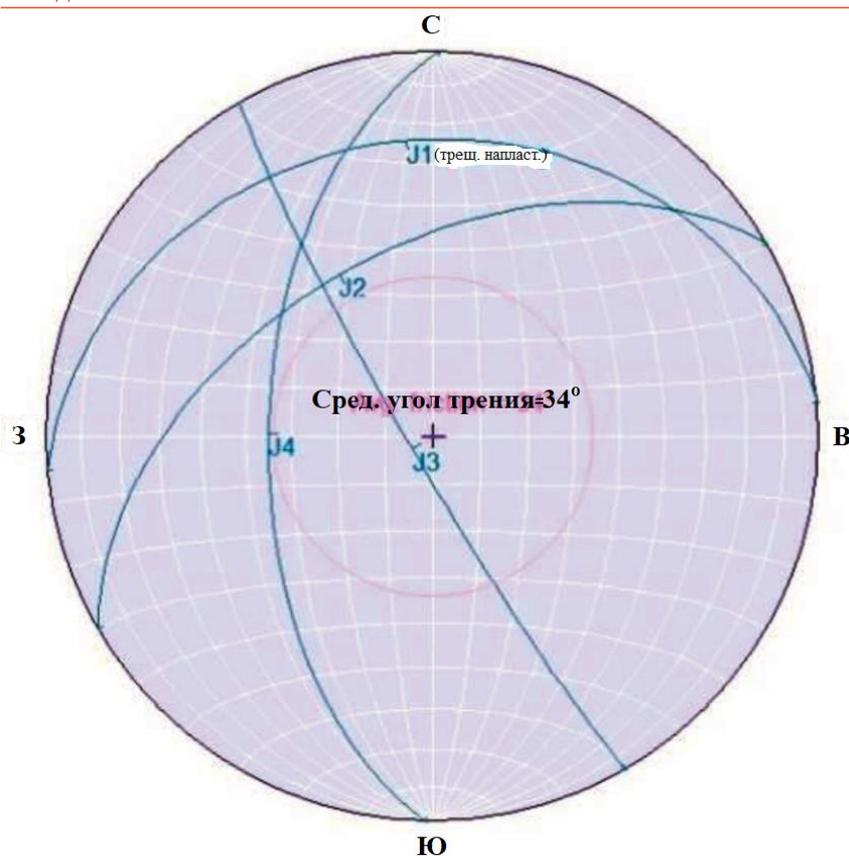


Рис. 8. Стереограммы четырех систем трещин, преобладающих на изучаемом участке (по [3])

Исследования других авторов, проведенные на изучаемой территории до написания рассматриваемой статьи [3], включали картирование опасностей нестабильных склонов, анализ категорий опасностей и деревьев событий для оценки рисков камнепадов на 12 различных участках. В последующие годы в Департамент дорог Непала были представлены два независимых отчета об исследованиях и предложения по защите от камнепадов. Однако эти меры пока не начали реализовываться. Поэтому Гнявали с коллегами [3] продолжили обследование склонов вдоль рассматриваемой части шоссе Н10 с учетом информации из вышеуказанных источников, которые они представили в списке использованной литературы.

Причины камнепадов на изученной территории

Далее авторы статьи [3] перечисляют и расшифровывают основные причины камнепадов в исследованном районе.

1. *Ориентация дороги и систем трещин.* Крутые склоны (в среднем 70–85 град.), азимут падения трещин в юго-западном направлении (в среднем 60 град.) и ориентация дороги в северном направлении обуславливают подверженность скальных склонов обрушению. Углы внутреннего трения песчаника в этом районе в основном варьируют от 28 до 39 град., поэтому происходит разрушение по плоскостям ослабления. Гнявали с коллегами [3] подчеркивают, что на исследуемой территории наиболее распространено разрушение склонов по потенциальным плоскостям отрыва, образуемым системой трещин, которые обращены к юго-западу. Вместе с тем от района Чахара до примерно 100 м перед парком «Рамапитекас» над шоссе Н10 также имеется короткий участок (длиной примерно 400 м) с призмами скольжения (обрушения) между системами трещин юго-восточного и юго-западного направлений. Для возникновения призмы обрушения среднее направление и угол падения линии пересечения составляют 231 и 53 град. соответственно.

2. *Трещины напластования.* Слагающие склоны пласты в основном представлены песчаником, но местами встречаются слои аргиллитов. Эти аргиллиты быстро и легко эродируют под действием поверхностных вод и дождей и, таким образом, вышележащие скальные грунты теряют опору и начинают падать (рис. 9). Это механизм реакции цепного типа, когда блоки породы падают один за другим.



Рис. 9. Пласты пород в изученном районе в основном образованы песчаниками, но иногда встречаются слои аргиллитов. Аргиллит эродирует / размывается дождями, и в конце концов вышележащая трещиноватая порода теряет опору, соскальзывает по плоскости ослабления / разрушения и блоками падает вниз (по [3])

3. *Зоны нарушения сплошности массива скальных грунтов.* В этом районе бывает много дождей, и большую часть времени трещины остаются незаполненными. Поэтому поровое давление повышается из-за инфильтрации дождевых вод, из-за чего выветривание происходит более быстрыми темпами, тем самым способствуя раскалыванию массива скальных грунтов и падению их блоков. К тому же камнепады могут вызываться вибрациями от дороги из-за оживленного движения транспорта.

4. *Овражная эрозия / селевые потоки.* Обильные муссонные осадки и крутые высокие склоны в этом районе обуславливают поверхностный сток с большими скоростями. Сильнотрещиноватые породы начинают раскалываться, и их блоки/фрагменты сносятся вниз стекающими водами. Образуется множество русел временных водотоков, и обломки пород, неустойчиво в них лежащие, создают угрозу камнепадов.

Типы разрушения склонов в изученном районе

Основываясь на наблюдениях и обзоре литературы, авторы работы [3] разделяют типы разрушений склонов над (и под) рассматриваемой частью шоссе Н10 (рис. 10) на три типа.

1. *Разрушение на блоки.* От поверхности в результате разрушений в основном по плоскостям ослабления и трещинам отрываются крупные блоки (размером в среднем от 1 до 20 куб. м) и падают на дорогу.

2. *Обрушение части склона, оставляющее на нем «рубец» (поверхность отрыва).* В результате разрушения при сдвиге возникает оползень небольшого масштаба и обрушивается небольшая часть скального склона, на котором остается «рубец». Такой камнепад объемом приблизительно 18–20 куб. м как раз произошел незадолго до написания рассматриваемой статьи [3].

3. *Овражная эрозия / селевые потоки.* На поверхности склона имеется множество русел временных водостоков, которые периодически активизируются во время муссонных дождей и по которым с высокой скоростью в сторону дороги переносятся большие объемы обломочного материала. Такое событие, в частности, произошло на изученном участке незадолго до публикации работы [3].



Рис. 10. Случаи обрушений скального склона в исследуемом районе в результате: разрушения на блоки (а, б); возникновения оползня небольшого масштаба с образованием на склоне «рубца» (поверхности отрыва) (в); комбинации возникновения оползня небольшого масштаба и потока обломочного материала / небольшого селя (г–е) (по [3])

Моделирование камнепадов

Гнявали с соавторами [3] напоминают, что для прогнозирования возможных камнепадов, а также правильного проектирования и определения объемов мер защиты необходимо оценить размеры опасных зон, а затем количественно оценить кинетическую энергию падающих камней, высоту их отскоков и ударные нагрузки для каждой точки вдоль их траекторий. Чтобы спроектировать подходящие защитные сооружения (рвы, сетчатые противокамнепадные барьеры, аттенюаторы, завесы, геосетки, галереи, дамбы), необходимо использовать результаты моделирования, по которым можно определить их параметры (тип, положение, длину, высоту, прочность, а также величины и направления возможных ударных нагрузок). Для этой цели используются также полномасштабные испытания, но моделирование камнепадов с помощью коммерчески доступного программного обеспечения предпочтительнее, поскольку оно экономит время и деньги. Однако при этом следует уделять пристальное внимание предварительному сбору детальных полевых данных и калибровке модели.

Места зарождения камнепадов могут быть определены как точки (например, для изолированных обнажений или локальных разрушений), линии (например, для гребней скал или бровок скальных склонов) или зоны. Затем динамика и кинематика камнепадов вычисляются с использованием трех типов моделей на основе:

- 1) эмпирических данных;
- 2) известных механизмов процессов;
- 3) геоинформационных систем (ГИС – полных трехмерных подходов к взаимодействию твердого тела с поверхностью земли).

Это могут быть:

- 2D-модели (когда профиль склона / траектории падения определяет пользователь);

- 2,5D-модели (когда для определения профилей склона / траекторий падения в 2D-модели используется ГИС);
- 3D-модели (в которых рассчитываются траектории камнепадов в полной трехмерной среде).

Однако, когда можно игнорировать геометрические и динамические эффекты трехмерной топографии (например, на плоских крутых осыпных склонах, на почти ровных склонах, на склонах с малым количеством или отсутствием растительности, на крутых бортах оврагов или долин), то предпочтительнее 2D-моделирование – в основном из-за его большей вычислительной эффективности и достаточного количества соответствующей доступной литературы. Для обзорного ознакомления с этим вопросом Гнявали с соавторами [3] рекомендуют диссертацию Уилли (Wyllie, 2014).

Защита от камнепадов

Авторы статьи [3] напоминают, что существуют разнообразные меры противодействия камнепадам: естественная защита с помощью лесопосадок, полустественные сооружения (насыпные дамбы, рвы), полностью искусственные конструкции (сетчатые противокампнепадные барьеры, аттенюаторы, завесы, геосетки, галереи, стенки). Прежде чем их реализовать, необходимо оценить риски, выбрать варианты защиты и спроектировать противокампнепадные сооружения.

Некоторые из защитных сооружений Гнявали с коллегами [3] рассматривают чуть подробнее.

Противокампнепадный барьер (камнеулавливающее ограждение) работает как гибкая барьерная система, поглощающая энергию падающих камней за счет деформирования (в идеале обратимого) его стальных компонентов (кольчужной или омега-сетки, амортизирующих элементов, тросов, шарнирных опор и других деформируемых конструкций, рассеивающих энергию) (рис. 11). Конструкция, подходящая для конкретного места, зависит от топографии, ожидаемых ударных нагрузок и высоты отскоков камней.

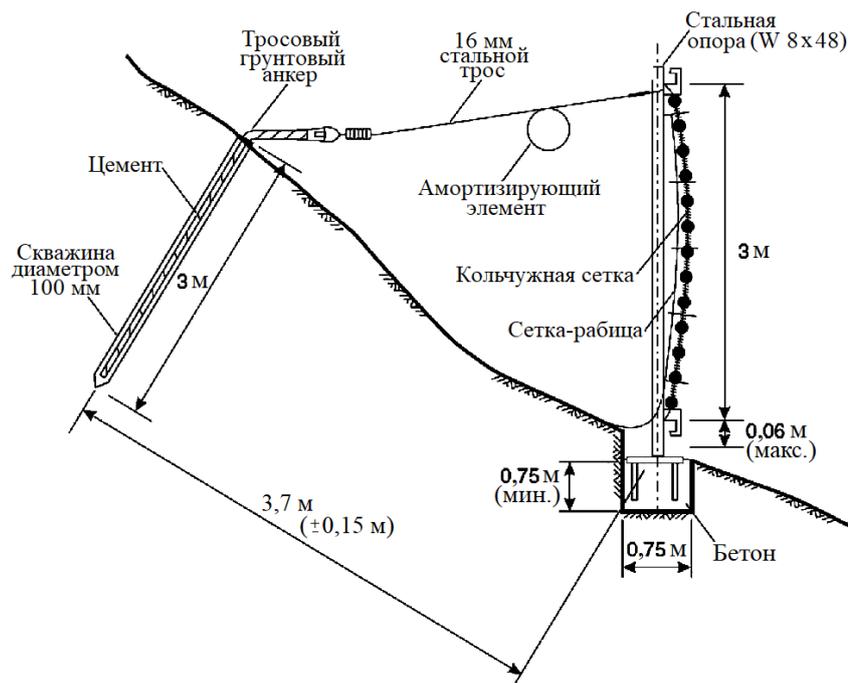


Рис. 11. Схема одного из вариантов противокампнепадного барьера (по [3])

Система стабилизации поверхности геосеткой состоит из гибкого стального сетчатого покрытия скального склона, прикрепленного к массиву пород скальными нагелями или грунтовыми анкерами через определенные промежутки (рис. 12). Она действует как пассивная защита и подходит для удержания на склоне в основном небольших нестабильных блоков на участках, непосредственно прилегающих, например, к дороге.

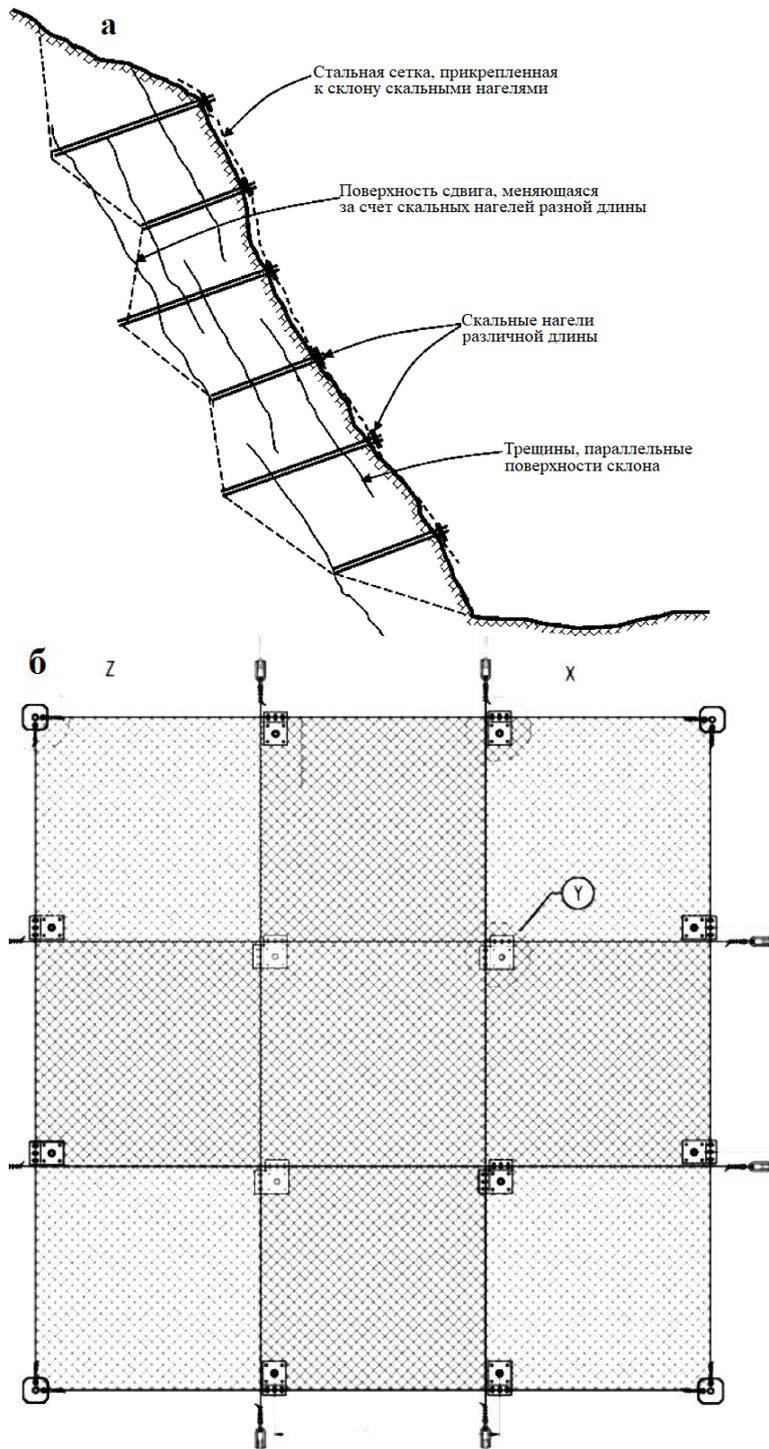


Рис. 12. Система стабилизации неустойчивых блоков на склоне с помощью гибкой стальной сетки, прикрепленной к массиву пород скальными нагелями или грунтовыми анкерами: а – в разрезе; б – в плане (по [3])

Противокаменная галерея обычно работает как жесткая конструкция, но имеет на крыше амортизирующий слой, так что энергия падающих камней значительно поглощается, прежде чем воздействовать на нижележащую жесткую часть (рис. 13). Такие сооружения могут иметь разные конструкции в зависимости от условий площадки. Они способны выдерживать очень высокие энергии ударов и являются самоочищающимися (камни с них обычно падают дальше из-за наклона крыши, то есть их ручная очистка не требуется).

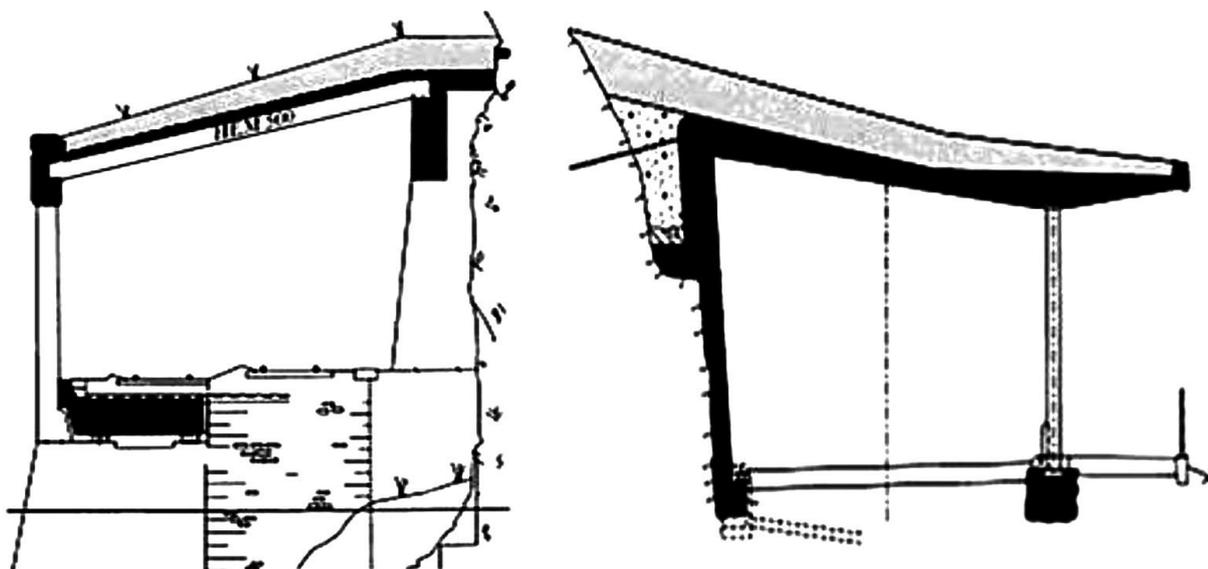


Рис. 13. Схематичные вертикальные поперечные разрезы некоторых возможных конструкций противокаменных галерей (по [3])

Авторы работы [3] сначала выполнили тщательную количественную оценку предрасположенности исследуемых склонов к возникновению камнепадов, распределения блоков по размерам в потенциальных зонах их зарождения, ожидаемых траекторий камней, распределения и интенсивности ударов по защитным конструкциям, а также величин и статистической изменчивости задействованных кинематических и динамических параметров (скорости, кинетической энергии, высоты полета). Для этого были выполнены полевые исследования на интересующей территории. Гнявали с коллегами [3] собрали данные, связанные с уклонами, предыдущими случаями камнепадов, существующими и предыдущими размерами блоков, профилями склонов вдоль наиболее критических участков, разрывами сплошности пород и материалами, слагающими склон с поверхности. Затем они выполнили 2D-моделирование камнепадов в программе Rocscience Rocfall (рис. 14) и провели анализ полевых и модельных данных для оценки разных участков вдоль исследованной части шоссе Н10 по:

- 1) частоте / опасности камнепадов;
- 2) характеру разрушений на склоне;
- 3) приблизительным энергиям падающих камней после анализа в Rocscience Rocfall;
- 4) доступности площадок.

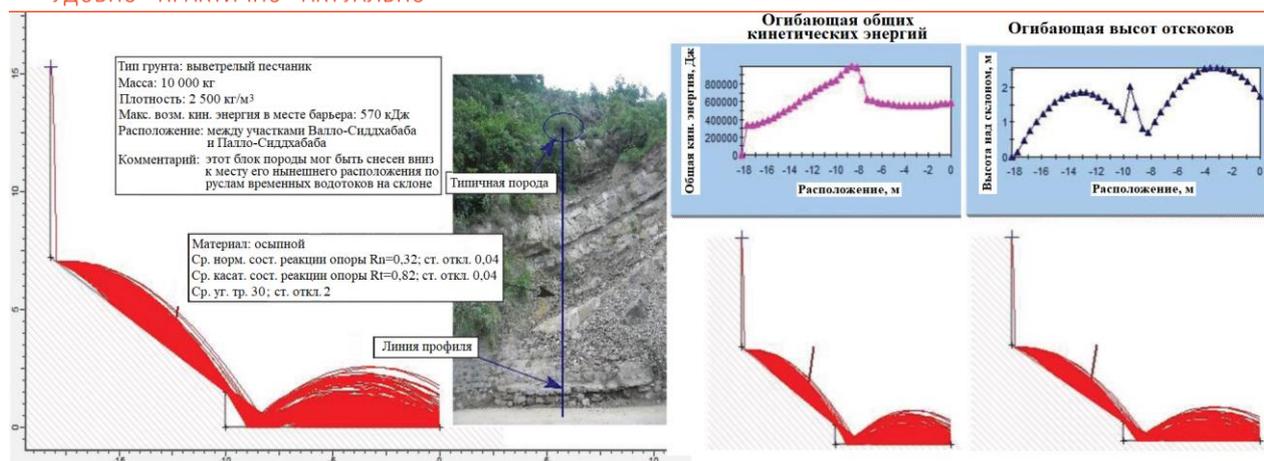


Рис. 14. Пример анализа, проведенного в программе Rocscience Rocfall (по [3])

На основе выполненных полевых рекогносцировочных исследований, моделирования и анализа, а также пригодности тех или иных мер в существующих инженерно-геологических условиях авторы статьи [3] предлагают использовать следующие типы защиты с ориентировочным диапазоном выдерживаемых энергий ударов от 1000 до 3000 кДж:

- 1) установку противокаменпадных барьеров перед дорогой;
- 2) стабилизацию неустойчивых скальных блоков (размером примерно от 0,3 до 2 куб. м) на прилегающих к дороге участках с помощью обтягивания склона гибкой стальной сеткой, прикрепленной к массиву пород скальными нагелями или грунтовыми анкерами;
- 3) строительство противокаменпадной галереи на участке Чахара из-за труднодоступности крутого скального склона, разнообразных типов его разрушения (от падения крупных блоков до возникновения осыпей и сухих оползней) и наличия крупных блоков, которые могут упасть с большой высоты;
- 4) закрепление нестабильных блоков на склоне скальными нагелями или грунтовыми анкерами в качестве дополнительной меры в некоторых критически неустойчивых местах склонов.

При этом Гнявали с соавторами [3] подчеркивают, что в целом для устранения опасности попадания камнепадов на шоссе Н7 в Сиддхабабе указанные защитные сооружения надо использовать комплексно (рис. 15). Для интересующихся подобными проблемами они рекомендуют более подробно ознакомиться с одной из предыдущих работ Гнявали (Gnyawali, 2014) и книгой Уилли (Wyllie, 2014).

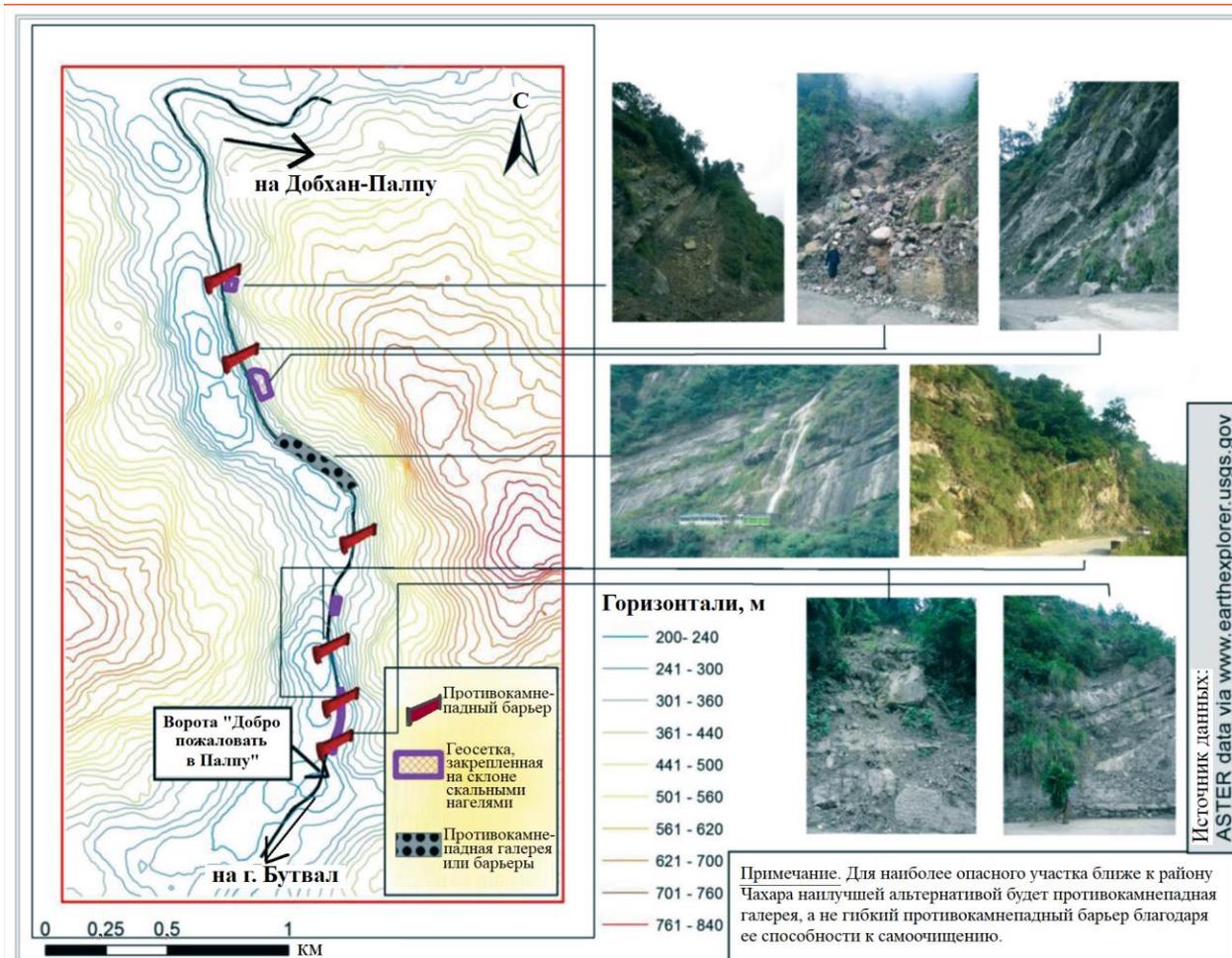


Рис. 15. Предложенные меры инженерной защиты от камнепадов на изученных участках шоссе Н-10 (по [3])

Заключение

На основе выполненных исследований Гнявали с соавторами [3] делают вывод о том, что камнепады вдоль шоссе «Сиддхартха» (Н10) в районе Сиддхабаба в Непале опасны и требуют инженерной защиты.

В основном там происходят три типа разрушений склонов (разделение на блоки, овражная эрозия и обрушения типа небольших оползней с образованием «рубцов» на склоне) из-за неблагоприятной ориентации систем трещин по отношению к дороге, присутствия среди пластов песчаника слоев аргиллитов, выветривания и коротких селевых потоков с большим количеством крупнообломочного материала.

Для инженерной защиты от камнепадов в изученном районе могут использоваться сетчатые противокаменные барьеры, противокаменные галереи и стабилизация поверхности склонов путем покрытия их гибкими стальными сетками, прикрепляемыми к массивам пород скальными нагелями или грунтовыми анкерами. Кроме того, для некоторых потенциально неустойчивых блоков на склонах необходимо их простое закрепление скальными нагелями или грунтовыми анкерами.

Немедленная установка таких конструкций представляется авторам работы [3] абсолютно необходимой.

Однако Гнявали с коллегами [3] подчеркивают, что предложенные ими меры для разных участков на рассматриваемой территории основаны на рекогносцировочном визуальном обследовании подверженности изученных склонов камнепадам и на упрощенном анализе возможных камнепадов с помощью моделирования, поэтому в ближайшем будущем необходимо

точнее определить и описать опасные участки на основе детальных полевых исследований и трехмерного моделирования.

От редакции добавим, что в журнале «Геоинфо» в прошлом году был [опубликован](#) перевод интересной работы Маркуса Хайдна и др. [1] об использовании австрийского опыта компании Trumer Schutzbauten по установке экономичных и надежных сетчатых барьеров для защиты от камнепадов в Непале и Грузии.

Важно, что проблемы, подобные описанным в статье Гнявали и др. [3] и в статье Хайдна и др. [1], характерны для многих дорог во многих странах, в том числе и в России. Например, на Северном Кавказе и вдоль Черноморского побережья Кавказа часто происходят камнепады и другие оползневые явления, которые приводят к авариям и длительным остановкам движения даже на федеральных трассах, не говоря уже о грунтовых горных дорогах. Поэтому и там на всех проблемных участках необходимо принять адекватные меры инженерной защиты. Хорошо, что многие крупные российские компании, в частности ОАО «РЖД», ГК «Автодор» и другие, начали понимать всю глубину этих проблем и в последнее время уделяют им все больше внимания.

Компания «РТ ТРУМЕР» (российское представительство австрийской компании Trumer Schutzbauten) участвовала в проекте по инженерной защите Транссибирской железнодорожной магистрали в районе города Аша Челябинской области, где были установлены сетчатые противокампнепадные защитные системы на участке длиной 10 км. Мы подробно рассказывали в об этом в журнале [здесь](#) и [здесь](#).

В Западной Европе подобные бескомпромиссные подходы к защите людей и объектов инфраструктуры от опасных склоновых процессов используются уже много десятилетий. И хорошо, что этот опыт и в том числе передовые австрийские технологии, начали применять и в России.

Источники

1. Хайдн М., Авердунк С., Фукс С., Тиард-Лафорет С. Защита от стихийных бедствий в рамках сотрудничества в области содействия развитию на примере Непала и Грузии // Геоинфо. 05.07.2021. URL: geoinfo.ru/product/markus-hajdn/zashchita-ot-stihijnyh-bedstvij-v-ramkah-sotrudnichestva-v-oblasti-sodejstviya-razvitiyu-na-primere-nepala-i-gruzii-44926.shtml.
2. en.wikipedia.org/wiki/Siddhartha_Highway.
3. Gnyawali K.R., Shrestha R., Bhattarai A., Magar P.R., Dhungana A.R., Sukupayo I., Dumaru R. Rockfall characterization and structural protection in the Siddhababa Section of Siddhartha Highway H10, Nepal // Journal of the Institute of Engineering. 2015. Vol. 11. № 1. P. 1–11. URL: nepjol.info/index.php/JIE/article/view/14689.
4. gonepal.ru/karta_nepala/fizicheskaya-karta-nepala.html.
5. ru.wikipedia.org/wiki/Джомолунгма.
6. ru.wikipedia.org/wiki/Непал.
7. [ru.wikipedia.org/wiki/Палпа_\(район\)](http://ru.wikipedia.org/wiki/Палпа_(район))
8. ru.wikipedia.org/wiki/Тераи.
9. sergedolya.livejournal.com/1296732.html.

Заглавное фото: yandex.ru/video/preview/?text=Непал%20допора&path=wizard&parent-reqid=1645043662699474-7107849010979399828-vla1-0726-vla-l7-balancer-8080-BAL-4764&wiz_type=v4thumbs&filmId=9108198792595642016.

Список литературы, использованной авторами статьи [3]

- Agliardi F., Crosta G.B. Supporting rockfall countermeasure design in difficult conditions // *Landslide Science for a Safer Geoenvironment*. Vol. 3. Targeted Landslides. Switzerland: Springer International Publishing, 2014. P. 71–76.
- Chen G., Zheng L., Zhang Y., Wu J. Numerical simulation in rockfall analysis: a close comparison of 2-D and 3-D DDA // *Rock Mech Rock Eng.* 2013. Vol. 46. № 3. DOI: 10.1007/s00603-012-0360-9.
- Crosta G.B., Agliardi F. Parametric evaluation of 3D dispersion of rockfall trajectories // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2004. Vol. 4, P. 589–598.
- Dahal R.K. Report submitted by Trumer Schutzbauten, Austria basen in Nepal through Himalaya Conservation Group to DRO. DOR Palpa. 2014.
- Dhakal S. Report submitted by GHEaSES Intl. and BEAM Consult. to DRO. DOR Palpa. 2012.
- Dorren L., Domaas U., Kronholm K., Labiouse V. Methods for predicting rockfall trajectories and run-out zones // S. Lambert, F. Nicot. *Rockfall Engineering*. London, UK: ISTE Ltd., 2011. P. 143–168.
- Dorren L.K. A review of rockfall mechanics and modelling approaches // *Progress in Physical Geography*. 2003. Vol. I. № 27. P. 69–87.
- Ekantipur.com. 2015. August 8. URL: ekantipur.com/2015/08/08/top-story/bus-swept-away-by-landslide-3-killed/409128.html.
- Frattoni P., Crosta G.B., Agliardi F. Rockfall characterization and modeling // J.J. Clague, D. Stead (eds.). *Landslides – Types, Mechanisms and Modeling*. New York: Cambridge University Press, 2012. P. 267–281.
- Geobruigg. 2010. URL: geobruigg.com/en.
- Gnyawali K.R. Document posted on personal blog. *Rockslope Protection works: rockfall catch fence and anchored rock mesh protection system*. 2014. URL: kaushalrajgnyawali.blogspot.com/.
- Hoek E. Analysis of rockfall hazards // *Practical Rock Engineering*. 2000. URL: rocscience.com/hoek/corner/9_Analysis_of_rockfall_hazards.pdf.
- Hoek E., Bray J. *Rock Slope Engineering* (4th ed.). New York: Spon Press, 2005.
- Hunger O., Leroueil S., Picarelli L. The Varnes classification of landslide types, an update // *Landslides*. 2014. Vol. 11. P. 167–194.
- Kharel P., Dhakal S. Hazard rating and event tree analysis for assessing rockfall risks along Siddhartha Highway in Siddhababa Area, Nepal // *International Journal of landslide and Environment (IJLE)*. 2013. Vol. I. № 1. P. 41–42.
- Lambert S., Bourrier F., Toe D. Improving three-dimensional rockfall trajectory simulation codes for assessing the efficiency of protective embankments // *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2013. Vol. 60. P. 26–36.
- Luckman B.H. Processes, transport, deposition, and landforms: rockfall // J. Shroder (ed.). *Treatise on Geomorphology* (14 ed.). 2013. Vol. 1. P. 174–182.
- Moon T., Oh J., Mun B. Practical design of rockfall catch fence at urban area from a numerical analysis approach // *Engineering Geology*. 2014. Vol. 172. P. 41–56.
- Onlinekhabar.com. 2015. June 17. URL: onlinekhabar.com/2015/06/289457/.
- Ritchie A. The evaluation of rockfall and its control // *Highway Research Record*. Washington DC: National Academy of Sciences-National Research Council, 1963.

Rocfall-Rocscience Inc., URL: rocscience.com/rocscience/products/rocfall.

Thapa A.B. Rock slide hazard mapping along Siddhartha Highway (Chidiya Khola – Dovan road section) with GIS application: MSc Dissertation. Nepal: Institute of Engineering, Pulchowk/Central Campus, Civil Engineering, 2011.

Trumer Schutzbauten. 2014. URL: trumer.cl/.

Varnes D. Slope movement types and processes. Washington DC: Transportation Research Board, National Research Council, 1978.

Vogel T. Rock fall protection as an integral task. Vol. 3. Zurich, Switzerland: Structural Engineering International, 2009. URL: iabse.org.

Volkwein A. et al. Rockfall characterization and structural protection – a review // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2011. Vol. 11. P. 2617–2651.

Wyllie D.C. Calibration of rock fall modelling parameters // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2014. Vol. 67. P. 170–180.

Wyllie D.C. Rockfall Engineering: development and calibration of an improved model for analysis of rockfalls in highways and railways: PhD thesis. Vancouver: University of British Columbia, 2014.

Wyllie D.C. Rockfall Engineering. CRC Press, Taylor and Francis Group, 2014.

Wyllie D.C., Mah C.W. Stabilization of rock slopes // Rock Slope Engineering. 2005. P. 310–319.

Zhang L., Yang Z., Xu B. Rockfalls and rockfall hazards // Journal of Engineering Geology. 2004. Vol. 12. № 3. P. 225–231.