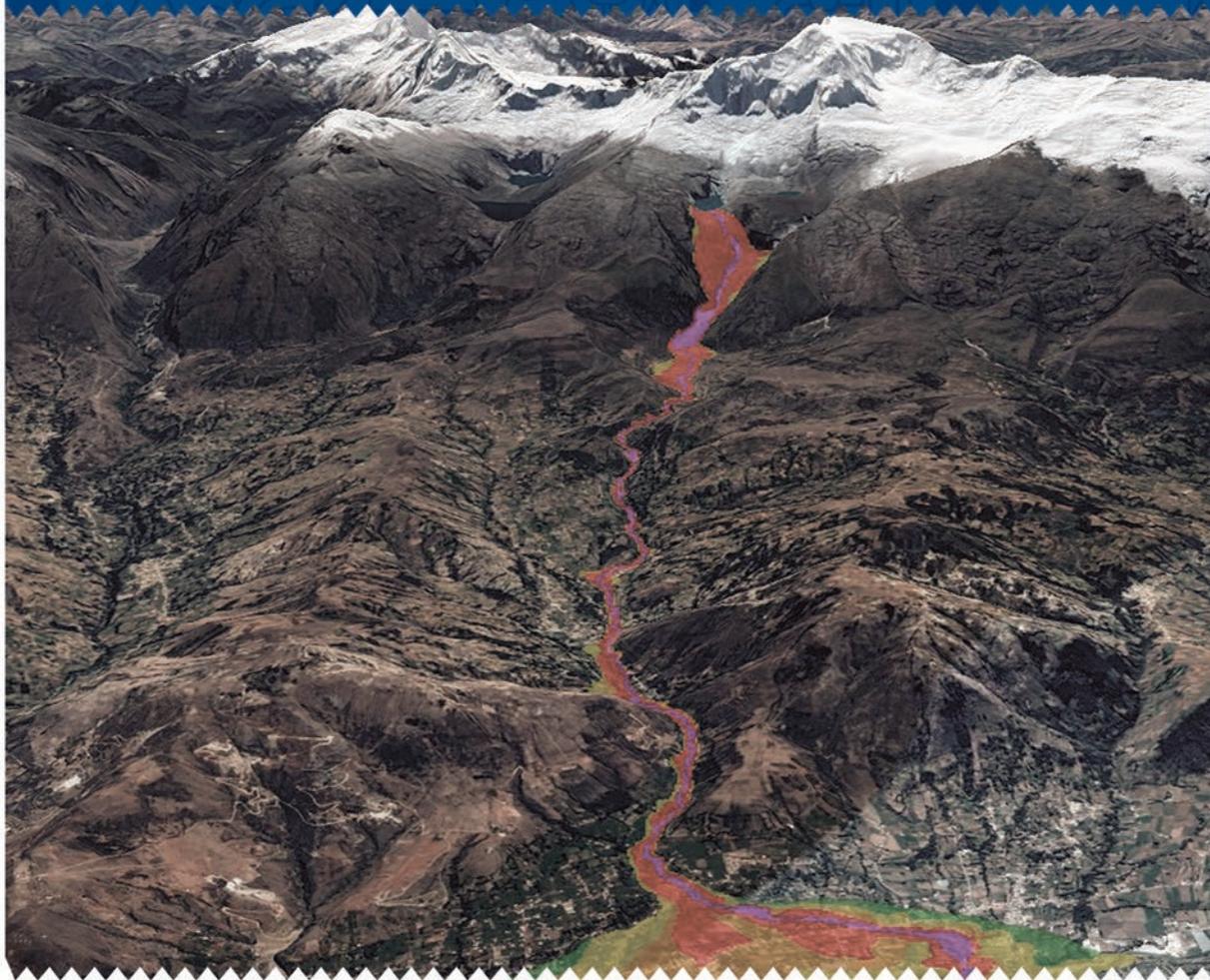


# Оценка опасных явлений, связанных с ледниками и мерзлотой, в горных районах

ТЕХНИЧЕСКИЙ РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Швейцарская Конфедерация  
Швейцарское агентство по  
развитию и сотрудничеству SDC

Федеральный департамент  
экономики, образования и научных  
исследований EAER

Государственный секретариат по  
экономическим вопросам SECO



PROYECTO  
**GLACIÈRES+**  
Más allá de los riesgos hacia  
las oportunidades



University of  
Zurich



## GARHAZ

Постоянная научная группа Международной  
ассоциации криосферных наук (IACS) и  
Международной ассоциации по  
мерзотоведению (IPA)



IUGG



IACS

International Association  
of Cryospheric Sciences



WORLD BANK GROUP



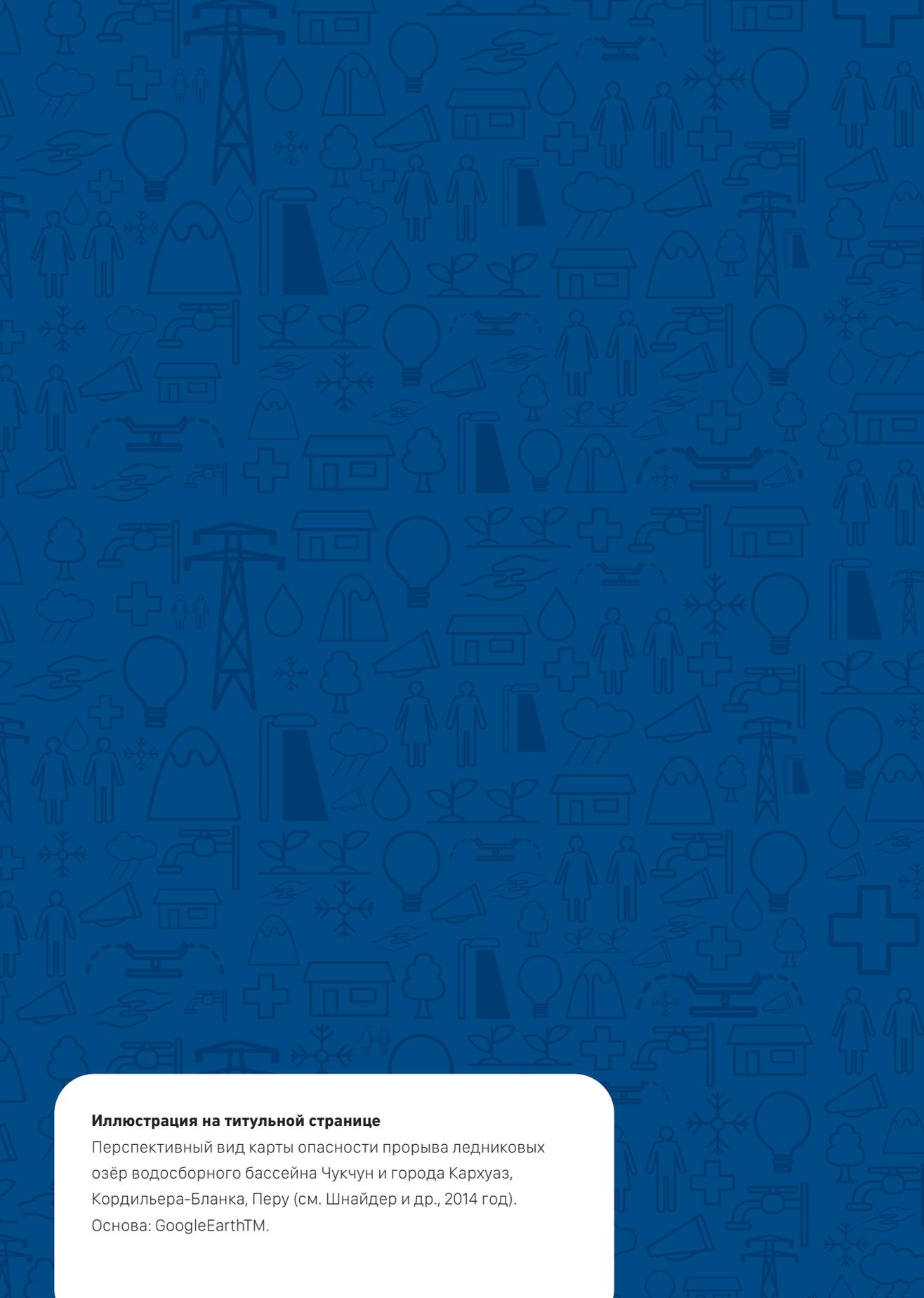
EUROPEAN UNION



UKaid



GFDRR



**Иллюстрация на титульной странице**

Перспективный вид карты опасности прорыва ледниковых озёр водосборного бассейна Чукчун и города Кархуаз, Кордильера-Бланка, Перу (см. Шнайдер и др., 2014 год).  
Основа: GoogleEarth™.

# Оценка опасных явлений, связанных с ледниками и мерзлотой, в горных районах

ТЕХНИЧЕСКИЙ РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

## ВАЖНЫЙ КОММЕНТАРИЙ

В настоящем документе представлены результаты работы, проделанной профессиональными учёными, сотрудничающими с Постоянной группой по вопросам ледников и многолетней мерзлоты (GAPHAZ) Международной ассоциации криосферных наук (IACS) и Международной ассоциации по мерзлотоведению (IPA). Авторы и учреждения, которые они представляют, не дают никаких прямых или косвенных гарантий относительно дальнейшего использования настоящего документа, а также ни при каких обстоятельствах не несут ответственности за какой-либо прямой, косвенный, целенаправленный, случайный или побочный ущерб в случае предъявления претензий со стороны пользователей настоящего документа.

Эта публикация была подготовлена при финансовой поддержке Европейского союза. Ее содержание является исключительной ответственностью IACS/IPA GAPHAZ и не обязательно отражает точку зрения Европейского союза.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Настоящий документ был подготовлен в рамках Проекта «Glaciares+», который поддерживается и финансируется Швейцарским агентством по развитию и сотрудничеству (SDC/COSUDE). Перевод настоящего документа на русский язык был выполнен при финансовой поддержке со стороны Глобального фонда по уменьшению опасности бедствий и восстановлению (GFDRR).

Разработка русскоязычной версии этого документа была подготовлена в рамках водно-энергетической программы для Центральной Азии (CAWEP), которая является партнерством Всемирного банка, Европейского союза, Швейцарии и Великобритании, а также Глобального фонда по снижению риска бедствий (GFDRR).

## ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

GAPHAZ 2017: Оценка опасных явлений, связанных с ледниками и мерзлотой, в горных районах – Технический руководящий документ. Подготовлен: Аллен, С., Фрей, Х., Хуггель, К. и др. Постоянная группа по вопросам ледников и многолетней мерзлоты (GAPHAZ) Международной ассоциации криосферных наук (IACS) и Международной ассоциации по мерзлотоведению (IPA). Цюрих, Швейцария/Лима, Перу, 72 стр.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Ведущие авторы

**Аллен, С.К.** Окружающая среда и климат: влияние, риски и адаптация (Eclim), Кафедра географии Цюрихского университета, Швейцария.

**Фрей, Х.** Окружающая среда и климат: влияние, риски и адаптация (Eclim), Кафедра географии Цюрихского университета, Швейцария.

**Хуггель, С.** Окружающая среда и климат: влияние, риски и адаптация (Eclim), Кафедра географии Цюрихского университета, Швейцария

### Соавторы

**Брюндль, М.** WSL Институт исследований снега и лавин SLF, Давос Дорф, Швейцария.

**Гиртсема, М.** Министерство лесов, земель и природных ресурсов, Принц-Джордж, Британская Колумбия, Канада.

**Делин, П.** Лаборатория EDYTEM – Окружающая среда, динамика и горные территории, Университет Савуи Монблан, Ле Бурже-дю-Лак, Франция.

**Джигардино, М.** GeoSitLab, Кафедра землеведения, Туринский университет, Италия.

**Каргель, Дж.** Кафедра гидрологии и атмосферных наук, Аризонский Университет, Тусон Аризона, США.

**Кееб, А.** Кафедра геофизических исследований, Университет Осло, Норвегия.

**Киарле, М.** Национальный исследовательский совет (CNR), Научно-исследовательский институт гидрогеологической защиты (IRPI), Второй офис в Турине, Италия.

**Климес, Дж.** Институт строения и механики горных пород, Чешская академия наук, Прага, Чехия.

**Клэйг, Дж.Дж.** Кафедра землеведения, Университет Саймона Фрейзера, Бернаби, Британская Колумбия, Канада.

**Кочачин, А.** Группа по гляциологии и водным ресурсам (UGRH), Национальное водное управление (АНА), Хуарас, Перу.

**Краутблаттер, М.** Мюнхенский технический университет, Германия.

**Кук, С.** География, Школа социальных наук, Университет Данди, Шотландия, Великобритания.

**МакАарделл, Б.** Швейцарский федеральный научно-исследовательский институт WSL, Бирменсдорф, Швейцария

**Мергили, М.** Институт прикладной геологии, Университет природных ресурсов и науки о жизни (BOKU), Вена, Австрия.

**Петраков, Д.,** Географический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия.

**Портокарреро, С.** Независимый консультант, Хуарас, Перу.

**Рейнолдс, Дж.** Рейнолдс Интернешнл Лтд, Молд, Великобритания.

**Хэбери, В.** Кафедра географии Цюрихского университета, Швейцария.

**Шнайдер, Д.** Инженерное бюро кантона Берн, Швейцария.

### Перевод на русский язык

**Сократов, С.** Географический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

**Гафуров, А.** Центр Исследования Земли (GFZ Potsdam), Потсдам, Германия

**Калашникова, О.** Центральнo-Азиатский Институт прикладных Исследований Земли (ЦАИИЗ)

**Ниязов, Ж.** Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии, Душанбе, Таджикистан

**Дизайн и верстка:** Герберт Сальватьера Бётгер

**Верстка русской версии:** Владимир Мирзоев

# СОДЕРЖАНИЕ

## ВВЕДЕНИЕ 6–9

- 1. СФЕРА ПРИМЕНЕНИЯ И ЦЕЛИ ДОКУМЕНТА**
- 2. ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА И ЭВОЛЮЦИЯ ГОРНЫХ ЛАНДШАФТОВ**
- 3. КЛЮЧЕВЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ**
- 4. СТРУКТУРА ДОКУМЕНТА**

## I. ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ИХ ВЗАИМОСВЯЗИ 10–24

### **1. КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ ОБВАЛЫ**

- 1.1 Каменные лавины
- 1.2 Ледяные лавины и другие проявления неустойчивости ледников
- 1.3 Прорывы ледниковых озер
- 1.4 Селевые потоки
- 1.5 Процессы, вызванные взаимодействием вулканизма и оледенения
- 1.6 Другие значимые ПРОЦЕССЫ

### **2. ВЗАИМОСВЯЗИ И ДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ**

- 2.1 Пространственные и временные масштабы процессов и опасных явлений
- 2.2 Комплексные процессы и синергетические эффекты

## II. ОЦЕНКА ОПАСНОСТЕЙ 28–59

### **1. ОБЩАЯ СХЕМА И ОСНОВОПОЛАГАЮЩИЕ КОНЦЕПЦИИ**

- 1.1 Общая схема оценки
- 1.2 Роль исторических данных по опасным природным явлениям
- 1.3 Оценка базовых климатических условий

### **2. ОЦЕНКА УЯЗВИМОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ**

- 2.1 Каменные лавины
- 2.2 Ледяные лавины и другие проявления неустойчивости склонов
- 2.3 Прорывы ледниковых озер
- 2.4 Селевые потоки
- 2.5 Локальные угрозы мерзлотного происхождения

### **3. ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ**

- 3.1 Предварительная оценка опасности
- 3.2 Построение сценария
- 3.3 Моделирование интенсивности опасного явления и классификация
- 3.4 Комплексные процессы и синергетические эффекты

## ПРИЛОЖЕНИЯ 60–72

- 1. ТАБЛИЦЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОДВЕРЖЕННОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ**
- 2. ПЕРЕЧЕНЬ ИНСТРУМЕНТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОПАСНОСТИ**
- 3. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ И ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

# ВВЕДЕНИЕ

Опасные явления, связанные с ледниками и многолетней мерзлотой, существуют в большинстве горных регионов земного шара, угрожая жизни людей, средствам к их существованию и устойчивому развитию в рамках некоторых наиболее уязвимых общин в мире. В связи с быстро происходящим глобальным потеплением и связанными с этим изменениями в уязвимой горной криосфере, происходит эволюция ландшафтов и как следствие возникают новые угрозы. Вкупе с продолжающимся продвижением людей и инфраструктуры в высокогорные долины возрастает вероятность социального ущерба и бедствий, влекущих серьёзные последствия. Признавая необходимость следовать структурированному и комплексному подходу при оценке опасных явлений, подкреплённому результатами новейших научных изысканий, Совместная Постоянная группа по вопросам ледников и многолетней мерзлоты (GAPHAZ) Международной ассоциации криосферных наук (IACS) и Международной ассоциации по мерзлотоведению (IPA) подготовила представляемый технический руководящий документ в качестве информационного ресурса для международных и национальных учреждений, ответственных органов и частных компаний. Проведённая работа получила значительную поддержку со стороны Швейцарского агентства по развитию и сотрудничеству (SDC) в рамках реализации Проекта «Glaciarest+».

## 1. СФЕРА ПРИМЕНЕНИЯ И ЦЕЛИ ДОКУМЕНТА

В контексте потепления и эволюции горного ландшафта, настоящий технический руководящий документ посвящён опасным явлениям, которые непосредственно исходят или вызваны происходящими изменениями горных ледников и многолетней мерзлоты. Акцент делается на катастрофические процессы, связанные с обвалами, переносящими вещество на большие расстояния вниз по руслу или по склону, потенциально способные приводить к каскадным процессам и воздействиям. Это включает в себя ледяные лавины и другие типы ледниковой нестабильности, каменные или каменно-ледяные лавины, пара- или перигляциальные селевые потоки и прорывы ледниковых озёр. Кроме того, рассматриваются опасные явления, связанные с ледниками и многолетней мерзлотой, предоставляющие угрозы локального и местного характера, такие как просадка грунта и нарушение стабильности на глубине. Представленный анализ опасных явлений, характерных для горной окружающей среды, не является исчерпывающим, хотя включает в себя обсуждение потенциальной взаимосвязи с такими явлениями, как снежные лавины и речные паводки.

Настоящим ожидается, что пользователи данного технического руководящего документа, предназначенного для практиков и экспертов, работающих в соответствующих учреждениях, будут обладать необходимыми знаниями и экспертным опытом в области проведения оценки опасных явлений. В связи с этим, данный документ не предназначен для обеспечения базового пошагового нормативного руководства. Напротив, в непосредственном соответствии с одной из заявленных задач Постоянной группы «GAPHAZ», общая цель настоящего документа заключается в том, чтобы представить краткий перечень информации об уровне имеющихся научных знаний и передовой практике, связанной с проведением оценки опасных явлений, связанных с ледниками и мерзлотой.

В международном плане, уровень и разработка руководств или стандартов в отношении проведения оценок опасных явлений сильно разнятся от страны к стране. Хотя в данном документе собраны примеры лучшего опыта по разработке и применению надёжных методов, он не всегда может полностью соответствовать существующей национальной или региональной практике. Поэтому рекомендуется осуществлять координацию с ответственными органами и соответствующими заинтересованными сторонами.

При оценке факторов, которые могут обуславливать или вызывать опасные процессы, связанные с ледниками и многолетней мерзлотой, мы фокусируемся на взаимосвязанных между собой атмосферных, криосферных, геологических, геоморфологических и гидрологических процессах. В качестве исходных данных для картирования опасных явлений и осуществления надлежащего планирования уделяется внимание обуславливающим и провоцирующим их факторам, прежде всего, для того, чтобы определить где событие может ожидаться, а также соответствующая вероятность такого события. Более точное определение того, когда такое событие может произойти (т. е. прогнозирование и раннее оповещение) выходит за рамки настоящего документа. Роль антропогенных факторов, таких как инженерные работы, которые могут непосредственно повлиять, например, на устойчивость склонов или естественных плотин, или на объём озера, также в документе не рассматриваются, но эти аспекты должны быть неотъемлемой частью любой проводимой оценки опасного явления там, где воздействие человека на природную среду очевидно. Кроме того, в документе не рассматриваются другие элементы риска, такие как подверженность и уязвимость людей и их имущества.

## **2. ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА И ЭВОЛЮЦИЯ ГОРНЫХ ЛАНДШАФТОВ**

На сегодняшний день главным вызовом, связанным с упреждением и оценкой опасных явлений в высокогорных регионах с наличием оледенение, является фундаментальное изменение парадигмы, производимое последствиями продолжающегося глобального потепления. Исчезновение ледников, деградация многолетней мерзлоты, эволюция ландшафта и соответствующие изменения во взаимосвязанных поверхностных процессах представляют собой совокупные явления. Все они выходит далеко за рамки исторических прецедентов. Будущие условия во многих местах будут существенным образом отличаться от ситуации в прошлом и настоящем и, следовательно, ограничат значимость исторических данных. Поэтому должны применяться количественные, ориентированные на будущее и основанные на соответствующих сценариях системные подходы (Аллен и др., 2016 год; Шауб и др., 2013 год). Впрочем, моделирование будущих высокогорных ландшафтов с их комплексными системами взаимодействующих поверхностных процессов и форм рельефа — это молодая, развивающаяся область исследований, и погрешности здесь высоки по своей природе. Отдельные компоненты в рамках комплексной системы имеют резко отличающиеся характеристики относительно их реагирования на изменение климата. Отступление ледников не только происходит быстрыми темпами, но и ускоряется в большинстве регионов мира (Ваган и др., 2013 год; Земп и др., 2015 год). Для сравнения, если не будет происходить дальнейшего развития термических процессов, то, по причине медленного рассеивания тепла и замедляющихся эффектов от скрытого теплообмена в подповерхностном льду, деградация многолетней мерзлоты будет происходить медленными темпами, но при этом оказывать соответствующее воздействие в долгосрочной перспективе. Многие горные хребты, расположенные в средних широтах,

могут в значительной степени утратить свои ледники в течение десятилетий (Хасс и Хок, 2015 год; Земп и др., 2006 год). Соответствующие ледниковые ландшафты превратятся в перигляциальные ландшафты, характеризующиеся медленно деградирующей многолетней мерзлотой, многочисленными новыми озёрами и выраженными условиями нарушения природного равновесия, касающимися растительного покрова, устойчивости склонов и осадочных отложений. Ввиду большой неопределённости, связанной с ожиданием таких условий, требуется проводить целенаправленный мониторинг с использованием передовых космических, воздушных и наземных технологий в сочетании с регулярной переоценкой общих условий и быстро меняющихся ситуаций с опасными явлениями. Формирование новых озёр всё ближе к крутым горным хребтам с понижающейся устойчивостью может значительно повысить региональные риски от далеко распространяющихся паводковых волн (Хэберли и др., 2016 год). Соответствующее управление опасными явлениями и рисками, связанными с событиями малой вероятности но экстремальным разрушительным потенциалом, особенно затруднено при планировании, выработки политики и принятия решений. Более того, должно приниматься во внимание ожидаемое проникновение людей с их инфраструктурой для туризма, транспорта, гидроэнергетики, и т. д., в ранее недоступные или даже прежде избегаемые высокогорные регионы. Поэтому долгосрочная перспектива в оценке опасных явлений и рисков в высокогорных ландшафтах требует интенсивного междисциплинарного взаимодействия и сотрудничества.

### 3. КЛЮЧЕВЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Опасное явление (опасность) определяется здесь как потенциальное возникновение природного процесса или явления, которое может повлечь гибель людей, увечья или другой вред здоровью, ущерб имуществу, потерю средств к существованию и услуг, социальные и экономические потрясения или вред окружающей среде. Данное определение перекликается с соответствующими аспектами, касающимися адаптации к климатическим изменениям (МГЭИК, 2014 год), и сообществами по уменьшению риска бедствий (МСУОБ ООН, 2009 год). В настоящем отчёте мы рассматриваем только те опасные явления, которые непосредственно обусловлены или вызваны текущими изменениями в горных ледниках и многолетней мерзлоте.

С технической точки зрения, опасное явление рассматривается как совокупность вероятностей возникновения какого-либо явления и ожидаемая интенсивность (магнитуда) такого явления:

**Опасное явление =  $f$  (вероятность, интенсивность)**

Понятие «интенсивность» определяется в данном случае использованием специфической для рассматриваемого процесса физической величины (см. также воздействие), тогда как понятие «магнитуда» может применяться в более широком смысле в соответствующем диапазоне масштабов.

Понятие «подверженность» является относительной мерой возможности (или вероятности) того, что опасное явление произойдёт или возникнет на определённом участке, исходя из внутренних свойств и динамических характеристик данного участка. Понятие «подверженности» имеет давнюю историю в плане проведения оценки оползневой опасности, и результаты часто представляются в виде карт подверженности (Хайлэнд и Бобровский, 2008 год). Подверженность имеет обратную взаимосвязь с устойчивостью, т. е. неустойчивая озёрная плотина может

указывать на то, что данное ледниковое озеро значительно подвержено прорывному паводку. Понятие «воздействие» используется в настоящем руководящем документе в качестве общего термина для обозначения потенциальной физической угрозы, исходящей от опасного природного явления. В рамках данного компонента оценки опасности определяется потенциальная площадь зоны воздействия и предоставляется информация об интенсивности ожидаемого события в терминологии, например, высоты затопления, скорости и т. д., тем самым обеспечивая основу для картирования опасного явления.

«Сценарий» в контексте оценки опасности явлений, связанных с ледниками и мерзлотой, описывает потенциальное событие определённой магнитуды наряду с соответствующей оценённой вероятностью его возникновения. При рассмотрении нескольких возможных сценариев оценки опасности (как правило, малой, средней и значительной), результат может включать в себя диапазон последствий и имеющуюся неопределённость. Сценарии оценки опасности соответствуют современным условиям, но могут также включать в себя будущие условия в контексте изменения климата.

Следует отметить, что в контексте изменения климата термин «сценарий» относится к различным будущим последствиям, таким как сценарии выбросов парниковых газов, в рамках которых предпринимаются попытки выявить различные пути смягчения последствий изменения климата и затем это все переводится в различные сценарии, касающиеся потепления в атмосфере (Мосс и др., 2010 год). Соответствующие временные горизонты — это, как правило, десятилетия до конца 21 века. При этом важно отметить разницу между сценариями изменения климата и сценариями, применяемыми при оценке опасных явлений (как описано выше). Для некоторых процессов сценарии изменения климата могут напрямую включаться в разработку сценариев оценки опасных явлений, но в других случаях связи с изменением климата не так хорошо установлены. Предмет данного документа находится на границе сообществ, изучающих изменения климата и опасные явления. Поэтому рекомендуется уточнять и указывать тип сценария и временной диапазон, которые применяются при проведении какого-либо исследования, а также чётко доносить эту информацию до сведения заинтересованных сторон и других участников исследований.

#### **4. СТРУКТУРА ДОКУМЕНТА**

После введения, представленного в Части I руководящего документа, обзор основных процессов и их взаимодействия будет представлен в Части II. Цель данного обзора заключается в том, чтобы представить читателю новейшие современные знания, которые необходимы для проведения последующей оценки опасных явлений, представленной в части III. После ознакомления с концептуальной структурой оценки опасных явлений, читатель затем систематически информируется об основных компонентах оценки опасности. Ключевые факторы, которые следует учитывать при проведении оценке подверженности, изложены в серии контрольных таблиц, предоставляющих собой ценный ресурс для практикующих специалистов (Приложение 1). На протяжении всего текста руководящего документа делаются ссылки на исследования на ключевых участках и примеры, взятые из международной литературы. Наконец, дополнительные технические детали о доступных инструментах моделирования для проведения оценки опасных явлений, приведены в Приложении 2 с полным списком использованной в документе литературы в Приложении 3.

# I. ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ИХ ВЗАИМОСВЯЗИ



**Иллюстрация 1:** Огромная каменная лавина (~12 x 106 м3) сошла с восточной стороны горы Аораки/гора Кука 14 декабря 1991 года. Обвал уменьшил высота самой высокой горы Новой Зеландии примерно на 30 м (Фото: Ян Оуэнс, 16 декабря 1991 года).

В этой части документа мы представляем краткое изложение новейших научных знаний, касающихся ключевых процессов, связанных с опасными явлениями, происходящих в областях распространения ледников и многолетней мерзлоты. Цель состоит не в том, чтобы представить всесторонний обзор, а в том, чтобы вооружить читателя достаточным пониманием физики, наполняющей любую последующую оценку опасного явления. Это включает в себя описание разномасштабных катастрофических потоков вещества, которые могут возникать в условиях высокогорья, лежащих в основе необходимых условий и спусковых механизмов, их вызывающих. Затем мы исследуем пространственные и временные характеристики процессов, подчёркивая возможные взаимодействия между ними, способные усугубить потенциал опасного явления.

## 1. КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ ОБВАЛЫ

Термин «катастрофические обвалы» охватывает различные опасные геоморфологические процессы, происходящие в высокогорье, в основном состоящие из движения массы снега,

льда, воды, горных пород и их обломков вниз по склону или по руслу. Тогда как ключевые типы процессов выделены в описании ниже, необходимо отметить, что ключевой характеристикой катастрофических обвалов, происходят в высокогорных ландшафтах, является частое взаимодействие и трансформация, происходящая между процессами, по мере включения или отложения на пути своего движения, и по мере таяния снега или льда (см. также раздел 2.2).

### **1.1. КАМЕННЫЕ ЛАВИНЫ**

Каменные лавины представляют собой разрывы склона по коренной породе включающие в себя похожее на поток движение фрагментированного исходного материала, источником которого являются неповреждённые массы горных пород, вниз по склону на большой скорости (Хунгр и др., 2001 год). Таким образом существует ясное отличие от камнепадов, которые включают в себя менее масштабное перемещение рыхлой коренной породы, хотя терминология зачастую используется в литературе взаимозаменяемо, и камнепады могут усиливать неустойчивость гораздо большей массы горных пород. Каменные лавины регистрируются во всех горных регионах и являются основным источником денудации в высокогорных районах из-за топографии склонов, расчленения рельефа, нестабильных геологических структур и сейсмичности, которые в свою очередь взаимосвязаны с кратковременными определяемыми климатом гляциальными, пара- и перигляциальными процессами (Эванс и Делани, 2015 год). Результирующие воздействия и социальные последствия могут простираются на бошьшие расстояния, поскольку мобильность высокогорных каменных лавин увеличивается вследствие слабого трения и включения дополнительного материала при движении потока по покрытой снежным покровом и льдом местности (Делайн, 2008 год; Эванс и др., 2009 год; Эванс и Клэйг, 1988 год; Шнайдер и др., 2011 год).

Геотехнические факторы (литология и структура) определяют общую способность склона к противодействию действующему на него напряжению и, следовательно, также отвечают за геометрию, которую склон способен сохранять. Эти факторы преимущественно статичны или изменяются медленно в масштабе геологического времени. Поэтому они считаются главными факторами, определяющими природную прочность склона. Первичное разрушение горных массивов систематизируется в соответствии с тремя механизмами, требующими неблагоприятной конфигурации трещин и пластов (Хук и Брэй, 1981 год). Плоскостное оползание происходит в случае, когда плоскость разрыва выходит на поверхность горной породы (так называемую «дневную поверхность»), при угле её заложения больше, чем угол внутреннего трения горной породы. Клинообразные разрушения образуется, когда два разрыва пересекаются с образованием клина, в котором угол поверхности скалы превышает угол потенциальной поверхности скольжения. Более сложно происходит опрокидывание, включающее в себя вращение глыб или колонн глыб относительно зафиксированного основания. В общем, трещины ослабляют горную породу, служа не только потенциальными плоскостями соскальзывания, но и являясь каналами для потоков воды и проводниками теплового переноса, открывая большую поверхность для погодного выветривания. Поэтому, крупные каменные лавины часто образовывались из сильно-раздробленного и разбухшего исходного материала (см., например, Кокс и др., 2015 год; Делайн и др., 2011 год; Мак-Сэвени, 2002 год). Определённые литологические элементы могут по своей природе быть привязаны к преобладающим механизмам и масштабам разрушений, и архивы исторических данных по каменным лавинам позволили выявить преобладающее группирование событий там, где



**Иллюстрация 2:** Каменная лавина и сопровождающие её селевые потоки в Пиццо Ченгало в долине Бондаска и в Бондо, южные Швейцарские Альпы. А: вид зоны разрушения каменного склона после обвала объёмом около 3 млн куб. м, сошедшего 23 августа 2017 г. В 2011 году, каменная лавина объёмом около 1,5 млн куб. м сошла в том же месте зимой (27 декабря). Сразу после 23 августа 2017 года, селевые потоки сформировались из основания разрыва каменного склона и вовлекли в себя значительный объём материала выноса каменной лавины (В), произведя значительное воздействие нацц общину Бондо ниже по течению (С) (фото: «Swisstopo», VBS, SDA).

имеются крупномасштабные структурные разрывы, в частности, вдоль литологических границ и зон разломов, обязанным в этом изменению технических свойств пород (см., например, Эллен и др., 2011 год; Фишер и др., 2012 год). Эти же исследования показали, что каменные лавины преимущественно сходили с очень крутых склонов ( $40^{\circ}$ – $60^{\circ}$ ).

Хотя влияние пара- и перигляциальных факторов на устойчивость коренных пород многосторонне, проявляясь в диапазоне пространственных и временных масштабов, имеется, тем не менее, убедительное практическое свидетельство, указывающее на современное повышение неустойчивости склонов в результате дегляциации и возрастание нестабильности внутри зон тёплой или краевой мерзлоты (Делайн и др., 2015 год). Крупные склоны были эродированы в своих нижних частях в результате ледникового или флювиального воздействия в гляциальных или ранее гляциальных условиях. Последующее отступление ледникового льда ведёт к эффекту потери опоры, когда поддержка, которую представлял собой лёд, удалена (Бэллантайн, 2002

год). Как следствие такой разгрузки происходит разрушение, высвобождающее напряжение в коренных породах, формируя новые плоскости разрушений (МакКолл, 2012 год). Недоступные ранее поверхности обнажаются и подвергаются воздействию изменения гидрологических и гидравлических изменений, а также изменённым режимам механической и температурной эрозии (Хэберли и др., 1997 год; Вегманн и др., 1998). Так, выветривание за счёт таяния-промерзания способно расширить ранее имевшуюся трещиноватость породы и ослабить её (Мацуока, Мэртон, 2008 год). Связи между атмосферным потеплением, деградацией мерзлоты и неустойчивостью склонов были установлены на основе понимания физики этих процессов (Грубер и Хэберли, 2007 год) и их подтверждением полевыми исследованиями, в том числе визуальным установлением наличия льда в зонах отрыва недавних каменных лавин (Драмис и др., 1995 год; Хэберли и др., 2004 год), преобладающих отрывов на территориях краевой или «тёплой» мерзлоты (Эллен и др., 2011 год; Боттино и др., 2002 год; Нётцли и др., 2003 год), и регистрации таких событий в периоды необычно тёплой погоды (Эллен и Хуггель, 2013 год; Коу и др., 2017 год; Грубер и др., 2004 год; Паранунцо и др., 2016 год; Рэванел и др., 2010 год).

Лабораторные исследования совместно с такими свидетельствами также прояснили реакцию механических свойств породы и льда на потепление, указывая на понижение предела прочности на сдвиг как в смёрзшихся, так и в свободных ото льда трещин при температурах, близких к 0° (Дэйвис и др., 2001 год; Краутблаттер и др., 2013 год).

Спусковые механизмы каменных лавин в высокогорье редко устанавливались с какой-либо уверенностью из-за отдалённости областей зарождения лавин и недостатка надёжных данных по многим регионам. Многие из крупнейших горных хребтов формируются на активных тектонических границах, где распространены каменные лавины, вызываемые землетрясениями (см., например, Хьюитт и др., 2008 год; Кифер, 1994 год; Сюй и др., 2016 год). Интенсивные осадки являются хорошо установленным спусковым механизмом оползней со склонов на равнинных территориях, что было увязано с некоторыми высокогорными каменными лавинами (Хэнкок и Томсон, 2013 год; Паранунцо и др., 2016 год). В частности в европейских Альпах, где наблюдается одно из самых быстрых на протяжении последней сотни лет потепление атмосферы, многим современным сходам каменных лавин предшествовали периоды экстремально высокой температуры продолжительностью от дней до недель (Эллен и Хуггель, 2013 год; Паранунцо и др., 2016 год). Эти события обычно относятся к малым или средним по размерам каменным лавинам, которые могут быть связаны с быстрым протаиванием мерзлых пород, увеличением толщины деятельного слоя или быстро возраставшим напором поровых и трещинных вод при таянии снега и льда. Важно, однако, заметить, что многие крупные каменные лавины сходили спонтанно, при отсутствии очевидных погодных или сейсмических спусковых механизмов, когда прогрессирующая потеря прочности горной породы под воздействием долговременных усталостных нагрузок и различных других вызывающих это процессов достигали своего внутреннего предела (см., например, Эберхардт и др., 2004 год; Хэнкок и др., 1999 год; Мак-Сэвени, 2002 год).

## **1.2 ЛЕДЯНЫЕ ЛАВИНЫ И ДРУГИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ЛЕДНИКОВ**

Ледяные лавины возникают, как правило, при отрыве льда а) от крутого переднего края ледника (так называемые обвалы) либо б) с наклонного ложа ледника (так называемое соскальзывание) (Элин, 1985 год). Вероятность катастрофического схода ледяной лавины и его масштаб

определяются рядом общих факторов. Они включают в себя сопротивление сдвиговым усилиям в придонных слоях льда (определяется температурными и гидрологическими условиями), уклон и форма ложа ледника и предел прочности тела самого ледника (Эванс и Дэлани, 2015 год). В целом, для неустойчивости, приводящей к соскальзыванию на ледниках холодного типа, требуется более крутая поверхность соскальзывания (как условие для ложа небольшого и крутого ледника), чем для политермических или тёплых ледников. Случаи обвалов, с другой стороны, скорее связаны с резким увеличением крутизны или обрывом в топографии ложа.

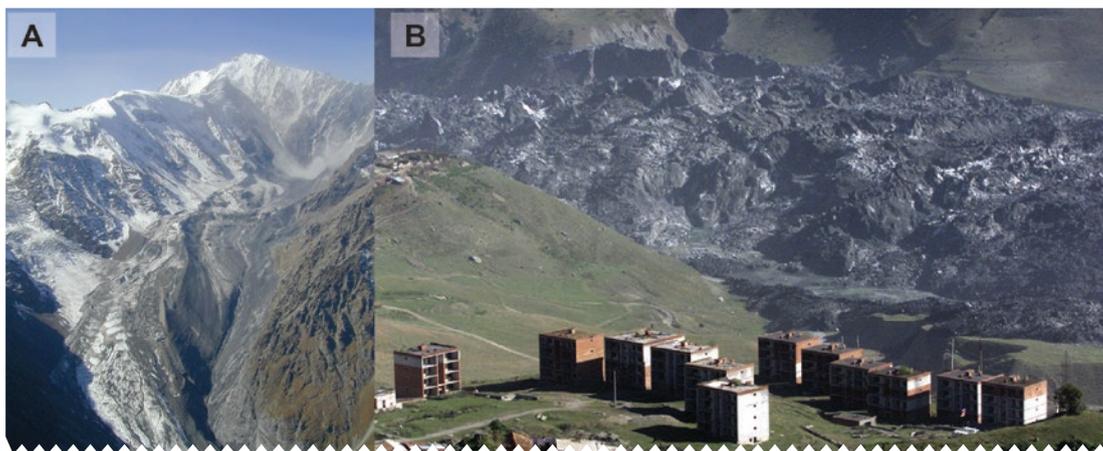
Файллетц и др. (2015 год) объединили результаты наблюдений и моделирование с целью дальнейшего выяснения влияния температурных факторов на устойчивость ледников и выявили три возможных установки:

1. Холодные ледники, полностью промороженные к своему ложу, в которых неустойчивость вызвана прогрессирующим возрастанием разрушений из-за изменения геометрии ложа (накопление массы и утолщение к фронту ледника). В этом случае завершающий разлом происходит в толще льда, обычно в нескольких метрах над ложем.
2. Политермические ледники, частично смёрзшиеся с ложем, с наличием тёплой зоны. В этом случае завершающий разлом происходит непосредственно на ложе в тёплой зоне ледника, и способен распространяться в толще льда. В таких ледниках присутствует жидкая (но не текущая) вода, играющая ключевую роль в развитии неустойчивости.
3. Тёплые крутые языки ледников, являющиеся объектом скольжения по подстилающему ложу. В этом случае завершающий разлом происходит непосредственно на ложе, и в наличии имеется текущая вода на границе ледника и ложа. Неустойчивость вызвана, прежде всего, резкими перепадами напора подледниковых вод и требует критической геометрической формы (крутой склон, отсутствие упора на фронте, выпуклая топография ложа).

Эти базовые процессы подразумевают значительное топо-климатическое влияние на устойчивость ледников, так как их ложа обычно становятся круче, а примерзание к ложу более вероятно с увеличением абсолютной высоты. Значит, изменение температуры влекут за собой изменение в формировании ледяных лавин как через прямое воздействие на тепловой режим ледников, так и через опосредованное воздействие на изменяющуюся геометрию ледников. Независимо от того, каким образом происходит отрыв, по мере движения ледяной массы вниз она разрушается, формируя высокоподвижный поток раздробленного льда, достигающий высоких скоростей. Дальности выброса в основном зависят от первоначального объёма оторвавшегося материала, хотя возможен захват значительной массы по мере движения, трансформирование потока и каскадные процессы (см. раздел 2.2). Обычно предполагается, что лавины обвального типа связаны с меньшими, частыми и повторяющимися событиями, которые в некотором роде представляют собой естественную абляцию для таких ледников. Хотя большие объёмы обвалов мало вероятны, их воздействия на ледниковые озёра и волны прорыва являются частой и серьёзной угрозой, особенно в ледниковых цирках, где озёра образуются у подножий крутых ледниковых лбов. Ситуации соскальзывания приводят к более редким но большим ледниковым лавинам, способным достигать и воздействовать на участки ниже по долине.

Ледяные лавины крупных объёмов (более 106 куб. м) достаточно редки. О них имеются сообщения из Европейских Альп, Северной Америки, Анд, Гималаев и Тибета (Шнайдер и др., 2011 год). Случаи отрыва крупных частей относительно пологих долинных ледников чрезвычайно редки. Примеры таковых имели место на леднике Колка на российском Кавказе в 2002 году (Эванс и др., 2009 год; Хэберли и др., 2004 год; Хуггель и др., 2005 год), где ледник был введён в неустойчивое состояние серией ледяных и каменных лавин с крутых склонов за ним; и недавний сход своеобразной двойной ледяной лавины на хребте Ару Кру на Тибете в 2016 году (Тянь и др., 2017 год). До сих пор нет полного понимания природы этих процессов, хотя, в некоторых случаях, с ними связывались пульсации, а на Тибете они и непосредственно наблюдались перед вышеупомянутыми событиями. Предполагаемые причинные механизмы, делающие вклад в такие катастрофические отрывы, связаны с возрастанием напряжений при снижении прочности в леднике, включая потерю прочности на сдвиг на контакте ледника с его ложем из-за развития экстремальных давлений в результате атмосферных осадков или таяния (в особенности в условиях политермальных условий на ложе), нагрузки из-за снегонакопления и перераспределения массы или нагрузок из-за других перемещений вещества остающегося на льду ледника (Эванс и Дэлани, 2015 год).

Ускоренное движение ледника, образование трещин напряжения и расселин на поверхности — достаточно частый, но не обязательный предвестник образования ледяной лавины (Файеттас и др., 2016 год). Ледяные лавины также могут быть спущены землетрясением. В то время как в большинстве таких случаев вовлечены разломы в подстилающих породах (например, при катастрофе в Хуаскаране, Перу, в 1970 году), также имелись случаи, когда в лавинных отложениях можно было видеть лишь минимум скальных обломков (ван дер Вёрд и др., 2004 год). К примеру, недавнее бедствие в Лангтанге (2015 год) в основном рассматривается как спровоцированная землетрясением снежно-ледяная лавина (Фуджита и др., 2016 год). Из-за изменений в давлении воды и уменьшения прочности на сдвиг и интенсивные осадки, и экстремально тёплые периоды также рассматриваются как потенциальные спусковые механизмы для ледяных лавин.



**Иллюстрация 3:** 20 сентября 2002 г. разрушился ледник Колка на Кавказе (Северная Осетия, Россия) приведя к каменно-ледяной лавине объёмом более 100 млн куб. м, прошедшей вниз по долине на расстояние 19 км, после чего трансформировавшейся в селевой поток, приведший к гибели около 140 человек и значительным разрушениям. А: вид разрушившегося ледника Колка и изначальная траектория схода лавины. В: Ледяные и селевые отложения лавины в Кармадоне (фото И. Галушкина и Кейстоуна).

### 1.3 ПРОРЫВЫ ЛЕДНИКОВЫХ ОЗЕР

Термин «прорыв ледникового озера» (ПЛО) используется здесь для обозначения катастрофического сброса воды из водоёма, образовавшегося рядом, перед, под или на леднике. Дамбы, запруживающие водоём, могут быть сложены преимущественно из льда, моренных отложений или коренных пород.

Подпрудные озера могут формироваться у края наступающего (или пульсирующего) ледника когда боковые притоки или котловины у боков ледника отсекаются и перегораживаются. Множество таких озёр образовывались в высокогорных областях во время максимума последнего оледенения (МПО) и позднее, во время малого ледникового периода (МЛП). В течении времени, по мере отступления ледника, поддержка ледяной дамбой исчезает и озеро может осушиться катастрофически или же оставаться запруженным за краевыми моренами бывшего ледника. Недавнее бедствие, вызванное ПЛО (в 2013 год) в Кедарнате, Индия, включал в себя прорыв такого озера (Эллен и др., 2015 год). При отступании прежде кофлюэнтного ледника новые озёра могут образовываться на освобождающейся предледниковой долине, запруженной ниже по долине остающимся ледником. Подледниковые озёра, формирующиеся под ледниками, наиболее хорошо известны в Исландии, где накопление (и спуск) связывается с геотермальной и вулканической активностью. Прорывы из запруженных льдом водоёмов внутри или под ледниками, включая спуски надледниковых запруд через внутриледниковые каналы, также описывались в большинстве горных регионов мира, где были замечены их связи с интенсивными осадками или усиленным таянием во время периодов тёплой погоды (Бенн и др., 2012 год; Хасс и др., 2007 г.; Ричардсон и Рейнолдс, 2000 год; Раунс и др., 2017 год). Современные исследования на Тянь-Шане показали, что размеры и срок жизни надледниковых озёр определяются временем их соединения с системой внутриледниковых каналов. Для оценки быстро развивающихся угроз требуются частые наблюдения (Нарама и др. 2010 год; 2017 год).

Подледниковые и внутриледниковые спуски воды осуществляются, главным образом, по туннелям, которые растут за счёт термической и механической эрозии. Что точно является причиной таких спусков зачастую не совсем понятно, но гидростатическое всплытие ледниковой дамбы при достижении объёмом запруживаемой воды некоторого критического уровня — один из возможных механизмов. Прорывы, связанные с увеличением туннелей, обычно развиваются медленнее и с меньшими пиковыми расходами, чем при действии иных механизмов ПЛО при сравнимых объёмах воды. Были зарегистрированы, также, и более быстрые под- и внутриледниковые спуски воды, однако механизмы их образования недостаточно ясны.

Широко распространённое отступление горных ледников со времени МЛП привело к образованию озёр, сдерживаемых ледниковыми моренами. Некоторые из таких озёр имеют значительные объёмы водных масс — до 100 млн куб. м и глубины, превышающие 200 м (Кук и Куинси, 2015 год). Эти озёра могут занимать днища крутых ледниковых цирков или днища долин. Для длинных, плоских, покрытых обломочным материалом ледников, отвечающим на отрицательный баланс массы, скорее, утоньшением, чем отступлением языка (например, см. Куинси и др., 2007 год; Ричардсон и Рейнолдс, 2000 год), крупные озера обычно развиваются через постепенное расширение и объединение надледниковых подпрудных водоёмов. По причине разрозненности моренных отложений по своей природе, элементы которых, при этом,

скреплены льдом, дамбы (высотой до 100 м) могут быть непрочными и предрасположенными к разрушению несколькими механизмами. Во-первых, градиент гидравлического давления по ширине дамбы может приводить к просачиванию, вымыванию мелкозёма, и к эрозии на низовом откосе дамбы. Деградация ледяного ядра дамбы может уменьшить внутреннюю устойчивость и таким образом увеличить подверженность к её разрушению. Во-вторых, регрессивная эрозия каналов каналов (например, из-за ветровых волн или прорыва перегородки во временном стоковом канале) рассесть преграду и привести к переливу. В-третьих, быстрый приток воды (дождевой или талой), формирование волны прорыва из-за перемещения масс (ледяные или каменные лавины) в озеро может увеличить сток воды через стоковый канал и инициировать рассечение. В любой из таких ситуаций быстрого притока воды или перемещение массы, формирующих паводковую волну, базовыми составляющими оценки опасного явления становятся гидрологические, геоморфологические и геологические характеристики окружающих склонов и водосборного бассейна озера. Землетрясения могут стать спусковым механизмом приноса масс в озеро или могут напрямую дестабилизировать структуры дамбы. Однако, эмпирических свидетельства подобных событий на удивление мало. Землетрясение в Горка (Непал) не привело к какой либо значительной дестабилизации моренной дамбы, возможно, частично в силу расположения озёр на плоских участках дна долины, где сейсмические ускорения меньше (Каргель и др., 2016 год).



**Иллюстрация 4:** 16 и 17 июня 2013 года невиданные селевые потоки разрушили деревню Кедарнат в штате Уттарачанд на севере Индии. Основные разрушения и гибель людей произошли 17 июня, когда небольшое озеро, запруженное у боковой кромки ледника Хорабари (отмечен голубой стрелкой) переполнилось и прорвалось после многодневных экстремально сильных дождей. Необычно быстрое весеннее снеготаяние сток в озеро в течение предшествующего месяца скорее всего также относятся к ключевым факторам, приведшим к этим событиям. (Фото: Вайбав Каул).

Как только вода прорезает промоину поперёк моренной дамбы и сток из озера возрастает, усиливается эрозия и промоина растёт. Сток из озера продолжает возрастать и инициируется само-развивающийся процесс (Рисунок 5). Обычно это продолжается до того момента, когда сток начинает убывать вместе с касательным напряжением на поверхности грунта. Эрозионные процессы затухают и, наконец, прекращаются. Состав дамбы (размеры обломков, наличие погребенного льда и растительности) и её морфометрия (высота, ширина, уклон) имеют

значение не только для исходной устойчивости дамбы, но также для контроля за скоростью эрозионных процессов и окончательной глубины промоины, являющейся главным фактором для построения гидрографа паводка. Существуют несколько примеров прорыва моренных дамб вскоре после образования озера (О'Коннер и др., 2001 год), однако во многих случаях дамбы могут сохраняться в течение нескольких лет, десятилетий, столетий и даже еще более длительных периодов времени. В большинстве случаев прорыв дамбы приводит к значительному падению уровня воды в озере и образовавшиеся в результате каналы часто предотвращают новые угрозы развития критической водной массы, если только чаша озера в дальнейшем не будет углубляться и расширяться, например, вследствие продолжающегося отступления и сокращения тела ледника. Кроме того, в редких случаях, волны прорыва от перемещения крупных горных масс могут перехлестнуть моренную дамбу, что может стать причиной ее прорыва без ее фактического разрушения, что означает, что угроза повторных явлений сохраняется. На озёрах, подпруженных коренными выступами, такие волны являются единственным фактором катастрофического паводка, так как такие дамбы сами по себе считаются прочными.



**Иллюстрация 5:** Фото, сделанные при прорыве моренной дамбы на леднике Грубен близ Вале (Швейцария), со значительным размывом и расширением тоннеля прорыва под дамбой. (Фото: Х. Рётлисбергер, 1970 год).

При возникновении прорыва дамбы ледниково-подпрудного озера образовавшийся поток увлекает большой объем осадочных пород, при этом в верховьях высокогорных ущелий, где уклоны тальвегов наиболее велики могут перемещаться крупные валуны. Это особенно справедливо для прорывов озер с моренными дамбами, когда поток становится или селевым, или «сверхконцентрированным» вследствие его предельного насыщения материалом

увлекаемой им морены и отложениями в нижнем течении. Обычно для формирования таких потоков уклон русла превышает  $6^{\circ}$ – $9^{\circ}$  (Хуггел и др., 2004 год), при этом на более пологих участках, наоборот, происходит аккумуляция материала. Прежде всего большая глубина потока и уклоны русла при катастрофических прорывах осуществляют наиболее интенсивную эрозионную деятельность, чем обычные метеорологические паводки при тех же параметрах потока. В то же время, в отличие от метеорологических паводков, паводки возникшие от прорыва ледниковых озер быстро ослабевают, что приводит к меньшим разрушениям ниже по течению (Швангарт и др., 2016 год). Снижение паводкового потока в нижнем течении связано с начальным объемом воды и продолжительностью прорыва дамбы, паводки небольших объемов и короткой продолжительности истощаются наиболее быстро. Однако при большой протяженности долин, как в Гималаях и Андах, при прорывах ледниковых озер часто наблюдается изменение первоначального водо- грязекаменного типа потока на «сверхконцентрированный» поток и, иногда, снова на грязекаменный, в зависимости от уклона русла и доступного к размыву и сносу материала. При этом наблюдались русла паводковых потоков протяженностью до 100 км и более (Кэйри и др., 2012 год; Чендерелли и Воль, 2003 год; Швангарт и др., 2016 год).

#### **1.4 СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ**

В то время как одни селевые потоки формируются при прорыве глубоких ледниково-подпрудных озер (см. раздел 1.3), другие, не связанные с озерными прорывами, формируются в высокогорьях, и имеют в качестве очагов зарождения крутосклонные моренные гряды, коллювиально-пролювиальные конусы и шлейфы, насыщенные обломками неустойчивые ледниковые языки и флювиогляциальные отложения в долинах с большими уклонами тальвега (Эванс и Дэлани, 2015 год). Движущийся на большой скорости селевой поток состоит из смеси обломочного материала и воды. Поток может иметь одну или несколько волн (Айверсон, 1997). Объемная доля твердой составляющей бывает различной, но чаще всего составляет 50%–70%. Характерными особенностями селей являются интенсивная эрозия, способность к переносу крупных валунов, слабо отсортированный переносимый материал и прирусловая аккумуляция с образованием пролювиальных валов при снижении скорости потока на более пологих участках долины (Хунгр и др., 2001 год). Для формирования селевого потока благоприятны пери- и парагляциальные зоны в связи с обилием в них рыхлых отложений в сочетании со значительными уклонами рельефа, таянием снега и льда и интенсивными конвективными или муссонными осадками (Эллен и др., 2015 год; Кьярле и др., 2007 год; Эванс и Клаг, 1994 год; Йомелли и др., 2007 год). Триггерными факторами селя обычно являются жаркая погода летом и, как следствие, интенсивное таяние снега и льда, и/или обильные осадки (Кьярле и др., 2007 год; Йомелли и др., 2007 год). Так, около 600 селей в Швейцарских Альпах в 1987 году были вызваны интенсивными осадками, причем более 50% селей сформировались в местностях, освободившихся от ледника за последние 150 лет (Риккенманн и Циммерманн, 1993 год; Циммерманн и Хэберли, 1992 год).

Аналогичные исследования в России показали, что усиление селевой активности связано с недавним быстрым сокращением оледенения, в результате которого обширные территории оказались покрыты голой мореной, а также с увеличением площадей термокарста, которые становятся зонами селевого питания благодаря насыщенности приповерхностного слоя грунта талыми и атмосферными водами (Сейнова и др., 2011 год; Стоукс и др., 2006

год). Местное поверхностное переувлажнение усугубляется наличием водоупоров из многолетнемёрзлых пород (Циммерманн и Хэберли, 1992 год). Таяние многолетней мерзлоты в рыхлых отложениях приводит к потере их связности, возрастанию парового давления подземных вод и просадкам грунта в местах исчезновения подземного льда (Хэррис, 2005 год). Территории недавней дегляциации с разреженным растительным покровом и преобладанием пери- и парагляциальной растительности становятся слабо защищенными от эрозии в течение следующих нескольких и более десятилетий (Кееб и др., 2005 год).

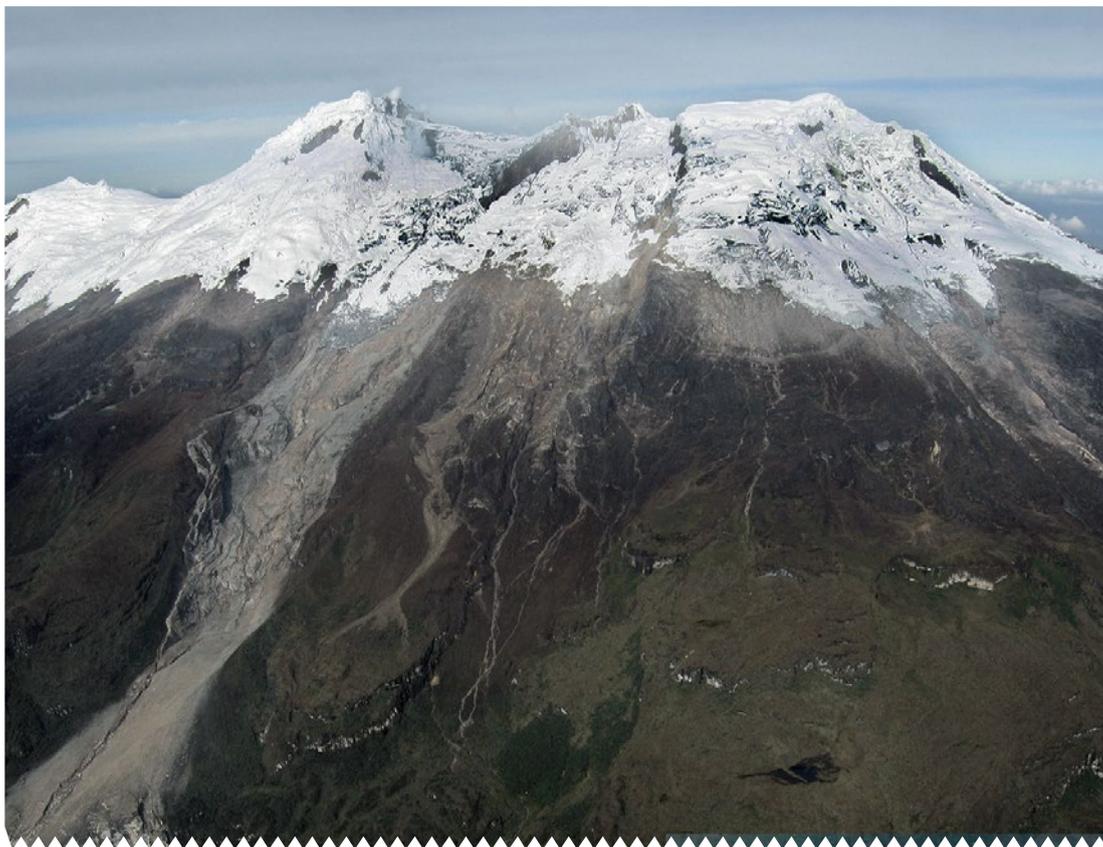
Селевая активность четкую сезонности. В Европейских Альпах сели наиболее часто происходят летом и осенью (Ребетес и др., 1997 год; Штоффель и др., 2011 год), и на Кавказе летом (Перов и др., 2017 год). Интенсивные конвективные осадки или процессы таяния отмечаются в основном в теплые месяцы года, являясь триггерными факторами селепроявления, , но также рыхлые отложения оттаивают и поэтому легко размываются. Особенно, в зонах с с многолетней мерзлотой наблюдается тесная связь между селевой деятельностью и площадью и глубиной оттаивания грунтов. Поэтому склоны достигают наибольшей денудационной неустойчивости к концу лета и осенью, когда в грунтах оттаивание достигает наибольшей глубины. Однако порог водонасыщения атмосферными осадками в результате которого формируется селевой поток, менее вероятен в начале лета, когда оттаявший слой имеет меньшую глубину, но сильнее насыщен водой от весеннего снеготаяния (Шнойли-Боллшвейлер и Штоффель, 2012 год).



**Иллюстрация 6:** Селевой поток, формирующийся на ледниковой морене (валунных глинах) близ г. Тырнауз (Россия), июль 2000 года. Наиболее вероятным триггерным фактором селевого потока считается прорыв воды из внутриледниковой каверны (фото А. Алейникова).

## 1.5 ПРОЦЕССЫ, ВЫЗВАННЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ВУЛКАНИЗМА И ОЛЕДЕНЕНИЯ

Процессы, вызванные взаимодействием вулканизма и оледенения являются одними из наиболее катастрофических природных явлений в мире. Наиболее известное в истории событие произошло в 1985 году в Колумбии, когда относительно небольшое извержение вулкана Невадо дель Руис растопило значительный объем снежно-ледяной массы, и в результате со склона вулкана сошли лахары - вулканические грязекаменные потоки, которые привели к гибели более 20 000 человек в городе Армеро, находящемся в 70 км ниже от вулкана (Пирсон и др., 1990 год; Войт, 1990 год). Пятью годами ранее, в 1980 году, при катастрофическом извержении вулкана Сент-Хеленс, также покрытого ледниковой шапкой, произошло обрушение склона и взрыв вулкана вместе с ледовым массивом сошли каменные лавины и лахары, опустошив обширную прилегающую местность (Уэйтт и др., 1983 год). После этих трагедий было усилено изучение процессов взаимодействия вулканической деятельности со снегом и льдом, и связанных с этим опасных явлений.



**Иллюстрация 7:** В 2007 и 2008 годах в колумбийской Центральной Кордильере произошли извержения недействующего долгое время покрытого ледником вулкана Невадо дель Уила. В результате извержения произошло интенсивное таяние ледников и образование лахаров, которые, сошли с ледника вниз по склону, проделав путь более 100 км. Усилия по оценке опасности эффективное управление рисками и раннее оповещение позволили избежать больших человеческих жертв. (Фото: INGEOMINAS (Геологическая служба Колумбии, апрель 2008 год).

Лахары представляют собой опасное явление с наибольшим радиусом действия, преодолевая расстояния более чем 150 км вниз от вулкана (Ворни и др., 2012 год) и иметь объемы в десятки миллионов куб. м с пиковыми расходами до нескольких десятков тысяч куб. м/с. Например в Невадо дель Руис в 1985 г. общий объем лахаров составил 90 млн куб. м с пиком расхода 48 000 куб. м/с и скоростями от 5 до 15 м/с. Общий объем лахара, сошедшего с вулкана Безымянный на Качатке в 1956 году, был даже более 500 млн куб. м (Сейнова и др., 2017 год). Лахары могут формироваться как в результате извержений, так и иных процессов, происходящих на вулканах с ледниковыми шапками (Мэйджор и Ньюолл, 1989 год):

- Пирокластические потоки – смесь горячих и сухих скальных обломков и горячих газов, движущиеся с высокой скоростью, которые быстро растапливают снег и лед и приводят к образованию лахаров.
- Потоки лавы также могут растапливать снег и лед, но их тепловой поток намного медленнее и менее эффективен, чем у пирокластических потоков.
- Тепловой поток под ложем ледников может генерироваться подледными извержениями или геотермальными течениями. Под ледником может скапливаться большой объем воды, зависящий от рельефа и дренажной системы, и в итоге катастрофически прорываться, как наиболее известный в Исландии, крупный внезапный прорывной паводок называемый «йёкюдльхлауп» (Бйёрнссон, 2003 год; Робертс, 2005 год).
- Выброс и осаждение пепла и других продуктов извержения на ледники едва ли могут приводить к образованию лахаров, но оказывают влияние на абляцию и на масс- баланс ледников. Озера в кратерах являются потенциальными источниками крупных паводков, которые могут вызывать как изверженную, так и низверженную вулканическую активность, а также изменения снежных и ледовых масс.

Последние исследования показали, что по всему миру насчитывается 144 вулкана с ледниками, а также 226 вулканов с устойчивым снежным покровом (Сейнова и др., 2017 год). К регионам с наибольшим количеством таких вулканов, можно отнести Американские Кордильеры, а также Алеутскую гряду, Камчатку, Японию, Новую Зеландию и Исландию. Исследования по оценке опасности были выполнены для нескольких из таких вулканов в Андах, Мексике и США с использованием ряда методов, которые обязательно учитывали взаимодействие вулканической и ледниковой систем (Хуггель и др., 2007b; Кюнцлер и др., 2012; Турет, 1990; Уэйтомас и др., 2009).

## **1.6 ДРУГИЕ ЗНАЧИМЫЕ ПРОЦЕССЫ**

Наряду с процессами, описанными в разделах 1.1–1.5, в высокогорных пара- и перигляциальных зонах происходят различные другие природные опасные процессы. Постепенным и часто долговременным парагляциальным процессом, представляющим значительную угрозу для местной инфраструктуры, является гравитационная деформация крутых моренных и коренных склонов (Делайн и др., 2015 год). Катастрофический обвал происходит, если преобразование склона продолжается, и, несмотря на то, что скорости перемещения весьма малы (от сантиметров до метров в год), порог перехода к стремительному обвалу снижается (Мак-

Колл и Дейвис, 2013 год). В этом контексте землетрясения являются важным потенциальным триггером всех видов катастрофических склоновых процессов (см., например, Шугар и др., 2012 год; ван дер Верд и др., 2004 год), к роме того, они оказывают кумулятивное воздействие на устойчивость склонов и развитие ландшафтов, в высокогорьях эрозионно-аккумулятивную деятельность (см., например, Ховарт и др., 2012 год; Швангхарт и др., 2016 год). Учитывая, что снежные лавины происходят во всех горных областях мира, процедуры оценки и научное понимание основываются на опыте многих десятилетий исследований и обмена информацией (например, Международные научные семинары по снежному покрову (International Snow Science Workshops) известны с 1950-х годов).

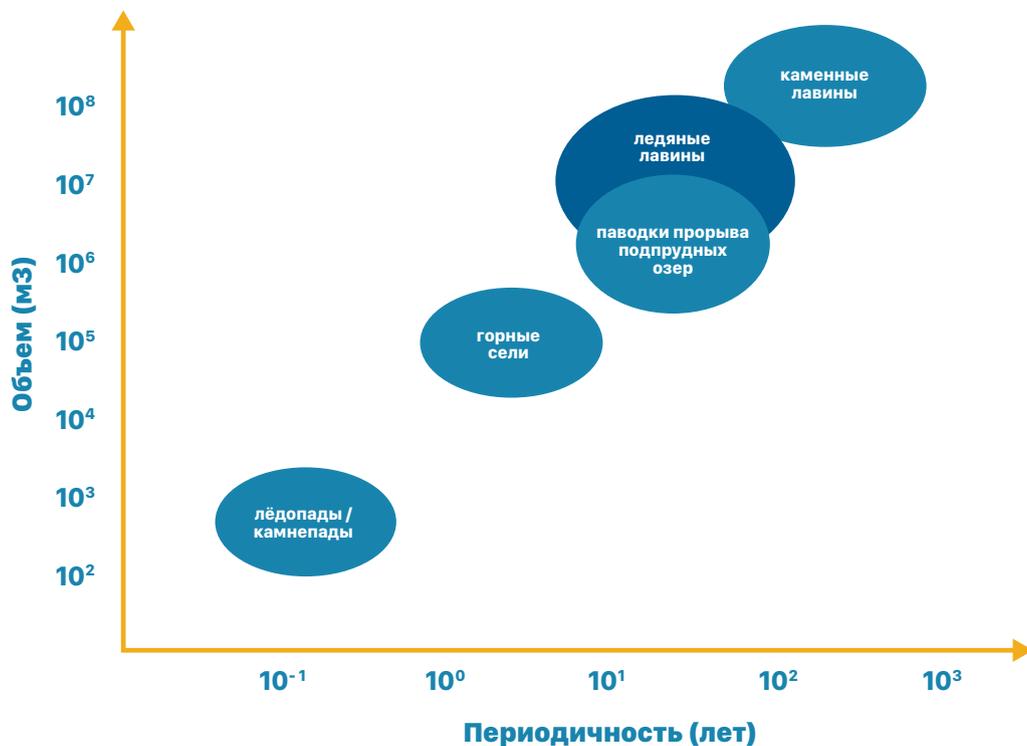
В этом контексте сами по себе снежные лавины не относятся к явным опасным гляциальным или мерзлотным явлениям. Однако признается важность учета снега в смешанных ледяно-каменно-снежных лавинах (Шнайдер и др., 2011 год) и недавняя катастрофа в Лангтанге (Непал) продемонстрировала, какие разрушения может вызывать сход с крутых фронтальных уступов ледников крупных снежных лавин (Фуджита и др., 2016 год).

И в заключении, речные паводки (часто упоминаемые как горные водотоки) также не рассматриваются в настоящем документе, хотя эти явления могут усиливаться весенним таянием снегов и льдов, и в сочетании с сильными ветрами могут привести к разрушительным паводкам с речных и прорывом подпрудных озер (Эллен и др., 2015 год; Дас и др., 2015 год). Поэтому, с учетом широкого спектра опасных явлений, которые могут происходить в горных условиях, для их оценки, как правило, необходим комплексный междисциплинарный подход.

## 2. ВЗАИМОСВЯЗИ И ДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ

### 2.1 ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ МАСШТАБЫ ПРОЦЕССОВ И ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Опасные явления гляциального и мерзлотного генезиса имеют широкие пространственные и временные диапазоны (Иллюстрация 8). С одной стороны в динамических горных условиях существуют такие повседневные события, как обвалы льда и горных пород малых объемов, в особенности в течение теплых летних месяцев, когда их частота может быть тесно связана с суточными циклами замерзания и оттаивания. Угроза наступления таких событий обычно ограничена высокогорной местностью, где ей подвергаются туристы и альпинисты на маршрутах (Темме, 2015 год). С другой стороны существуют сравнительно редкие, но масштабные в своем проявлении крупные ледяные и/или каменные лавины, которые сходят на большие расстояния и поэтому представляю потенциальную опасность для людей и инфраструктурных объектов (Шнайдер и др., 2011 год), особенно там, где эти события трансформируются или инициируются цепи процессов (см. раздел 2.2).



**Иллюстрация 8:** Характерные объемы и периодичность различных обвалов и других горных склоновых процессов в высокогорных областях и зонах многолетней мерзлоты (Хуггел и др., 2012 год). Схема имеет обобщенный характер и не исключает, что данные события могут происходить гораздо чаще. Например, некоторые ледниковые озера могут образовываться довольно быстро или иметь сезонное обводнение и вызывать частые прорывные явления.

В настоящем документе мы рассматриваем как условия и предпосылки, так и процессы, запускающие опасные явления и цепи событий. В этой связи уникальны климатические изменения, так как с ними связаны криогенные и гидрометеорологические изменения оказывающие комплексное влияние на эрозионные и склоновые процессы, действуя в определенном пространственно-временном диапазоне. При рассмотрении примера неустойчивости коренных склонов, геологическое строение и рельеф как правило, считаются статичными предопределяющими факторами, но оба медленно реагируют на отступление ледников в масштабе сотен и тысяч лет (Мак-Колл, 2012, также см. Часть Ш). Такие процессы приводят к постепенному снижению прочности склонов при сдвиге, в то время как более краткосрочные гидрометеорологические экстремумы, такие, как интенсивные осадки и снеготаяние, быстрее проявляются в степени устойчивости склонов. В промежуточных сроках (например, в связи с ускоренным потеплением последнего столетия) можно рассматривать такие процессы, как таяние многолетней мерзлоты на глубину от нескольких метров до десятков метров или исчезновение малых ледников.

Процессы, вызывающие резкое снижение прочности при сдвиге (включая землетрясения) могут действовать только как триггеры склоновых процессов, где прочность при сдвиге была уже достаточно низкой и приближалась к критическому порогу (Иллюстрация 9). Поэтому оценка опасных явлений ледникового и мерзлотного происхождения должна учитывать долговременную эволюцию в изменении ландшафтов и взаимодействующих процессов, одновременно историческую и в ближайшей перспективе.



**Иллюстрация 9:** Принципиальная схема, демонстрирующая долгосрочную динамику устойчивости двух склонов. Пунктиры показывают порог предела прочности при сдвиге, ниже которого склон переходит в неустойчивое состояние и в результате происходит обвал (по Хуггел и др., 2010 год). Развитие обоих склонов характеризуется процессами, вызывающими постепенное снижение прочности при сдвиге (например, отступление ледников с последнего четвертичного оледенения) и быстрое снижение прочности на сдвиг (например, гидрометеорологические экстремумы или землетрясения). Склон 2 имеет более низкий предел прочности при сдвиге связанный, например, с видом и структурой породы.

## 2.2 КОМПЛЕКСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И СИНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

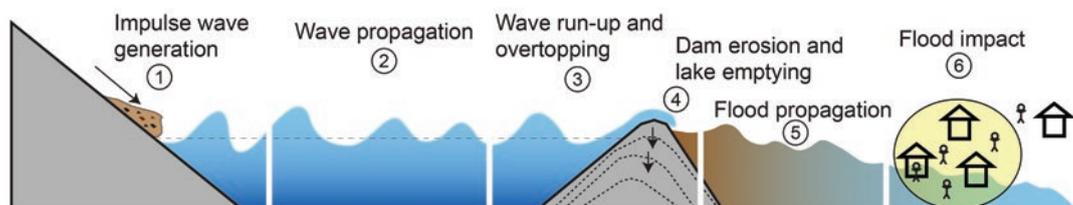
Отличительной чертой в оценке угроз гляциального и мерзлотного происхождения является необходимость учета взаимодействующих процессов и их совокупного воздействия в нижнем течении. Фактически, некоторые из наиболее разрушительных и далеко распространившихся бедствий в высокогорьях представляли собой комплексные процессы, начинающиеся как ледяные и/или каменные лавины, которые по мере схода превращались в селевые, либо «сверхконцентрированные» потоки (см., например, Хуггел и др., 2005 год; Ллибутри и др., 1977 год). Взаимодействие между процессами может быть мгновенным (от секунд до минут), как в случае, когда обрушение горных пород в озеро вызывает внезапное наводнение. При других взаимодействиях, таких, как подпруживание водотоков оползневыми или ледниковыми массами, возникает последующая опасность, которая может развиваться в течение дней, недель, месяцев или даже лет (для получения дополнительной информации о подпруживании озер оползнями содержится в Шнайдер и др., 2013 год; Корап и Твид, 2007 год).

Пример типичного комплексного процесса, происходящего при обрушении льда или породы в ледниковое озеро, приведенный несколькими авторами (см., например, Уорни и др., 2014 год) (Иллюстрация 11), приобретает все большую важность в связи с образованием новых озер вблизи с крутыми и неустойчивыми горными склонами (Хэберли и др., 2016 год). Главная проблема при оценке опасных явлений в то м, что методики моделирования отдельных процессов (например,



**Иллюстрация 10:** Траектория схода и шлейф выноса каменной лавины и селя, сошедших 6 августа 2010 года с горы Мигер в канадской Британской Колумбии. Лавина началась со схода обломков вулканических пород в объеме 53 млн куб. м и трансформировалась в селевой поток, прошедший около 10 км вниз по склону и перегородивший реку Лиллуэт (Роберти и др., 2017 год). Хорошо видны исключительно масштабные результаты эрозии, ширина бокового наклона и повороты траектории селевого потока. (Фото: Т. Спарджен).

образование волн, прорывы дамб, распространение потоков) разработанные научными и инженерными сообществами никогда не предусматривали комплексное моделирование прорывных паводков ледниковых озер. Шнейдер и др. (2014) предложили в качестве основы для картирования опасных зон в Перу одну из первых моделей взаимодействия селевого потока и прорыва озера. В этом примере, наибольшая неопределенность, в возникновении перехлестывающей волны связана не с сочетанием различных моделей, а в большей степени с определением исходного сценария каменно-ледяной лавин (Шауб и др., 2015 год). Это подчеркивает важность оценки начальной устойчивости горных склонов. Последние усилия были нацелены на разработку методов моделирования, способных смоделировать комплексные процессы, с двухфазными моделями селевого потока (Кафле и др., 2016 год). В широком временном диапазоне (месяцы и годы) имеется важная связь между камнепадами, каменными обвалами и селепроявлениями. Появление больших объемов рыхлых и легкоразмываемых отложений, таких, как отложения каменных лавин, может существенно изменить селевую активность (Франк и др., 2015 год; Тоблер и др., 2014 год).



**Иллюстрация 11:** Схематический рисунок, показывающий типичную цепь прорыва ледникового озера, возникшего в результате первоначального перемещения горной массы (согласно Ворни и др., 2014 год). (1) Перемещение масс (ледяных, скальных или селевых) обрушившихся в озеро, вызывавших (2) волну перемещения, которая (3) перекрывает (4) врзается и размывает зону плотины. (5) Затем наводнение устремляется вниз, где расположены (6) населенные пункты и инфраструктура. Следует заметить, что волны перемещения могут быть катастрофическими как с разрушением, так и без разрушения плотины, как таковые, очевидно могут представлять угрозу устойчивым озерам, перекрытым коренными породами.

## II. ОЦЕНКА ОПАСНОСТЕЙ

В этой главной части данного руководства мы выделяем систематический подход к оценке опасности гляциального и мерзлотного происхождения. Следуя вводной части общей схемы оценки, мы обращаемся к двум основополагающим требованиям, а именно, важности разработки и проведения инвентаризации прошлых событий и, в контексте стремительного изменения климата, необходимости надежных климатических данных для обоснования оценки. Опираясь на новейшие достижения в разработке проблемы, представленные в этой части, мы представим читателю ключевые соображения и новейшие методологические подходы к оценке угроз явлений гляциального и мерзлотного генезиса в горных местностях, уделяя особое внимание картированию опасных зон.

### 1. ОБЩАЯ СХЕМА И ОСНОВОПОЛАГАЮЩИЕ КОНЦЕПЦИИ

#### 1.1 ОБЩАЯ СХЕМА ОЦЕНКИ

Выделяются две ключевые составляющие (или два результата) процесса оценки угроз:

- Оценка уязвимости и устойчивости – определение места и вероятности возникновения опасных процессов.
- Оценка воздействия: определение потенциальной угрозы опасных явлений для нижележащих территорий склонов и долин, и предоставление научной основы для принятия решений и планирования.

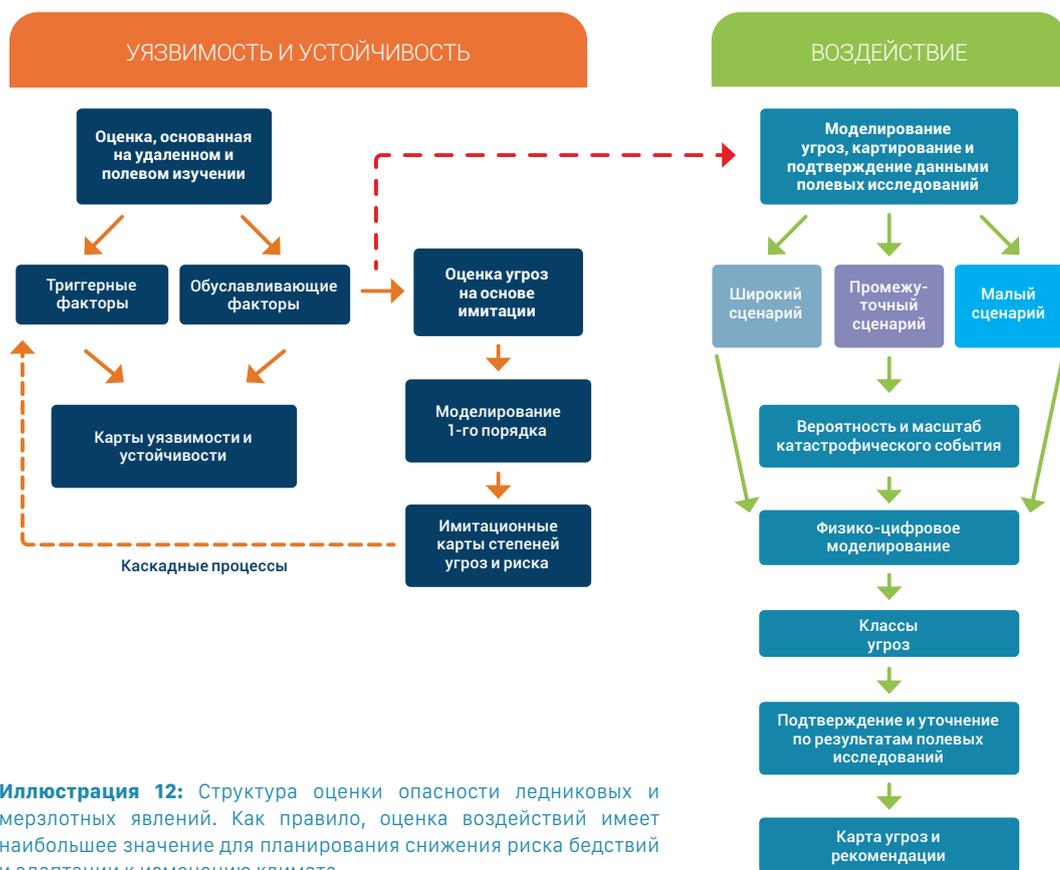
Отметим, что мы здесь рассматриваем только потенциальное физическое воздействие. Оценка социального воздействия, ущерба и потерь относится к области оценки риска и выходит за рамки тематики настоящего документа. Руководство не имеет предписывающего характера, а скорее предназначено для систематического и комплексного ориентирования специалиста-практика или эксперта в проведении оценки. Для каждого этапа оценки доступны различные инструменты и методики, которые в каждом случае должны быть адаптированы к местным условиям и потребностям. Структура также должна быть достаточно общей для проведения оценочных исследований в различных масштабах – от регионального до местного с учетом специфики конкретного участка. Масштаб любой оценки будет зависеть от исследуемых вопросов, например, какую конкретную угрозу представляет данное озеро (для конкретного участка); с какими угрозами будет сталкиваться развитие гидроэнергетики в конкретном речном бассейне (региональный масштаб). По мере того как исследование продвигается от рассмотрения уязвимости и устойчивости к оценке воздействия, актуальность и целесообразность для местных властей, заинтересованных в уменьшении риска бедствий и адаптации к изменению климата в целом возрастает.

Там, где это позволяют данные и уровень экспертизы, конечной целью может быть разработка основанных на физико-цифровых моделях карт опасностей, подтвержденных и детализированных полевыми исследованиями, и разработка на основе этих карт рекомендаций для планирования.

Однако мы признаём, что это может быть не во всех случаях осуществимо или желательно, и могут быть получены значимые результаты на основе упрощенных подходов первого порядка и экспертной оценки.

### 1.1.1 Оценка уязвимости и устойчивости

Мы предоставляем руководство для широкой оценки атмосферных, криосферных (мерзлотных) и геотехнологических факторов, которые являются условием и триггером опасного явления (см. раздел 2). Обуславливающие факторы включают в себя статические и внутренние характеристики местности, а также динамические факторы, со временем постепенно повышающие уязвимость местности. Триггерными факторами являются процессы, которые вызывают начало быстрого перемещения или переводят участок из устойчивого состояния в неустойчивое. Степень влияния определенных факторов на уязвимость или устойчивость будет варьировать от одного региона к другому. Таким образом, необходимо экспертное заключение для определения особого значения отдельных факторов в местной местной оценки уязвимости. Например, если инвентаризация данных по каменным лавинам показывает, что все они произошли в пределах определенной литологической зоны, этот фактор может иметь особое значение для оценки устойчивости склона.



**Иллюстрация 12:** Структура оценки опасности ледниковых и мерзлотных явлений. Как правило, оценка воздействий имеет наибольшее значение для планирования снижения риска бедствий и адаптации к изменению климата

Обуславливающие и триггерные факторы дают информацию не только о месте и вероятности возникновения события, но и о его возможном масштабе (величине). Следовательно, оценка уязвимости и устойчивости обеспечивает основу для определения и расстановки приоритетов, где будут сосредоточены последующие исследования воздействия (например, фокусировка внимания на особо уязвимых или неустойчивых склонах). В то время, как сбор информации на этом этапе, также будет использоваться непосредственно для разработки сценариев и моделирования опасностей фазы оценки воздействия. Как правило, подходы к оценке уязвимости в бассейновом или более крупном масштабе основаны на дистанционно полученной информации, при этом ГИС используется для наложения для перекрытия различных факторов уязвимости, чтобы можно было выполнить полукачественную классификацию на основе пикселей. Там, где выявляются критические угрозы и возможны полевые исследования или дистанционное зондирование с очень высоким разрешением, данные для конкретного участка могут использоваться для проведения количественных анализов, таких, как анализ устойчивости или кинематического моделирования склона.

### 1.1.2 Оценка воздействия

В нашей структуре допускается, что многие крупномасштабные исследования (например, районные или региональные) имеют тенденцию выходить за рамки оценки уязвимости и устойчивости с использованием простых моделей и эмпирических подходов для определения паводкового пути вниз по течению и возможной охваченной территории, но при этом обнаруживается дефицит количественной информации, необходимой для картирования опасности (см., например, Эллен и др., 2016 год; Раунс и др., 2016 год). Здесь мы расцениваем этот промежуточный этап как смоделированную оценку угроз, главными результатами которой являются ориентировочные карты потенциальной опасности или риска. Используемые модели первого порядка часто выводятся эмпирическим путем, но не имеют физической основы и поэтому не могут предоставить такую информацию, как высота паводка, динамическое давление, скорости и т.д., необходимую для комплексного картирования опасности. Тем не менее, такие модели ценны тем, что их простота позволяет моделировать множества (например, сотен) потенциальных путей событий, и, следовательно, полученные карты могут служить индикатором первого порядка потенциальных угроз и основой для установления приоритетов дальнейших локальных исследований и картирования опасностей. Для каскадных процессов такое моделирование первого порядка может также использоваться в оценке уязвимости, например, местоположения озер, в пределах потенциального пути выхода ледяной или каменной лавины.

При выявлении критических ситуаций (например, при высокой уязвимости и/или смоделированной оценке опасности выявляются ключевые угрозы), вероятно, будет выполнено моделирование и картирование опасностей. Картирование опасностей в контексте данного руководящего документа относится только к оценке опасностей, определенной на основе вероятности наступления события и ожидаемая интенсивности данного события. Опасность может быть представлена в следующем виде:

Опасность = f (вероятность, интенсивность)

Картирование опасностей обычно основывается на исторических данных, позволяющих установить взаимосвязь между частотой и величиной, которая может использоваться как основа разработки сценариев и моделирования опасностей, например, картирование данной речной поймы может быть выполнено для паводка 20-летней давности с установленным пиковым расходом 1000 куб. м/с. Для опасностей, возникающих в высокогорьях, возможность надежного установления отношения частоты и величиной ограничивается тремя факторами:

- Опасности часто возникают в отдаленных труднодоступных местах, что означает, что даже крупные события могли пройти незамеченными и даты не были зафиксированы в исторических документах.
- Криосфера быстро меняется, и в некоторых случаях условия уже выходят за рамки исторических прецедентов, что означает, что отношение между частотой и величиной со временем убывает.
- Многие события могут происходить лишь единожды (например, размыв моренной плотины), и, следовательно, отношение частоты и величины события в таких случаях неприменимы.

Учитывая эти ограничения полукачественный подход к разработке сценариев рекомендуется тогда, когда сценарии событий трех различных величин (например, малое, среднее и крупное) связаны с соответствующими наилучшими оценками вероятности возникновения (например, низкая, средняя, высокая). В основе разработки сценария должна лежать информация, собранная при оценке уязвимости и устойчивости, и дополненная, где возможно, лучшим пониманием прошлых событий, происходивших в данном регионе или в других областях. Мы подчеркиваем важность включения наихудшего сценария, то есть события с максимальной величиной, которое можно ожидать с вероятностью определенной на основе вышеописанных источников информации. В частности, для прогнозирования новых или возникающих угроз в условиях изменяющегося климата, наихудшие сценарии предоставляют консервативный подход, с помощью которого можно получать различные источники неопределенности, присущие будущим прогнозам. Набор физико-числовых моделей может затем имитировать для каждого сценария потенциально опасное событие для нижележащей части склона или долины (см. Приложение II), с предоставлением ключевых параметров, таких как – уровень воды, динамическое давление и скорости, требуемых для картирования интенсивности и классификации опасностей. Разработка сценария, подходы к моделированию, а также процедуры классификации и картирования опасностей как для отдельных событий, так для и более сложных цепочек процессов описанных в разделах 3.2 – 3.4.

## **1.2 РОЛЬ ИСТОРИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПО ОПАСНЫМ ПРИРОДНЫМ ЯВЛЕНИЯМ**

Исторические данные о прошлых катастрофических горных обвалах являются основной предпосылкой для оценки опасности и рисков. Посредством исследования распределения, типа и характера прошлых опасных событий, можно улучшить понимание триггерных и обуславливающих процессов, а также оптимизацию оценки уязвимости и лучше ограничить воздействия (Кэрривик и Твид, 2016 год). Выявление и каталогизация опасных явлений, происходящих в высокогорных районах, является сложной задачей, так как 1) мало очевидцев; 2) облачность, тень, и /или снежный покров могут препятствовать получению качественных изображений дистанционного зондирования; 3) ледниковая и речная эрозия могут быстро

устранить следы процесса горных масс; 4) скопления льда/снега быстро исчезают (в течение дней/недель); 5) свежие отложения обломочного материала (например, оползня), перекрывающие более старые отложения (например, морена) могут быть труднораспознаваемы.

Системные исторические данные опасностей гляциального и мерзлотного происхождения наиболее полно разработаны для Европейских Альп, где исследователи имеют в своем распоряжении продолжительную историю научного мониторинга и где альпинисты, смотрители горных хижин и другие обычные люди, которые занимаются сбором данных о горных ландшафтах (Фишер и др., 2012 год; Раванел и Делайн, 2011 год). Как следствие, понимание процесса и многие определяющие эмпирические правила, например, характеристики стартовой зоны или дальность выноса, в основном основываются на данных, поступающих из Европейских Альп (Хэберли, 1983 год; Хуггел и др., 2004 год). В других же, более отдаленных от населенных местностей горных районах, зачастую хорошо задокументированы только самые крупные события. Что касается паводков от прорыва ледниковых озер (ПЛО), в последнее время были предприняты попытки по созданию международной базы данных событий (<http://glofs-database.org/>), которая поможет понять процессы и воздействия ПЛО в различных физических и социальных средах (Вилимек и др., 2014 год). Для того чтобы оценить изменения в процессах с течением времени, архивы опасных событий должны охватывать период минимум 30 лет (т.е. типичная продолжительность рекомендуемого климатического периода), поскольку более короткие периоды не дадут статистически устойчивых трендов. В этой связи реконструкция исторических событий, например, с помощью дендроморфологических методов, может существенно улучшить базовый уровень знаний об опасных процессах, в особенности о взаимосвязи между частотой и масштабом явлений (Штоффель и Боллшвейлер, 2008 год). Используя ПЛО в качестве примера, мы далее показываем, какого рода информации обычно регистрируется в реестре опасностей ПЛО. В разделе 2 содержится обширный обзор типа информации, необходимой для понимания триггерных и обуславливающих факторов других процессов перемещения горных масс.

Основные физические параметры международной базы данных ПЛО (Вилимек и др., 2014 год):  
Ледниковые озера:

- название
- координаты (широта, долгота, высота)
- местоположение (горный хребет, долина)
- тип озера (над-, внутри-, пери-, подледниковое и т.п.)
- тип озерной плотины (скальная, моренная, ледяная, скомбинированная)

Наводнение вследствие прорыва дамбы или перехлеста воды через дамбу:

- дата события
- вероятный триггерный фактор
- механизм(ы) прорыва/выплеска
- объем паводковых вод
- пиковый расход
- охваченная территория ниже по течению (обусловлен также топографией в нижнем течении)
- тип потока/ количество осадочного материала

### 1.3 ОЦЕНКА БАЗОВЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Изменения средних и экстремальных значений атмосферы (в основном температуры и осадков) и возникающие в результате воздействия на криосферу являются важными обуславливающими и/или триггерными факторами многих паводков и процессов перемещения горных масс (см. Раздел 2). Поэтому характеристика таких изменений является сложной задачей, учитывая, что гидрометеорологические данные по многим отдаленным горным районам ограничены. В некоторой степени свободно доступные наборы климатологических данных с координатной привязкой могут служить заменой наземным измерениям, при этом спутниковые оценки осадков из TRMM (Программа для измерения количества тропических осадков) или IMERG, которые широко применялись для оценки угроз оползней и ПЛО, произошедших за последние 20 лет (например, Эллен и др., 2015; Мэттью и др., 2014). Однако эти наборы данных могут давать как заниженную, так и завышенную оценку количества осадков по сравнению с фактическими значениями.

Что касается температуры, результаты повторных анализов могут предоставить приблизительную оценку возможных крупномасштабных аномалий, или как обычно, тренды температуры экстраполируются по вертикали и горизонтали из ближайших доступных данных станций (часто около 100 км или более в отдаленных регионах). В то время как многие авторы использовали такие экстраполяции, чтобы сделать выводы о влиянии таяния и оттаивания для создания условий или запуск [опасного природного явления], связанные с этим неопределенности в таких исследованиях велики. Аналогичным образом, в качестве триггерного фактора в исследованиях указывались «необычно сильные осадки» или «экстремально высокие температуры» и т.п., без какой либо статистической основы для этих утверждений. В идеале, как средние, так и экстремальные климатические условия должны определяться на местном уровне на основе базисного периода 30 лет или более (Сеневиратне и др., 2012 год) и, по меньшей мере, в пределах данного региона, при задании условий следует использовать общий период времени. Недавно Паранунцо и др. (2015, 2016) представили статистический подход для выявления аномалий в климатических параметрах (температура и осадки), связанных с возникновением горных обвалов в Итальянских Альпах, предложив тем самым надежный инструмент для исследования факторов, обуславливающих и неустойчивость склонов на больших высотах.

Учитывая эти соображения и проблемы как составляющие долгосрочной стратегии мониторинга и оценки связанных опасностей следует проводить установку автоматических метеостанций (включая снегомеры) и водомеров, желательно на многих высотных отметках в пределах водосбора. В частности, для учета будущих изменений требуются данные местных станций для уменьшения масштаба результатов глобальных или региональных климатических моделей (см., например, Бёкли и др., 2012 год; Этцельмюллер и др., 2001 год; Фиддс и др., 2015 год). Процедуры дистанционного мониторинга ледниковых изменений, в том числе образования озер, хорошо отработаны, а недавняя инвентаризация доступна для большинства горных регионов мира. Эти кадастры следует регулярно обновлять. Вечная мерзлота, как подземное явление, вряд ли может быть оценена дистанционно, и поэтому условия вечной мерзлоты обычно определяются с использованием подходов к моделированию, начиная от простых эмпирических правил и заканчивая физически обоснованными численными моделями

(например, Боекли et al., 2012; Etzelmüller et al., 2001; Fiddes et al., 2015) На критических объектах на поверхности земли или под землей можно устанавливать термодатчики или проводить геофизические исследования для подтверждения результатов моделирования и проводить мониторинг во времени (см., например, Грубер и др., 2003 год; Хаук, 2013 год).

## **2. ОЦЕНКА УЯЗВИМОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ**

В данном разделе мы выделим главные факторы, которые следует учитывать, и соответствующие им методологические подходы, которые следует применять в оценке уязвимости и устойчивости для различных опасностей ледникового и мерзлотного происхождения. Мы группируем эти факторы как относящиеся к криосфере или к геотехническим и геоморфологическим условиям. В то же время мы допускаем, что между различными факторами существует тесная взаимосвязь. Данная информация представлена в Приложении 1, таблицах 1 – 5.

### **2.1 КАМЕННЫЕ ЛАВИНЫ**

Физические характеристики структуры и прочности коренных пород являются важнейшими составляющей оценки устойчивости склона. Однако, поскольку каменные лавины формируются на некоторых из самых крутых и недоступных высокогорных склонах, подходы к оценке часто должны опираться на методы дистанционного зондирования. Там, где выявлены критические угрозы и возможно полевое изучение склона или дистанционное зондирование с очень высоким разрешением, для построения статических, кинематических или динамических моделей с целью оценки устойчивости склона можно использовать информацию о конкретных геотехнических и других факторах.

#### **2.1.1 Криосферные факторы**

Существует ряд различных подходов к моделированию условий вечной мерзлоты, от простых эмпирических взаимосвязей между средней годовой температурой воздуха (СГТВ) и морфологией склонов до передовых численных моделей, которые оценивают температуру поверхности земли (см., например, Бёкли и др., 2012 год; Фиддс и др., 2015 год; Грубер и др., 2004 год).

Для оценки уязвимости склона особый интерес представляет выявление участков коренных пород где вечная мерзлота, вероятно, будет теплой (маргинальной), т.е., где температура поверхности земли составляет  $\sim 0^{\circ}$ . Связанные с этим исследования обычно фокусируются на критическом диапазоне  $-1.5 - 0^{\circ}\text{C}$ . На значительно более холодных или более теплых склонах таяние вечной мерзлоты редко бывает значимым фактором, хотя его нельзя исключать, особенно там, где наличие всеяких ледников и связанная с ними теплопередача вглубь фирновой толщи зоны аккумуляции может вызвать значительные тепловые возмущения. Результаты моделирования дают только косвенное представление о фактических условиях вечной мерзлоты, в то время как локальные геофизические измерения, (например, томография электросопротивления) могут предоставить информацию о термических условиях, содержании льда и не замерзшей воды на глубине (см. Хаук, 2013 для обзора геофизических процессов). Исчезновение или истончение тела ледника на крутых скальных склонах или у их подножия

может количественно определяться методом повторных космических съемок, аэрофотосъемок или наземных снимков, и использовать их для выработки заключений соответствующих термических и механических (например, вывешивание ледников) воздействию на склон.

### **2.1.2 Геолого-технические и геоморфологические факторы**

Любая оценка устойчивости склона коренных пород должна начинаться с фундаментального понимания местных геотехнических условий, в особенности, простирающихся слоев, их состояния, слоистости, трещиноватости, разломов и других нарушений (Хук и Брэй, 1981 год). Если для данной местности имеются крупномасштабные геологические карты, они должны служить первоочередным руководством. Некоторые геотехнические характеристики могут выводиться на основе нанесенных на карту литологических единиц и структур, в особенности там, когда исторические кадастры оползней обеспечивают надежную научную основу для связи определенных литологических единиц со структурными условиями и процессами разрушения (см., например, Эллен и др., 2011). Аналогично могут предполагаться неблагоприятные условия в зонах крупных структурных нарушений (например, вдоль разломов и литологических границ). В дальнейшем, для более детальной оценки структурных нарушений требуется дистанционное зондирование с высоким разрешением (включая лазерное сканирование) и/или полевое картирование. Разработаны различные схемы геотехнической оценки устойчивости склонов (смотри обзор в работе: Пантелидис, 2009), общие вводные требования которых сводятся к следующему:

- Прочность и качество горной породы (прочность неповрежденной горной породы, эрозия и атмосферные воздействия);
- Состояние трещин (заполнение брекчиями, наличие воды, льда и др.);
- Геометрические характеристики трещин (глубина, ориентация, интервал и др.);
- Состояние склона (неровности, растительный покров и др.);
- Морфометрия склона (угол склона, экспозиция, высота и др.).

Здесь невозможно подробно рассмотреть детально требования по геотехнической оценке. Обычно требуется высокий уровень экспертных знаний для определения являются ли условия или морфометрические характеристики благоприятными или неблагоприятными для устойчивости склона. Классификация по степени уязвимости должна опираться, прежде всего, на знания местных геотехнических условий и понимании прошлой оползневой активности в данном регионе. В целом, там где, проведен анализ архивных данных, максимальная уязвимость наблюдается на весьма крутых (~40° - 60°) склонах, сложенными сильнотрещиноватыми и/или фрагментированными породами, и на склонах, морфоструктурные особенности которых дополнительно способствуют сползанию пластов, обрушению или опрокидыванию отдельных горных пород (Эллен и др., 2011; Фишер и др., 2012; Мак-Сэвени, 2002). Сейсмичность может быть, как обуславливающим, так и триггерным фактором обрушения склона и в сейсмически активных регионах должна обязательно учитываться. Убедительным индикатором неблагоприятных условий, в которых может развиваться крупный обвал, являются документальные свидетельства уже происшедших обвалов и каменных лавин.

## 2.2 ЛЕДЯНЫЕ ЛАВИНЫ И ДРУГИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ

Ледяные лавины представляют проблему для оценки опасности, потому что ключевые процессы, как правило, развиваются стремительно в толще ледника или под ним, и следовательно, за ними трудно проводить непосредственное наблюдение или мониторинг. Таким образом, при оценке в значительной степени мы вынуждены полагаться на косвенные индикаторы, которые можно наблюдать или делать выводы по поверхности ледника, часто с использованием методов дистанционного зондирования. Поскольку небольшие нарушения устойчивости в одном и том же леднике происходят многократно, архив прошлых событий оказывается чрезвычайно полезным для оценки уязвимости. Некоторые признаки можно обнаружить только за недели или дни до схода ледяной лавины, поэтому они менее важны для оценки и картирования опасности, и скорее, более полезны для целей раннего предупреждения.

### 2.2.1 Криосферные факторы

Важнейшими факторами, которые должны учитываться при оценке уязвимости от ледовых лавин, являются тип ледника, его термические характеристики и уклон ложа. Холодные ледники обычно предполагают механику внутреннего разрушения тела ледника, в то время как умеренные и политермические ледники также связаны с неустойчивостью к сдвигу по базальному слою ледяной толщи (Файеттас и др., 2015 год). В зависимости от задействованных механизмов разрушения, для срыва лавины с ледника с холодным основанием требуется минимальный уклон ложа более  $45^\circ$ , тогда как в сравнении с ледниками умеренного пояса достаточно критического угла лишь  $20^\circ - 25^\circ$  (Алеан, 1985). При отсутствии прямых измерений температуры льда термическое состояние ледника можно оценить на основе зависимости мощности от среднегодовой температуры воздуха (СГТВ) (Хуггел и др., 2004). У маломощных ледников уклон поверхности в общих чертах повторяет рельеф ложа и может использоваться для определения критических углов или особенностей рельефа ложа (например внезапных разрывов в топографии или отсутствие поддерживающих опор). Геофизические исследования (например, георадиолокация) дают прямые измерения уклона ложа небольших ледников; для крупных ледников существуют методы моделирования, позволяющие определить топографию ледникового ложа (см., например, Линсбауэр и др., 2012).

Выявлению потенциальных зон зарождения ледяной лавины может способствовать разделение между ситуациями обвала и типом уклона (Алеан, 1985; Пралонг и Функ, 2006). Так как это определяет набор факторов и признаков, который необходимо учитывать при анализе уязвимости, и позволяет предполагать вероятную частоту и величину (масштаб) любого возможного события. В то время как, отвесные обрывы могут порождать частые небольшие лавины, отрывы массивов языка и их сход по долине происходят реже, но характеризуются гораздо большими объемами. Новые возникающие угрозы можно ожидать там, где ледники отступают к менее благоприятным участкам рельефа (например, к более крутому уклону без опор).

Методы фотограмметрии (например, с использованием оптических изображений, радаров с синтезированной апертурой SAR, лазерных систем обнаружения и определения дальности (LIDAR)), в том числе методы сопоставления с цифровыми моделями рельефа и отслеживания изменений (признаков), могут использоваться для количественной оценки изменений в морфометрии и динамике ледника.

Более крупномасштабные изменения могут наблюдаться в масштабах бассейнов, в то время как конкретные ледники могут анализироваться с помощью наземной или аэрокосмической съемки. Утолщение массы к передней части висячего ледника может быть признаком его критической неустойчивости; в то время как увеличение поверхностной скорости также может свидетельствовать о предстоящем механическом обвале за несколько недель (Файеттас и др., 2015). В общем, появление крупных трещин, проходящих по всей ширине ледника, является ранним признаком возможной неустойчивости льда, который может сорваться вниз. Пульсирующие ледники характеризуются быстрым увеличением скорости на порядок и более в своем движении, сильной трещиноватостью и утолщением фронта языка. В очень редких случаях пульсирующие ледники становились источниками крупных обвалов. Термомеханическое моделирование, спутниковое оптическое и радарное (SAR) дистанционное зондирование могут оказывать поддержку для оценки устойчивости, однако возможности раннего обнаружения приближающихся обрушений ограничены.

Дополнительно к оценкам, основывающимся на СГТВ, моделирование мерзлотных процессов помогает определять термический тип ледника (холодный, умеренный или политермический). Если многолетняя мерзлота «теплая» или отсутствует, то на границе ледника с его ложем вероятно наличие воды, и неустойчивость может возникнуть при меньших уклонах склона. Однако известно, что висячим ледникам присуще сложное распределение внутренних температур. На вертикальных непроницаемых уступах лед может быть таким же холодным, как окружающие коренные породы, тогда как на менее крутых вышележащих зонах аккумуляции проницаемые фирновые слои сильно нагреваются за счёт скрытого тепла от просачивающейся и повторно замерзающей талой воды (Хэберли и др., 1997). В зонах, где СГТВ превышает  $-1012^{\circ}\text{C}$ , фирн обычной температуры (Хук и др., 1983), и граница раздела льда с ложем ледника за холодным уступом остается в фазе температурного равновесия, что может вызывать глубоко расположенные тепловые аномалии в породах ложа и, следовательно, способствовать условиям для схода каменно-ледяной лавины (Хэберли и др., 1997, 2004). Изменения тепловых свойств ледника, вызываемые климатическими изменениями и глобальным потеплением, могут иметь важное влияние на его устойчивость.

### **2.2.2 Гео-технические и геоморфологические факторы**

Поскольку причина возникновения больших ледяно-каменных лавин может состоять в обрушении коренного скального основания, опасность схода ледяно-каменных лавин всегда следует оценивать комплексно. В дополнение к тем факторам, которые влияют на устойчивость подстилающих коренных пород, следует оценивать потенциальную частоту и величину сейсмичности в данном регионе, как потенциальный прямой триггерный фактор схода ледяной лавины. Устойчивость ледников во время крупных сейсмических событий еще не полностью изучена, но имеющиеся наблюдения предполагают высокую устойчивость ледников к воздействию сейсмических толчков, как правило, большую, чем устойчивость скальных пород или снега (лавины) или почвы, что, вероятно, связано с пластичностью ледникового льда.

## 2.3 ПРОРЫВЫ ЛЕДНИКОВЫХ ОЗЕР

Для оценки уязвимости подпрудных ледниковых озер были предложены различные схемы, в основном с использованием информации дистанционного зондирования для полуколичественной характеристики криосферной среды, зоны озера и плотины и другие геотехнические и геоморфологические характеристики водосборного бассейна озера выше по течению (Хуггел и др., 2002; Мак-Киллоп и Клаг, 2007; Уорни и др., 2013). Потенциал обрушения неустойчивых ледовых и/или горных масс в озеро может быть определен по принципу наибольших из возможных дистанций выноса (подробности см. в разделе 3.1). Методы оценки были разработаны и адаптированы к региональной реализации, в частности для моренных озер, для которых Мак-Киллоп и Клаг (2007) сделали обзор многих имеющих отношение к этому вопросу факторов уязвимости, которые могут обусловить или спровоцировать прорыв дамбы (Иллюстрация 13). Наше руководство, приведенное ниже, в значительной степени основано на этой работе, но также рассматривает более полный спектр факторов, имеющих отношение к озерам, подпруженным ледяными, моренными и скальными дамбами. Окончательная оценка уязвимости для каждого конкретного озера, обычно основан на упрощенной, эмпирической схеме классификации или возможен статистический подход, там, где имеется достаточный исторический перечень событий. Что касается под- и внутриледникового стока из озер, то понимание этого процесса пока достаточно ограничено и надежные критерии оценки отсутствуют.

### 2.3.1 Криологические факторы

Основными ключевыми факторами уязвимости к ПЛО и результирующей величины события являются: размеры ледникового озера, механизм прорыва (и связанный с ним гидрограф паводка) и характеристики паводкового потока (определяемые уклоном русла и доступным обломочным материалом). Очевидно, что крупные озера могут вызвать паводки потенциально большего масштаба, но более крупные озера также более подвержены обрушению в них обломочных и ледяных масс. Площадь озера легко оценить по изображениям, полученным с помощью дистанционного зондирования. С другой стороны, прямые измерения объема озера выполняются редко из-за трудностей и опасностей, с которыми связаны батиметрические исследования в отдаленных регионах. Применение малоразмерных беспилотных лодок с гидроакустической аппаратурой обеспечивает безопасный и экономичный вариант исследования потенциально опасных паводковых озер с получением подробных батиметрических данных. Для исследований в региональном и бассейновом масштабе оценка объема озера первого порядка может быть получена из эмпирических уравнений на основе зависимости средних глубин с площадью озера (Фуджита и др., 2013; Хуггел и др., 2002; О'Коннор и др., 2001). Было показано, что рассмотрение геоморфологических условий (например, моренная, надледниковая ледяная дамба) значительно повышает достоверность оценки объема озера первого порядка (Кук и Куинси, 2015). Будущую угрозу можно ожидать там, где озера расширяются или вновь образуются в понижениях ложа ледника. Возможные места крупных переуглублений могут быть установлены на основе морфологических критериев (Фрей и др., 2010) или с помощью моделирования рельефа дна (см., например, Линсбауэр и др., 2016 год), хотя будущие объемы озера можно оценить только в пределах порядка величины.

Гляциодинамические показатели – (продвижение, отступление, откалывание глыб льда, уменьшение мощности за счет таяния и пульсация) могут отслеживаться на обширных территориях с помощью дистанционного зондирования и фотограмметрии, которые должны сочетаться с регулярным мониторингом развития озера и дополнением его описания. Мерзлотные условия должны быть охарактеризованы как для окружающих крутых склонов коренных пород (см. оценку вероятности схода каменных лавин), так и для участка плотины озера, для того, чтобы сделать вывод о наличии и вероятном состоянии любого грунтового льда в теле плотины (морена с ледяным ядром или аменный ледник), которые могут быть в высокой степени подвержены дальнейшему потеплению и таянию. В случае опасных плотинных сооружений можно использовать геофизические методы для более точного определения подповерхностных тепловых условий.

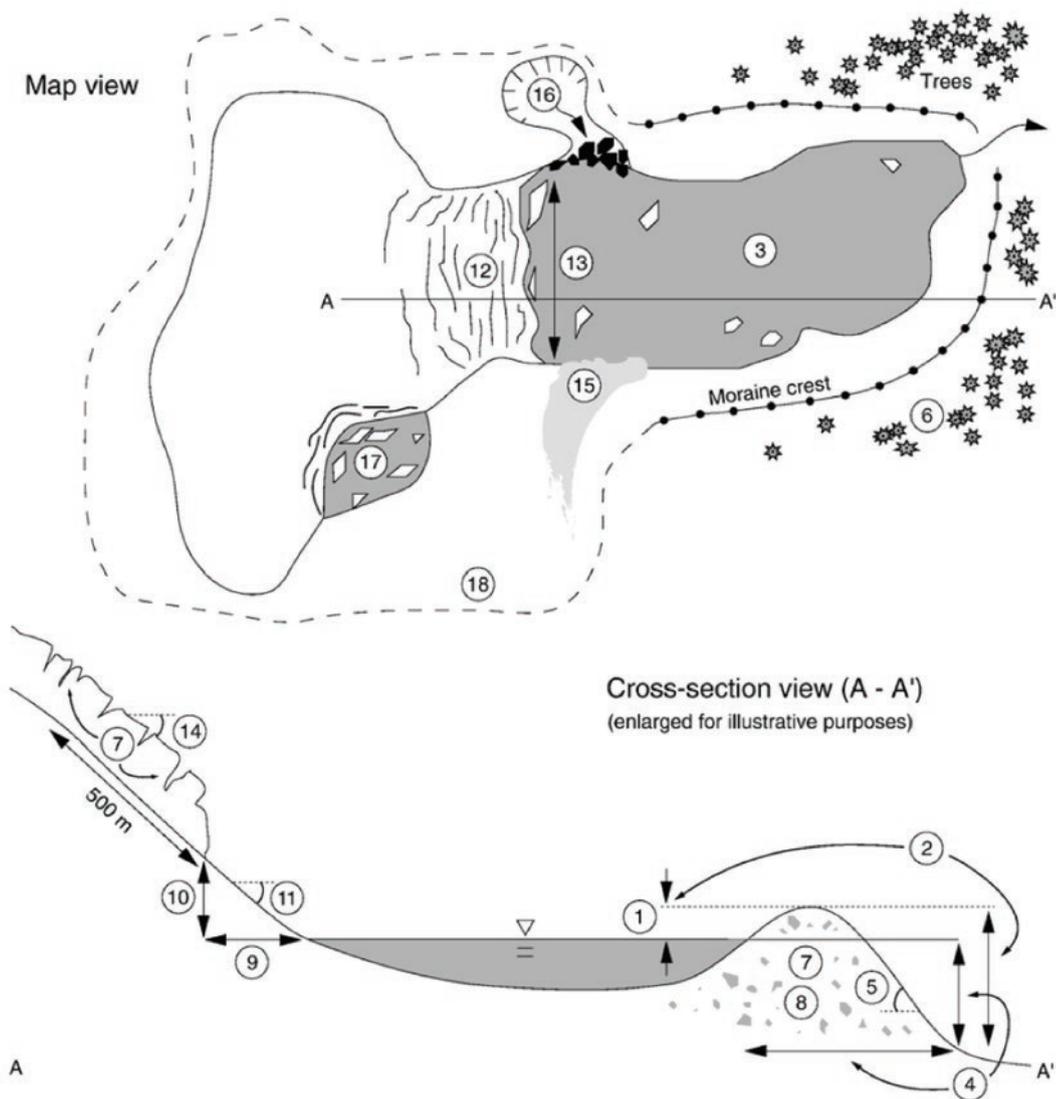
В то время как дренажные сети поверхностного стока могут наблюдаться непосредственно на леднике, связь озер с под- или внутриледниковыми системами можно установить только путем наблюдения за прошлыми дренажными процессами, в полевых экспериментах (например, отслеживания красителей) или моделированием.

### **2.3.2 Геолого-технические и геоморфологические факторы**

Следует различать факторы, которые имеют решающее значение для устойчивости озерной плотины и факторы, определяющие гидрологические изменения в водосборе озера и, таким образом, влияют на его уязвимость к прорывным явлениям, связанным с выпадением осадков или притоком талых вод.

С использованием оптических снимков высокого разрешения (например, доступным в Google Earth) и соответствующим высококачественным цифровым моделям стало возможным количественное определение различных физических характеристик плотин и площади водосбора для больших пространственных масштабов. Однако точные геометрические измерения (например, высота надводного борта плотины или высота плотины) и характеристики на месте (например, ледяное ядро и литология) могут быть получены только в поле.

Инструменты ГИС можно использовать для определения площади водосбора каждого ледникового озера вверх по течению и количественной оценки его ключевых гидрологических характеристик (Эллен и др., 2015). Тогда как, эмпирические данные, связывающие характеристики водосбора с уязвимостью ПЛО, остаются ограниченными, можно предположить, что озера, питаемые водосборами с большими уклонами поверхности и быстрее наполняются водой от осадков и таяния снега. Те же инструменты могут использоваться для установления морфометрических и геоморфологических характеристик пути паводка вниз по течению ниже озера.



**Иллюстрация 13:** Краткий обзор факторов, влияющих на устойчивость ледниковых озер с моренными плотинами (по Мак-Киллоп и Клаг, 2007 год). Эти факторы включают в себя: (1) высота надводного борта плотины; (2) отношение высоты надводного борта плотины к высоте гребня морены; (3) площадь озера; (4) отношение высоты морены к ее ширине; (5) крутизна нижнего откоса дамбы; (6) растительный покров плотины; (7) морена с ледяным ядром; (8) литологический состав морены; (9) расстояние между озером и ледником (расстояние по горизонтали); (10) рельеф озера и ледника (расстояние по вертикали); (11) уклон между озером и ледником; (12) трещиноватость ледника, (13) откалывание глыб льда от ледника по его передней ширине, (14) обрывистость выступа ледника, (15) снежные лавины, (16) оползни, (17) нестабильные участки в верховье озера, и (18) площадь водораздела.

## 2.4 СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ

Селепроявления в большой степени обусловлены рельефом, типом бассейна твердого питания и связанными с этим физико-геоморфологическими характеристиками селевого бассейна. Здесь мы сосредотачиваем внимание на оценке уязвимости тех очагов селеобразования, которые формируются в результате ледниковых и мерзлотных процессов, и/или, где криосферные процессы (таяние ледников, снега или вечной мерзлоты) могут вызвать селевой поток. Селевые потоки, вызванные прорывом ледниковых озер, рассматриваются в разделе 2.3. В целом пара- и периледниковая среда характеризуется обилием рыхлого обломочного материала, залегающих на крутых склонах, и поэтому, очень восприимчива к активизации селепроявления, которая может быть спровоцирована обильным снеготаянием или осадками.

### 2.4.1 Криосферные факторы

Изменения в ледниках могут оцениваться, как описано в п. 2.2.1, на основе анализа данных дистанционного зондирования в масштабах от регионального к бассейновому, чтобы помочь определить, где в результате отступление ледника обнажает новые зоны рыхлых осадочных отложений, или где уменьшение мощности ледников дестабилизируют прилегающие моренные отложения. Аналогичным образом, для вечной мерзлоты, здесь можно применять как моделирование, так и полевые исследования, как описано в п. 2.1.1, для характеристики состояния многолетней мерзлоты не только области аккумуляции, но и окружающих склонов, с которых в них сносится обломочный материал. Деформация склонов, измеренная наземными методами или методами дистанционного зондирования, также является показателем состояния вечной мерзлоты. В пределах области аккумуляции ключевыми параметрами, которые необходимо учитывать, являются глубина и сезонное оттаивание активного слоя (влияние, на глубину эрозии) и, как определяющий момент времени формирования и возможном объеме селевого потока. Пласты, вечной мерзлоты, действующие в качестве водоупоров на глубине в пределах зоны аккумуляции, могут выявляться геофизическими методами и могут разграничить зоны переувлажнения в вышележащих отложениях в периоды чрезмерного поступления талых или атмосферных вод. Снежники как источники талой воды могут картироваться путем дистанционного зондирования и полевых рекогносцировок, и они наиболее опасны, когда расположены в зоне контакта скальной поверхности с конусами и шлейфами осыпей (Хуггелл и др., 2004а). Интенсивность морозного выветривания значительно зависит от высотного положения и экспозиции склона, при этом повышенная скорость проявлением обвальнo-осыпной деятельности и образование обломочного материала наблюдается на затененных склонах и в зонах вечной мерзлоты (Сасс, 2005). Для определения потенциала морозного выветривания в тех или иных областях можно использовать различные температурные индексы, а также оценить влияние современных климатических изменений на интенсивность морозного выветривания (см., например, Йомелли и др., 2004, 2007).

### 2.4.2 Геотехнические и геоморфологические факторы

Ключевое различие обычно проводится между активными и реликтовыми областями обломочной аккумуляции (Сэттлер, 2014 год). Активные области постоянно пополняются отложениями за счет выветривания, склоновых, или флювиальных процессов. Осадочные накопления в таких областях (например, коллювиально-пролювиальные шлейфы, русловые наносы, оползневые накопления) являются очагами зарождения обычно небольших селей, так

как объем твердого питания от таких источников невелик (ограничен запасом). Соответственно частота селепроявлений также может быть низкой, поскольку после схода очередного селя необходимо время для регенерации резервуара (накопление обломочного материала). И наоборот, в отличие от активных областей, реликтовые области аккумуляции больше не пополняются за счет активных процессов и могут формироваться в течение длительного периода времени. Связанные селевые потоки, питающиеся материалом из таких областей (например, морены, речные террасы или оползневые отложения) могут достигать большой величины, так как в движение приходят большие объемы, и такие события могут происходить с высокой частотой до истощения источников питания. Горные ледники могут служить областями аккумуляции обоих типов, в зависимости от степени их активности.

Для зон аккумуляции отложений, питанием которых служат механическая и термическая эрозия прилегающих скальных склонов, оценка должна учитывать факторы, влияющие на возникновение опасности каменных лавин, в том числе факторы, определяющие скорость формирования обломочного материала – такие как плотность трещин, ускорение денудации из-за тектонического подъема и складкообразования и направление падения пластов. Аналогичным образом, некоторые литологические структуры (например, осадочные породы), как было показано в некоторых исследованиях более подверженные морозному выветриванию, чем кристаллические породы (Андрэ, 2003). Физические свойства отложений зон аккумуляции (например, гранулометрический состав, проницаемость и прочность на сдвиг) могут быть непосредственно определены полевыми исследованиями, хотя некоторые характеристики могут выведены из литологии исходных пород. Однако эмпирические зависимости еще недостаточно хорошо установлены, иногда противоречивы и частично зависят от результирующего триггерного механизма. Что касается моренных отложений, то их рыхлость, слабая сортированность, пористость и высокая проницаемость связана с высоким уровнем неустойчивости.

Исследования показали, что процент растительного покрова на площади водосбора является важным контролирующим фактором, как для частоты, так и масштаб селепроявлений. Растительный покров закрепляет поверхностные слои от размыва, стабилизирует русла и уменьшает поверхностный сток (см., например, Гринвуд и др., 2004). В недавно появившихся перигляциальных средах или перигляциальных ландшафтах растительный покров отсутствует, что увеличивает уязвимость таких зон.

Крутизна склонов в зоне твердого селевого питания можно считать основополагающим фактором для аккумуляции наносов и формирования селевых потоков. Коста (1984) определил интервал уклонов от 15° до 20°, как общий нижний порог для формирования селевого потока в то время как наблюдаемые углы наклона обычно находятся в пределах от 20° до 45° (Короминас и др., 1996). Верхние границы относятся к углу естественного откоса осыпей и других обломочных пород, а более крутые склоны обычно покрыты слишком маломощным или прерывистым обломочным чехлом, чтобы он мог иметь какое-либо значение. Кроме того, топографические изломы (например, выпуклый крутой склон с более пологим вогнутым нижним участком) могут представлять зоны повышенной уязвимости из-за концентрации стока в низких градиентах склонов (Ларссон, 1982). Такие зоны часто обнаруживаются на границе между осыпей, где на затененных участках можно видеть снежники (Хуггел и др., 2004).

Локальную сейсмичность следует оценивать в связи как с прямым провоцированием селевых потоков за счет разжижения, так и с их подготовкой за счет активизации обвально-осыпной деятельности на ослабленных склоновых структурах.

## **2.5 ЛОКАЛЬНЫЕ УГРОЗЫ МЕРЗЛОТНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ**

Местные опасности мерзлотного происхождения имеют отношение к объектам инфраструктуры, которые частично или полностью расположены поблизости или поверх вечномерзлых коренных или обломочных горных масс, затронутых вечной мерзлотой и ледниками. Изменения в динамике вечной мерзлоты и ледников могут быть результатом атмосферного потепления, но также и взаимодействия человека с окружающей средой. Оба эти фактора способны вызывать изменения термических, механических и гидрогеологических свойств коренных или обломочных горных пород в районах многолетней мерзлоты и современного оледенения (Грубер и Хэберли, 2007; Хэберли, 2005; Краутблаттер и др., 2013).

Происходящие в результате этого изменения в устойчивости и гидродинамике влияют на высокогорную (i) транспортную инфраструктуру (фуникулёры, железные дороги, зубчатые поезда, туннельная инфраструктура), (ii) жилую и гастрономическую инфраструктуры (гостиницы и альпийские хижины), и (iii) развлекательно-спортивную инфраструктуру (лыжные и альпинистские объекты). Типичные опасности включают в себя медленное и быстрое оседание, обводнение и подтопление, горные обвалы, обрушение скальных склонов, медленное гравитационное сползание чехла рыхлых пород (крип), влияющую на инфраструктуру и прилегающие территории (Фишер и др., 2010, 2013; Филлипс и др., 2016; Погребиский и Чернышёв, 1977). Из-за чувствительности нарушенных горных масс и осыпных склонов малые природные или антропогенные изменения геологической среды могут вызывать широкое распространение опасности и приводить к необходимости весьма дорогостоящих защитных мероприятий, реструктуризации или отказу от инфраструктурных объектов.

Первые осторожные попытки делаются в направлении разработки рекомендаций или руководящих принципов для строительства с целью помочь им избежать опасностей, связанных с мерзлотными процессами (Боммер и др., 2010). Некоторые страны также начали систематическую инвентаризацию объектов инфраструктуры, которой потенциально угрожает деградация вечной мерзлоты и отступания ледников, например, во Франции идентифицировано более 1700 таких объектов 10% из которых относятся к категории высокого риска (Дювийар и др., 2015). К настоящему времени разработаны структурные меры противодействия, включая современные системы анкеровки и цементирования для предотвращения теплопередачи и чрезмерной нагрузки, выдавливающей лед из мерзлых пород (Лин и др., 2015; Филлипс, 2000; Плескен и др., 2017).

### **2.5.1 Криологические факторы**

Механическая устойчивость склонов, сложенных мерзлыми породами, зависит от прочности коренной породы с заполненной льдом пористостью, прочности контактных слоев породы и льда в трещинах и прочности льда в трещинах. Все три фактора значительно снижаются от  $-5^{\circ}\text{C}$  и

0°C (Аренсон и др., 2007 год; Дэйвис и др., 2001 год; Краутблаттер и др., 2013 год). Многократное замерзание и продолжительная сегрегация льда при отрицательных температурах приводит к усталости материала и может значительно понизить механическую прочность коренной породы. (Джиа и др., 2015 год; Мёртон и др., 2016 год). Массы горных пород подвергаются высоким уровням быстро меняющихся напряжений. Они возникают из-за повышенного гидростатического давления в верховодке над слоями вечной мерзлоты и повышенного криостатического давления, обусловленного сегрегацией льда (Фишер и др., 2010 год; Джиа и др., 2017 год).

Механические свойства, оседание и сползание насыщенного льдом обломочного материала зависят от условий напряжения (сил спуска и нагрузки), пропорциональным содержанием льда и обломочного материала (примесей), температуры льда, содержанием воды во льду, а также запаса воды и тепла в ледниковом теле (Аренсон и др., 2016 год; Аренсон и Спрингмэн, 2005 год; Бадд и Джекка, 1989 год). Недавние исследования показывают возможность опасных быстрых подвижек каменных ледников с амплитудой в метры и десятки дециметров в год (Кееб и др., 2007 год; Кеннер и др., 2014 год).

### **2.5.2 Геолого-технические и геоморфологические факторы**

В дополнение к ряду геолого-геоморфологических и геотехнических свойств, влияющих на все горные склоны, распространение вечной мёрзлоты, динамика ледников и снежного покрова могут значительно влиять на устойчивость склонов с вечной мерзлотой и быстро реагировать на климатические колебания (Фишер и др., 2010 год; Фишер и Хуггель, 2008 год).

Влияние динамики вечной мерзлоты на устойчивость горных склонов рассматривается детально лишь в немногих исследованиях. Часто сообщается о наличии льда в зоне неустойчивости, где развивается отрыв (Драмис и др., 1995 год; Грубер и Хэберли, 2007 год). Взаимосвязь между динамикой вечной мерзлоты и оползневыми процессами в некоторых случаях выводилась из реконструированного термического поля. Хуггель (2009) утверждает, что зоны срыва каменно-ледяных лавин могут коррелировать с зонами температурных возмущений, вызванными термическим взаимодействием мерзлотного и ледникового льда, вулканическими и геотермальными эффектами и климатическими изменениями. Эта взаимосвязь была, например, предложена для Колка-Кармадонского оползня на Кавказе (Хэберли и др., 2003), лавин в Ильямна на Аляске (Хуггель и др., 2007а), лавины на горе Стеллера на Аляске (Хуггель и др., 2008 год), и обвала на г. Монте-Роза в Италии (Фишер и др., 2006 год). Чувствительность вечной мерзлоты к атмосферному потеплению и последующее усиление активности обвалов были продемонстрированы в Европейских Альпах жарким летом 2003 года (Грубер и др., 2004). Более того, пространственная связь между деградацией вечной мерзлоты и обвалами установлена Нётцли и др. (2003) в Европейских Альпах и Элленом и др. (2009) в Южных Альпах, Новой Зеландии. Коу и соавторы (2017) связали недавнее учащение крупных сходов высокоподвижных каменных лавин на юго-востоке Аляски с деградацией горной многолетней мерзлоты.

С точки зрения механики наличие вечной мерзлоты может повышать напряжение сдвига из-за изменения гидростатического-и криостатического давления, то есть из-за сегрегации льда. Таяние вечной мерзлоты также может снижать силу сопротивления сдвигу горных масс, поскольку таяние меняет механические свойства неповрежденной породы, процесс развития трещин и процессы трения в слоях контакта горных пород, горных пород и льда, льда и мёрзлого материала в трещинах (Краутблаттер и др., 2013).

Применительно к напряжению сдвига проницаемость мёрзлой трещиноватой породы на 1-3 порядка ниже проницаемости идентичных талых пород (Погребиский и Чернышев, 1977). Сочетание залегающих грунтовых вод и систем глубоких свободных от мерзлоты трещиноватых пластов представляет большую трудность при сооружении туннелей из-за проникновения воды в вечно мёрзлой толщине, например, близ Эгюий-дю-миди (Франция) и Юнгфрау (Швейцария) в 2003 год, а также в горном туннеле Цинхай-Тибетской железной дороги в горах Куньлунь (Хаслер и др., 2008 год; Танг и Ванг, 2006 год; Вегманн, 1998 год). Существенную роль в дестабилизации склонов может играть гидростатическое давление, возникающее из-за перекрытия льдом поверхностей, как показало комбинированное гидромеханическое моделирование каменной лавины объемом  $3 \times 10^5$  куб. м, сошедшей близ г. Черва в 1988 году (Фишер и др., 2010), и наблюдавшийся после обвалов излив напорных вод из-под горных склонов, например, на скальных уступах долины Колка-Кармадон и горы Стеллера (Хэберли, 2005; Хуггель, 2008). Сегрегация льда требует отрицательного интервала температур ( $-3^{\circ}\text{C}$ ... $-6^{\circ}\text{C}$ ), подачи воды и внутритрещинного давления, несколько превышающего предел коррозии под напряжением. Эти условия часто совпадают в основании активного слоя над вечномёрзлым пластом (Халлет и др., 1991 год; Мёртон и др., 2006 год). Значения давления вспучивания от 20 до 30 МПа превышают даже предел прочности при растяжении прочных горных пород и может вызвать распространение трещин (Халлет и др., 1991; Джиа и др., 2017).

Что касается сопротивления сдвигу трещины, заполненные льдом, реагируют на различные механические процессы, действующие индивидуально, последовательно или совместно: (1) трение/растрескивание вдоль контактов скальных пород; (2) трение/растрескивание вдоль контактного слоя скальных пород и льда; (3) разрушение/деформация трещиноватого льда и, если имеется, (4) деформация мёрзлого, заполняющего трещины, материала.

Для насыщенной неповрежденной породы Меллор (1973) показал снижение однонаправленного усилия сжатия в пределах от 20% до 50% и снижение предела прочности при растяжении от 15% до 70%. Это снижение имеет корреляцию с пористостью и водосодержанием породы и соответствует изменениям отношения Пуассона, модуля Юнга и жесткости стыка; оно более выражено для прочности при растяжении, чем для прочности при сжатии (Гламхеден, 2001 год; Инада и Йокота, 1984 год). Одновременно с этим также существенно изменяется вязкость разрушения, ее субкритическое распространение разрыва и трение вдоль трещин мёрзлых коренных пород (Двиведи и др., 2000; Краутблаттер и др., 2013; Ли и др., 2003). Поведение поликристаллического трещиноватого льда под постоянной нагрузкой зависит от напряженно-деформированного состояния и скорости нагружения. Лёд проявляет упругую и вязкую ползучесть (первичная, вторичная и третичная ползучесть) без разрушения при медленном сжатии. Скорость деформации сдвига зависит от напряжения сдвига, а также от температуры, ориентации кристаллов, примесей, водосодержания и др. Лед деформируется по хрупкому и вязко-хрупкому типу до наступления разрушения при превышении определенных пороговых значений уровня напряжения, скорости или величины деформации (Сандерсон, 1988). Как показали эксперименты с деформацией сдвига в образцах изо льда и бетона, напряжение сдвига при разрушении по заполненным льдом трещинам является функцией температуры и нормального напряжения, т.е. сила сопротивления сдвигу по трещине падает при подъеме температуры льда между  $-5^{\circ}\text{C}$  и  $0^{\circ}\text{C}$  (Дэйвис и др., 2000). В более реалистичных экспериментах с постоянным напряжением сдвига разрушение образца происходит на контакте льда с бетоном и напряжение сдвига при разрушении определяется нормальными напряжением

и температурой. (Гюнцель, 2008; Краутблаттер и др., 2013). Трещины в мёрзлых коренных породах с замороженным заполняющим материалом, предположительно, могут быть связаны с исследованиями в области многолетне-мерзлых грунтов. Аренсон и др. (2007) пришли к выводу, что прочностные характеристики вечномерзлых пород определяются объемной долей льда и скоростью деформации. Прочность повышается с уменьшением объемной доли льда в породе благодаря повышению коэффициента трения между ее твердыми частицами. Лёд представляет собой связь между частицами и обеспечивает сцепление, что выражается в значительно более высокой прочности образца в начале сдвига с относительно низкой скоростью деформации по сравнению с не замороженными образцами. При высокой скорости деформации прочность замороженной породы приближается к прочности не замороженной. При снятии нагрузки происходит после-деформационная регенерация льда за счёт рекристаллизации, с восстановлением прочностных свойств образца (Аренсон и Спрингман, 2005).

Для ограничения механических моделей в связанных с местными опасностями мерзлотного генезиса, могут быть необходимы лабораторные испытания механической прочности материалов в замороженном состоянии (Аренсон и др., 2007; Джаи и др., 2015; Краутблаттер и др., 2013). Геофизические методы могут обеспечить быстрое понимание и помочь в мониторинге соответствующих геотехнических и мерзлотных условий (Хаук и др., 2011 год; Хайнке и др., 2006 год; Хилбич и др., 2008 год; Кёшник и др., 2016 год; Краутблаттер и Дребинг, 2014 год; Маньин и др., 2015 год). Технологии LiDAR, SAR и технологии дистанционного зондирования способны быстро определять размеры зон просадок и перемещения пород, а также временную эволюцию при повторном применении (Кеннер и др., 2014).

В опасностей характерных для данной местности, их воздействие проявляется в зоне нестабильности, а не ниже по склону или долине, как в случае, например, ПЛО или лавин. Следовательно, с практической точки зрения, существует менее четкое различие между оценкой уязвимости или устойчивости и оценкой воздействия. Поэтому мы рекомендуем выполнять следующие ключевые этапы оценки (см. Таблицу 5):

- Геологическая, геотехническая и гидрогеологическая разведка потенциально неустойчивых или перемещающихся структурных геологических масс, а также потенциальных гидрологических проблем;
- Разведка мерзлотных условий и их изменения; здесь для быстрой предварительной оценки и мониторинга могут быть использованы геофизические методы;
- Геомеханический анализ или моделирование скомбинированной механической устойчивости горных пород и льда и гидрогеологическая оценка будущей проблемы.

## 3. ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ

### 3.1 ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ

К предварительной оценке опасности, мы относим те методы, которые дают первое представление о степени и угрозе природных опасностей, но где их интенсивность не моделируется физически. Обычно эти методы сочетают эмпирические оценки возможного масштаба событий (объемов лавин или паводковых вод и их пиковый расход) и их территориального охвата, с использованием простых гидрологических моделей или алгоритмов направления потока, которые охватывают основной путь движения главного русла паводкового потока или лавины вниз по течению или по склону (Эллен и др., 2016; Хортон и др., 2013; Хуггел и др., 2003; Рунс и др., 2016; Уотсон и др., 2015). Такие методы широко применялись при исследовании опасностей гляциального и мерзлотного происхождения за последнее десятилетие, и служат нескольким целям:

- Определению, на промежуточном этапе, мест наибольшей потенциальной опасности или очагов риска, где могут быть сосредоточены дальнейшее изучение, полевые исследования и моделирование на основе процессов и картирование опасностей.
- Как альтернатива основывающегося на процессах моделирования и картирования опасностей, где качество и разрешение данных предотвращают использование более сложных методов.
- Выявление потенциальных каскадных процессов и цепных реакций.
- Для раннего предупреждения будущих угроз.

Модели направления (маршрутизации) потоков на основе ГИС требуют минимальные вычислительные мощности даже для крупномасштабных приложений (например, целый горной хребет) и обычно применяются с использованием имеющихся в свободном доступе цифровых данных абсолютных высот с разрешением сетки от 30 до 90 м (например, ASTER GDEM или SRTM). Главное ограничение этих методов состоит в невозможности установить действительное физическое поведение потоков и перемещающихся горных масс, например, перелив через преграды в русле или трансформации потока и таких физических параметров, как высота потока, динамическое давление, скорости и др., не моделируются. Эти модели дают, скорее, приблизительную оценку возможной области вниз по склону или по течению, на которую может повлиять данное событие. Там, где моделируемые пути пересекаются с другими потенциально опасными источниками (например, с озерами, или крутыми неустойчивыми скоплениями обломочного материала) можно ожидать вероятность вторичных событий или трансформации потока.

Ключевой концепцией в предварительной оценке опасности являются эмпирические значения уклонов отдельных участков или общего уклона трассы от начальной до конечной точки, часто используемые для определения максимального расстояния, которое может преодолеть поток. Там, где это возможно, специалисты-практики должны определять дистанцию потока исходя из сопоставимых событий, происходивших в аналогичной или похожей изучаемой среде. Для оценки первого порядка в Европейских Альпах были установлены ориентировочные значения уклона: 17° для ледяных лавин, 11° для селевых потоков и 2° – 3° для потоков с небольшой объемной долей обломочного материала (Хуггел и др., 2004). Подвижность каменных лавин

в значительной мере обусловлена их общим объемом и содержанием воды и льда, при этом некоторые из наиболее крупных событий, зарегистрированных во всем мире достигали угла наклона лишь 6° (Шнайдер и др., 2011).

### 3.2 ПОСТРОЕНИЕ СЦЕНАРИЯ

Сценарии событий, в контексте оценки опасностей ледникового и мерзлотного происхождения, отражают ожидаемую частоту и масштаб событий. Сценарии имеют по определению прогнозный характер, однако не всегда учитывают широкий спектр будущих механизмов и опасностей, таких, как изменение климата и связанные с ним воздействия на криосферу. Следовательно, следует четко определить временной горизонт в течение которого определенный сценарий будет действителен. Если предполагается, что сценарий будет действовать в течение более длительного времени (несколько десятилетий), необходимо надлежащим образом учитывать соответствующие будущие климатические изменения, которые, в свою очередь, можно представить различными сценариями (например, связанных с низкими и высокими выбросами парниковых газов). Таким образом, сценарии опасности могут быть независимыми или связанными с климатическими сценариями, в зависимости от временного горизонта, в пределах которого оценка опасности считается действительной.

Как указано во введении к общей схеме оценки, цель разработки сценариев состоит в том, чтобы установить три опасности сценария для моделирования опасностей на основе процессов, при котором оценивается потенциальная масса или объем, возникающий при малом, среднем или крупном событии, и присваивается соответствующая наилучшая оценка вероятности возникновения такого события. Важно, что эти сценарии обычно учитывают только массу или объем, вовлеченные в первичное событие, в то время как последующее вовлечение материала по пути схода или руслу потока может оцениваться на основе моделирования условий, складывающихся в нижней части склона или долины.

Эксперт может установить возможные сценарии событий на основе следующих основных источников информации:

- Информация, собранная при оценке уязвимости/устойчивости территорий величиной от бассейна до конкретного участка.
- Выводы, сделанные по результатам местных исторических обзоров и полевых данных прошлых событий.
- Выводы, основанные на данных и понимании соответствующих процессов из международной литературы.

В идеале случае эксперт, чтобы определить уровни вероятности для трех сценариев будет использовать в первую очередь количественную информацию, полученную из оценок уязвимости и устойчивости, подкрепленную там, где это необходимо и возможно, полевыми исследованиями, доступными данными исторических обзоров, международным опытом и пониманием процессов. Принимая во внимание быстро меняющиеся условия окружающей среды при разработке сценариев должны объединять новейшие знания об изменении ледниковых и перигляциальных ландшафтов, и итоговые последствия в частоте и масштабе событий (также см. Часть I). Следует четко определить, для какого периода времени эти сценарии действительны

(например, на 5 или 10 лет) по истечении которого сценарии необходимо будет пересмотреть и произвести повторную оценку.

Предусмотрены следующие возможные подходы к разработке сценария:

- Степени вероятности присваиваются на основе тщательного рассмотрения основной оценки уязвимости и устойчивости. Возможны все сочетания степеней вероятности и масштабов событий.
- Применяется простая обратная зависимость частоты масштаба событий, то есть большому сценарию приписывается наименьшая вероятность, а малому сценарию – наибольшая вероятность.
- При отсутствии достаточных оснований и аргументов для распознавания вероятностей, может оказаться целесообразным поддерживать одинаковый уровень вероятности для всех трех сценариев, т.е. все три сценария считать одинаково вероятными.

Ввиду возможности того, что возможные экстремальные события, характеризующиеся очень низкой вероятностью могут быть весьма масштабными, таким событиям можно предложить единственный "наихудший" сценарий. Такой подход целесообразен, например, для озера с большим объемом воды, которое, как считается, имеет очень низкую вероятность прорыва. Согласно результатам моделирования опасностей (см. раздел 3.2) площадь, которая может быть охвачена таким событием наихудшего случая, можно отметить как зону остаточной опасности.

Невозможно дать рекомендации о том, как следует разрабатывать сценарии, и значительную роль в этом занимает экспертная оценка. Также рекомендуется чтобы сценарии обсуждались и утверждались с участием компетентных представителей местной администрации. Например, вопрос о том, следует ли моделировать „наихудший“ сценарий и каким образом, должен быть предметом обсуждения с администрацией и компетентными учреждениями, поскольку он включает политическое и общественное решение. «Наихудший случай» может быть включен как смоделированный большой сценарий, включаемый отдельно как остаточная опасность (как описано выше) или не моделироваться вообще. Неопределенности связанные со сценариях должны быть ясной, открытой, прозрачной и воспроизводимой образом. Приведенные ниже примеры служат для дальнейшей иллюстрации того, как эксперт может подходить к разработке сценариев ключевых процессов.

### **Пример 1: Каменная лавина**

В случае потенциальной неустойчивости коренных пород эксперту следует исходить из оценки устойчивости и специфических факторов, таких, как геометрия нарушений, их расположение по отношению к рельефу склона, чтобы определить мощность пласта породы, клина или блоков, с которых может начаться обрушение. Такое событие может быть приписано малому сценарию с высокой вероятностью. Там, где неустойчивые породы несут на себе поддерживают крупный массив пород (например, в ситуации с опорой), обрушение всего этого массива может составить большой сценарий. В зависимости от геотехнической конфигурации можно принять, что большой и малый сценарии имеют равную вероятность, или устойчивость верхнего массива может быть достаточна для того, чтобы большому сценарию была приписана малая вероятность. Если доступны данные с высоким разрешением по конкретным участкам,, количественную основу разработки сценария может дать кинематическое моделирование склона. Там, где отсутствуют

местные геотехнические наблюдения, потенциальные сценарии могут быть выведены на основе прошлой оползневой активности в данном бассейне, а определенные литологические единицы могут быть связаны с характерными механизмами обрушения, глубинами и объемами. Например, структуры тонкослоистых пород могут быть более предрасположены к частым камнепадам небольшого объема, чем к крупным катастрофическим разрушениям.

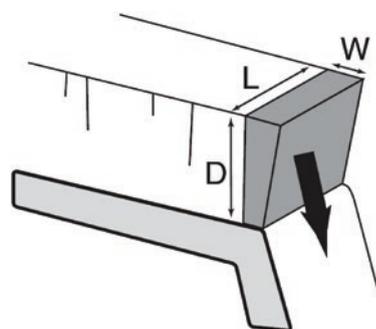
### Пример 2: Ледяные лавины

Определение массы льда, который может быть вовлечен в потенциально возможную лавину, представляет собой сложную задачу. В некоторых случаях для картирования зон возможного отрыва ледяной массы служило определение характера трещиноватости пород (Шауб и др., 2015), однако такой подход может оказаться ненадежным в других случаях. Там, где ледник пересечен крупными трещинами, а на участке вниз по склону наблюдаются признаки увеличения скорости, можно с большой долей уверенности определить зону неустойчивого состояния (Файеттас и др., 2015). Хуггель и др. (2004) предложили простую аппроксимацию для ситуаций фронтального обвала на основе данных Швейцарских Альпах (Иллюстрация 14), где объем определяется исходя из длины уступа ( $L$ ), ширины ( $W$ ) и мощности/глубины ( $D$ ). В тех случаях, когда эти значения не могли быть получены дистанционным зондированием, из топографических карт или полевых изысканий, было обнаружено, что допустимые значения находятся приблизительно в диапазоне 10 – 20 м для ширины (как точка, в которой ледники скального типа обычно отрываются от передней части фронта ледника), а толщина в пределах 50 – 60 м. Насколько эти данные верны для других горных регионов, неясно. Для ситуаций типа обрыва для Альп предлагаются максимальные объемы в  $5 \times 10^6$  куб. м (Хуггель и др., 2004), однако в других регионах мира эти цифры были превышены на порядок, в частности, когда отрывались целые ледниковые языки (Эванс и др., 2008; Хуггель и др., 2010; Тянь и др., 2017). Это подчеркивает, что эмпирические правила предоставляют только полезные рекомендации и не гарантируют, что события превосходящего масштаба не произойдут.

При отсутствии дополнительных местных данных в случае ледяных лавин может быть достоверно применена типичная обратная взаимосвязь между частотой и величиной. Такой подход можно считать наиболее надежным для ледников скального типа, где небольшие и частые лавины представляют собой естественный процесс абляции.

### Пример 3: Прорывы ледниковых озер

Сценарии для ледниковых озер сложны из-за разнообразия триггерных механизмов, типов озер и состава плотин. Для озер, перекрытых коренными породами, где единственным вероятным механизмом прорыва является ударная волна, вызванная гравитационным перемещением горных пород, весьма приблизительно объем вытесняемой воды будет равен объему потенциально попадающей в озеро оползнево-обвальной массы. В этом случае вероятность



**Иллюстрация 14:** Оценка объема ледяной лавины при фронтальном обвале на основе длины ( $L$ ), ширины ( $W$ ) и мощности/глубины ( $D$ ) неустойчивого блока.

будет также связана с оценкой устойчивости льда и коренных пород окружающих склонов. Для озер с моренными плотинами, большой сценарий будет включать в себя прорыв плотины и излив всей массы озера. Вероятность этого события будет зависеть главным образом от морфометрии плотины, поскольку крутые и узкие плотины наиболее подвержены необратимой эрозии. Из-за склонности процесса размыва плотин к саморазвитию, для наиболее уязвимых структур плотины большой сценарий можно считать столь же вероятным, как и малый. В случае более благоприятной морфометрии плотины сокращение оттока и прекращение эрозии может произойти задолго до опустошения всего объема озера, что делает более вероятными малые сценарии событий, вызванных обрушением в озеро оползнево-обвальной массы, а также событий, вызванных просачиванием и туннельным размывом плотины. Поскольку экстремальные гидрометеорологические явления по определению происходят реже, чем более умеренные, то к прорывным явлениям, спровоцированным осадками или снеготаянием, можно обоснованно применять обратную зависимость «частота-величина».

На основании эмпирических данных максимальный объем паводка зависит от объема воды озера (Хуггел и др., 2002). Для моренных озер, определяющим фактором является скорость и степень развития промыва, имитацию которых можно выполнить методами моделирования (например, BASEMENT), где доступны гипсометрические данные высокого разрешения и батиметрические данные. Обычно озера, подпруженные ледяными плотинами, имеют под- и внутриледниковый сток, порождая малые паводки по сравнению с моренно-подпрудными озерами аналогичного размера. Однако для сценариев, связанных с механическим разрушением льда, пиковый расход паводка может быть сравним с пиковым расходом моренно-подпрудных озер, в то время как большие озера, подпруженные пульсирующими ледниками, могут вызывать события исключительно большой величины и высокой вероятности (Хэррисон и др., 2014).

### **3.3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ОПАСНОГО ЯВЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ**

Доступность инструментов численного моделирования для моделирования сценариев катастрофических перемещений горных масс за последние годы существенно возросла и обеспечивает основу для физически обоснованного картографирования интенсивности событий для каждого сценария опасности (обзор широко применяемых моделей см. в Приложении 2). Оптимального (наилучшего) подхода не существуют, и выбранные модели должны соответствовать местным требованиям, ресурсам и доступности данных.

Чтобы связать моделирование сценария с соответствующим уровнем опасности, желательно использовать матричный метод классификации опасности, как например, это принято в швейцарских кодексах практики (Раэтцо и др., 2002). Матрица сопоставима с классификационными схемами, используемыми в нескольких других странах (см., например, Фибигер, 1997; Гарсия и др., 2003; Хамберт, 1977; Йакоб, 2005; Валланс и др., 2003).

Для каждого сценария матрица «3 на 3» связывает уровни интенсивности моделируемого паводка или перемещения горных масс с приписанной этому сценарию уровню вероятности, чтобы установить опасность или ее уровень (Иллюстрация 15). Затем можно наложить несколько сценариев (например, малые, средние, большие сценарии) и настроить их путем полевого картирования, чтобы получить карту опасностей. Общая схема может быть применена

к различным явлениям (паводки, сели, оползни, лавины и др.), и остается достаточно гибкой, поскольку лежащие в ее основе уровни вероятности и интенсивности можно вычислить различными способами и с различными уровнями количественной оценки в зависимости от шкалы оценки.



**Иллюстрация 15:** Матричный подход для увязки оценки уязвимости (вероятности) с моделированием интенсивности на основе сценария для получения классификации опасности. Цвета обычно соответствуют национальным стандартам.

Согласно швейцарской практике, классы качественной интенсивности основаны на количественных показателях интенсивности процессов (см. Таблицу 1) и относятся к потенциальному ущербу, который данное явление может причинить людям и имуществу (если таковое имеется). Заметим, однако, что оценка принимается чисто гипотетически, и фактически не учитывает подвергаются ли люди и имущество воздействию моделируемого явления (как он рассматривался бы при оценке риска).

**Высокая интенсивность:** люди и животные могут получить травмы внутри помещений; возможны сильные повреждения и даже полное разрушение зданий.

**Средняя интенсивность:** люди и животные могут получить травмы за пределами здания, но уровень угрозы внутри помещений низкий; возможны небольшие повреждения зданий.

**Низкая интенсивность:** люди и животные подвергаются незначительной угрозе, в том числе вне зданий (за исключением каменных и глыбовых лавин, которые могут травмировать или убить людей и животных); возможны поверхностные повреждения зданий.

Для определения этих классов интенсивности могут применяться различные количественные критерии с использованием одного или нескольких результатов имитационного моделирования. На примере селевого потока, исследования показали, что динамическое

давление главным образом зависит от скорости, хотя также важна и глубина потока. Следовательно, некоторые авторы решили объединить оба фактора для определения результирующей интенсивности потока (Хёрлиманн и др., 2006; Шнайдер и др., 2014). Для других процессов, таких, как обвалы и лавины, динамическое давление может быть прямым результатом моделирования. Ориентировочные значения, предложенные в Швейцарии для определения классов интенсивности опасности для различных высокогорных процессов, приведены в Таблице 1. Эти определения должны служить только в качестве общего руководства, другие определения могут использоваться в соответствии с национальными руководствами. Следует заметить, что для некоторых процессов действительны не все три класса интенсивности, например, в зоне воздействия каменной лавины интенсивность всегда считается высокой. Аналогично, в соответствии со швейцарскими правилами, для селевых потоков низкая интенсивность не учитывается.

**Таблица 1.** Ориентировочные значения для классификации интенсивности различных высокогорных опасностей, используемые в швейцарской практике (по Хэрлиманн и др., 2006; Рээтцо и др., 2002).  $E$  – кинетическая энергия,  $v$  – скорость,  $h$  – глубина потока или высота слоя отложений.

Явление	Низкая интенсивность	Средняя интенсивность	Высокая интенсивность
Обвал	$E < 30$ кДж	$30 < E < 300$ кДж	$E > 300$ кДж
Каменная лавина			$E > 300$ кДж
Оползень	$v \leq 2$ см/год	$v$ : дм/год ( $> 2$ см/год)	$v > 0.1$ м/день для маломощных оползней; перемещение $> 1$ м за 1 событие
Селевой поток (единичный параметр)		$h < 1$ м	$h > 1$ м
Селевой поток (множественный параметр)		$h < 1$ м or $v < 1$ м/с	$h > 1$ м and $v > 1$ м/с

Во Вставке 1 приводится наглядный пример применения моделирования и классификации интенсивности опасности для картирования опасности селевого потока. Необработанные результаты численного моделирования и классификации опасностей следует рассматривать только как предварительную карту опасностей, которая требует обязательного сопоставления и подтверждения картографическими результатами полевых изысканий и историческими архивами. Как указано в разработке сценария, чрезвычайно редкие и потенциально крупные события не включены в матричный классификационный метод. Такие весьма с очень низкой вероятностью обычно классифицируются как зона остаточной опасности с высоким смоделированным уровнем интенсивности (например, в Швейцарии эта зона распространяется на события с периодом повторения свыше 300 лет). Значение окончательных классифицированных уровней и соответствующих ответных мер руководства будут изменяться в зависимости от местного социального, управленческого и правового контекста.

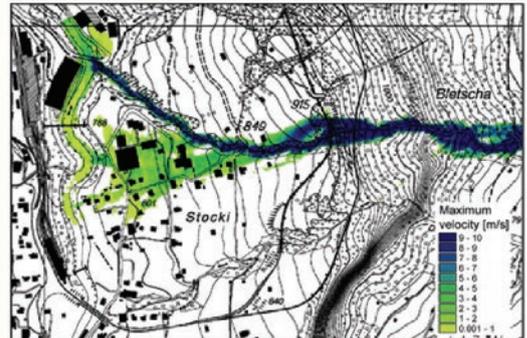
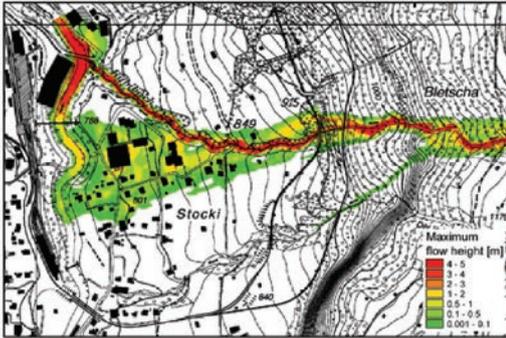
**Вставка 1: Иллюстративный пример моделирования и картирования угрозы селевого потока**

**Средний сценарий:**

**Максимальная высота потока  $h$  [м]:**

Вероятность = средняя

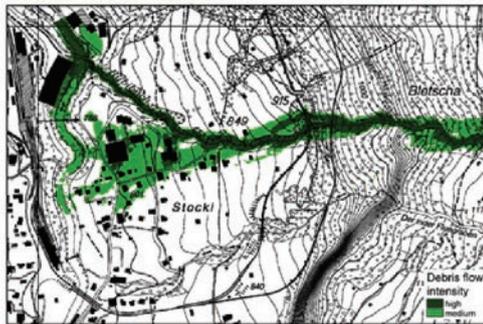
**Максимальная скорость  $v$  [м/с]**



**Интенсивность селя**

**Шаг 1:**

Цифровое моделирование и классификация интенсивности события для данного сценария



**МАКСИМАЛЬНАЯ СКОРОСТЬ**

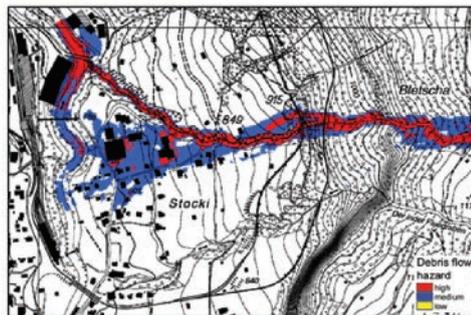
	Высокая	Средняя	Низкая
> 1 m/s			-
0 - 1 m/s			
-			

МАКС. ГЛУБИНА ПОТОКА	Высокая	Средняя	Низкая
Высокая	> 1 м		
Средняя	0 - 1 м		
Низкая	-		

**Угроза селя**

**Шаг 2:**

Предварительная классификация угроз, основывающаяся на интенсивности и вероятности для данного сценария



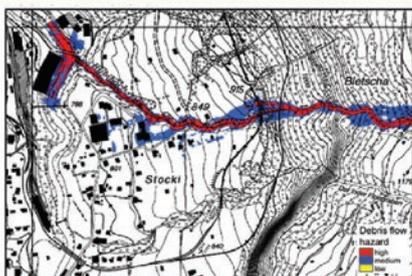
**ВЕРОЯТНОСТЬ**

	Высокая	Средняя	Низкая
ИНТЕНСИВНОСТЬ	Высокая		
Средняя			
Низкая			

## Предварительные карты угроз

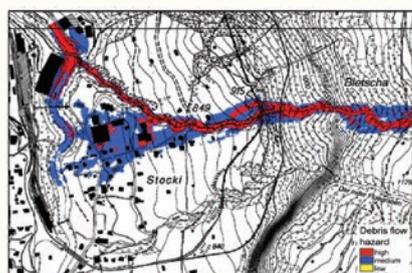
### Малый сценарий:

Вероятность: высокая



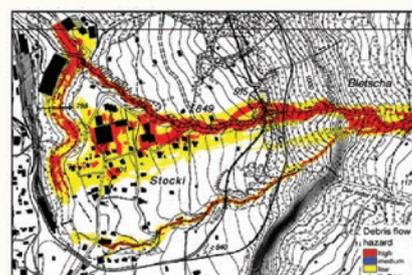
### Средний сценарий:

Вероятность: средняя

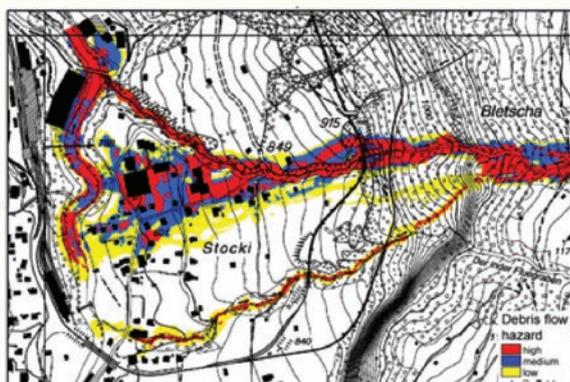


### Большой сценарий:

Вероятность: низкая



## Пред-окончательные карты угроз



### Шаг 3:

Повторить шаги 1 и 2 по всем сценариям и отразить результаты в пред-окончательной карте угроз.

Окончательная карта угроз, подлежащая проверке и дополнениям по итогам полевых изысканий и уточнению в соответствии с потребностями местных органов власти.

### 3.4 КОМПЛЕКСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И СИНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

Существует ограниченное количество опубликованных примеров комплексных оценок опасностей, которые были выполнены для потенциальных связанных процессов каскадных перемещений масс вниз по течению. Однако, ввиду быстрых изменений в окружающей среде и образования новых озер, подверженных воздействию неустойчивых горных пород и льда (Хэберли и др., 2016), такие события приобретают все возрастающее значение для снижения риска бедствий и адаптационного планирования. Моделирование комплексных процессов с физически обоснованными полностью связанными моделями является новой областью исследований (см., например, Домник и др., 2013; Пастор и др., 2009; Уорни и др., 2014), в то время как другие исследования объединили отдельные модели для различных этапов цепочки (см., например, Шнайдер и др., 2014; Уэстобай и др., 2014). Этот последний подход был наиболее полно описан для Озера 513 в горах Кордильера Бланка в Перу, где Шнайдер и др. (2014) смоделировали сценарии прорывов озера, вызванные ударными волнами каменно-ледяной лавины, в качестве основы для картирования опасностей. Их изучение служит здесь наглядным руководством. Первым требованием является определение этапов, из которых состоит цепь процессов, и для каждого этапа выбрать соответствующий подход к моделированию. На примере Озера №513 на основе прошлого события были выделены пять этапов:

- Сход комбинированной каменно-ледяной лавины в Озеро 513.
- Ударная волна вызванная каменно-ледяной лавиной и перелив волны через плотину из коренных пород.
- Формирование селевого потока за счет боковой эрозии и вовлечения в поток продуктов эрозии с последующим их отложением на нижнем участке русла и на конусе выноса.
- Продолжение потока как «суперконцентрированный» поток.
- Начало вторичного селевого потока из-за возрастания уклона русла, скорости потока и размываемости материала.

В то время как начальная лавина и все стадии прорывного паводка были смоделированы с помощью RAMMS, распространение ударной волны и ее перелив из озера моделировались в IBER (см. подробные описания этих моделей в Приложении 2). Следуя общему подходу, изложенному в разделе 3.2, для запуска комплексного процесса требуются сценарии, которые в случае Озера 513 представляли собой малый (высокой вероятности), средний (средней вероятности) и большой (низкой вероятности) сценарии начальной ледяной/каменной лавины. Для остальных процессов следующий этап моделирования начинается на основе результата предыдущего этапа (Иллюстрация 16). Во-первых, исходными данными для IBER моделирования распространения ударной волны и её перелива был гидрограф, рассчитанный по объему и плотности лавины, смоделированной в RAMMS. Во-вторых, гидрограф паводка, разработанный в IBER, затем служил входными данными для моделирования в RAMMS нисходящего потока, при этом параметры модели были настроены и скорректированы с учетом изменений в реологии потока.

После того, как вся цепь процессов смоделирована для всех трех сценариев, можно классифицировать интенсивность потоков, присвоить уровни опасности в соответствии с матрицей интенсивности – вероятности, и составить комбинированную карту опасности на основе модели (Иллюстрация 17). В случае Озера 513 эта основанная на модели карта опасностей была обобщена после полевых исследований, и схема классификации была скорректирована для обеспечения ее согласованности с местной административной системой. Это показывает, как общая оценочная схема может быть изменена и оптимизирована для реализации на местном уровне, и подтверждает, что полученные на основе модели результаты сами по себе недостаточны для планирования ответных мер и стратегий смягчения их последствий.

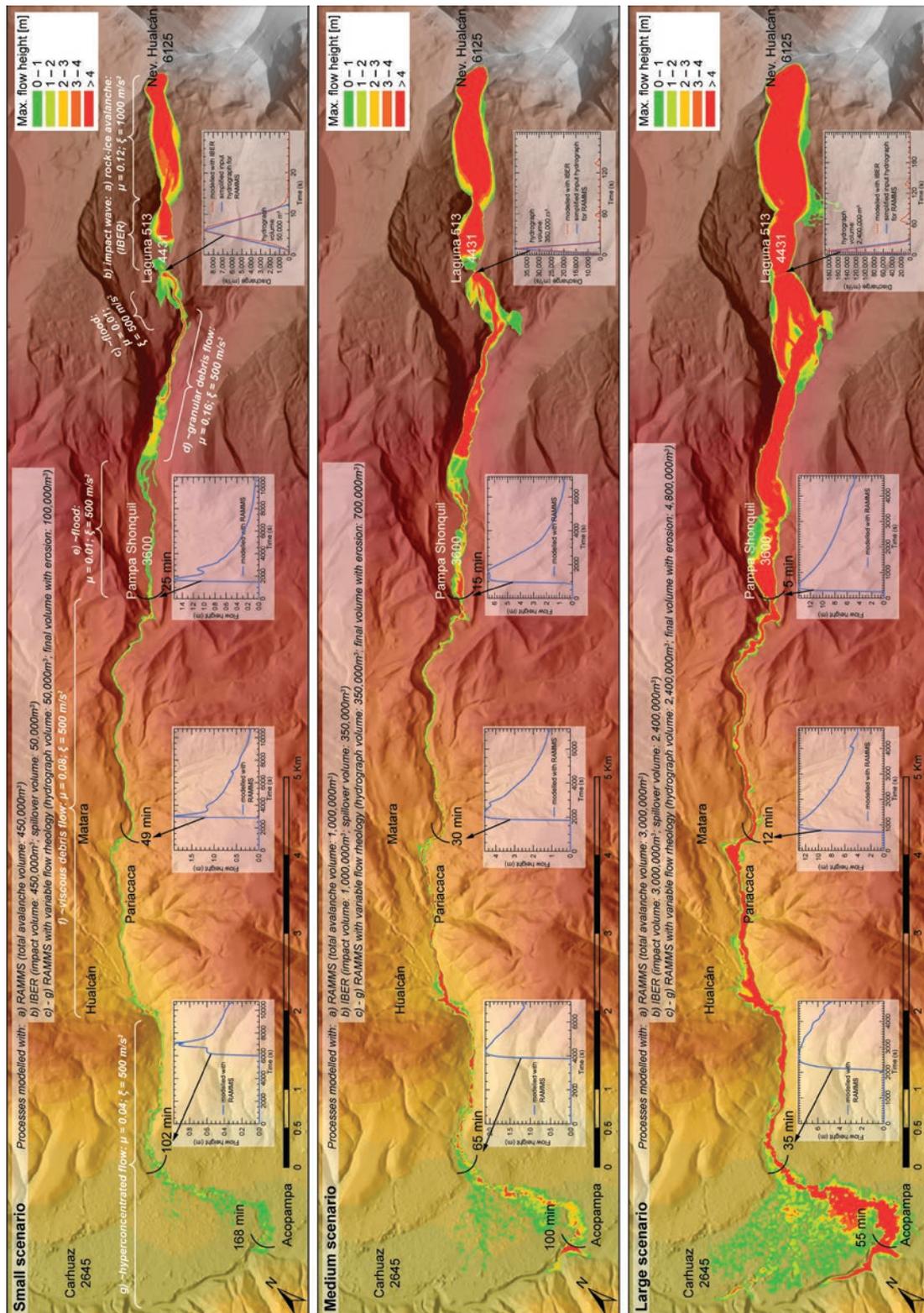


Иллюстрация 16

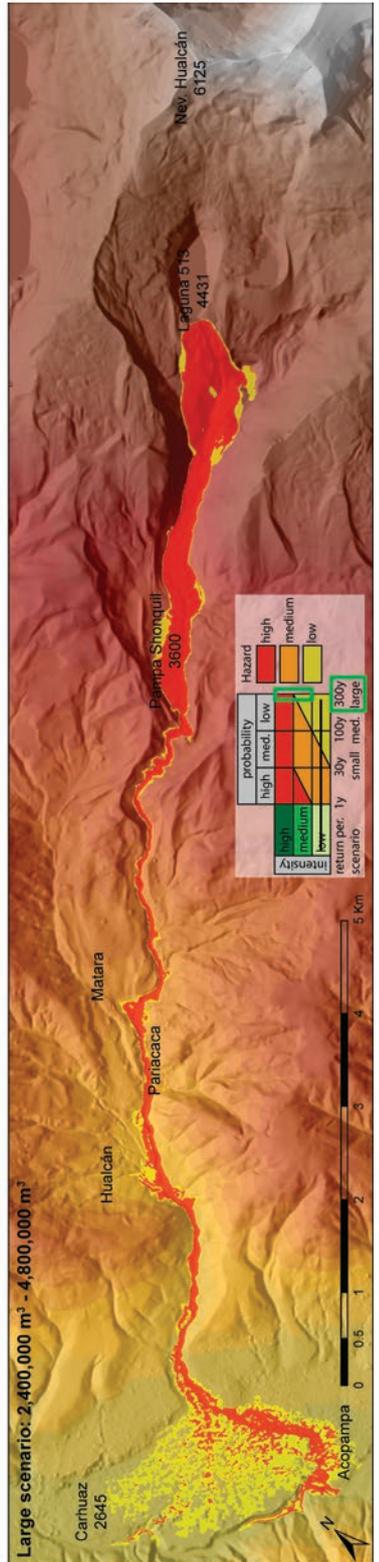
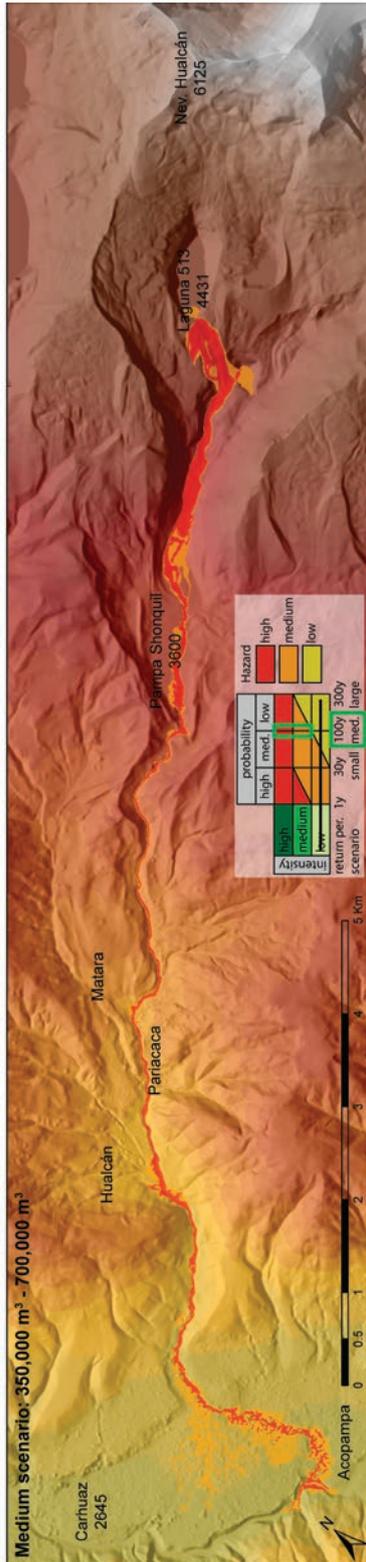
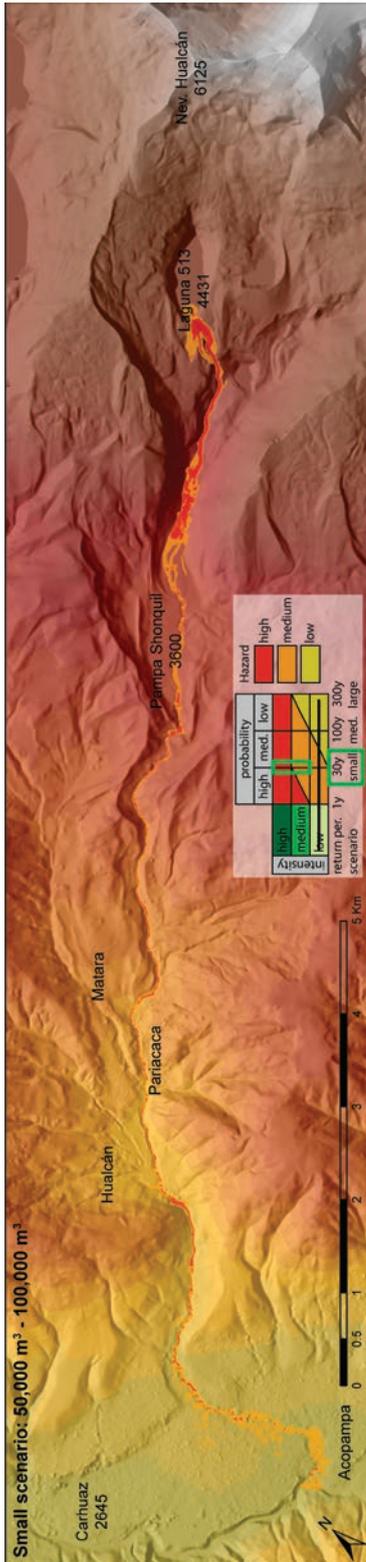


Иллюстрация 17

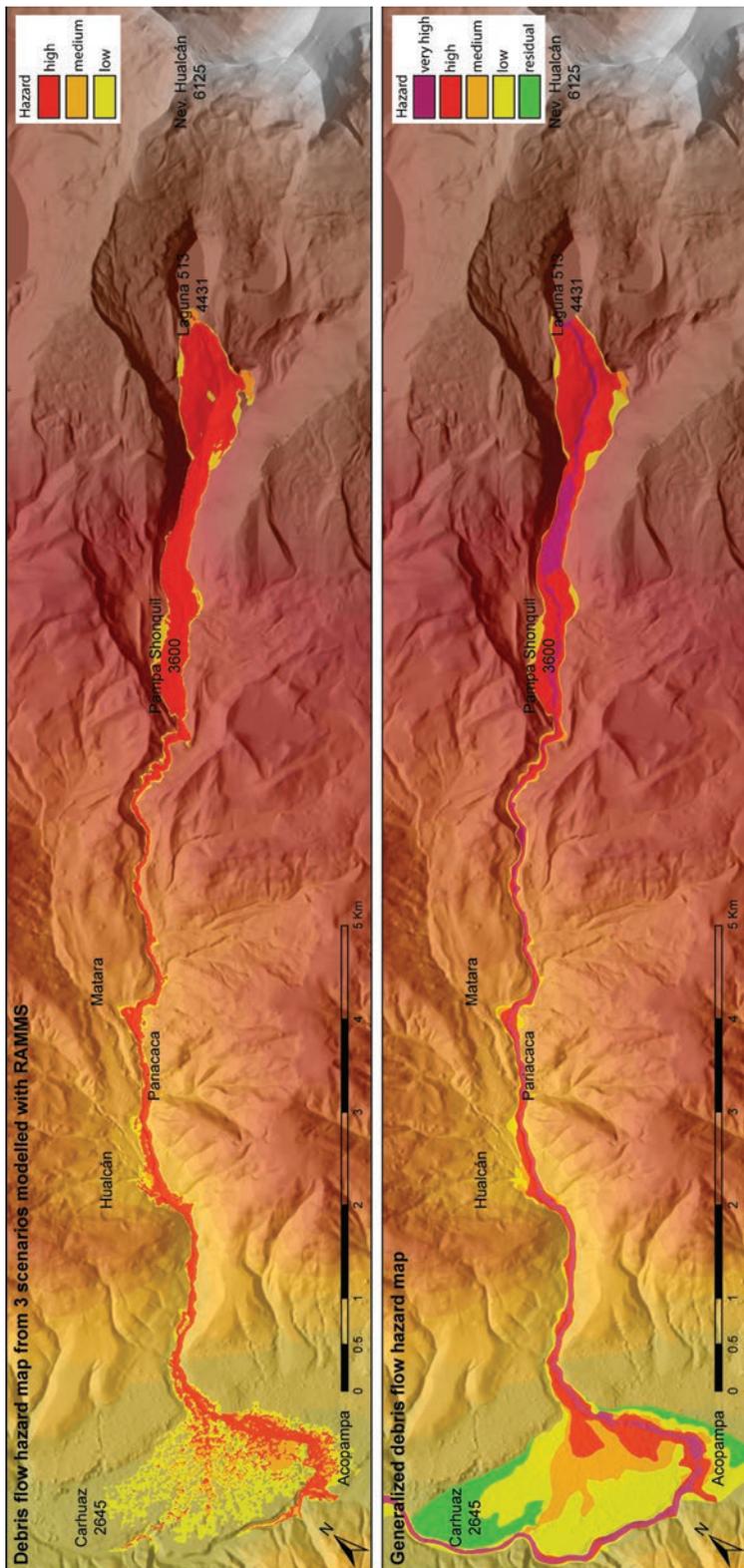


Иллюстрация 17

**Иллюстрация 16.** Результаты числового моделирования (RAMMS) трех сценариев (малого, среднего, большого) потенциальной цепи процессов быстрого перемещения воды и горных масс с участком ПЛО Озера №513 в Перу. Для ясности, моделирование IBER распространения ударной волны и ее перелива не показано. Продолжительность паводка указана вдоль каждого русла во всех трех сценариях.

**Иллюстрация 17:** Классификация опасностей для трех сценариев, разработанная на основе смоделированной интенсивности и вероятности потока. Интенсивность потока классифицировалась по сочетанию смоделированной высоты подъема потока (Иллюстрация 16) и скоростей (не показаны). Основная на моделях карта опасностей была обобщена и отредактирована по итогам полевых исследований и уточнена в связи с потребностями и ожиданиями местной администрации.

# ПРИЛОЖЕНИЕ 1

## ТАБЛИЦЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОДВЕРЖЕННОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ

Ниже представлены руководящие таблицы для оценки подверженности и устойчивости (см. раздел 2 для получения подробной информации). Факторы, которые характеризуют возникновение какого-либо явления, могут быть обуславливающими (Обус.), триггерными (Триг.), и/или касаться масштаба (Мас.) данного явления. Для многих факторов их взаимосвязь с подверженностью или устойчивостью не является однозначными, и поэтому эксперт должен давать свою собственную оценку по целому ряду признаков для того, чтобы определить, являются ли условия благоприятными (низкая уязвимость) или неблагоприятными (высокая уязвимость). Таблицы упорядочены по типу процесса. Тем не менее, эксперт должен уделять особое внимание и четко осознавать возможности взаимодействия процессов и потенциальных комплексных явлений, таких как ледяные или каменные лавины, вызывающие паводки прорыва, или повторная активизация отложений каменных лавин, как более интенсивный селевого потока или грязекаменного паводка (см. также часть 1, раздел 2.2 и часть 2, раздел 3.4).

**Таблица А1: Каменная лавина**

Факторы уязвимости, касающиеся каменных лавин	Релевантность			Основные признаки	Уязвимость		Методы оценки	Масштаб оценки
	Обус.	Триг.	Мас.		Пониженная	Повышенная		
<b>Атмосферные</b>								
Температура	+	+		Средняя температура	Тенденция отсутствует	Ярко выраженная тенденция	Климатические анализы с помощью станций или координатной сетки	На уровне речного бассейна
				Интенсивность и частота экстремальных температур	Низкая	Высокая		
Осадки		+		Интенсивность и частота выпадения экстремальных осадков.	Низкая	Высокая	Климатические анализы с помощью станций или координатной сетки	На уровне речного бассейна
<b>Криосферные</b>								
Условия вечной мерзлоты	+		+	Состояние вечной мерзлоты, ее распределение и протяженность в пределах коренных склонов. Глубина залегания активного слоя и нестабильная масса.	Отсутствие вечной мерзлоты или холодной многолетней мерзлоты	Теплая (тающая) вечная мерзлота	На основе использования модели (косвенная) Геофизическая (полупрямая)	Начиная от регионального уровня до уровня речного бассейна. На уровне конкретного объекта на местах.
Состояние ледников	+		+	Отступление (утонение) изнутри или ниже скального склона.	Нет отступления	Значительное отступление	Дистанционное зондирование, полевые исследования, неофициальные данные	Начиная от регионального уровня до уровня речного бассейна

Факторы уязвимости, касающиеся каменных лавин	Релевантность			Основные признаки	Уязвимость		Методы оценки	Масштаб оценки
	Обус.	Триг.	Мас.		Пониженная	Повышенная		
<b>Геолого-технические и геоморфологические факторы</b>								
Качество породной массы	+		+	Литологические характеристики Степень денудации	Благоприятные условия	Неблагоприятные условия	Геологическое картирование (дистанционное зондирование или полевые исследования)	Начиная от уровня речного бассейна до уровня конкретного объекта на местах
Состояние нарушений	+			Степень денудации, отверстие, заполнение (например, брекчия или гильная глина), просачивание	Благоприятные условия	Неблагоприятные условия	Геологическое картирование (дистанционное зондирование или полевые исследования)	Начиная от уровня речного бассейна до уровня конкретного объекта на местах
Структурные характеристики нарушений	+		+	Падение, простирание, межплоскостные расстояния, протяженность	Благоприятные условия	Неблагоприятные условия	Геологическое картирование (дистанционное зондирование или полевые исследования)	Начиная от уровня речного бассейна до уровня конкретного объекта на местах
Состояние склона	+			Нависание, выпуклости, неровности	Благоприятные условия	Неблагоприятные условия	Геологическое картирование (дистанционное зондирование или полевые исследования)	Начиная от уровня речного бассейна до уровня конкретного объекта на местах
Угол склона	+			Топографический угол склона. Критический диапазон или пороговый угол, который был определен на основе местных инвентаризационных данных.	Нижний угол склона	Крутой угол склона	Геологическое картирование (дистанционное зондирование или полевые исследования)	Начиная от уровня речного бассейна до уровня конкретного объекта на местах
Высота склона	+		+	Относительный рельеф откоса или склона	Небольшая	Большая	Геологическое картирование (дистанционное зондирование или полевые исследования)	Начиная от уровня речного бассейна до уровня конкретного объекта на местах
Сейсмичность	+	+		Вероятная магнитуда частота, ускорение основания	Низкая вероятность	Высокая вероятность	Геологическое картирование и моделирование.	На региональном уровне
Случаи обвала горных пород	+	+	+	Частота и масштабы бедствия в прошлом	Неявная	Частая и возрастающая активность	Геологическое картирование (дистанционное зондирование или полевые исследования)	Начиная от уровня речного бассейна до уровня конкретного объекта на местах

**Таблица А2: Ледяная лавина**

Факторы уязвимости, касающиеся ледяных лавин	Релевантность			Основные признаки	Уязвимость		Методы оценки	Масштаб оценки
	Обус.	Триг.	Мас.		Пониженная	Повышенная		
<b>Атмосферные</b>								
Температура	+	+		Средняя температура	Тенденция отсутствует	Ярко выраженной тенденции	Климатические анализы с помощью станций или координатной сетки	На уровне речного бассейна
Осадки		+		Интенсивность и частота выпадения экстремальных осадков.	Низкая	Высокая	Климатические анализы с помощью станций или координатной сетки	На уровне речного бассейна
<b>Криосферные</b>								
Термические условия	+			Холодный, политермический или умеренный ледник. Распределение и протяженность многолетней мерзлоты. Температурные аномалии по причине присутствия висьячих ледников.	Экспертное оценка относительно последствий, касающихся механизмов и процессов обрушения.		На основе использования модели (косвенная) Геофизическая (полу-прямая) Скважины (прямая)	От региональной до речного бассейна. В зависимости от местных условий.
Состояние ледников	+		+	Ситуации фронтального обвала или ситуации отрыва и сползания.	Экспертное оценка относительно последствий, касающихся частоты/масштабов.		Дистанционное зондирование	Начиная от регионального уровня до уровня речного бассейна
Плотность и расположение трещиноватостей	+			Образование трещин вдоль ледника. Размер и глубина трещиноватостей.	Неявная	Большая и широко распространенная	Дистанционное зондирование	Начиная от уровня речного бассейна до уровня конкретного объекта на местах
Рельеф ложа				Крутой угол наклона и резкие разломы в топографии. Выпуклые склоны. Отсутствие прочного упора в виде фронтальной морены.	Благоприятные условия	Неблагоприятные условия	Получено или смоделировано на основе рельефа поверхности. Геофизическая съемка.	От региональной до речного бассейна. В зависимости от местных условий.
Ледниковая гидрология	+	+		Распределенная подледная система дренажа в случае неустойчивых состояний. Свидетельства повышенного давления воды и/или блокирования (критично для политермических ледников), такие как скопление воды на поверхности или внезапные изменения темпов сброса воды при крупных катастрофических разрушениях.	Благоприятные условия	Неблагоприятные условия	Дистанционное зондирование, гидрологическое моделирование и полевые исследования.	Начиная от уровня речного бассейна до уровня конкретного объекта на местах.
Скорость движения ледника	+			Увеличение поверхностной скорости, особенно на участках, расположенных ниже зон трещиноватости	Без изменения	Быстрое увеличение	Дистанционное зондирование, полевые исследования	Начиная от уровня речного бассейна до уровня конкретного объекта на местах

Факторы уязвимости, касающиеся ледяных лавин	Релевантность			Основные признаки	Уязвимость		Методы оценки	Масштаб оценки
	Обус.	Триг.	Мас.		Пониженная	Повышенная		
Геометрия ледника	+			Утолщение по направлению к основанию висячего ледника. Утолщение языка долинного ледника является свидетельством его пульсации.	Без изменения	Крупное утолщение	Дистанционное зондирование	Начиная от уровня речного бассейна до уровня конкретного объекта на местах
Изменение длины ледника	+			Отступление или продвижение в сторону более крутой рельефа и/или новые температурные режимы.	Благоприятные условия	Неблагоприятные условия	Дистанционное зондирование, полевые исследования, неофициальные данные	Начиная от регионально-го уровня до уровня речного бассейна
Случаи возникновения ледяных лавин	+	+	+	Частота и величина неустойчивых состоянии, в том числе падение сераков. (вершина или гребень льда) на поверхности ледника)	Неявная	Частая и возрастающая активность	Дистанционное зондирование, полевые исследования, неофициальные данные	Начиная от уровня речного бассейна до уровня конкретного объекта на местах

#### Геолого-технические и геоморфологические факторы

Устойчивость коренных пород	+	+	+	См. оценку вероятности схода каменных лавин	Нестабильная ситуация	Стабильная ситуация	Геологическое картирование (дистанционное зондирование или полевые исследования)	Начиная от уровня речного бассейна до уровня конкретного объекта на местах
Сейсмичность	+	+		Вероятная величина и частота, ускорение основания	Низкая вероятность	Высокая вероятность	Геологическое картирование (дистанционное зондирование или полевые исследования)	Начиная от уровня речного бассейна до уровня конкретного объекта на местах

**Таблица А3: Паводок прорыва и выплеска ледникового озера**

Факторы уязвимости, касающиеся ППВЛО	Релевантность			Основные признаки	Уязвимость		Методы оценки	Масштаб оценки
	Обус.	Триг.	Мас.		Пониженная	Повышенная		
<b>Атмосферные</b>								
Температура				Средняя температура	Тенденция отсутствует	Ярко выраженная тенденция	Климатические анализы с помощью станций или координатной сетки	На уровне речного бассейна
	+	+		Интенсивность и частота экстремальных температур	Низкая	Высокая		
Осадки	+	+		Интенсивность и частота выпадения экстремальных осадков.	Низкая	Высокая	Климатические анализы с помощью станций или координатной сетки	На уровне речного бассейна
<b>Криосферные</b>								
Условия вечной мерзлоты	+			Состояние распространение и устойчивость вечной мерзлоты, в зоны плотины озера и окружающих склонов коренных пород.	Отсутствие вечной мерзлоты или холодной вечной мерзлоты	Теплая (оттаивающая) вечная мерзлота в пределах зоны плотины озера и/или окружающей горной породы или коренных склонов	На основе использования модели (косвенная)	От региональной до речного бассейна. В зависимости от местных условий.
Отступление и уменьшение мощности ледника за счет таяния	+		+	Расширение прогляциальных озер, активное образование надледникового озера, обрушение или проседание плотины	Нет отступления ледника, увеличения площади озера или проседания плотины	Значительное отступление ледника, увеличение площади озера или проседание плотины	Геофизическая (полупрямая)	Начиная от регионального уровня до уровня речного бассейна
Продвижение ледника (в том числе его пульсация)	+			Образование озер, подпруженных ледяными дамбами	Без очевидных изменений	Очевидное продвижение и подпруживание	Дистанционное зондирование	Начиная от регионального уровня до уровня речного бассейна
Вероятность схода ледяной лавины	+		+	См. оценку вероятности схода ледяной лавины	Пониженная	Повышенная	Дистанционное зондирование	Начиная от уровня речного бассейна до уровня конкретного объекта на местах
Вероятность откалывания глыб льда	+		+	Ширина откалывания глыб льда по фронту ледника, активность, плотность трещиноватости	Неявная	Большая и частая	См. оценку вероятности схода ледяной лавины	Начиная от уровня речного бассейна до уровня конкретного объекта на местах
Размер озера	+		+	Площадь или объем	Меньше	Больше	Дистанционное зондирование, моделирование структуры коренного ложа, полевые исследования	Начиная от регионального уровня до уровня конкретного объекта на местах
Измерение глубины озера (батиметрия)	+		+	Влияние на гидравлику плотины, влияние на распространение волн смещения и ширину бокового наката	Благоприятные условия	Неблагоприятные условия	Полевые исследования (гидроакустические измерения)	На уровне конкретного участка
Под-, над- и внутриледниковый сток из озера	+	+		Связь озера с ледниковой гидрологической системой	Не сообщается	Тесно сообщается	Полевые исследования и моделирование	На уровне конкретного участка
<b>Геолого-технические и геоморфологические факторы</b>								
а) Характеристики плотины								
Тип	+		+	Коренное ложе, морена, лед	Коренное ложе	Лед, (моренная гряда с ледяным ядром)	Геофизическая (полупрямая)	Начиная от регионального уровня до уровня речного бассейна
Моренная гряда с ледяным ядром	+			Толщина, протяженность и состояние (связь с вечной мерзлотой)	Отсутствует	Крупная и подтаивающая	Дистанционное зондирование	На уровне конкретного участка

Факторы уязвимости, касающиеся ППВЛО	Релевантность			Основные признаки	Уязвимость		Методы оценки	Масштаб оценки
	Обус.	Триг.	Мас.		Пониженная	Повышенная		
Соотношение ширины к высоте плотины	+		+	Ширина по гребню плотины относительно высоты плотины	Больше	Меньше	Дистанционное зондирование	Начиная от уровня речного бассейна до уровня конкретного объекта на местах
Соотношение превышения гребня плотины над уровнем воды к высоте плотины	+		+	Разница в высоте между поверхностью озера и самой низкой точкой морены.	Больше	Меньше	См. оценку вероятности схода ледяной лавины	Начиная от уровня речного бассейна до уровня конкретного объекта на местах
Литология	+		+	Шероховатость моренного материала, наличие мелковолокнистого материала, вулканического материала и т. д.	Преимущественно крупнозернистый материал	Преимущественно мелко-ложнистый или вулканический материал	Дистанционное зондирование, моделирование структуры коренного ложа, полевые исследования	На уровне конкретного участка
Низовой откос плотины	+			Средний уклон на нижнем бьефе озерной плотины.	Более отлогий	Более отвесный	Полевые исследования (гидроакустические измерения)	Начиная от уровня речного бассейна до уровня конкретного объекта на местах
Растительный покров	+			Плотность и тип растительного покрова (трава, кустарники, деревья).	Широко распространён	Отсутствует	Полевые исследования и моделирование	Начиная от уровня речного бассейна до уровня конкретного объекта на местах

**б) Топография и гидрология водосборного бассейна**

Водосборная площадь	+			Общий размер площади дренажа в верхнем бьефе водосборного бассейна, оледеневшие/не оледеневшие участки	Меньше	Больше	Анализ на основе ЦМР	Начиная от регионального уровня до уровня речного бассейна
Средний уклон водосборного бассейна	+			Отвесность водосборной площади	Более отлогая	Более отвесная	Анализ на основе ЦМР	Начиная от регионального уровня до уровня речного бассейна
Густота дренажной сети	+			Густота сети водотоков в водосборной площади	Ниже	Выше	Анализ на основе ЦМР	Начиная от регионального уровня до уровня речного бассейна
Порядок водотока	+			Наличие крупных речных потоков, способствующих быстрому дренированию воды в озеро	Отсутствует либо только низшего порядка	Очевидное присутствие крупных водотоков высокого порядка	Дистанционное зондирование, Анализ на основе ЦМР	Начиная от регионального уровня до уровня речного бассейна
Озера в верховье	+			Наличие и уязвимость озер в верховье.	Отсутствуют	Несколько озер	Дистанционное зондирование	Начиная от регионального уровня до уровня речного бассейна

**с) Геотехническая устойчивость**

Вероятность схода каменной лавины	+		+	См. оценку вероятности схода каменной лавины	Пониженная	Повышенная	См. оценку вероятности схода каменной лавины	
Моренная неустойчивость	+		+	Вероятность обвала пород с моренных склонов в озеро	Отсутствуют какие-либо отвесные моренные склоны, прилегающие к озеру	Отвесные, неустойчивые моренные склоны, прилегающие к озеру.	Анализ на основе ЦМР, дистанционное зондирование, полевые работы, геофизические исследования	Начиная от уровня речного бассейна до уровня конкретного объекта на местах
Сейсмичность	+			Вероятная величина и частота, ускорение основания	Пониженная	Повышенная	Геологическое картирование и моделирование	На региональном уровне

**Таблица А4: Селевой поток**

Факторы уязвимости, касающиеся каменных лавин	Релевантность			Основные признаки	Уязвимость		Методы оценки	Масштаб оценки
	Обус.	Триг.	Мас.		Пониженная	Повышенная		
<b>Атмосферные</b>								
Температура				Средняя температура	Тенденция отсутствует	Ярко выраженная тенденция	Климатические анализы с помощью станций или координатной сетки	На уровне речного бассейна
				Интенсивность и частота экстремальных температур	Низкая	Высокая	Климатические анализы с помощью станций или координатной сетки	На уровне речного бассейна
Осадки		+	+	Интенсивность и частота выпадения экстремальных осадков.	Низкая	Высокая	Климатические анализы с помощью станций или координатной сетки	На уровне речного бассейна
<b>Криосферные</b>								
Условия многолетней мерзлоты	+		+	Холодный, политермический или умеренный ледник. Распределение и протяженность многолетней мерзлоты. Температурные аномалии по причине присутствия висячих ледников	Благоприятные условия	Неблагоприятные условия	На основе использования модели (косвенная)	От региональной до речного бассейна. В зависимости от местных условий.
Состояние ледников	+			Отступление (утонение) изнутри или ниже скального склона.	Нет отступления	Значительное отступление	Геофизическая (полупрямая)	Начиная от регионального уровня до уровня речного бассейна
Снежный покров	+	+		Образование трещин вдоль ледника. Размер и глубина трещиноватостей	Отсутствует	Повсеместное	Дистанционное зондирование, полевые исследования, неофициальные данные	Начиная от уровня речного бассейна до уровня конкретного объекта на местах
Морозное выветривание	+			Угол отвесного склона и резкие неровности в топографии. Склоны нарастания. отсутствие передних поддерживающих упоров.	Низкая интенсивность	Высокая интенсивность	Дистанционное зондирование и полевые исследования.	От региональной до речного бассейна. В зависимости от местных условий.
<b>Геолого-технические и геоморфологические факторы</b>								
Устойчивость краевых уступов	+		+	См. оценку вероятности схода каменных лавин	Нестабильная ситуация	Стабильная ситуация	См. оценку вероятности схода каменных лавин	Начиная от уровня речного бассейна до уровня конкретного объекта на местах
Характеристики осадочных отложений	+		+	Гранулометрический состав, проницаемость, сопротивление сдвигу.	Благоприятные условия	Неблагоприятные условия	Результаты полученные с помощью геологического картирования либо измерения были произведены прямо на местах	Начиная от уровня речного бассейна до уровня конкретного объекта на местах
Угол склона	+		+	Угол склона считается достаточным для зарождения селевого потока, но при этом он не является слишком отвесным, чтобы селевые массы не могли не накапливаться. Критический угол зависит от других факторов.	Нижний угол склона	Критический диапазон от 20° до 45°.	Геоморфологическое картирование (дистанционное зондирование или полевые исследования)	Начиная от уровня речного бассейна до уровня конкретного объекта на местах

Факторы уязвимости, касающиеся каменных лавин	Релевантность			Основные признаки	Уязвимость		Методы оценки	Масштаб оценки
	Обус.	Триг.	Мас.		Пониженная	Повышенная		
Геометрия склона	+		+	Разрушение в породе на склоне - верхний склон нарастания (источник) с нижним градиентным склоном отступления (скопление), например, зона контакта между боковой породой и скатом, покрытым осыпью	Явное разрушение не наблюдается	Наблюдается явное разрушение	Геоморфологическое картирование (дистанционное зондирование или полевые исследования)	Начиная от уровня речного бассейна до уровня конкретного объекта на местах
Типология резервуара осадочных отложений	+		+	Активные резервуары (скат, покрытый осыпью, дренажные каналы, заполненные осадочными отложениями) в основном имеют ограниченный потенциал по образованию отложений, реликтовые резервуары (морены, речные террасы), большинство из которых являются неограниченными источниками осадочных отложений. Каменные ледники могут относиться к обеим категориям.	Экспертное суждение относительно последствий, касающихся частоты/масштабов.		Геоморфологическое картирование (дистанционное зондирование или полевые исследования)	Начиная от уровня речного бассейна до уровня конкретного объекта на местах
Размер склона	+		+	Площадь и глубина накопления.	Небольшой	Крупный	Геоморфологическое картирование (дистанционное зондирование или полевые исследования)	Начиная от уровня речного бассейна до уровня конкретного объекта на местах
Растительный покров	+		+	Непрерывный, спорадичный или отсутствующий.	Отсутствует	Широко распространен	Геоморфологическое картирование (дистанционное зондирование или полевые исследования)	Начиная от уровня речного бассейна до уровня конкретного объекта на местах
Сейсмичность	+	+		Вероятная магнитуда и частота	Низкая вероятность	Высокая вероятность	Геологическое картирование и моделирование.	Начиная от уровня речного бассейна до уровня конкретного объекта на местах
Селевая активность	+		+	Частота и масштабы стихий в прошлом	Неявная	Частая и возрастающая активность	Дистанционное зондирование, полевые исследования, неофициальные данные.	Начиная от уровня речного бассейна до уровня конкретного объекта на местах

**Таблица А5: Местные опасности мерзлотного происхождения**

Факторы уязвимости, касающиеся ледяных лавин	Релевантность			Основные признаки	Уязвимость		Методы оценки	Масштаб оценки
	Обус.	Триг.	Мас.		Пониженная	Повышенная		
<b>Атмосферные</b>								
Температура	+			Средняя температура	Тенденция отсутствует	Ярко выраженная тенденция	Климатические анализы с помощью станций или координатной сетки	На уровня конкретного объекта на местах
				Интенсивность и частота экстремальных температур	Низкая	Высокая	Климатические анализы с помощью станций или координатной сетки	На уровня конкретного объекта на местах
Осадки			+	Интенсивность и частота выпадения экстремальных осадков.	Низкая	Высокая	Климатические анализы с помощью станций или координатной сетки	На уровня конкретного объекта на местах
<b>Криосферные</b>								
Условия вечной мерзлоты	+	+	+	Состояние вечной мерзлоты, ее распределение и протяженность в пределах коренных склонов. Глубина залегания активного слоя и нестабильная масса. Ее влияние на механический, температурный и гидрологический режим.	Благоприятные условия	Неблагоприятные условия	На основе использования модели (косвенная) Геофизическая (полупрямая) Бурение (прямая)	На уровня конкретного объекта на местах
Состояние ледников	+	+	+	Отступление (утонение) изнутри или ниже участка расположения. Его влияние на механический, температурный и гидрологический режим.	Нет отступления	Значительное отступление	Дистанционное зондирование, полевые исследования, неофициальные данные.	На уровня конкретного объекта на местах
<b>Геолого-технические и геоморфологические факторы</b>								
Механическое состояние вечной мерзлой трещиноватой горной массы	+	+	+	Деградация вечной мерзлоты неблагоприятно влияет на (i) трение/растрескивание в контактном слое отдельностей породы, (ii) трение/растрескивание в контактном слое породы и льда, (iii) деформация льда в разломах (iv) деформация мерзлого обломочного материала, заполняющего трещины	Благоприятные условия	Неблагоприятные условия	механические лабораторные испытания замороженных материалов Обновление карт с помощью систем «LiDAR», «SAR» дистанционного зондирования (iii) геофизическая рекогносцировочная съёмка геотехнических параметров (iv) механическое моделирование.	На уровня конкретного объекта на местах
Характеристики осадочных отложений	+		+	Механические свойства зависят от (i) условий напряжения (например, сил, вызывающих смещение вниз по склону/нагрузки) (ii) соотношения объемных долей льда и обломочного материала (iii) температуры льда (iv) водосодержания льда (v) подтока воды и тепла к включениям льда	Благоприятные условия	Неблагоприятные условия	механические лабораторные испытания замороженных материалов Обновление карт с помощью систем «LiDAR», «SAR» дистанционного зондирования (iii) геофизическая рекогносцировочная съёмка геотехнических параметров (iv) механическое моделирование.	На уровня конкретного объекта на местах

Факторы уязвимости, касающиеся ледяных лавин	Релевантность			Основные признаки	Уязвимость		Методы оценки	Масштаб оценки
	Обус.	Триг.	Мас.		Пониженная	Повышенная		
Угол склона	+		+	Быстро изменяющиеся гидростатические и криостатические условия по причине присутствия подвешенной грунтовой воды многолетней мерзлоты и процессов сегрегации льда.	Благоприятные условия	Неблагоприятные условия	Гидрогеологическое картирование, изменение и моделирование	На уровня конкретного объекта на местах
Геометрия склона	+		+	Сползание каменных глетчеров, движение почвы (солифлюкция), оседание почвы, ППВЛО, каменно-ледяные лавины, селевые потоки: см. также таблицы 2 - 5.	Благоприятные условия	Неблагоприятные условия	Геоморфологическое картирование: см. также таблицы 2 - 5.	На уровня конкретного объекта на местах

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### ПЕРЕЧЕНЬ ИНСТРУМЕНТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОПАСНОСТИ

Название	Процесс (-ы)	Необходимые данные	Конечный результат (-ы)	Стоимость	Программная среда	Наличие	Источник
<b>RAMMS</b>	Модули для селевых потоков, снежных лавин, обвала горных пород. Они также используются в отношении ледяных и каменных лавин	ЦМР, параметры трения «Voellmy» (2), начальный объем (например, оползень) или гидрограф	Параметры течения: например, глубина, скорость, давление	Приблизительно 2500 долларов США в год (различные сроки действия, предоставляется скидка на образовательные лицензии)	Автономное программное обеспечение (IDL)	ramms.slf.ch	Кристен, М. и еще 11 соавторов, 2012 год. Интегральное управление рисками с использованием единой программной среды: инструмент численного моделирования «RAMMS» для гравитационных природных опасностей. В: Кобольтшиг, Г. и др. (ред.) 12-й Конгресс «INTERPRAEVENT», Гренобль, Франция. Том 1, 77-86 стр.
<b>MSF</b>	«Селевые потоки»	Начальная зона ЦМР	Вероятность воздействия	Бесплатное ПО	AML ArcGIS toolbox Python (Arcspу)	Свяжитесь с авторами	Хуггел, К., Кеб, А., Хэберли, В. и Крумменахер, Б.: Региональные модели ГИС для оценки угроз опасным явлениям, связанных с прорывами ледниковых озер: оценка и их применение в Швейцарских Альпах, Международный междисциплинарный научный журнал «Natural Hazards and Earth System Sciences», выпуск №3, 647-662 стр., 2003 год.
<b>FLO-2D</b>	Грязевые оползни	ЦМР, параметры трения, исходный гидрограф	Параметры течения: например, глубина, скорость	Flo-2D Basic (Бесплатное ПО) FLO-2D Pro 995 долларов США.	Автономное программное обеспечение	flo-2d.com	О'Брайен, Дж.С., Жюльен, П.Ю. и Фуллертон, В.Т., 1993 год. Двумерное моделирование наводнений и грязевых оползней, Научный журнал «Journal of Hydraulic Engineering», выпуск №119, 244-261 стр.
<b>BASEMENT</b>	«Паводок»	«ЦМР»	Глубина, скорость	Бесплатное ПО	Автономное программное обеспечение	basement.ethz.ch	Веч Д. и 16 соавторов. 2006-2017. BASEMENT – базовая среда моделирования для расчета экологического стока и моделирования естественных опасностей. Версия 2.7, Цюрих, Лаборатория гидравлики, гидрологии и гляциологии (VAW).
<b>Titan2D</b>	«Образование прорывов в моренных дамбах»	Топография, данные о шероховатости, информация о потоке	Параметры течения: например, глубина, скорость, давление	Бесплатное ПО	Программное обеспечение с открытым исходным кодом	sourceforge.net/projects/titan2d/	Е. Б. Питман, К. Ничита, А. Патра, А. К. Бауэр, М. Бурдик, А. 2003 год. Численное исследование сыпучих потоков на эродируемых поверхностях, дискретных и непрерывных динамических системах - В3 (4).

Название	Процесс (-ы)	Необходимые данные	Конечный результат (-ы)	Стоимость	Программная среда	Наличие	Источник
<b>IBER</b>	Волна вытеснения	Батиметрия, гидрография воздействия движения масс	Турбулентный свободный неравномерный поперечный поток	Бесплатное ПО (требуется регистрация)	Автономное программное обеспечение	iberaula.es	Бладе, Е., Цеа, Л., Корестейн, Г., Эсколано, Э., Пуэртас, Дж., Васкес-Сендон, М. Е., Дольц, Дж. и Колл, А. 2014 год: Инструмент численного моделирования потока в реках. Международный журнал численных методов исчисления и проектирования в технике, выпуск №30, 1-10 стр.
<b>r.avaflow</b>	Двухфазные течения, лавины, селевые потоки и т. д.	ЦМР, параметры трения, начальные условия	Параметры течения: например, глубина, скорость, давление	Бесплатное ПО (находится в процессе разработки, все еще является экспериментальным)	Имеется в наличии автономное программное обеспечение с открытым исходным кодом	www.avaflow.org/software.html	Мергили, М., Бенедикт, М. и Лудасани, С. П. 2017 год. g.avaflow – модель моделирования ГИС с открытым исходным кодом для сыпучих лавин и селевых потоков. дистрибутивы «r.avaflow».
<b>LAHARZ</b>	Каменные лавины, селевые потоки	Топография, сценарии объема	Зоны затопления	Бесплатное ПО	ArcMap	pubs.usgs.gov/of/2014/1073/	Шиллинг, С.П. 2014. «Laharz_ru» – ГИС инструменты для автоматизированного картирования опасных зон затопления лахаров: отчет на основе открытых данных Геологической службы США 2014-1073, 78 стр., <a href="https://dx.doi.org/10.3133/ofr20141073">https://dx.doi.org/10.3133/ofr20141073</a> .
<b>Rockyfor3D</b>	Обвал горных пород (точечно-массивная модель с вероятностными прогнозами)	Растровые карты для топографии, свойства пород и почвы и т. д.	Траектория обвала горных пород (высота, мощность, территориальный охват и т. д.)	Бесплатное ПО	Автономное программное обеспечение	ecorisq.org/ecorisq-tools	Доррен, Л. К. А., 2012 год. Технический документ «Rockyfor3D» – Прозрачное описание полной трехмерной модели скальных пород. Документ «ecorisQ» ( <a href="http://www.ecorisq.org">www.ecorisq.org</a> ): 31 стр.
<b>RAMMS Rockfall</b>	Обвал горных пород (настоящая трехмерная ротационная механика)	Форма горной породы, ее размер, топография, начальные условия	Траектория обвала горных пород, мощность, территориальный охват и т. д.)	Приблизительно 2500 долларов США в год (различные сроки действия, предоставляется скидка на образовательные лицензии)	Автономное программное обеспечение	ramms.slf.ch	Кристен, М. и еще 11 соавторов, 2012 год. Интегральное управление рисками с использованием единой программной среды: инструмент численного моделирования «RAMMS» для гравитационных природных опасностей. В: Кобольтшниц, Г. и др. (ред.) 12-й Конгресс «INTERPRAEVENT», Гренобль, Франция. Том 1, 77-86 стр.

# ПРИЛОЖЕНИЕ 3

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ И ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

**Алеан, Дж.:** Ледяные лавины: некоторая эмпирическая информация об их формировании и протяженности, Журнал по гляциологии, выпуск № 31, 324–333 стр., 1985.

**Alean, J.:** Ice avalanches: some empirical information about their formation and reach, *J. Glaciol.*, 31, 324–333, 1985.

**Аллен, С. К. и Хуггел, К.:** Экстремально теплые температуры как потенциальная причина недавнего высокогорного обвала пород, Научный журнал «Глобальное и планетарное изменение», выпуск №107, 59–69 стр., 2013.

**Allen, S. K. and Huggel, C.:** Extremely warm temperatures as a potential cause of recent high mountain rockfall, *Glob. Planet. Change*, 107, 59–69, 2013.

**Аллен, С. К., Грубер, С. и Оуэнс, И. Ф.:** Исследования вечной мерзлоты, сформировавшейся в коренном ложе крутой горной породы и ее взаимосвязь с недавними обвалами горных пород в Южных Альпах Новой Зеландии, Научный журнал «Многолетняя мерзлота и перигляциальные процессы», выпуск №20, 345–356 стр., 2009.

**Allen, S. K., Gruber, S. and Owens, I. F.:** Exploring steep bedrock permafrost and its relationship with recent slope failures in the Southern Alps of New Zealand, *Permafrost. Periglac. Process.*, 20, 345–356, 2009.

**Эллин, С.К, Кокс, С.С. и Оуэнс И.Ф.:** Каменные лавины и другие виды оползней в центральных южных Альпах Новой Зеландии: региональное исследование с учетом возможных последствий изменения климата, оползней, выпуск №8 (1), 33–48 стр., doi: 10.1007/s10346-010-0222-g, 2011.

**Allen, S. K., Cox, S. C. and Owens, I. F.:** Rock avalanches and other landslides in the central Southern Alps of New Zealand: A regional study considering possible climate change impacts, *Landslides*, 8(1), 33–48, doi:10.1007/s10346-010-0222-z, 2011.

**Аллен, С. К., Растнер, П., Арора, М., Хуггел, К. и Штоффель, М.:** Прорыв озер и грязекаменные стихийные потоки в Кедарнатхе, июнь 2013 год: гидрометеорологические триггерный фактор и топографическая предрасположенность, оползни, 10.1007/s10346-015-0584-3, 2015

**Allen, S. K., Rastner, P., Arora, M., Huggel, C. and Stoffel, M.:** Lake outburst and debris flow disaster at Kedarnath, June 2013: hydrometeorological triggering and topographic predisposition, *Landslides*, 10.1007/s10346-015-0584-3, 2015.

**Аллен, С. К., Линсбауэр, А., Рандхава, С. С., Хуггел, К., Рана, П. и Кумари, А.:** Риск возникновения паводка прорыва и выплеска ледникового озера в Химачал-Прадеше, Индия: всеохватывающий и упреждающий подход с учетом текущих и будущих угроз, Научный журнал «Стихийные бедствия», Выпуск №84 (3), 1741–1763, doi: 10.1007 / s11069-016-2511-x, 2016.

**Allen, S. K., Linsbauer, A., Randhawa, S. S., Huggel, C., Rana, P. and Kumari, A.:** Glacial lake outburst flood risk in Himachal Pradesh, India: an integrative and anticipatory approach considering current and future threats, *Nat. Hazards*, 84(3), 1741–1763, doi:10.1007/s11069-016-2511-x, 2016.

**Андре, М.-Ф.:** Происходит ли развитие приледниковых ландшафтов в приледниковых условиях? Научный журнал «Геоморфология», выпуск №52 (1), 149–164, doi: 10.1016 / S0169-555X (02) 00255-6, 2003.

**André, M.-F.:** Do periglacial landscapes evolve under periglacial conditions?, *Geomorphology*, 52(1), 149–164, doi:10.1016/S0169-555X(02)00255-6, 2003.

**Аренсон, Л. и Спрингмен, С.:** Трехмерное испытание на постоянное напряжение и скорость деформации сдвига на образцах многолетней мерзлоты, обогащенных льдом, Научный журнал «Canadian Geotechnical Journal», выпуск №42, 412–430 стр., 2005 год.

**Arenson, L. and Springman, S.:** Triaxial constant stress and constant strain rate test on ice-rich permafrost samples, *Can. Geotech. J.*, 42, 412–430, 2005a.

**Аренсон, Л., Спрингмен, С. и Сего, Д. С.:** Реология замороженных почв, Научный журнал «Прикладная реология» выпуск №17, 1–14 стр., 2007 год.

**Arenson, L., Springman, S. and Sego, D. C.:** The rheology of frozen soils, *Appl. Rheol.*, 17, 1–14, 2007.

---

**Аренсон, Л. У. и Спрингмен, С. М.:** Математическое описание поведения льдонасыщенных мерзлотных грунтов при температурах, близких к нулевому градусу по Цельсию, Канадский геотехнический научный журнал, выпуск №42, 431–442 стр., 2005 год.

**Arenson, L. U. and Springman, S. M.:** Mathematical description for the behaviour of ice-rich frozen soils at temperatures close to zero centigrade, *Can. Geotech. J.*, 42, 431–442, 2005b.

---

**Аренсон, Л. У., Кааб, А. и О'Салливан, А.:** Обнаружение и анализ деформации грунта в условиях вечной мерзлоты, Пермафр. Научный журнал «Приледниковые процессы», выпуск №27, 339–351 стр., doi: 10.1002 / ppp.1932, 2016 год.

**Arenson, L. U., Kaab, A. and O'Sullivan, A.:** Detection and Analysis of Ground Deformation in Permafrost Environments, *Permafr. Periglac. Process.*, 27, 339–351, doi:10.1002/ppp.1932, 2016.

---

**Баллантин, С. К.:** Парагляциальная геоморфология, Научный журнал «Обзор четвертичной науки», выпуск №21, 1935–2017, 2002 год

**Ballantyne, C. K.:** Paraglacial geomorphology, *Quat. Sci. Rev.*, 21, 1935–2017, 2002.

---

**Бенн, Д.И, Болч, Т., Хэндс, К., Галли, Дж., Лакмэн, А., Николсон, Л. И., Квинси, Д., Томпсон, С., Туми, Р. и Вайсмэн, С.:** Реакция ледников, покрытых осколочной породой в регионе Эвереста, к недавнему потеплению, и последствия для возникновения прорывоопасных наводнений, Научный журнал «Earth-Science Reviews», выпуск №114, 156–174 стр., 2012 год.

**Benn, D. I., Bolch, T., Hands, K., Gulley, J., Luckman, A., Nicholson, L. I., Quincey, D., Thompson, S., Toumi, R. and Wiseman, S.:** Response of debris-covered glaciers in the Mount Everest region to recent warming, and implications for outburst flood hazards., *Earth Sci. Rev.*, 114, 156–174, 2012.

---

**Бьёрнссон, Х.:** Подледниковые озера и йёкюдльхлауп в Исландии, Научный журнал «Global and Planetary Change», выпуск №35(3), 255–271 стр., doi: 10.1016/S0921-8181(02)00130-3, 2003 год

**Björnsson, H.:** Subglacial lakes and jökulhlaups in Iceland, *Glob. Planet. Change*, 35(3), 255–271, doi:10.1016/S0921-8181(02)00130-3, 2003.

---

**Бёкли, Л., Бреннинг, А., Грубер, С. и Нётцли, Дж.:** Распределение распространения вечной мерзлоты в европейских Альпах: расчет и оценка индексной карты и сводная статистика, Международный научный журнал «The Cryosphere», 6 (4), 807–820, doi: 10.5194 / tc-6-807-2012, 2012 год.

**Boeckli, L., Brenning, A., Gruber, S. and Noetzli, J.:** Permafrost distribution in the European Alps: calculation and evaluation of an index map and summary statistics, *Cryosph.*, 6(4), 807–820, doi:10.5194/tc-6-807-2012, 2012.

---

**Боммер, С., Филипс, М. и Аренсон, Л. У.:** Практические рекомендации по планированию, строительству и поддержке инфраструктуры в условиях горной вечной мерзлоты, Международный научный журнал «Permafrost and Periglacial Processes» выпуск №21, 97–104 стр., 2010 год.

**Bommer, C., Phillips, M. and Arenson, L. U.:** Practical recommendations for planning, constructing and maintaining infrastructure in mountain permafrost, *Permafr. Periglac. Process.*, 21, 97–104, 2010.

---

**Боттино, Г., Киарле, М., Джоли, А. и Мортара, Г.:** Моделирование каменных лавин и их связь с деградацией вечной мерзлоты в ледниковой среде, Международный научный журнал «Многолетняя мерзлота и пригляциальные процессы», выпуск №13, 283–288 стр., 2002 год,

**Bottino, G., Chiarle, M., Joly, A. and Mortara, G.:** Modelling rock avalanches and their relation to permafrost degradation in glacial environments, *Permafr. Periglac. Process.*, 13, 283–288, 2002.

---

**Бадд, У. Ф. и Джека, Т. Х.:** Обзор реологии льда для моделирования ледникового покрова, Международный научный журнал «Cold Regions Science and Technology», выпуск №16, 107–144 стр., 1989 год.

**Budd, W. F. and Jacka, T. H.:** A review of ice rheology for ice-sheet modeling, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 16, 107–144, 1989.

---

**Карей, М., Хуггел, К., Бари, Дж., Портокарреро, С. и Хэберли, В.:** Комплексная социально-экологическая основа для управления рисками, связанными с ледниками, и адаптация к изменению климата: уроки Озера №513, Кордильера-Бланка, Перу, Международный научный журнал «Climatic Change», выпуск №112, 733–767 стр., 2012 год.

**Carey, M., Huggel, C., Bury, J., Portocarrero, C. and Haeblerli, W.:** An integrated socio-environmental framework for glacier hazard management and climate change adaptation: lessons from Lake 513, Cordillera Blanca, Peru, *Clim. Change*, 112, 733–767, 2012.

---

---

**Карривик, Дж. Л. и Твид, Ф. С.:** Глобальная оценка социальных последствий от паводков, вызванных прорывом ледниковых озер, Научный журнал «Global and Planetary Change», выпуск №144, 1-16 стр., doi: 10.1016/j.gloplacha.2016.07.001, 2016 год.

**Carrivick, J. L. and Tweed, F. S.:** A global assessment of the societal impacts of glacier outburst floods, *Glob. Planet. Change*, 144, 1–16, doi:10.1016/j.gloplacha.2016.07.001, 2016.

---

**Сендерелли, Д. А. и Вол, Е. Е.:** Гидравлика потока и геоморфологические последствия от паводков прорыва и выплеска ледниковых озер в районе Эвереста, Международный научный журнал «Earth Surface Processes and Landforms», выпуск №28 (4), 385–407 стр., doi: 10.1002/esp.448, 2003 год.

**Cenderelli, D. A. and Wohl, E. E.:** Flow hydraulics and geomorphic effects of glacial-lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal, *Earth Surf. Process. Landforms*, 28(4), 385–407, doi:10.1002/esp.448, 2003.

---

**Киарле, М., Ианотти, С., Мортара, Г. и Делайн, Р.:** Недавние сели, связанные с ледниками в Альпах, Научный журнал «Global and Planetary Change», выпуск №56, 123–136 стр., 2007 год.

**Chiarle, M., Iannotti, S., Mortara, G. and Deline, P.:** Recent debris flow occurrences associated with glaciers in the Alps, *Glob. Planet. Change*, 56, 123–136, 2007.

---

**Коу, Дж. А., Бессетт-Киртон, Е. К. и Геертсема, М.:** Увеличение объемов каменных лавин и их подвижности в Национальном парке и заповеднике «Глейшер-Бей», штат Аляска, отмечавшиеся в период с 1984 по 2016 годы, спутниковые снимки Ландсат, оползни, 1–15, doi: 10.1007/s10346-017-0879-7, 2017 год.

**Coe, J. A., Bessette-Kirton, E. K. and Geertsema, M.:** Increasing rock-avalanche size and mobility in Glacier Bay National Park and Preserve, Alaska detected from 1984 to 2016 Landsat imagery, *Landslides*, 1–15, doi:10.1007/s10346-017-0879-7, 2017.

---

**Кук, С. Дж. и Квинси, Д. Дж.:** Оценка объема альпийских ледниковых озер, Международный научный журнал «Earth Surface Dynamics», выпуск №3 (4), 559–575 стр., doi: 10.5194/esurf-3-559-2015, 2015 год.

**Cook, S. J. and Quincey, D. J.:** Estimating the volume of Alpine glacial lakes, *Earth Surf. Dyn.*, 3(4), 559–575, doi:10.5194/esurf-3-559-2015, 2015.

---

**Короминас, Дж., Ремондо, Дж., Фариас, П., Эстевао, М., Зезере, Дж., Диаз деТеран, Дж., Дикау, Р., Шротт, Л., Моя, Дж. и Гонсалес, А.:** Селевой поток при распознавании оползней, под редакцией Р. Дикау, Д. Брунсдена, Л. Шротта и М. Л. Ибсена, 161–181 стр., Шпрингер-Ферлаг, Чичестер, 1996 год.

**Corominas, J., Remondo, J., Farias, P., Estevao, M., Zézere, J., Díaz deTerán, J., Dikau, R., Schrott, L., Moya, J. and González, A.:** Debris Flow, in *Landslide Recognition*, edited by R. Dikau, D. Brunsden, L. Schrott, and M.-L. Ibsen, pp. 161–181, Springer-Verlag, Chichester., 1996.

---

**Коста, Дж. Е.:** Физическая геоморфология селевых потоков при разработке приложений по геоморфологии», под редакцией Дж. Э. Коста и П. Дж. Флейшера, 268–317 стр., Шпрингер-Ферлаг, Берлин, 1984 год.

**Costa, J. E.:** Physical geomorphology of debris flows, in *Developments and Applications of Geomorphology*, edited by J. E. Costa and P. J. Fleisher, pp. 268–317, Springer-Verlag, Berlin., 1984.

---

**Кокс, С. С., Максэвэни, М. Дж., Спенсер, Дж., Аллен, С. К., Ашраф, С., Ханкок, Г. Т., Сиргвей, П., Саличон, Дж. и Феррис, Б. Г.:** Каменная лавина, сошедшая 14 июля 2014 года, с хребта Хиллари-Ридж, гора Аораки/Гора Кука, Новая Зеландия, Оползни, 12 (2), 395–402, doi: 10.1007/s10346-015-0556-7, 2015 год.

**Cox, S. C., McSaveney, M. J., Spencer, J., Allen, S. K., Ashraf, S., Hancox, G. T., Sirguey, P., Salichon, J. and Ferris, B. G.:** Rock avalanche on 14 July 2014 from Hillary Ridge, Aoraki/Mount Cook, New Zealand, *Landslides*, 12(2), 395–402, doi:10.1007/s10346-015-0556-7, 2015.

---

**Дас, С., Кар, Н. С. и Бандьюпадхьяй, С.:** Прорыв ледникового озера в Кедарнате, Индийские Гималаи: исследование с использованием цифровых моделей рельефа и спутниковых изображений, Международный научный журнал «Natural Hazards», doi: 10.1007/s11069-015-1629-6, 2015 год.

**Das, S., Kar, N. S. and Bandyopadhyay, S.:** Glacial lake outburst flood at Kedarnath, Indian Himalaya: a study using digital elevation models and satellite images, *Nat. Hazards*, doi:10.1007/s11069-015-1629-6, 2015.

---

---

**Давиес, М. С. Р., Хамза, О., Лумсден, Б. В. и Харрис, С.:** Лабораторные измерения прочности оледеневших скальных пород на сдвиг, *Международный научный журнал «Annals of Glaciology»*, выпуск №31, 463–467 стр., 2000 год.

**Davies, M. C. R., Hamza, O., Lumsden, B. W. and Harris, C.:** Laboratory measurements of the shear strength of ice-filled rock joints, *Ann. Glaciol.*, 31, 463–467, 2000.

---

**Давиес, М. С. Р., Хамза, О., и Харрис, С.:** Влияние повышения среднегодовой температуры на устойчивость скальных склонов, содержащих разрывные нарушения, заполненные льдом, *Международный научный журнал «Permafrost and Periglacial Processes»*, выпуск №12, 69–77 стр., 2001 год.

**Davies, M. C. R., Hamza, O. and Harris, C.:** The effect of rise in mean annual temperature on the stability of rock slopes containing ice-filled discontinuities, *Permafr. Periglac. Process.*, 12, 69–77, 2001.

---

**Делин, П.:** Взаимодействие между каменными лавинами и ледниками в массиве Монблан во время позднего голоцена, *Международный научный журнал «Quaternary Science Reviews»*, выпуск №28, 1070–1083, 2008 год.

**Deline, P.:** Interactions between rock avalanches and glaciers in the Mont Blanc massif during the late Holocene, *Quat. Sci. Rev.*, 28, 1070–1083, 2008.

---

**Делин, П., Альберто, В., Брокколато, М., Хунгр, О., Нётцли, Дж., Раванел, Д. и Тамбурины, А.:** Каменная лавина Краммонт, сошедшая в декабре 2008 года, в зоне массива Монблан, Италия, *Междисциплинарный и международный научный журнал «Natural Hazards and Earth System Sciences»*, 11 стр., 3307–3318, 2011 год.

**Deline, P., Alberto, W., Broccolato, M., Hungr, O., Noetzli, J., Ravel, L. and Tamburini, A.:** The December 2008 Crammont rock avalanche, Mont Blanc massif area, Italy, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 3307–3318, 2011.

---

**Делин, П., Грубер, С., Делалойе, Р., Фишер, Л., Геертсема, М., Джардино, М., Хаслер, А., Киркбрайд, М., Краутблаттер, М., Магнин, Ф., Маккол, С., Раванел, Л. и Шёнайх, Р.:** «Таяние льда и устойчивость склонов в высокогорных регионах», «Опасности, риски и катастрофы, связанные со снегом и льдом», под редакцией У. Хэберли и К. Уайтмана, Эльзевир, Нидерланды, США, Великобритания, 2015 год.

**Deline, P., Gruber, S., Delaloye, R., Fischer, L., Geertsema, M., Giardino, M., Hasler, A., Kirkbride, M., Krautblatter, M., Magnin, F., McColl, S., Ravel, L. and Schoeneich, P.:** Ice Loss and Slope Stability in High-Mountain Regions, in *Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters*, edited by W. Haeberli and C. Whiteman, Elsevier, Netherlands, USA, UK., 2015.

---

**Домник, Б., Пудасаини, С. П., Катценбах, Р. и Миллер, С. А.:** Сопряжение полных двумерных и усредненных по глубине моделей для сыпучих потоков, *Международный научный журнал «Non-Newtonian Fluid Mechanics»*, выпуск №201, 56–68 стр., doi: 10.1016 / j.jnnfm.2013.07.005, 2013 год.

**Domnik, B., Pudasaini, S. P., Katzenbach, R. and Miller, S. A.:** Coupling of full two-dimensional and depth-averaged models for granular flows, *J. Nonnewton. Fluid Mech.*, 201, 56–68, doi:10.1016/j.jnnfm.2013.07.005, 2013.

---

**Драмис, Ф., Гови, М., Гуглильмин, М. и Мортара, Г.:** Горная вечная мерзлота и неустойчивость склонов в итальянских Альпах: оползень Валь-Пола, *Международный научный журнал «Permafrost and Periglacial Processes»*, выпуск №6, 73–82 стр., 1995 год.

**Dramis, F., Govi, M., Guglielmin, M. and Mortara, G.:** Mountain permafrost and slope instability in the Italian Alps: The Val Pola Landslide, *Permafr. Periglac. Process.*, 6, 73–82, 1995.

---

**Дувиллард, Р. А., Раванел, Л. и Делин, Р.:** Оценка риска дестабилизации инфраструктуры по причине глобального потепления в высоких Французских Альпах, *Международный научный журнал «Revue de géographie alpine»*, 103, doi: 10.4000 / rga.2896, 2015 год.

**Duvillard, P. A., Ravel, L. and Deline, P.:** Risk assessment of infrastructure destabilisation due to global warming in the high French Alps, *Rev. Geogr. Alpine-Journal Alp. Res.*, 103, doi:10.4000/rga.2896, 2015.

---

**Двиведи, Р. Д., Сони, А. К., Гоэль, Р. К. и Дубе, А. К.:** Ударная вязкость горных пород при отрицательных температурных условиях, *Международный научный журнал «International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences»*, выпуск №37, 1267–1275 стр., 2000 год.

**Dwivedi, R. D., Soni, A. K., Goel, R. K. and Dube, A. K.:** Fracture toughness of rocks under sub-zero temperature conditions, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 37, 1267–1275, 2000.

---

---

**Эберхардт, Е., Сид, Д. и Когган, Дж. С.:** Численный анализ возникновения и прогрессирующего разрушения естественных горных склонов – оползень Ранда в 1991 году, Международный научный журнал «Международный журнал горной механики и горных наук», выпуск №41 (1), 69–87 стр., doi: 10.1016 / S1365-1609 (03) 00076-5, 2004 год.

**Eberhardt, E., Stead, D. and Coggan, J. S.:** Numerical analysis of initiation and progressive failure in natural rock slopes—the 1991 Randa rockslide, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 41(1), 69–87, doi:10.1016/S1365-1609(03)00076-5, 2004.

**Эртцемюллер, Б., Хольцле, М., Хеггем, Е. С. Ф., Исаксен, К., Миттац, С., Вондер Мюль, Д., Одегард, Р. С., Хэберли, В. и Соллид, Дж. Л.:** Картирование и моделирование возникновения и распространение горной вечной мерзлоты, Научный журнал «Norwegian Journal of Geography», выпуск №55, 186–194 стр., 2001 год.

**Etzelmüller, B., Hoelzle, M., Heggem, E. S. F., Isaksen, K., Mittaz, C., Vonder Mühl, D., Odegard, R. S., Haeberli, W. and Sollid, J. L.:** Mapping and modelling the occurrence and distribution of mountain permafrost, *Nor. J. Geogr.*, 55, 186–194, 2001.

---

**Эванс, С. Г. и Клаг, Дж. Дж.:** Катастрофические каменные лавины в ледниковой среде, Материалы пятого Международного симпозиума по оползням, 10–15 июля 1988 год, 2, 1153–1158, 1988 год.

**Evans, S. G. and Clague, J. J.:** Catastrophic rock avalanches in glacial environment, *Proc. 5th Int. Symposium Landslides*, July 10–15, 1988, 2, 1153–1158, 1988.

---

**Эванс, С. Г. и Клаг, Дж. Дж.:** Недавние климатические изменения и катастрофические геоморфологические процессы в горной среде, Научный журнал «Geomorphology», выпуск №10, 107–128 стр., 1994 год.

**Evans, S. G. and Clague, J. J.:** Recent climatic change and catastrophic geomorphic processes in mountain environments., *Geomorphology*, 10, 107–128, 1994.

---

**Эванс, С. Г. и Делани, К. Б.:** катастрофические потоки масс в горной ледниковой среде, связанные со снегом и ледовыми опасностями, рисками и бедствиями, под редакцией У. Хэберли и К. Уайтмана, 568–606 стр., Издательский дом «Elsevier», 2015 год.

**Evans, S. G. and Delaney, K. B.:** Catastrophic Mass Flows in the Mountain Glacial Environment, in *Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters*, edited by W. Haeberli and C. Whiteman, pp. 568–606, Elsevier, 2015.

---

**Эванс С. Г., Тутубалина О. В., Дробышев В. Н., Черноморец С. С., Макдугалл С., Петраков Д. А., Хунг О.:** Катастрофическое отделение и высокоскоростной поток движения ледника Колка, Кавказские горы, Россия в 2002 году, Научный журнал «Geomorphology», выпуск №105, 314–321 стр., doi: 10.1016 / j.geomorph.2008.10.008, 2008 год.

**Evans, S. G., Tutubalina, O. V., Drobyshev, V. N., Chernomorets, S. S., Mcdougall, S., Petrakov, D. A. and Hungr, O.:** Catastrophic detachment and high-velocity long-runout flow of Kolka Glacier, Caucasus Mountains, Russia in 2002, *Geomorphology*, 105, 314–321, doi:10.1016/j.geomorph.2008.10.008, 2008.

---

**Эванс, С. Г., Бишоп, Н. Ф., Смолл, Л. Ф., Мурильо, П. В., Делани, К. Б. и Оливер-Смит:** А. Пересмотр механизма и воздействия на человека катастрофических потоков масс, происходящих на Невадо Уаскаран, Кордильера-Бланка, Перу в 1962 и 1970 годах, Научный журнал «Engineering Geology», выпуск №108, 96–118 стр., doi: 10.1016 / j.enggeo.2009.06.020, 2009 год.

**Evans, S. G., Bishop, N. F., Smoll, L. F., Murillo, P. V., Delaney, K. B. and Oliver-Smith, A.:** A re-examination of the mechanism and human impact of catastrophic mass flows originating on Nevado Huascarán, Cordillera Blanca, Peru in 1962 and 1970, *Eng. Geol.*, 108, 96–118, doi:10.1016/j.enggeo.2009.06.020, 2009.

---

**Файллеттац, Дж., Фанк, М. и Винсент, С.:** Неустойчивость ледников, переходящая в лавины: обзор процессов и раннее оповещение, Научный журнал «Reviews of Geophysics», выпуск №53 (2), 203–224 стр., doi: 10.1002 / 2014RG000466, 2015 год.

**Faillietaz, J., Funk, M. and Vincent, C.:** Avalanching glacier instabilities: Review on processes and early warning perspectives, *Rev. Geophys.*, 53(2), 203–224, doi:10.1002/2014RG000466, 2015.

---

**Файллеттац, Дж., Фанк, М. и Ваглиасинди, М.:** Прогноз времени отрыва фрагментов от висячего ледника, Международный научный журнал «The Cryosphere», выпуск №10, 1191–1200, doi: 10.5194/tc-10-1191-2016, 2016 год.

**Faillietaz, J., Funk, M. and Vagliasindi, M.:** Time forecast of a break-off event from a hanging glacier, *Cryosph.*, 10, 1191–1200, doi:10.5194/tc-10-1191-2016, 2016.

---

---

**Фиддес, Дж., Эндрицци, С. и Грубер, С.:** Моделирование на участках поверхности суши больших площадей в неоднородной среде с использованием глобальных наборов данных: применение к горной вечной мерзлоте, Международный научный журнал «The Cryosphere», выпуск №9, 411–426 стр., 2015 год.

**Fiddes, J., Endrizzi, S. and Gruber, S.:** Large-area land surface simulations in heterogeneous terrain driven by global data sets: application to mountain permafrost, *Cryosph.*, 9, 411–426, 2015.

---

**Фибигер, Г.:** Планирование зон опасности угроз в Австрии, Научный журнал «Wildbach und Lawinenverbau», выпуск №61, 121–133 стр., 1997 год.

**Fiebiger, G.:** Gefahrenzonenplanung in Österreich., *Wildbach und Lawinenverbau*, 61, 121–133, 1997.

---

**Фишер, Л. и Хуггел, К.:** Методическое проектирование для оценки устойчивости вечной мерзлоты, на которую оказывают воздействие высокие горные массивы, Материалы девятой Международной конференции по вечной мерзлоте, том. 1, под редакцией Д. Л. Кейна и К. М. Хинкеля, 439–444 стр., Институт северной инженерии, Университет Аляски, Фэрбенкс, 2008 год.

**Fischer, L. and Huggel, C.:** Methodical design for stability assessments of permafrost affected high-mountain rock walls, in *Ninth International Conference on Permafrost*, vol. 1, edited by D. L. Kane and K. M. Hinkel, pp. 439–444, Institute of Northern Engineering, University of Alaska, Fairbanks., 2008.

---

**Фишер, Л., Кеб, А., Хуггел, К. и Нётцли, Дж.:** Геология, отступление ледников и деградация вечной мерзлоты как факторы, влияющие на неустойчивость склонов в высокогорных скальных массивах: восточная сторона горы Монте-Роза, Международный междисциплинарный научный журнал «Natural Hazards and Earth System Sciences», выпуск №6, 761–772 стр., 2006 год.

**Fischer, L., Käab, A., Huggel, C. and Noetzli, J.:** Geology, glacier retreat and permafrost degradation as controlling factors of slope instabilities in a high-mountain rock wall: the Monte Rosa east face, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 6, 761–772, 2006.

---

**Фишер, Л., Аманн, Ф., Мур, Дж. Р. и Хуггел, К.:** Оценка устойчивости перигляциального склона при сходе каменной лавины Чирва в 1988 г. (Пиц Мортерач, Швейцария), Международный междисциплинарный научный журнал «Engineering Geology», выпуск №116, 32–43 стр., 2010 год.

**Fischer, L., Amann, F., Moore, J. R. and Huggel, C.:** Assessment of periglacial slope stability for the 1988 Tschierva rock avalanche (Piz Morteratsch, Switzerland), *Eng. Geol.*, 116, 32–43, 2010.

---

**Фишер, Л., Пурвес, Р. С., Хуггел, К., Нётцли, Дж. и Хэбэрли, В.:** О влиянии топографических, геологических и криосферных факторов на каменные лавины и обвалы горных пород в высокогорных регионах, Международный междисциплинарный научный журнал «Natural Hazards and Earth System Sciences», выпуск №12, 241–254 стр., 2012 год.

**Fischer, L., Purves, R. S., Huggel, C., Noetzli, J. and Haerberli, W.:** On the influence of topographic, geological and cryospheric factors on rock avalanches and rockfalls in high-mountain areas, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 241–254, 2012.

---

**Фишер, Л., Хуггел, К., Кааб, А. и Хэбэрли, В.:** Неустойчивость склонов и скорость распространения эрозии на ледниковом высокогорном склоне под воздействием климатических изменений, Международный научный журнал «Earth Surface Processes and Landforms», выпуск №38, 836–846 стр., doi: 10.1002 / esp.3355, 2013 год.

**Fischer, L., Huggel, C., Kaab, A. and Haerberli, W.:** Slope failures and erosion rates on a glacierized high-mountain face under climatic changes, *Earth Surf. Process. Landforms*, 38, 836–846, doi:10.1002/esp.3355, 2013.

---

**Франк, Ф., Макардель, Б. В., Хуггел, К. и Виели, А.:** Важность выноса и накопление при моделировании движения селевого потока: примеры из Швейцарских Альп, Международный междисциплинарный научный журнал «Natural Hazards and Earth System Sciences», 15 (11), 2569–2583, doi: 10.5194 / nhess-15-2569-2015, 2015 год.

**Frank, F., McArdell, B. W., Huggel, C. and Vieli, A.:** The importance of entrainment and bulking on debris flow runout modeling: examples from the Swiss Alps, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 15(11), 2569–2583, doi:10.5194/nhess-15-2569-2015, 2015.

---

**Фрей, Х., Хэбэрли, В., Линсбауэр, А., Хуггел, К. и Пауль, Ф.:** Многоуровневая стратегия прогнозирования будущего формирования ледникового озера и связанных с ним потенциальных опасностей, Международный междисциплинарный научный журнал «Natural Hazards and Earth System Sciences», выпуск 10, 339–352 стр., 2010 год.

**Frey, H., Haerberli, W., Linsbauer, A., Huggel, C. and Paul, F.:** A multi-level strategy for anticipating future glacier lake formation and associated hazard potentials, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 339–352, 2010.

---

---

**Фуджита, К., Сакаи, А., Такенака, С., Нуимура, Т., Суразаков, А. Б., Савагаки, Т. и Яманокучи, Т.:** Масштаб потенциального наводнения Гималайских ледниковых озер, Международный междисциплинарный научный журнал «Natural Hazards and Earth System Sciences», выпуск №13 (7), 1827-1839, doi: 10.5194 / nhess-13-1827-2013, 2013 год.

**Fujita, K., Sakai, A., Takenaka, S., Nuimura, T., Surazakov, A. B., Sawagaki, T. and Yamanokuchi, T.:** Potential flood volume of Himalayan glacial lakes, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 13(7), 1827–1839, doi:10.5194/nhess-13-1827-2013, 2013.

---

**Фуджита, К., Иноуэ, Х., Изуми, Т., Ямагучи, С., Садакане, А., Сунако, С., Нишимура, К., Иммерзеель, В. В., Ши, Дж. М., Каяшта, Р. Б., Савагаки, Т., Бришиэрс, Д. Ф., Яги, Х. и Сакаи, А.:** Аномальный зимний снегопад усиливший землетрясение, спровоцировавший схода лавины Лангтанг в 2015 году в Непале, Международный междисциплинарный научный журнал «Natural Hazards and Earth System Sciences», 1–27 стр., doi: 10.5194/nhess-2016-317, 2016 год.

**Fujita, K., Inoue, H., Izumi, T., Yamaguchi, S., Sadakane, A., Sunako, S., Nishimura, K., Immerzeel, W. W., Shea, J. M., Kayashta, R. B., Sawagaki, T., Breashears, D. F., Yagi, H. and Sakai, A.:** Anomalous winter snow amplified earthquake induced disaster of the 2015 Langtang avalanche in Nepal, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss., 1–27, doi:10.5194/nhess-2016-317, 2016.

---

**Гарсия, Р., Лопес, Дж. Л., Нойа, М., Белло, М. Е., Белло, М. Т., Гонсалес, Н., Чанг, С. Ю., Паредес, Г., Вивас, М. И. и О'Брайен, Дж. С.:** Картирование опасностей селевых потоков и предупреждение дорожного движения на аллювиальных конусах, по мостам, расположенным в северной части Венесуэлы, подверженных селевым потокам, 589-599 стр., издательство «Millpress», Роттердам, 2003 год.

**García, R., López, J. L., Noya, M., Bello, M. E., Bello, M. T., González, N., Chang, S. Y., Paredes, G., Vivas, M. I. and O'Brien, J. S.:** Hazard mapping for debris-flow events debris flows and warning road traffic at in the alluvial fans of northern Venezuela bridges susceptible to debris-flow., in Debris-Flow Hazards Mitigation, pp. 589–599, Millpress, Rotterdam., 2003.

---

**Гламхеден, Р.:** Термомеханическое поведение замерзших пещер в горах Хард Рок, Технологический университет Чалмерса, Гетеборг, 2001 год.

**Glamheden, R.:** Thermo-Mechanical Behaviour of Refrigerated Caverns in Hard Rock, Chalmers University of Technology, Göteborg., 2001.

---

**Гинвуд, Дж. Р., Норрис, Дж. Е. и Уинт, Дж.:** Оценка влияния растительности в обеспечение устойчивости склона, Труды Института гражданских инженеров - гражданское строительство, 157(4), 199–207, doi: 10.1680/geng.2004.157.4.199, 2004 год.

**Greenwood, J. R., Norris, J. E. and Wint, J.:** Assessing the contribution of vegetation to slope stability, Proc. Inst. Civ. Eng. - Geotech. Eng., 157(4), 199–207, doi:10.1680/geng.2004.157.4.199, 2004.

---

**Грубер, С. и Хэберли, В.:** Вечная мерзлота на крутых склонах коренных пород ложа и ее температурная дестабилизация вследствие изменения климата. Научный журнал «Journal of Geophysical Research», 112 стр., 2007 год.

**Gruber, S. and Haeberli, W.:** Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change., J. Geophys. Res., 112, 2007.

---

**Грубер, С., Петер, М., Хельцле, М., Вудхатч, И. и Хэберли, В.:** Температура поверхности на крутых альпийских горных склонах - стратегия измерения и моделирования вечной мерзлоты регионального масштаба, Материалы восьмой Международной конференции по вопросам мерзлоты, том 1, под редакцией М. Филлипса, С. М. Спрингмена и Л. У. Аренсона, 325-330 стр., Издательство «Swets & Zeitlinger», Цюрих, 2003 год.

**Gruber, S., Peter, M., Hoelzle, M., Woodhatch, I. and Haeberli, W.:** Surface temperatures in steep alpine rock faces - a strategy for regional-scale measurement and modelling, in PERMAFROST, Proceedings of the Eighth International Conference on Permafrost, vol. 1, edited by M. Phillips, S. M. Springman, and L. U. Arenson, pp. 325–330, Swets & Zeitlinger, Zurich., 2003.

---

**Грубер, С., Хельцле, М. и Хэберли, В.:** Таяние вечной мерзлоты и дестабилизация альпийских горных пород в жаркое лето 2003 года, Научное издание «Geophysical Research Letters», выпуск №31, 2004 год.

**Gruber, S., Hoelzle, M. and Haeberli, W.:** Permafrost thaw and destabilization of Alpine rock walls in the hot summer of 2003, Geophys. Res. Lett., 31, 2004.

---

---

**Гюнцель, Ф.:** Прочность на сдвиг покрытых льдом скальных пород, материалы 9-й Международной конференции по вопросам мерзлоты, том 1, под редакцией Д. Л. Кейна и К. М. Хинкеля, 581-586 стр., Институт Северной инженерии Университета Аляски Фэрбенкс, Фэрбенкс, Аляска, США, 2008 год.

**Guenzel, F.:** Shear Strength of Ice-Filled Rock Joints, in 9th Int. Conf. on Permafrost, vol. 1, edited by D. L. Kane and K. M. Hinkel, pp. 581–586, INE-UAF, Fairbanks, Alaska, US., 2008.

---

**Хэберли, В.:** Частота и характеристики ледниковых наводнений в Швейцарских Альпах, Международный научный журнал «Annals of Glaciology», выпуск №4, 85–90 стр., 1983 год.

**Haeberli, W.:** Frequency and characteristics of glacier floods in the Swiss Alps., Ann. Glaciol., 4, 85–90, 1983.

---

**Хэберли, В.:** Изучение взаимосвязи ледников и вечной мерзлоты в высокогорной зоне: историческая предпосылка, избранные примеры и исследовательские потребности, в криосферных системах: ледники и вечная мерзлота, том 242, под редакцией К. Харриса и Дж. Б. Мёртона, 29-37 стр., Специальная публикация геологического общества, Лондон, 2005 год.

**Haeberli, W.:** Investigating glacier-permafrost relationships in high-mountain area: historical background, selected examples and research needs, in Cryospheric Systems: Glaciers and Permafrost, vol. 242, edited by C. Harris and J. B. Murton, pp. 29–37, Geological Society Special Publication, London., 2005.

---

**Хэберли, В., Вегманн, М. и Фондер Мюль, Д.:** Проблемы устойчивости склона, связанные с сокращением площади ледников и деградацией вечной мерзлоты в Альпах, Научная публикация «Eclogae Geologicae Helveticae», выпуск №90, 407-414 стр., 1997 год.

**Haeberli, W., Wegmann, M. and Vonder Mühli, D.:** Slope stability problems related to glacier shrinkage and permafrost degradation in the Alps., Eclogae Geol. Helv., 90, 407–414, 1997.

---

**Хэберли, В., Хюггел, К., Кееб, А., Полквой, А., Зотиков, И. и Осокин, Н.:** Условия вечной мерзлоты в начальной зоне каменного/ледяного обвала Колка-Кармадон на 20 сентября 2002 г. в Северной Осетии (Российский Кавказ), материалы 8-й Международной конференции по вопросам вечной мерзлоты, 49-50 стр., Цюрих, Швейцария, 2003 год.

**Haeberli, W., Huggel, C., Kääh, A., Polkvoj, A., Zotikov, I. and Osokin, N.:** Permafrost conditions in the starting zone of the Kolka-Karmadon rock/ice slide of 20 September 2002 in North Ossetia (Russian Caucasus), in 8th Int. Conf. on Permafrost, pp. 49–50, Zurich, Switzerland., 2003.

---

**Хэберли, В., Хуггел, К., Кееб, А., Освальд, С., Полковой, А., И., З. и Осокин, Н.:** Каменный/ледяной обвал Колка-Кармадон 20 сентября 2002 г. - чрезвычайное событие исторического масштаба в Северной Осетии (Российский Кавказ), Научный журнал «Journal of Glaciology», выпуск №50, 533-546 стр., 2004 год.

**Haeberli, W., Huggel, C., Kääh, A., Oswald, S., Polkvoj, A., I., Z. and Osokin, N.:** The Kolka-Karmadon rock/ice slide of 20 September 2002 - an extraordinary event of historical dimensions in North Ossetia (Russian Caucasus), J. Glaciol., 50, 533–546, 2004.

---

**Хэберли, У., Шауб, Ю. и Хуггел, С.:** Повышение рисков, связанных с оползнями в результате деградации вечной мерзлоты, переходящей в новые озера в горных хребтах, где отступили ледники, Научный журнал «Geomorphology», doi: 10.1016 / j.geomorph.2016.02.009, 2016 год.

**Haeberli, W., Schaub, Y. and Huggel, C.:** Increasing risks related to landslides from degrading permafrost into new lakes in de-glaciating mountain ranges, Geomorphology, doi: 10.1016/j.geomorph.2016.02.009, 2016.

---

**Халлет, Б., Вальдер, Дж. С. и Стаббс, К. В.:** Выветривание за счет сегрегационного роста льда в микротрещинах при устойчивых минусовых температурах: подтверждение экспериментального исследования с использованием акустических эмиссии, Международный научный журнал «Permafrost and Periglacial Processes», выпуск №2, 283-300 стр., 1991 год.

**Hallet, B., Walder, J. S. and Stubbs, C. W.:** Weathering by segregation ice growth in microcracks at sustained sub-zero temperatures: verification from an experimental study using acoustic emissions, Permafr. Periglac. Process., 2, 283–300, 1991.

---

**Ханкок, Г. Т. и Томсон, Р.:** Каменная лавина, сошедшая с горы Хааст и масштабный обвал горных пород, произошедшие в январе 2013 г., Национальный парк на горе Аораки/Горе Кука, Новая Зеландия, 2013 год.

**Hancox, G. T. and Thomson, R.:** The January 2013 Mt Haast Rock Avalanche The January 2013 Mt Haast Rock Avalanche and Ball Ridge Rock Fall in Aoraki / Mt Cook National Park , New Zealand., 2013.

---

---

**Ханкок, Г. Т., Максэвени, М. Дж., Дэвис, Т. Р. и Ходжсон, К.:** Каменная лавина, сошедшая на горе Адамса 6 октября 1999 г., а также последующее образование и разрушение большой оползневой плотины на реке Поруа, Уэстленд, Новая Зеландия. Публикация «GNS Science report 99/19», Институт геологических и ядерных наук, Нижний Хатт, Новая Зеландия, 1999 год.

**Hancox, G. T., McSaveney, M. J., Davies, T. R. and Hodgson, K.:** Mt Adams rock avalanche of 6 October 1999 and subsequent formation and breaching of a large landslide dam in Poerua River, Westland, New Zealand. GNS Science report 99/19, Institute of Geological and Nuclear Sciences, Lower Hutt, New Zealand., 1999.

---

**Харрис, С.:** Изменение климата, деградация горной вечной мерзлоты и геотехническая опасность, в условиях глобальных изменений и горных регионах. Обзор текущих знаний, под редакцией У. М. Хубера, Х. К. М. Бугмана и М. А. Разонера, 215–224 стр., Издательство «Springer», Дордрехт, 2005 год.

**Harris, C.:** Climate Change, Mountain Permafrost Degradation and Geotechnical Hazard, in *Global Change and Mountain Regions. An Overview of Current Knowledge*, edited by U. M. Huber, H. K. M. Bugmann, and M. A. Reasoner, pp. 215–224, Springer, Dordrecht., 2005.

---

**Харрисон, В. Д., Осипова, Г. Б., Носенко, Г. А., Эспизуа, Л., Кееб, А., Фишер, Л., Хуггель, К., Бёрнс, П. А. С., Траффер, М. и Лаи, А. В.:** Подвижки ледников при опасностях, рисках и стихийных бедствиях, связанных со снегом и льдом, под редакцией В. Хэберли и К. Уайтмена, 437–485 стр., Издательский дом «Elsevier», 2014 год.

**Harrison, W. D., Osipova, G. B., Nosenko, G. A., Espizua, L., Kääh, A., Fischer, L., Huggel, C., Burns, P. A. C., Truffer, M. and Lai, A. W.:** Glacier Surges, in *Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters*, edited by W. Haeberli and C. Whiteman, pp. 437–485, Elsevier, 2014.

---

**Хаслер, А., Талци, И., Бойтель, Дж., Чудин, С. и Грубер, С.:** Беспроводные сенсорные сети в исследованиях вечной мерзлоты: концепция, требования, реализация и вызовы, материалы 9-й Международной конференции по вопросам мерзлоты, том 1, под редакцией Д. Л. Кейна и К. М. Хинкеля, 669–674 стр., Институт Северной инженерии Университета Аляски Фэрбенкс, Фэрбенкс, Аляска, США, 2008 год.

**Hasler, A., Talzi, I., Beutel, J., Tschudin, C. and Gruber, S.:** Wireless Sensor Networks in Permafrost Research: Concept, Requirements, Implementation, and Challenges, in *9th Int. Conf. on Permafrost*, vol. 1, edited by D. L. Kane and K. M. Hinkel, pp. 669–674, INE-UAF, Fairbanks, Alaska, US., 2008.

---

**Хаук, С.:** Новые концепции геофизической съемки и дешифровки данных по вопросам вечной мерзлоты, *Международный научный журнал «Permafrost and Periglacial Processes»*, выпуск №24, 131–137 стр., 2013 год.

**Hauck, C.:** New concepts in geophysical surveying and data interpretation for permafrost terrain, *Permafrost. Periglacial Process.*, 24, 131–137, 2013.

---

**Хаук, С., Ботчер, М. и Маурер, Х.:** Новая модель оценки состава подповерхностного льда на основе комбинированных наборов электрических и сейсмических данных, *Научный журнал «Cryosphere»*, выпуск №5, 453–468 стр., doi: 10.5194 / tc-5-453- 2011, 2011 год.

**Hauck, C., Bottcher, M. and Maurer, H.:** A new model for estimating subsurface ice content based on combined electrical and seismic data sets, *Cryosphere*, 5, 453–468, doi:10.5194/tc-5-453-2011, 2011.

---

**Хайнке, Б., Маурер, Х., Грин, А. Г., Вилленберг, Х., Шпилльманн, Т. и Бурлини, Л.:** Определение характеристик неустойчивости горного склона с использованием поверхностной двумерной и трехмерной сейсмической томографии, *Научный журнал «Geophysics»*, выпуск №71, 241–256 стр., doi: 10.1190 / 1.2338823, 2006 год.

**Heincke, B., Maurer, H., Green, A. G., Willenberg, H., Spillmann, T. and Burlini, L.:** Characterizing an unstable mountain slope using shallow 2-D and 3-D seismic tomography, *Geophysics*, 71, 241–256, doi:10.1190/1.2338823, 2006.

---

**Хьюитт, К., Клаг, Дж. Дж. и Орвин, Дж. Ф.:** Наследие катастрофических обрушений горных пород со склонов в горных ландшафтах, *Научный журнал «Earth-Science Reviews»*, выпуск №87, 1–38 стр., 2008 год.

**Hewitt, K., Clague, J. J. and Orwin, J. F.:** Legacies of catastrophic rock slope failures in mountain landscapes, *Earth-Science Rev.*, 87, 1–38, 2008.

---

**Хайленд, Л. и Бобровский, П.:** Справочник по вопросам оползней – Руководство для понимания оползней, Геологическая служба США, Циркуляр №1325, Вирджиния, 2008 год.

**Highland, L. and Bobrowsky, P.:** *The Landslide Handbook— A Guide to Understanding Landslides*, U.S. Geological Survey Circular 1325, Virginia., 2008.

---

---

**Хильбих, С., Хаук, С., Хельцле, М., Шерлер, М., Шудель, Л., Фёлкш, И., Мюль, Д. В и Мосбахер, Р.:** Мониторинг эволюции вечной мерзлоты в горах с использованием электрической томографии электрического сопротивления: 7-летнее исследование сезонных, годовых и долгосрочных изменений в Шильторне, Швейцарских Альпах, Научный журнал «Journal of Geophysical Research. Earth Surface», выпуск №113, F01590, doi: 10.1029 / 2007JF000799, 2008 год.

**Hilbich, C., Hauck, C., Hoelzle, M., Scherler, M., Schudel, L., Voelksch, I., Muehll, D. V and Maeusbacher, R.:** Monitoring mountain permafrost evolution using electrical resistivity tomography: A 7-year study of seasonal, annual, and long-term variations at Schilthorn, Swiss Alps, J. Geophys. Res. – Earth Surf., 113, F01590, doi:10.1029/2007JF000799, 2008.

---

**Хёк, Е. и Брей, Дж. В.:** Проектирование скальных склонов, Институт горного дела и металлургии, Лондон, 1981 год.

**Hoek, E. and Bray, J. W.:** Rock slope engineering, The Institution for Mining and Metallurgy, London., 1981.

---

**Хуке, Р. Л., Гаулд, Дж. Е. и Брозозовский, Дж.:** без названия, Научный журнал «Zeitschrift für Gletscherkd. und Glazialgeol.», выпуск №19(1), 1–25 стр., 1983 год.

**Hooke, R. L., Gould, J. E. and Brozowski, J.:** No Title, Zeitschrift für Gletscherkd. und Glazialgeol., 19(1), 1–25, 1983.

---

**Хортон, П., Жабоедов, М., Рудац, Б. и Циммерманн, М.:** Поток-R, модель картирования подверженности селевых потоков и других гравитационных опасностей в региональном масштабе, Международный междисциплинарный научный журнал «Природные опасности и система Земли Наук», выпуск №13 (4), 869–885 стр., doi: 10.5194 / nhess-13-869-2013, 2013 год.

**Horton, P., Jaboyedoff, M., Rudaz, B. and Zimmermann, M.:** Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 13(4), 869–885, doi:10.5194/nhess-13-869-2013, 2013.

---

**Ховарт, Дж. Д., Фитцсимонс, С. Дж, Норрис, Р. Дж. и Якобсен, Г. Е.:** Озерные отложения фиксируют циклы притока наносов, вызванные сильными землетрясениями по альпийскому разлому, Новая Зеландия, Научный журнал «Geology», выпуск №40 (12), 1091–1094, doi: 10.1130 / G33486.1, 2012 год.

**Howarth, J. D., Fitzsimons, S. J., Norris, R. J. and Jacobsen, G. E.:** Lake sediments record cycles of sediment flux driven by large earthquakes on the Alpine fault, New Zealand, Geology, 40(12), 1091–1094, doi:10.1130/G33486.1, 2012.

---

**Хуггел, С.:** Недавние масштабные разрушения склонов в ледниковой среде: эффекты теплового возмущения, Международный научный журнал «Quaternary Science Reviews», 28, 1119–1130, 2009.

**Huggel, C.:** Recent extreme slope failures in glacial environments: effects of thermal perturbation, Quat. Sci. Rev., 28, 1119–1130, 2009.

---

**Хуггел, К., Кееб, А., Хэберли, В., Тайсзайре, П. и Пауль, Ф.:** Оценка опасностей, связанных с прорывом на ледниковых озерах с помощью дистанционного зондирования: пример из Швейцарских Альп, Научный журнал «Canadian Geotechnical Journal», выпуск №39, 316–330 стр., 2002 год.

**Huggel, C., Käab, A., Haeberli, W., Teysseire, P. and Paul, F.:** Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps, Can. Geotech. J., 39, 316–330, 2002.

---

**Хуггел, К., Кееб, А., Хэберли, В. и Крумменахер, Б.:** Региональные модели ГИС для оценки опасностей прорыва ледниковых озер: оценка и их применение в Швейцарских Альпах, Международный междисциплинарный научный журнал «Natural Hazards and Earth System Sciences», выпуск №3, 647–662 стр., 2003 год.

**Huggel, C., Käab, A., Haeberli, W. and Krummenacher, B.:** Regional-scale GIS-models for assessments of hazards from glacier lake outbursts: evaluation and application in the Swiss Alps., Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 3, 647–662, 2003.

---

**Хуггел, К., Хэберли, В., Кееб, А., Биери, Д. и Ричардсон, С.:** Процедура оценки опасностей, связанных с ледниками в швейцарских Альпах, Научный журнал «Canadian Geotechnical Journal», выпуск №41, 1068–1083, 2004 год.

**Huggel, C., Haeberli, W., Käab, A., Bieri, D. and Richardson, S.:** An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps, Can. Geotech. J., 41, 1068–1083, 2004a.

---

---

**Хуггел, К., Кееб, А. и Сальцманн, Н.:** ГИС моделирование ледниковых опасностей и их взаимодействие с использованием космических снимков Landsat-TM и IKONOS, Научный журнал «Norwegian Journal of Geography», выпуск №58, 61–73 стр., 2004 год.

**Huggel, C., Kääh, A. and Salzmann, N.:** GIS-based modeling of glacial hazards and their interactions using Landsat-TM and IKONOS imagery, *Nor. J. Geogr.*, 58, 61–73, 2004b.

---

**Хуггел, К., Цграгген-Освальд, С., Хэберли, В., Кееб, А., Полковой, А., Галушкин, И. и Эванс, С. Г.:** Каменная/ледовая лавина 2002 года в Колке/Кармадоне, Российский Кавказ: оценка необыкновенного образования и подвижности лавины и применение космических снимков со спутника QuickBird, Международный междисциплинарный научный журнал «Natural Hazards and Earth System Sciences», выпуск №5, 173–187 стр., 2005 год.

**Huggel, C., Zraggen-Oswald, S., Haerberli, W., Kääh, A., Polkvoj, A., Galushkin, I. and Evans, S. G.:** The 2002 rock/ice avalanche at Kolka/Karmadon, Russian Caucasus: assessment of extraordinary avalanche formation and mobility and application of QuickBird satellite imagery, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 5, 173–187, 2005.

---

**Хуггел, К., Каплан-Ауэрбах, Дж., Вайттомас, С. Ф. и Весселс, Р.:** Мониторинг и моделирование каменно-ледяных лавин, сходящих с вулканов, покрытых льдом: пример частых крупных сходов лавин на вулкан Илиямна, Аляска, Научный журнал «Journal of Volcanology and Geothermal Research» выпуск №168, 114–136 стр., 2007 год.

**Huggel, C., Caplan-Auerbach, J., Waythomas, C. F. and Wessels, R.:** Monitoring and modeling ice-rock avalanches from ice-capped volcanoes: A case study of frequent large avalanches on Iliamna Volcano, Alaska, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 168, 114–136, 2007a.

---

**Хуггел, К., Кебаллос, Дж. Л., Пулгарин, Б., Рамирез, Дж. и Турет, Дж. С.:** Обзор и переоценка опасностей, связанных с взаимодействием вулканов и ледников в Колумбии, Международный научный журнал «Annals of Glaciology», выпуск №45 (1), 128–136 стр., doi: 10.3189 / 172756407782282408, 2007 год.

**Huggel, C., Ceballos, J. L., Pulgarín, B., Ramírez, J. and Thouret, J.-C.:** Review and reassessment of hazards owing to volcano–glacier interactions in Colombia, *Ann. Glaciol.*, 45(1), 128–136, doi:10.3189/172756407782282408, 2007b.

---

**Хуггел, К., Каплан-Ауэрбах, Дж., Грубер, С., Молния, Б. и Весселс, Р.:** Сход каменно-ледяной лавины на горе Стеллер, Аляска в 2005 году: крупный обвал склона в условиях холодной вечной мерзлоте, Материалы девятой Международной конференции по вечной мерзлоте, том. 1, под редакцией Д. Л. Кейна и К. М. Хинкеля, 747–752 стр., Институт северной инженерии, Университет Аляски, Фэрбенкс, 2008 год.

**Huggel, C., Caplan-Auerbach, J., Gruber, S., Molnia, B. and Wessels, R.:** The 2005 Mt. Steller, Alaska, rock-ice avalanche: A large slope failure in cold permafrost, in Ninth International Conference on Permafrost, vol. 1, edited by D. L. Kane and K. M. Hinkel, pp. 747–752, Institute of Northern Engineering, University of Alaska, Fairbanks., 2008.

---

**Хуггел, К., Зальцманн, Н., Аллен, С., Каплан-Ауэрбах, Дж., Фишер, Л., Хэберли, В., Ларсен, С., Шнайдер, Д. и Весселс, Р.:** Недавние и будущие теплые экстремальные явления и устойчивость высокогорных склонов, Научный журнал «Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences», выпуск №368, 2435–2459, 2010 год.

**Huggel, C., Salzmann, N., Allen, S., Caplan-Auerbach, J., Fischer, L., Haerberli, W., Larsen, C., Schneider, D. and Wessels, R.:** Recent and future warm extreme events and high-mountain slope stability, *Philos. Trans. R. Soc. a-Mathematical Phys. Eng. Sci.*, 368, 2435–2459, 2010.

---

**Хуггел, К., Аллен, С., Делин, П., Фишер, Л., Нётцли, Дж. и Раванел, Л.:** Таяние льда, обвалы горных пород – участились ли случаи обрушения горных склонов, Научный журнал «Geology Today», выпуск №28, 98–104 стр., 2012 год.

**Huggel, C., Allen, S., Deline, P., Fischer, L., Noetzli, J. and Ravanel, L.:** Ice thawing, mountains falling—are alpine rock slope failures increasing?, *Geol. Today*, 28, 98–104, 2012.

---

**Гумберт, М.:** Картирование рисков в районах, подверженных перемещению почвы и недр: французские карты «ZERMOS», Бюллетень Международной ассоциации, Международный междисциплинарный научный журнал «Engineering Geology», выпуск №16, 80–82 стр., 1977 год.

**Humbert, M.:** Risk mapping of areas exposed to movements of soil and sub-soil: French “ZERMOS” maps, *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.*, 16, 80–82, 1977.

---

---

**Хунгр, О., Эванс, С. Г., Бовис, М. Дж. и Хутчинсон, Дж. Н.:** Обзор классификации оползней проточного типа, Научный журнал «Environmental and Engineering Geoscience», выпуск №7 (3), 221–238 стр., doi: 10.2113/gsegeosci.7.3.221, 2001 год.

**Hungry, O., Evans, S. G., Bovis, M. J. and Hutchinson, J. N.:** A review of the classification of landslides of the flow type, Environ. Eng. Geosci., 7(3), 221–238, doi:10.2113/gsegeosci.7.3.221, 2001.

---

**Хюрлиманн, М., Копонс, Р. и Альтимир, Дж.:** Детальная оценка опасностей, связанных с селевыми потоками в Андорре: междисциплинарный подход, doi: 10.1016 / j.geomorph.2006.02.003, 2006 год.

**Hürlimann, M., Copons, R. and Altimir, J.:** Detailed debris flow hazard assessment in Andorra: A multidisciplinary approach, doi:10.1016/j.geomorph.2006.02.003, 2006.

---

**Хусс, М. и Хок, Р.:** Новая модель глобального изменения ледников и повышения уровня моря, Научная публикация «Frontiers of Earth Science», выпуск №3, 54 стр., doi: 10.3389/feart.2015.00054, 2015 год.

**Huss, M. and Hock, R.:** A new model for global glacier change and sea-level rise, Front. Earth Sci., 3, 54, doi:10.3389/feart.2015.00054, 2015.

---

**Хусс, М., Баудер, А., Вердер, М., Функ, М. и Хок, Р.:** События прорыва ледникового озера в Горнерзее, Швейцария, Научный журнал «Journal of Glaciology», выпуск №53 (1), 189–200 стр., 2007 год.

**Huss, M., Bauder, A., Werder, M., Funk, M. and Hock, R.:** Glacier-dammed lake outburst events of Gornesee, Switzerland, J. Glaciol., 53(1), 189–200, 2007.

---

**Инада, Я. и Ёкота, К.:** Некоторые исследования прочности горных пород при низких температурах, Международный научный журнал «International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences», выпуск №21, 145–153 стр., 1984 год.

**Inada, Y. and Yokota, K.:** Some Studies of Low-Temperature Rock Strength, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 21, 145–153, 1984.

---

**Межправительственная группа экспертов по изменению климата:** Резюме для политиков. Рабочая группа II, Вклад в составление пятого доклада МГЭИК по оценке изменения климата, 2014 г.: Воздействие, адаптация и уязвимость, Издательство Кембриджского университета, Кембридж, Великобритания, 2014 год.

**IPCC:** Summary for Policymakers. Working Group II Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Cambridge University Press, Cambridge, UK., 2014.

---

**Иверсон, Р. М.:** Физика селевых потоков, Научный журнал «Reviews of Geophysics», выпуск №35, 245–296 стр., 1997 год.

**Iverson, R. M.:** The physics of debris flows, Rev. Geophys., 35, 245–296, 1997.

---

**Якоб, М.:** Анализ селевой опасности, в Опасности селевых потоков и связанных с ним явлений, под редакцией М. Якоба и О. Хунга, 411–443 стр., Издательство «Springer Berlin Heidelberg», Берлин, Гейдельберг, 2005 год.

**Jakob, M.:** Debris-flow hazard analysis, in Debris-flow Hazards and Related Phenomena, edited by M. Jakob and O. Hungr, pp. 411–443, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg., 2005.

---

**Цзя, Х., Сянг, В. и Краутблаттер, М.:** Количественная оценка усталости горных пород, снижение прочности на сжатие и растяжение после повторных циклов замораживания-оттаивания, Научная публикация «Permafr. Perigl. Process», Doi: 10.1002 / ppp.1857, 2015 год.

**Jia, H., Xiang, W. and Krautblatter, M.:** Quantifying rock fatigue and decreasing compressive and tensile strength after repeated freeze-thaw cycles, Permafr. Perigl. Process., doi:10.1002/ppp.1857, 2015.

---

**Цзя, Х., Лейт, К. и Краутблаттер, М.:** Зависящие от пути интегрирования эксперименты по замерзанию клина в гранулированном, низкопроницаемом граните, Научная публикация «Permafr. Perigl. Process», в печати, 2017 год.

**Jia, H., Leith, K. and Krautblatter, M.:** Path-Dependent Frost-Wedging Experiments in Fractured, Low-Permeability Granite, Permafr. Perigl. Process., in press, 2017.

---

---

**Джомелли, В., Печ, В. П., Чочиллон, С. и Брунштайн, Д.:** Геоморфические вариации селевых потоков и недавние климатические изменения во Французских Альпах, *Международный научный журнал «Climatic Change»*, выпуск №64(1/2), 77–102 стр., doi: 10.1023/B: CLIM.0000024700.35154.44, 2004 год.

**Jomelli, V., Pech, V. P., Chochillon, C. and Brunstein, D.:** Geomorphic Variations of Debris Flows and Recent Climatic Change in the French Alps, *Clim. Change*, 64(1/2), 77–102, doi:10.1023/B:CLIM.0000024700.35154.44, 2004.

---

**Джомелли, В., Брунштайн, Д., Гранчер Д. и Печ, П.:** Является ли однозначной реакция селевого потока со склона холмов на недавнее изменение климата? Тематическое исследования в Массиф де Эрик (Французские Альпы), doi: 10.1007/s10584-006-9209-0, 2007 год.

**Jomelli, V., Brunstein, D., Grancher, D. and Pech, P.:** Is the response of hill slope debris flows to recent climate change univocal? A case study in the Massif des Ecrins (French Alps), , doi:10.1007/s10584-006-9209-0, 2007.

---

**Кеб, А., Рейнолдс, Дж. М. и Хэберли, В.:** Опасности, связанные с ледниками и вечной мерзлотой в высокогорье, при глобальных изменениях и в горных регионах. Обзор текущих знаний, под редакцией У. М. Хубера, Х. К. М. Бугмана и М. А. Разуссера, 225–234 стр., Издательский дом «Springer», Дордрехт, 2005 год.

**Kääb, A., Reynolds, J. M. and Haeberli, W.:** Glacier and Permafrost Hazards in High Mountains, in *Global Change and Mountain Regions. An Overview of Current Knowledge*, edited by U. M. Huber, H. K. M. Bugmann, and M. A. Reasoner, pp. 225–234, Springer, Dordrecht., 2005.

---

**Кеб, А., Фрауенфельдер, Р. и Рёр, И.:** О реакции сползания каменных глетчеров на повышение температуры поверхности, *Научный журнал «Global and Planetary Change»*, выпуск №56, 172–187 стр, doi: 10.1016/j.gloplacha.2006.07.005, 2007 год.

**Kääb, A., Frauenfelder, R. and Roer, I.:** On the response of rockglacier creep to surface temperature increase, *Glob. Planet. Change*, 56, 172–187, doi:10.1016/j.gloplacha.2006.07.005, 2007.

---

**Кафле, Дж., Похрел, П. Р., Хаттри, К. Б., Каттель, П., Туладхар, Б. М., Пудасайни, С. П. и Кафле, Дж.:** Цунами, вызываемые оползнями и перемещение частиц в горных озерах и водохранилищах, 57163(71), 232–244 стр., doi: 10.3189/2016AoG71A034, 2016 год.

**Kafle, J., Pokhrel, P. R., Khattri, K. B., Kattel, P., Tuladhar, B. M., Pudasaini, S. P. and Kafle, J.:** Landslide-generated tsunami and particle transport in mountain lakes and reservoirs, , 57163(71), 232–244, doi:10.3189/2016AoG71A034, 2016.

---

**Каргель, Дж., Леонард, Г., Шугар, Д. Х., Хариташья, Ю. К., Бевинтон, А. и Филдинг, Е. Дж.:** Геоморфологический и геологический контроль геологических опасностей, вызванных землетрясением в Горке в Непале в 2015 году, *Научный журнал «Science»* (80-). 351 стр., doi: 10.1126/science.aac8353, 2016 год.

**Kargel, J., Leonard, G., Shugar, D. H., Haritashya, U. K., Bevinnton, A. and Fielding, E. J.:** Geomorphic and geologic controls of geohazards induced by Nepal's 2015 Gorkha earthquake, *Science* (80- ), 351, doi:10.1126/science.aac8353, 2016.

---

**Кифер, Д. К.:** Влияние оползней, вызванных землетрясениями, на долговременную эрозию склонов и опасности обрушения склонов в сейсмически активных областях, *Научный журнал «Geomorphology»*, выпуск №10, 265–284 стр., 1994 год.

**Keefer, D. K.:** The importance of earthquake-induced landslides to long-term slope erosion and slope-failure hazards in seismically active regions, *Geomorphology*, 10, 265–284, 1994.

---

**Кеннер Р., Булер, Я., Делалойе, Р., Гинцлер, С. и Филипс, М.:** Мониторинг движения высоких альпийских масс с помощью лазерного сканирования и цифровой воздушной фотограмметрией, *Научный журнал «Geomorphology»*, Выпуск «206, 492–504 стр., doi: 10.1016 /j.geomorph.2013.10.020, 2014 год.

**Kenner, R., Buhler, Y., Delaloye, R., Ginzler, C. and Phillips, M.:** Monitoring of high alpine mass movements combining laser scanning with digital airborne photogrammetry, *Geomorphology*, 206, 492–504, doi:10.1016/j.geomorph.2013.10.020, 2014.

---

**Койшинг, М., Краутблаттер, М., Хартмайер, И., Фасс, С. и Шротт, Л.:** Автоматизированная томография для тестирования электросопротивления и раннее предупреждения в неустойчивых скальных стенах из вечной мерзлоты вокруг высокогорной (альпийской) инфраструктуры, *Международный научный журнал «Permafrost and Periglacial Processes»*, N / a-n / a, doi: 10.1002 / ppp.1916, 2016 год.

**Keuschnig, M., Krautblatter, M., Hartmeyer, I., Fuss, C. and Schrott, L.:** Automated Electrical Resistivity Tomography Testing for Early Warning in Unstable Permafrost Rock Walls Around Alpine Infrastructure, *Permafr. Periglac. Process.*, n/a-n/a, doi:10.1002/ppp.1916, 2016.

---

---

**Коруп, О. и Твид, Ф.:** Льды, морены и оползневые плотины в горной местности, Научный журнал «Quaternary Science Reviews», выпуск №26, 3406–3422, 2007 год.

**Korup, O. and Tweed, F.:** Ice, moraine, and landslide dams in mountainous terrain, Quaternary Sci. Rev., 26, 3406–3422, 2007.

---

**Краутблаттер, М. и Дрэбинг, Д.:** Псевдотрехмерный - P-волновой рефракционный сейсмический мониторинг вечной мерзлоты в крутых неустойчивых коренных породах, Научный журнал «Journal of Geophysical Research: Earth Surface», том 119, 287–299 стр., doi: 10.1002 / 2012JF002638, 2014 год.

**Krautblatter, M. and Draebing, D.:** Pseudo 3D - P-wave refraction seismic monitoring of permafrost in steep unstable bedrock, J. Geophys. Res. - Earth Surf., VOL. 119, 287–299, doi:10.1002/2012JF002638, 2014.

---

**Краутблаттер, М., Функ, Д. и Гюнцель, Ф. К.:** Почему мерзлые горные породы становятся неустойчивыми: ледово-каменная механическая модель во времени и пространстве, Международный научный журнал «Earth Surface Processes and Landforms», выпуск №38, 876–887, doi: 10.1002 / esp.3374, 2013 год.

**Krautblatter, M., Funk, D. and Guenzel, F. K.:** Why permafrost rocks become unstable: a rock-ice-mechanical model in time and space, Earth Surf. Process. Landforms, 38, 876–887, doi:10.1002/esp.3374, 2013.

---

**Кюнцлер, М., Хуггел, К. и Рамирез, Дж. М.:** Анализ риска наводнений и лахаров: Пример по Центральным Кордильерам Колумбии, Международный научный журнал «Natural Hazards», выпуск №64 (1), 767–796 стр., doi: 10.1007 / s11069-012-0271-9, 2012 год.

**Künzler, M., Huggel, C. and Ramírez, J. M.:** A risk analysis for floods and lahars: case study in the Cordillera Central of Colombia, Nat. Hazards, 64(1), 767–796, doi:10.1007/s11069-012-0271-9, 2012.

---

**Ларссон, С.:** Геоморфологические эффекты на склонах долины Лонггар, Шпицберген, после сильных ливневых дождей в июле 1972 г., Научная публикация «Geografiska Annaler Series A Physical Geography», выпуск №64 (3/4), 105 стр., doi: 10.2307 / 520639, 1982 год.

**Larsson, S.:** Geomorphological Effects on the Slopes of Longyear Valley, Spitsbergen, after a Heavy Rainstorm in July 1972, Geogr. Ann. Ser. A, Phys. Geogr., 64(3/4), 105, doi:10.2307/520639, 1982.

---

**Ли Н., Жанг, П., Чен, Ю. и Свобода, Г.:** Усталостные свойства треснувших, насыщенных и замороженных образцов песчаника при циклической нагрузке, Международный научный журнал «International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences», выпуск №40, 145–150 стр., 2003 год.

**Li, N., Zhang, P., Chen, Y. and Swoboda, G.:** Fatigue properties of cracked, saturated and frozen sandstone samples under cyclic loading, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 40, 145–150, 2003.

---

**Лин, С., Лю, Дж. и Жанг, Ц.:** Разработка инновационной морозоустойчивой затирки для анкерных применений в холодных регионах, Научный журнал «Transportation Research Record», 1–12 стр., doi: 10.3141 / 2508-01, 2015 год.

**Lin, C., Liu, J. and Zhang, X.:** Development of Innovative Antifreeze Grout Mortar for Anchor Applications in Cold Regions, Transp. Res. Rec., 1–12, doi:10.3141/2508-01, 2015.

---

**Линсбауэр, А., Пауль, Ф. и Хэберли, В.:** Моделирование распределения толщины ледника и топография ложа по всему горным хребтам с помощью системы «GlabTop»: применение быстрого и надежного подхода. Научный журнал «Journal of Geophysical Research», 117, doi: 10.1029 / 2011JF002313, 2012 год.

**Linsbauer, A., Paul, F. and Haerberli, W.:** Modeling glacier thickness distribution and bed topography over entire mountain ranges with GlabTop: application of a fast and robust approach., J. Geophys. Res., 117, doi: 10.1029/2011JF002313, 2012.

---

**Линсбауэр, А., Фрей, Х., Хэберли, В., Мачгут, Х., Азам, М. Ф. и Аллен, С.:** Моделирование чрезмерного углубления ложа ледников и возможного возникновения будущих ледниковых озер в регионе Гималаи-Каракорум, Международный научный журнал «Annals of Glaciology», выпуск №57, 119–130 стр., 2016 год.

**Linsbauer, A., Frey, H., Haerberli, W., Machguth, H., Azam, M. F. and Allen, S.:** Modelling glacier-bed overdeepenings and possible future lakes for the glaciers in the Himalaya–Karakoram region, Ann. Glaciol., 57, 119–130, 2016.

---

**Ллибуэри, Л., Моралес, А. Б., Паутре, А. и Шнайдер, Б.:** Гляциологические проблемы, связанные с контролем за опасными озерами в Кордильера-Бланка, Перу. I. Историческое разрушение моренных плотин, его причины и предотвращение, Научный журнал «Journal of Glaciology», выпуск №18, 239–254 стр, 1977 год.

**Lliboutry, L., Morales, A. B., Pautre, A. and Schneider, B.:** Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru. I. Historic failure of morainic dams, their causes and prevention, J. Glaciol., 18, 239–254, 1977.

---

---

**Магнин Ф., Краутблаттер, М., Делин, П., Раванел, Л., Малет, Е. и Бевингтон, А.:** Определение теплых, чувствительных зон вечной мерзлоты в почти вертикальных шлейфах и оценка распределенных моделей с помощью электрической томографии удельного сопротивления, Научный журнал «Journal of Geophysical Research. Earth Surface», выпуск №120, 745–762 стр., 2015 год.

**Magnin, F., Krautblatter, M., Deline, P., Ravel, L., Malet, E. and Bevington, A.:** Determination of warm, sensitive permafrost areas in near-vertical rockwalls and evaluation of distributed models by electrical resistivity tomography, J. Geophys. Res. Surf., 120, 745–762, 2015.

---

**Мейджор, Дж. Дж. и Ньюхолл, К. Г.:** Возмущение снега и льда во время исторических извержений вулканов и образование лахаров и наводнений, Научный журнал «Bulletin of Volcanology», выпуск №52 (1), 1–27 стр., doi:10.1007/BF00641384, 1989 год.

**Major, J. J. and Newhall, C. G.:** Snow and ice perturbation during historical volcanic eruptions and the formation of lahars and floods, Bull. Volcanol., 52(1), 1–27, doi:10.1007/BF00641384, 1989.

---

**Мэтью, Дж., Гири Бабу, Д., Кунду, С., Винод Кумар, К. и Пант, К. К.:** Интеграция порогового значения количества осадков на основе интенсивности и продолжительности осадков, и оценка вероятности предшествующих осадков для раннего предупреждения об оползнях, вызванных дождем в части Гарвальных Гималаев, Индия, Научный журнал «Landslides», выпуск №11, 575–588 стр., 2014 год.

**Mathew, J., Giri Babu, D., Kundu, S., Vinod Kumar, K. and Pant, C. C.:** Integrating intensity–duration-based rainfall threshold and antecedent rainfall-based probability estimate towards generating early warning for rainfall-induced landslides in parts of the Garhwal Himalaya, India., Landslides, 11, 575–588, 2014.

---

**Мацуока, Н. и Муртон, Дж.:** Морозное выветривание: последние достижения и будущие направления, Международный научный журнал «Permafrost and Periglacial Processes», выпуск №19 (2), 195–210 стр., doi:10.1002/ppp.620, 2008 год.

**Matsuoka, N. and Murton, J.:** Frost weathering: recent advances and future directions, Permafr. Periglac. Process., 19(2), 195–210, doi:10.1002/ppp.620, 2008.

---

**Макколл, С.:** Устойчивость парагляциальных скальных склонов, Научный журнал «Geomorphology», 153–154, 1–16, 2012 год.

**McColl, S.:** Paraglacial rock-slope stability, Geomorphology, 153–154, 1–16, 2012.

---

**Макколл, С. Т. и Давиес, Т. Р. Х.:** Масштабные движения склонов, контактирующих со льдом: ледниковая опора, деформация и эрозия, Научный журнал «Earth Surface Processes and Landforms», выпуск № 38(10), 1102–1115, doi:10.1002/esp.3346, 2013 год.

**McColl, S. T. and Davies, T. R. H.:** Large ice–contact slope movements: glacial buttressing, deformation and erosion, Earth Surf. Process. Landforms, 38(10), 1102–1115, doi:10.1002/esp.3346, 2013.

---

**Маккиллоп, Р. Дж. и Клейг, Дж. Дж.:** Статистический подход, основанный на дистанционном зондировании, для оценки вероятности катастрофического дренажа от моренных озер на юго-западе Британской Колумбии, Научный журнал «Global and Planetary Change», выпуск №56, 153–171 стр., 2007 год.

**McKillop, R. J. and Clague, J. J.:** Statistical, remote sensing-based approach for estimating the probability of catastrophic drainage from moraine-dammed lakes in southwestern British Columbia, Glob. Planet. Change, 56, 153–171, 2007.

---

**Максвени, М. Дж.:** Недавние обвалы горных пород и каменные лавины в национальном парке Маунт-Кук, Новая Зеландия, Международный междисциплинарный научный журнал «Engineering Geology», выпуск №XV, 35–69 стр., 2002 год.

**McSaveney, M. J.:** Recent rockfalls and rock avalanches in Mount Cook National Park, New Zealand, Geol. Soc. Am. Rev. Eng. Geol., XV, 35–69, 2002.

---

**Меллор, М.:** Механические свойства горных пород при низких температурах, Материалы 2-й международной конференции по вечной мерзлоте, 334–344 стр., Якутск, Россия, 1973 год.

**Mellor, M.:** Mechanical Properties of Rocks at Low Temperatures, in 2nd Int. Conference on Permafrost, pp. 334–344, Yakutsk, Russia., 1973.

---

---

Мосс, Р.Х., Эдмондс, Дж. А., Хиббард, К.А., Мэннинг, М.Р., Роуз, С.К., Ван Вуурен, Д.П., Картер, Т.Р., Эмори, С., Кайнума, М., Крам, Т., Мил, Г.А., Митчелл, Дж. Ф. Б., Накиценович, Н., Риахи, К., Смит, С. Дж., Стауффер, Р. Дж., Томсон, А. М., Вейант, Дж. П. и Вилбанкс, Т. Дж.: Будущие поколения сценариев исследований и оценки изменения климата, Научный журнал «Nature», выпуск №463 (7282), 747–756 стр., doi: 10.1038 / nature08823, 2010 год.

Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P. and Wilbanks, T. J.: The next generation of scenarios for climate change research and assessment, Nature, 463(7282), 747–756, doi:10.1038/nature08823, 2010.

---

Мёртон, Дж., Курас, О., Краутблаттер, М., Кейн, Т., Чофен, Д., Улеманн, С., Шобер, С. и Уотсон, Р.: Мониторинг замерзания и оттаивания горных пород с помощью новой геоэлектрической и акустической техники, Научный журнал «Journal of Geophysical Research: Earth Surface», 2016 год.

Murton, J., Kuras, O., Krautblatter, M., Cane, T., Tschofen, D., Uhlemann, S., Schober, S. and Watson, P.: Monitoring rock freezing and thawing by novel geoelectrical and acoustic techniques, J. Geophys. Res. – Earth Surface., 2016.

---

Мёртон, Дж. Б., Питерсон, Р. и Озуф, Дж. С.: Разрушение коренного пород в результате сегрегации льда в холодных регионах, Научный журнал «Science» (80-), 314, 1127–1129, doi: 10.1126/science.1132127, 2006 год.

Murton, J. B., Peterson, R. and Ozouf, J.-C.: Bedrock Fracture by Ice Segregation in Cold Regions, Science (80- ), 314, 1127–1129, doi:10.1126/science.1132127, 2006.

---

Нарама, К., Дуйшонакунов, М., Кееб, А., Дайыров, М. и Абдрахматов, К.: Прорывной паводок 24 июля 2008 года на западном ледниковом озере Зиндан и недавние региональные изменения ледниковых озер хребта Тескей Ала-Тоо, Тянь-Шань, Кыргызстан, Международный междисциплинарный научный журнал «Natural Hazards and Earth System Sciences», выпуск №10 (4), 647–659 стр., 2010 год.

Narama, C., Duishonakunov, M., Kääh, A., Daiyrov, M. and Abdрахmatov, K.: The 24 July 2008 outburst flood at the western Zyn dan glacier lake and recent regional changes in glacier lakes of the Teskey Ala-Too range, Tien Shan, Kyrgyzstan, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 10(4), 647–659, 2010.

---

Нарама, К., Дайыров, М., Тадоно, Т., Ямамото, М., Кееб, А., Морита, Р., Укита, Дж. И Шан, Т.: Сезонный дренаж надледниковых озер на ледниках, покрытых осколочной породой в горах Тянь-Шаня, Центральная Азия, 2017 год.

Narama, C., Daiyrov, M., Tadono, T., Yamamoto, M., Kääh, A., Morita, R., Ukita, J. and Shan, T.: Seasonal drainage of supraglacial lakes on debris-covered glaciers in the Tien Shan Mountains, Central Asia, 2017.

---

Нётцли, Дж., Хёлцле, М. и Хэберли, В.: Горная вечная мерзлота и недавние обвалы горных пород в Альпах: подход на основе ГИС для определения критических факторов, в вечной мерзлоте. Материалы восьмой Международной конференции по вечной мерзлоте, том 2, под редакцией М. Филлипса, С. М. Спрингмена и Л. У. Аренсона, 827–832 стр., Издательский дом «Swets & Zeitlinger», Цюрих, Швейцария, 2003 год.

Noetzli, J., Hoelzle, M. and Haeberli, W.: Mountain permafrost and recent Alpine rock-fall events: a GIS-based approach to determine critical factors, in PERMAFROST, Proceedings of the Eighth International Conference on Permafrost, vol. 2, edited by M. Phillips, S. M. Springman, and L. U. Arenson, pp. 827–832, Swets & Zeitlinger, Zurich, Switzerland., 2003.

---

О'Коннор, Дж. Э., Хардисон, Дж. Х. и Коста, Дж. Э.: Селевые потоки из повреждений моренных дамб неогляциальной эпохи в природном заповеднике «Три Систерс и гора Джефферсона», штат Орегон, Официальный документ Геологической службы США, 1606, 2001 год.

O'Connor, J. E., Hardison, J. H. and Costa, J. E.: Debris flows from failures of Neoglacial-Age moraine dams in the Three Sisters and Mount Jefferson wilderness areas, Oregon., US Geol. Surv. Prof. Pap. , 1606, 2001.

---

Пантелидис, Л.: Оценка устойчивости горных склонов с помощью системы классификации горных пород, Международный научный журнал «International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences», 46(2), 315–325, doi: 10.1016/j.ijrmms.2008.06.003, 2009 год.

Pantelidis, L.: Rock slope stability assessment through rock mass classification systems, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 46(2), 315–325, doi:10.1016/j.ijrmms.2008.06.003, 2009.

---

---

**Паранунцио, Р., Лайо, Ф., Нигрелли, Г. и Киарле, М.:** Метод выявления климатических переменных, вызывающих обрушение склонов на большой высоте, *Международный научный журнал «Natural Hazards»*, выпуск №76(2), 1039–1061 стр., doi: 10.1007/s11069-014-1532-6, 2015 год.

**Paranunzio, R., Laio, F., Nigrelli, G. and Chiarle, M.:** A method to reveal climatic variables triggering slope failures at high elevation, *Nat. Hazards*, 76(2), 1039–1061, doi:10.1007/s11069-014-1532-6, 2015.

---

**Паранунцио, Р., Лайо, Ф., Киарле, М., Нигрелли, Г. и Гуццетти, Ф.:** Климатические аномалии, связанные с возникновением обвалов горных пород на больших высотах в Итальянских Альпах, *Международный междисциплинарный научный журнал «Natural Hazards and Earth System Sciences»*, doi: 10.5194/nhess-16-2085-2016, 2016 год.

**Paranunzio, R., Laio, F., Chiarle, M., Nigelli, G. and Guzzetti, F.:** Climate anomalies associated with the occurrence of rockfalls at high-elevation in the Italian Alps, *Nat. Hazards Earth Syst. Process.*, doi:10.5194/nhess-16-2085-2016, 2016.

---

**Пастор, М., Эррерос, И., Фернандес Меродо, Я. А., Мира, П., Хаддад, Б., Кекедо, М., Гонсалес, Э., Альварес-Седрон, С. и Дремпиц, В.:** Моделирование быстроразвивающихся катастрофических оползней и импульсные волны, вызываемые ими во фьордах, озерах и водохранилищах, *Международный междисциплинарный научный журнал «Engineering Geology»*, выпуск №109 (1), 124–134 стр., doi: 10.1016/j.enggeo.2008.10.006, 2009 год.

**Pastor, M., Herreros, I., Fernández Merodo, J. A., Mira, P., Haddad, B., Quecedo, M., González, E., Alvarez-Cedrón, C. and Dremptic, V.:** Modelling of fast catastrophic landslides and impulse waves induced by them in fjords, lakes and reservoirs, *Eng. Geol.*, 109(1), 124–134, doi:10.1016/j.enggeo.2008.10.006, 2009.

---

**Перов, В., Черноморец, С., Бударина О., Савернюк Е. и Леонтьева Т.:** Угр Опасность озы возникновения селевых потоков в горных регионах России: региональные особенности и ключевые события, *Международный научный журнал «Natural Hazards»*, 1–37 стр., doi: 10.1007 / s11069-017-2841-3, 2017 год.

**Perov, V., Chernomorets, S., Budarina, O., Savernyuk, E. and Leontyeva, T.:** Debris flow hazards for mountain regions of Russia: regional features and key events, *Nat. Hazards*, 1–37, doi:10.1007/s11069-017-2841-3, 2017.

---

**Филипп, М., Хаберкорн, А., Дрейбинг, Д., Краутблаттер, М., Рейнер, Х. и Кеннер, Р.:** Сезонно прерывистый поток воды, проходящий через глубокие разломы в альпийском горном хребте, *Международный научный журнал «Cold Regions Science and Technology»*, выпуск №125, 117–127 стр., doi: 10.1016/j.coldregions.2016.02.010, 2016 год.

**Phillips, M., Haberkorn, A., Draebing, D., Krautblatter, M., Rhyner, H. and Kenner, R.:** Seasonally intermittent water flow through deep fractures in an Alpine Rock Ridge: Gemsstock, Central Swiss Alps, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 125, 117–127, doi:10.1016/j.coldregions.2016.02.010, 2016.

---

**Филипп, М. Л. Б.-П.:** Влияние снежных опорных конструкций на термический режим грунта в высокогорной (альпийской) мерзлотной местности, Швейцарский федеральный институт исследований снега и лавин, Давос, 2000 год.

**Phillips, M. L. B.-P.:** Influences of snow supporting structures on the thermal regime of the ground in alpine permafrost terrain, *Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos.*, 2000.

---

**Пирсон, Т. К., Янда, Р. Дж., Турет Дж. К. и Борреро, С.А.:** Смещение и таяние снега и льда в результате извержения вулкана Невадо-дель-Руис в Колумбии 13 ноября 1985 г. и последующее образование, движение и осаждение лахаров, *Научный журнал «Journal of Volcanology and Geothermal Research»*, выпуск №41 (1–4), 17–66 стр., doi: 10.1016/0377-0273(90)90082-Q, 1990 год.

**Pierson, T. C., Janda, R. J., Thouret, J.-C. and Borrero, C. A.:** Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 41(1–4), 17–66, doi:10.1016/0377-0273(90)90082-Q, 1990.

---

**Плескен, Р., Койшниг М. и Краутблаттер, М.:** Систематический вывод анкерных сил в коренных породах под воздействием вечной мерзлоты, Серия публикация «Geophysical Research Abstracts», 19, 14476, 2017 год.

**Pläsken, R., Keuschnig, M. and Krautblatter, M.:** Systematic derivation of anchoring forces in permafrost-affected bedrock, *Geophys. Res. Abstr.*, 19, 14476, 2017.

---

---

**Погребиский, М. И. и Чернышев С. Н.** Определение проницаемости замерзшего массива скальных трещин в окрестностях Колымской гидроэлектростанции, доклад Исследовательской и инженерной лаборатории холодных регионов – черновой вариант перевода, 634, 1-13, 1977 год.

**Pogrebiskiy, M. I. and Chernyshev, S. N.:** Determination of the Permeability of the Frozen Fissured Rock Massif in the Vicinity of the Kolyma Hydroelectric Power Station, Cold Reg. Res. Eng. Lab. – Draft Transl., 634, 1–13, 1977.

---

**Пралонг, А. и Функ, М.:** О неустойчивости лавинных ледников, Научный журнал «Glaciology», выпуск №52, 31–48 стр., 2006 год.

**Pralong, A. and Funk, M.:** On the instability of avalanching glaciers, J. Glaciology, 52, 31–48, 2006.

---

**Квинси, Д. Дж., Ричардсон, С. Д., Лакман, А., Лукас, Р. М., Рейнольдс, Дж. М., Хэмбри, М. Дж. И Глассер, Н. Ф.:** Раннее распознавание опасностей ледниковых озера в Гималаях с использованием наборов данных дистанционного зондирования, Научный журнал «Global and Planetary Change», выпуск №56, 137–152 стр., 2007 год.

**Quincey, D. J., Richardson, S. D., Luckman, A., Lucas, R. M., Reynolds, J. M., Hambrey, M. J. and Glasser, N. F.:** Early recognition of glacial lake hazards in the Himalaya using remote sensing datasets, Glob. Planet. Change, 56, 137–152, 2007.

---

**Раеццо, Х., Лателтин, О., Боллинджер, Д. и Трип, Дж. П.:** Оценка опасностей в Швейцарии - Кодексы практики массовых движений, Научный журнал «Bulletin of Engineering Geology and the Environment», выпуск №61, 263–268 стр., 2002 год.

**Raetzto, H., Lateltin, O., Bollinger, D. and Tripet, J. P.:** Hazard assessment in Switzerland - Codes of Practice for mass movements, Bull Eng Geol Ev, 61, 263–268, 2002.

---

**Раванель, Л. и Делине, П.:** Влияние климата на обвалы горных пород на высокогорных крутых скалах: северная сторона Эгюи-де-Шамони (массив Монблан) с конца «Малого ледникового периода», Научный журнал «The Holocene», выпуск №21 (2), 357–365 стр., doi: 10.1177 / 0959683610374887, 2011 год.

**Ravel, L. and Deline, P.:** Climate influence on rockfalls in high-Alpine steep rockwalls: The north side of the Aiguilles de Chamonix (Mont Blanc massif) since the end of the “Little Ice Age,” The Holocene, 21(2), 357–365, doi:10.1177/0959683610374887, 2011.

---

**Раванель, Л., Аллингол, Ф., Делине, П., Грубер, С. и Равелло М.:** Обвалы горных пород в Монбланском массиве в 2007 и 2008 годах, Научный журнал «Landslides», выпуск №7, 493–501 стр., 2010 год.

**Ravel, L., Allignol, F., Deline, P., Gruber, S. and Ravello, M.:** Rock falls in the Mont Blanc Massif in 2007 and 2008, Landslides, 7, 493–501, 2010.

---

**Ребетец М., ЛУГОН, Р. И БАЕРИСИЛ, П. А.:** КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ И селевые ПОТОКИ В ВЫСОКО ГОРНЫХ РЕГИОНАХ: На примере изучения ПОТОКА В РИТИГРАБЕНЕ (ШВЕЙЦАРСКИЕ АЛЬПЫ), Международный научный журнал «Climatic Change», выпуск №36 (3/4), 371–389 стр., doi: 10.1023/A:1005356130392, 1997 год.

**Rebetez, M., LUGON, R. and BAERISWYL, P.-A.:** CLIMATIC CHANGE AND DEBRIS FLOWS IN HIGH MOUNTAIN REGIONS: THE CASE STUDY OF THE RITIGRABEN TORRENT (SWISS ALPS), Clim. Change, 36(3/4), 371–389, doi:10.1023/A:1005356130392, 1997.

---

**Ричардсон, С. Д. и Рейнольдс, Дж. М.:** Обзор ледниковых опасностей в Гималаях, Научный журнал «Quaternary International», выпуск 65/66, 31-47 стр., 2000 год.

**Richardson, S. D. and Reynolds, J. M.:** An overview of glacial hazards in the Himalayas, Quat. Int., 65/66, 31–47, 2000a.

---

**Ричардсон, С. Д. и Рейнольдс, Дж. М.:** Деградация моренных плотин с ледяным ядром: последствия для развития опасностей в ледниках, покрытых обломочными породами. Материалы семинара, проведенного в Сиэтле, Вашингтон, США, под редакцией М. Накаво, К. Ф. Раймонда и А. Фонтана, 187-198 стр., публикация Международной ассоциации гидрологических наук, Уоллингфорд, 2000 год.

**Richardson, S. D. and Reynolds, J. M.:** Degradation of ice-cored moraine dams: implications for hazard development, in Debris-covered Glaciers. Proceedings of a workshop held at Seattle, Washington, U.S.A., edited by M. Nakawo, C. F. Raymond, and A. Fountain, pp. 187–198, IAHS Publication, Wallingford., 2000b.

---

**Рикенманн, Д. и Циммерманн, М.:** Селевые потоки в 1987 году в Швейцарии: документация и анализ, Научный журнал «Geomorphology», выпуск №8, 175–189 стр., 1993 год.

**Rickenmann, D. and Zimmermann, M.:** The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis, *Geomorphology*, 8, 175–189, 1993.

---

**Робертс, М. Дж.:** Йокульхлэйп: переоценка потока паводковых вод через ледники, Научный журнал «Reviews of Geophysics», выпуск №43(1), RG1002, doi: 10.1029/2003RG000147, 2005 год.

**Roberts, M. J.:** Jökulhlaups: A reassessment of floodwater flow through glaciers, *Rev. Geophys.*, 43(1), RG1002, doi:10.1029/2003RG000147, 2005.

---

**Роберти, Г., Уорд, Б., ван Вик де Фриз, Б., Фриле, П. А., Перотти, Л., Клаг, Дж. и Джардино М.:** Предшествующее разрушение склона, приведшее к оползнию на горе Маунт Мега в 2010 году, Британская Колумбия. Научный журнал «Landslides», 10.1007/s10346-017-0901-0, 2017 год.

**Roberti, G., Ward, B., van Wyk de Vries, B., Friele, P.A., Perotti, L., Clague, J.J. and Giardino, M.:** Precursory slope distress leading up to the 2010 Mount Meager landslide, British Columbia. *Landslides*, 10.1007/s10346-017-0901-0, 2017.

---

**Раунс, Д. Р., Маккинни, Д. К., Лала, Дж. М., Байерс, А. К. и Уотсон, К. С.:** Новая система дистанционной оценки опасностей и рисков для ледниковых озер в Непальских Гималаях, Международный научный журнал «Hydrology and Earth System Sciences», выпуск №20, 3455–3475, doi: 10.5194/hess-20-3455-2016, 2016 год.

**Rounce, D. R., Mckinney, D. C., Lala, J. M., Byers, A. C. and Watson, C. S.:** A new remote hazard and risk assessment framework for glacial lakes in the Nepal Himalaya, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20, 3455–3475, doi:10.5194/hess-20-3455-2016, 2016.

---

**Раунс, Д. Р., Байерс, А. К., Байерс, Е. А. и Маккинни, Д. К.:** Краткое сообщение: Наблюдения за прорывом ледникового озера с ледника Лхоцзе, Эверест, Непал Международный научный журнал «The Cryosphere», выпуск №11, 443–449 стр., doi: 10.5194/tc-11-443-2017, 2017 год.

**Rounce, D. R., Byers, A. C., Byers, E. A. and Mckinney, D. C.:** Brief communication: Observations of a glacier outburst flood from Lhotse Glacier, Everest area, Nepal, *Cryosph.*, 11, 443–449, doi:10.5194/tc-11-443-2017, 2017.

---

**Сандерсон, Т.:** Механика льда и риски для оффшорных конструкций, Издательский дом «Springer», Амстердам, 1988 год.

**Sanderson, T.:** Ice mechanics and risks to offshore structures, Springer, Amsterdam., 1988.

---

**Сасс, О.:** Измерения влажности горных пород: методы, результаты и последствия выветривания, Международный научный журнал «Earth Surface Processes and Landforms», выпуск №30, 359–374 стр., 2005 год.

**Sass, O.:** Rock moisture measurements: techniques, results, and implications for weathering, *Earth Surf. Process. Landforms*, 30, 359–374, 2005.

---

**Саттлер, К.:** Перигляциальные предпосылки селевых потоков в Южных Альпах, Новая Зеландия, 2014 год.

**Sattler, K.:** Periglacial Preconditioning of Debris Flows in the Southern Alps , New Zealand, 2014.

---

**Шауб, Я., Хэберли, В., Хуггель, К., Кюнцлер, М. и Брюндль, М.:** Оползни и новые озера в районах дегляциации: основа управления рисками, Научная публикация «Landslide Science and Practice» под редакцией К. Марготтини, П. Канути и К. Сасса, 31–38 стр., Издательский дом «Springer», Берлин, Гейдельберг, 2013 год.

**Schaub, Y., Haeberli, W., Huggel, C., Künzler, M. and Bründl, M.:** Landslides and new lakes in deglaciating areas: a risk management framework, in *Landslide Science and Practice*, edited by C. Margottini, P. Canuti, and K. Sassa, pp. 31–38, Springer, Berlin Heidelberg., 2013.

---

**Шауб, Я., Хуггель, К., и Кочачин, А.:** Разработка сценария развития ледяной лавины и факторы неопределенности в численном моделировании ударных волн, вызванных каменными/ледовыми лавинами на горе Хуалкан и Озере №513, Перу, Научный журнал «Landslides», doi: 10.1007/s10346-015-0658-2, 2015 год.

**Schaub, Y., Huggel, C. and Cochachin, A.:** Ice-avalanche scenario elaboration and uncertainty propagation in numerical simulation of rock-/ice-avalanche-induced impact waves at Mount Hualcán and Lake 513, Peru, *Landslides*, doi:10.1007/s10346-015-0658-2, 2015.

---

---

**Шнайдер, Д., Хуггел, К., Хэберли, В. и Каитна, Р.:** Объяснение движущих факторов подвижности крупных каменно-ледяных лавин, *Международный научный журнал «Earth Surface Processes and Landforms»*, выпуск №36, 1948–1966 стр., 2011 год.

**Schneider, D., Huggel, C., Haeblerli, W. and Kaitna, R.:** Unraveling driving factors for large rock-ice avalanche mobility, *Earth Surf. Process. Landforms*, 36, 1948–1966, 2011.

---

**Шнайдер, Д., Хуггел, К., Кочачин, А., Гильен, С. и Гарсия, Дж.:** Картирование опасностей, связанных с прорывом ледникового озера, основанное на моделировании технологических каскадов на Озере №513, Кархуаз, Перу, *Научный журнал «International Journal of Advanced Geosciences»*, выпуск №35, 145–155 стр., doi: 10.5194 / adgeo-35-145-2014, 2014 год.

**Schneider, D., Huggel, C., Cochachin, A., Guillén, S. and García, J.:** Mapping hazards from glacier lake outburst floods based on modelling of process cascades at Lake 513, Carhuaz, Peru, *Adv. Geosci.*, 35, 145–155, doi:10.5194/adgeo-35-145-2014, 2014.

---

**Шнайдер, Дж. Ф., Gruber, F. E. and Mergili, M.:** Недавние случаи и геоморфологические данные о завальных озерах и связанных с ними опасностями в горах Центральной Азии, *Научная публикация «Landslide Science and Practice»*, 57–64 стр., Издательский дом «Springer», Берлин, Гейдельберг, 2013 год.

**Schneider, J. F., Gruber, F. E. and Mergili, M.:** Recent Cases and Geomorphic Evidence of Landslide-Dammed Lakes and Related Hazards in the Mountains of Central Asia, in *Landslide Science and Practice*, pp. 57–64, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg., 2013.

---

**Шнойвли-Боллшвайлер, М. и Штоффель, М.:** Гидрометеорологические триггеры перигляциальных селевых потоков в долине Церматта (Швейцария) с 1864 года, *Научный журнал «Journal of Geophysical Research: Earth Surface»*, выпуск №117(F2), n/a-n/a, doi: 10.1029/2011JF002262, 2012 год.

**Schneuwly-Bollschweiler, M. and Stoffel, M.:** Hydrometeorological triggers of periglacial debris flows in the Zermatt valley (Switzerland) since 1864, *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 117(F2), n/a-n/a, doi:10.1029/2011JF002262, 2012.

---

**Швангхарт, В., Бернхардт, А., Штолле, А., Хёльцманн, П., Адхикари, Б. Р., Андерманн, К., Тофельде, С., Мершель, С., Ругель, Г., Форт, М. и Коруп, О.:** Неоднократные катастрофические завалы долины после средневековых землетрясений в Непальских Гималаях, *Научный журнал «Science (80-»*), 351 (6269), 2016 год.

**Schwanghart, W., Bernhardt, A., Stolle, A., Hoelzmann, P., Adhikari, B. R., Andermann, C., Tofelde, S., Merchel, S., Rugel, G., Fort, M. and Korup, O.:** Repeated catastrophic valley infill following medieval earthquakes in the Nepal Himalaya, *Science (80- )*, 351(6269), 2016a.

---

**Швангхарт, В., Ворни, Р., Хуггел, К., Штоффель, М. и Коруп, О.:** Неопределенность во взаимосвязи в водно-энергетических ресурсах Гималаев: оценка подверженности региона наводнениям, вызванным прорывом ледниковых озер, *Научный журнал «Environmental Research Letters»*, выпуск №11(7), 74005, doi: 10.1088/1748-9326/11/7/074005, 2016 год.

**Schwanghart, W., Worni, R., Huggel, C., Stoffel, M. and Korup, O.:** Uncertainty in the Himalayan energy–water nexus: estimating regional exposure to glacial lake outburst floods, *Environ. Res. Lett.*, 11(7), 74005, doi:10.1088/1748-9326/11/7/074005, 2016b.

---

**Сейнова, И. Б., Андреев Б., Крыленко Н., Черноморец С. С. и Ломоносов М. В.:** РЕГИОНАЛЬНЫЙ КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ селевых ПОТОКОВ В ЛЕДНИКОВЫХ ВЫСОКОГОРНЫХ ЗОНАХ КАВКАЗА, *Научный журнал «Italian Journal of Engineering Geology and Environment»*, Doi: 10.4408 / IJEGE.2011-03.B-109, 2011 год.

**Seinova, I. B., Andreev, B., Krylenko, N., Chernomorets, S. S. and Lomonosov, M. V.:** REGIONAL SHORT-TERM FORECAST OF DEBRIS FLOW INITIATION FOR GLACIATED HIGH MOUNTAIN ZONE OF THE CAUCASUS, *Ital. J. Eng. Geol. Environment.*, doi:10.4408/IJEGE.2011-03.B-109, 2011.

---

**Сейнова, И. Б., Черноморец С. С., Докукин М. Д., Петраков Д. А., Савернюк Е. А., Лукашов А. А., Белоусова Е. А.:** Формирование потока воды в лахарах из действующих ледниковых вулканов, *Международный научный журнал «Earth`s Cryosphere»*, в печати, 2017 год.

**Seynova, I. B., Chernomorets, S. S., Dokukin, M. D., Petrakov, D. A., Savernyuk, E. A., Lukashov, A. A. and Belousova, E. A.:** Formation of water flow in lahars from active glacier-clad volcanoes, *Earth's Cryosph.*, in press, 2017.

---

**Сеневираатне, С. И., Николс, Н., Истрин, Д., Гудесс, К. М., Кана, С., Коссин, Дж., Ло, Ю., Маренго, Дж., Макиннес, К., Рахими, М., Рейхштейн, М., Сортеберг, А., Вера, К. и Жанг, Ш.:** Изменения экстремальных климатических условий и их воздействия на естественную физическую среду, Управление рисками экстремальных явлений и бедствий в целях содействия адаптации к изменению климата. Специальный доклад рабочих групп I и II Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГИК) под редакцией К. Б. Филда, В. Баррос, Т. Ф. Штокер, Д. Цинь, Д. Дж. Докен, К. Л. Эби, М. Д. Мастрандра, К. Дж. Мах, Г. К. Платтнер, С. К. Аллен, М. Тиньор и П. М. Мидгли, 109–230 стр., Издательство Кембриджского университета, Кембридж, Великобритания и Нью-Йорк, штат Нью-Йорк, США, 2012 год.

**Seneviratne, S. I., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C. M., Kanae, S., Kossin, J., Luo, Y., Marengo, J., McInnes, K., Rahimi, M., Reichstein, M., Sorteberg, A., Vera, C. and Zhang, X.:** Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment, in *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, edited by C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D. J. Dokken, K. L. Ebi, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, G. K. Plattner, S. K. Allen, M. Tignor, and P. M. Midgley, pp. 109–230, Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA., 2012.

---

**Шугар, Д. Х., Рабус, Б. Т., Клаг, Дж. Дж. и Каппс, Д. М.:** Реакция ледника Блэк Рапидс, Аляска, на каменную лавину в результате землетрясений в Денали, Дж. Геофиз. Научный журнал «*Journal of Geophysical Research*», выпуск №117 (F1), n / a-n / a, doi: 10.1029 / 2011JF002011, 2012 год.

**Shugar, D. H., Rabus, B. T., Clague, J. J. and Capps, D. M.:** The response of Black Rapids Glacier, Alaska, to the Denali earthquake rock avalanches, *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 117(F1), n/a-n/a, doi:10.1029/2011JF002011, 2012.

---

**Штоффель, М. и Боллшвайлер, М.:** Анализ годовых колец в исследовании природных опасностей – обзор, *Международный научный журнал «Natural Hazards» Earth Syst. Sci.*, 8, 187–202, 2008.

**Stoffel, M. and Bollschweiler, M.:** Tree-ring analysis in natural hazards research – an overview, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8, 187–202, 2008.

---

**Штоффель, М. и Боллшвайлер, М. и Бенистон, М.:** Характеристики дождевых осадков для перигляциальных селевых потоков в Швейцарских Альпах: случаи в прошлом - потенциальные изменения в будущем *Международный научный журнал «Climatic Change»*, выпуск №105, 263–280 стр., 2011 год.

**Stoffel, M., Bollschweiler, M. and Beniston, M.:** Rainfall characteristics for periglacial debris flows in the Swiss Alps: past incidences-potential future evolutions, *Clim. Change*, 105, 263–280, 2011.

---

**Стокс, К. Р., Герни, С. Д., Шахгеданова, М. и Поповнин, В.:** Изменения площади ледников в горах Кавказ, Россия/Грузия в конце XX века, *Научный журнал «Journal of Glaciology»*, выпуск №52(176), 99–109 стр., doi: 10.3189/172756506781828827, 2006 год.

**Stokes, C. R., Gurney, S. D., Shahgedanova, M. and Popovnin, V.:** Late-20th-century changes in glacier extent in the Caucasus Mountains, Russia/Georgia, *J. Glaciol.*, 52(176), 99–109, doi:10.3189/172756506781828827, 2006.

---

**Танг, Г. З. и Ванг, Ш. Х.:** Моделирование границы таяния в зонах обрушения горных породы в вечномерзлых грунтах при наличии поверхностных водотоков, *Научный журнал «Tunnelling and Underground Space Technology»*, выпуск №21, 684–689 стр., 2006 год.

**Tang, G. Z. and Wang, X. H.:** Modeling the thaw boundary in broken rock zones in permafrost in the presence of surface water flows, *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, 21, 684–689, 2006.

---

**Темме, А. Дж. А. М.:** Использование руководств по альпинизму для проведения оценки моделей падения горных пород в больших пространственных и десятилетних временных масштабах: пример из Швейцарских Альп, *Научная публикация «Geografiska Annaler Series A Physical Geography»*, выпуск №97(4), 793–807 стр., doi: 10.1111/geoa.12116, 2015 год.

**Temme, A. J. A. M.:** Using Climber's Guidebooks to Assess Rock Fall Patterns Over Large Spatial and Decadal Temporal Scales: An Example from the Swiss Alps, *Geogr. Ann. Ser. A, Phys. Geogr.*, 97(4), 793–807, doi:10.1111/geoa.12116, 2015.

---

**Туре, Дж. К.:** Последствия извержения 13 ноября 1985 г. на снежный покров и ледяную шапку вулкана Невадо-дель-Руис, Колумбия, *Научный журнал «Journal of Volcanology and Geothermal Research»*, выпуск №41 (1–4), 177–201 стр., doi: 10.1016 / 0377-0273 (90) 90088-W, 1990 год.

**Thouret, J.-C.:** Effects of the November 13, 1985 eruption on the snow pack and ice cap of Nevado del Ruiz volcano, Colombia, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 41(1–4), 177–201, doi:10.1016/0377-0273(90)90088-W, 1990.

---

**Тян, Л., Т., У., Гао, У., Томпсон, Л., Мосли-Томпсон, Э., Мухаммад, С., Цонг, Дж., Ван, К., Цзинь, С. и Ли, Ш.:** Обрушение двух ледников в западном Тибете, Научный журнал «Journal of Glaciology», выпуск №63, 194–197 стр., 2017 год.

**Tian, L., T., Y., Gao, Y., Thompson, L., Mosley-Thompson, E., Muhammad, S., Zong, J., Wang, C., Jin, S. and Li, Z.:** Two glaciers collapse in western Tibet, J. Glaciology, 63, 194–197, 2017.

**Тоблер, Д., Кулл, И., Жакемарт, М. и Хейлен, Н.:** Управление угрозами в зоне воздействия селевых потоков: пример из Шпритграбена, Швейцария, Научная публикация «Landslide Science for a Safer Geoenvironment», под редакцией К. Сасса, П. Канути и Я. Ин, 25–30 стр., Издательский дом «Springer International Publishing», 2014 год.

**Tobler, D., Kull, I., Jacquemart, M. and Haehlen, N.:** Hazard Management in a Debris Flow Affected Area: Case Study from Spreitgraben, Switzerland, in Landslide Science for a Safer Geoenvironment, edited by K. Sassa, P. Canuti, and Y. Yin, pp. 25–30, Springer International Publishing., 2014.

**МСУОБ ООН:** Терминологический глоссарий МСУОБ ООН по снижению риска бедствий, Организация Объединенных Наций, Женева, 2009 год.

**UNISDR:** UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction, United Nations, Geneva., 2009.

**Валланс, Дж. В., Кунико, М. Л. и Шиллинг, С. П.:** Опасность селевого потока, вызванного гидрологическими явлениями на горе Рейнир, Вашингтон. Отчет в открытом доступе 03-368.e, Ванкувер, Вашингтон, 2003 год.

**Vallance, J. W., Cunico, M. L. and Schilling, S. P.:** Debris-flow hazards caused by hydrologic events at Mount Rainier, Washington. Open-file Report 03-368.e, Vancouver, Washington., 2003.

**Воан Д. Г., Комисо Дж. К., Эллисон, И., Карраско, Дж., Казер, Г., Квок, Р., Моте, П., Мюррей, Т., Пауль, Ф., Рен, Дж., Ригнот, Е., Соломина, О., Штеффен, К. и Чжан, Т.:** Наблюдения: Криосфера, в изменении климата 2013 г.: Основы физической науки. Вклад Рабочей группы I в пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата под редакцией Т. Ф. Стокера, Д. Цинь, Г.-К., Платтнер, М. Тигнор, С. К. Аллен, Дж. Бошунг, А. Науэльс, Я. Ся, В. Бекс и П. М. Мидгли, 317–382 стр., Издательство Кембриджского университета, Кембридж, Великобритания и Нью-Йорк, штат Нью-Йорк, США, 2013 год.

**Vaughan, D. G., Comiso, J. C., Allison, I., Carrasco, J., Kaser, G., Kwok, R., Mote, P., Murray, T., Paul, F., Ren, J., Rignot, E., Solomina, O., Steffen, K. and Zhang, T.:** Observations: Cryosphere, in Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P. M. Midgley, pp. 317–382, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., 2013.

**Вилимек В., Эммер А., Хаггель С., Шауб, Ю. и Вюрмли, С.:** База данных о прорывах ледниковых озер» (ПЛО) – Международная программа по оползням, Проект №179, Научный журнал «Landslides», выпуск №11(1), 161–165 стр., doi: 10.1007/s10346-013-0448-7, 2014 год.

**Vilimek, V., Emmer, A., Huggel, C., Schaub, Y. and Würmli, S.:** Database of glacial lake outburst floods (GLOFs)–IPL project No. 179, Landslides, 11(1), 161–165, doi:10.1007/s10346-013-0448-7, 2014.

**Войт, Б.:** Катастрофа вулкана Невадо дель Руис в 1985 году: анализ и ретроспекция, Научный журнал «Journal of Volcanology and Geothermal Research», выпуск №44(3–4), 349–386 стр., doi: 10.1016/0377-0273(90)90027-D, 1990 год.

**Voight, B.:** The 1985 Nevado del Ruiz volcano catastrophe: anatomy and retrospection, J. Volcanol. Geotherm. Res., 44(3–4), 349–386, doi:10.1016/0377-0273(90)90027-D, 1990.

**Уэйтт, Р.Б., Пирсон, Т.К., Маклеод, Н.С., Джанда, Р. Дж., Войт, Б. и Холкомб, РТ:** сход лавины, наводнение и лахар на горе Сент-Хеленс, вызванные извержением вулкана – эффекты зимы, Научный журнал «Science (80-.)», 221 (4618), 1394–1397, 1983 год.

**Waite, R. B., Pierson, T. C., Macleod, N. S., Janda, R. J., Voight, B. and Holcomb, R. T.:** Eruption-Triggered Avalanche, Flood, and Lahar at Mount St. Helens--Effects of Winter, Science (80-.), 221(4618), 1394–1397, 1983.

**Уотсон, К. С., Карривик, Дж. И Квинси, Д.:** Усовершенствованный метод представления неопределенности ЦМР в распространении паводков, вызванных прорывом ледниковых озер с использованием стохастического моделирования, Научный журнал «Journal of Hydrology», 529, 1373–1389, doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.08.046, 2015 год.

**Watson, C. S., Carrivick, J. and Quincey, D.:** An improved method to represent DEM uncertainty in glacial lake outburst flood propagation using stochastic simulations, J. Hydrol., 529, 1373–1389, doi:10.1016/j.jhydrol.2015.08.046, 2015.

---

**Вэйтомас, К. Ф., Уоттс, П., Ши, Ф. и Кирби, Дж. Т.:** Опасности цунами в Тихоокеанском бассейне, связанные с массовыми потоками в Алеутской дуге Аляски, *Международный научный журнал «Quaternary Science Reviews»*, 28(11), 1006–1019, doi: 10.1016/j.quascirev.2009.02.019, 2009 год.

**Waythomas, C. F., Watts, P., Shi, F. and Kirby, J. T.:** Pacific Basin tsunami hazards associated with mass flows in the Aleutian arc of Alaska, *Quat. Sci. Rev.*, 28(11), 1006–1019, doi:10.1016/j.quascirev.2009.02.019, 2009.

---

**Вегманн, М.:** Динамика мороза в высокогорных альпийских скалах на примере региона Юнгфрауйох – Алеш, Швейцарская высшая техническая школа Цюриха, Цюрих, 1998 год.

**Wegmann, M.:** Frostdynamik in hochalpinen Felswänden am Beispiel der Region Jungfrauoch – Aletsch, ETH Zurich, Zurich., 1998.

---

**Вегманн, М., Гудмундссон, Г. Х. и Хэберли, В.:** Изменения состояния вечной мерзлоты в скальных стенах и отступление альпийских ледников: подход термического моделирования. *Международный научный журнал «Permafrost and Periglacial Processes»*, выпуск №9, 23–33 стр., 1998 год.

**Wegmann, M., Gudmundsson, G. H. and Haeblerli, W.:** Permafrost changes in rock walls and the retreat of Alpine glaciers: a thermal modelling approach., *Permafrost. Periglac. Process.*, 9, 23–33, 1998.

---

**Уэстоби, М. Дж., Глассер, Н. Ф., Брасингтон, Дж., Хэмбри, М. Дж., Куинси, Д. Дж. и Рейнолдс, Дж. М.:** Моделирование паводков прорыва ледниковых озер, подпруженных моренной дамбой, *Научный журнал «Earth-Science Reviews»*, выпуск №134, 137–159 стр., doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.03.009, 2014 год.

**Westoby, M. J., Glasser, N. F., Brasington, J., Hambrey, M. J., Quincey, D. J. and Reynolds, J. M.:** Modelling outburst floods from moraine-dammed glacial lakes, *Earth-Science Rev.*, 134, 137–159, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.03.009, 2014.

---

**Ван дер Вёрд, Я., Оуэн, Л. А., Таппонниер, П., Сивэй, Х., Кервин, Ф., Финкель, Р. С. и Барнард, П. Л.:** Гигантские ледяные лавины вызванные землетрясением M8 в восточной части Куньлунь Шаня, северный Тибет: характеристики, природа и динамика, *Научный журнал «Geological Society of America Bulletin»*, выпуск №116(3), 394 стр., doi: 10.1130/B253171, 2004 год.

**van der Woerd, J., Owen, L. A., Tapponnier, P., Xiwei, X., Kervyn, F., Finkel, R. C. and Barnard, P. L.:** Giant, ~M8 earthquake-triggered ice avalanches in the eastern Kunlun Shan, northern Tibet: Characteristics, nature and dynamics, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 116(3), 394, doi:10.1130/B253171, 2004.

---

**Уорни, Р., Хуггель, К., Штоффель, М. и Пульгарин, Б.:** Проблемы моделирования существующих очень крупных лахаров на вулкане Невадо-дель-Хуила, Колумбия, *Научный журнал «Bulletin of Volcanology»*, выпуск №74, 309–324 стр., 2012 год.

**Worni, R., Huggel, C., Stoffel, M. and Pulgarin, B.:** Challenges of modeling current very large lahars at Nevado del Huila Volcano, Colombia, *Bull. Volcanol.*, 74, 309–324, 2012.

---

**Уорни, Р., Хуггель, К. и Штоффель, М.:** Ледниковые озера в Индийских Гималаях – от крупномасштабной инвентаризации ледниковых озер до местной оценки и моделирования рисков критических ледниковых озер, *Научный журнал «Science of the Total Environment»*, 468–469 стр., s71–s84, 2013 год.

**Worni, R., Huggel, C. and Stoffel, M.:** Glacier lakes in the Indian Himalayas – From an area-wide glacial lake inventory to on-site and modeling based risk assessment of critical glacial lakes, *Sci. Total Environ.*, 468–469, s71–s84, 2013.

---

**Уорни, Р., Хуггель, К., Клайг, Дж. Дж., Шауб, Ю. и Штоффель, М.:** Связь воздействия ледникового озера, прорыв плотины и процессов наводнения: перспектива моделирования, *Научный журнал «Geomorphology»*, выпуск №224, 161–176 стр., doi: 0.1016/j.geomorph.2014.06.031, 2014 год.

**Worni, R., Huggel, C., Clague, J. J., Schaub, Y. and Stoffel, M.:** Coupling glacial lake impact, dam breach, and flood processes: A modeling perspective, *Geomorphology*, 224, 161–176, doi:0.1016/j.geomorph.2014.06.031, 2014.

---

**Ху, С., Ху, Ш., Тянь, Ю., Шен, Л., Яо, К., Хуан, Х., Ма, Дж., Чен, Х. и Ма, С.:** Два сопоставимых по силе землетрясения, приведших к существенно различным сейсмическим оползням: События 2015 года в Горке, Непал и 2008 года в Венчуане, Китай, *Научный журнал «Journal of Earth Science»*, выпуск №27(6), 1008–1015, doi: 10.1007/s12583-016-0684-6, 2016 год.

**Xu, C., Xu, X., Tian, Y., Shen, L., Yao, Q., Huang, X., Ma, J., Chen, X. and Ma, S.:** Two comparable earthquakes produced greatly different coseismic landslides: The 2015 Gorkha, Nepal and 2008 Wenchuan, China events, *J. Earth Sci.*, 27(6), 1008–1015, doi:10.1007/s12583-016-0684-6, 2016.

---

---

**Цемп, М., Хэберли, У., Хольцле, М. и Пауль, Ф.:** Исчезнут ли Альпийские ледники в течение ближайших десятилетий? Научная публикация «Geophysical Research Letters», выпуск №33, doi: 10.1029/2006GL026319, 2006 год.

**Zemp, M., Haeberli, W., Hoelzle, M. and Paul, F.:** Alpine glaciers to disappear within decades?, *Geophys. Res. Lett.*, 33, doi:10.1029/2006GL026319, 2006.

---

**Цемп, М., Фрей, Х., Гартнер-Рёр, И., Нуссбаумер, С. У., Хельцле, М., Пауль, Ф., Хэберли, У., Денцингер, Ф., Альстрём, А. П., Андерсон, Б., Байрачарья, С., Барони, К., Браун, Л. Н., Касерес, Б. Э. и Сангвар, С. В.:** Исторически беспрецедентное глобальное сокращение ледников в начале XXI века, Научный журнал «Journal of Glaciology», выпуск №61(228), 754–762 стр., doi: 10.3189/2015JoG15J017, 2015 год.

**Zemp, M., Frey, H., Gärtner-Roer, I., Nussbaumer, S. U., Hoelzle, M., Paul, F., Haeberli, W., Denzinger, F., Ahlström, A. P., Anderson, B., Bajracharya, S., Baroni, C., Braun, L. N., Cáceres, B. E. and Sangewar, C. V.:** Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century, *J. Glaciol.*, 61(228), 754–762, doi:10.3189/2015JoG15J017, 2015.

---

**Циммерманн, М. и Хэберли, В.:** Климатические изменения и селевые потоки в высокогорных районах: тематическое исследование в Швейцарских Альпах, Научный журнал «Catena Supplement», выпуск №22, 49–72 стр., 1992 год.

**Zimmermann, M. and Haeberli, W.:** Climatic change and debris flow activity in high mountain areas: a case study in the Swiss Alps, *Catena Suppl.*, 22, 49–72, 1992.

---



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Швейцарская Конфедерация  
Швейцарское агентство по  
развитию и сотрудничеству SDC

Федеральный департамент  
экономики, образования и научных  
исследований EAER  
Государственный секретариат по  
экономическим вопросам SECO



**PROYECTO  
GLACIARES+**  
Más allá de los riesgos hacia  
las oportunidades



University of  
Zurich<sup>12H</sup>



**GAPHAZ**

Постоянная научная группа Международной  
ассоциации криосферных наук (IACS) и  
Международной ассоциации по  
мерзлотоведению (IPA)

