

Опасные гляциальные процессы и защита от них

Glacier hazards and protection from them

ПЕТРАКОВ Д.А.

Старший научный сотрудник кафедры криолитологии и гляциологии географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, канд. геогр. наук

PETRAKOV D.A.

Senior researcher of the cryolithology and glaciology department of the geography faculty of Moscow State University

Ключевые слова: опасные гляциальные процессы; ледяные лавины; многостадийные процессы; гляциальные сели; подвижки ледников; сёрджи; снижение гляциального риска.

Аннотация: в статье приводится обзор опасных процессов гляциального генезиса. На конкретных примерах анализируются факторы их зарождения и особенности развития. Предпринимается попытка типизации опасных гляциальных процессов с точки зрения перспектив защиты населения и территории. Предлагается система мероприятий по снижению гляциального риска.

Key words: hazardous glacial processes; ice avalanches; multistage processes; glacial torrents; glacier motions; surges; glacial risk decrease.

Abstract: the article provides an overview of hazardous processes of glacial origin. It analyzes their origin factors and development features using specific examples. An attempt of typifying hazardous glacial processes from the perspective of protecting the population and the territory is made. A system of measures to decrease the glacial risk is proposed.

ВВЕДЕНИЕ

Стихийно-разрушительные процессы ледникового генезиса относятся к числу наиболее распространенных опасных природных явлений в горных районах. Зарождаясь высоко в горах, они могут уничтожать природную среду и хозяйственную инфраструктуру территорий, расположенных далеко за пределами нивально-гляциального пояса. Известны случаи, когда в зоне воздействия опасных ледниковых процессов оказывались районы, удаленные от ледников на десятки (Геналдон, 2002; Руис, 1985), на сотни (Уарас, 1941; Уаскаран, 1970) и даже на тысячу (Инд, 1932) километров [1, 24, 30, 33]. В XX веке опасные гляциальные процессы унесли жизни более чем 30 тыс. человек, а ежегодные убытки от их проявлений в мире оцениваются в 100 млн евро [27].

В большинстве горно-ледниковых районов России территории неподалеку от ледников практически не освоены. Только на Центральном Кавказе населенные пункты и инфраструктура исторически располагались вблизи ледников, а в последние годы там даже шло интенсивное и зачастую бесконтрольное освоение территорий. В начале XXI века от опасных гляциальных процессов в том регионе погибло более 140 человек, а материальный ущерб превысил 150 млн евро. Несмотря на это, понятие «опасные

гляциальные (ледниковые) процессы» в соответствующих российских нормативных документах отсутствует [14, 15].

Современное сокращение ледников способствует трансформации очагов стихийно-разрушительных процессов гляциального генезиса и смещению границ опасных зон. В результате под ударом стихии могут оказаться населенные пункты и инфраструктура, расположенные в безопасных с точки зрения исторического опыта местах. Ожидается, что прогнозируемые изменения климата вызовут возрастание гляциальной активности [35], что вместе с продолжающимся ростом населения и хозяйственным освоением горных территорий может привести к увеличению количества жертв и убытков.

Цель данной работы — обратить внимание специалистов по инженерным изысканиям в строительстве на существующую проблему. Приводится обзор опасных процессов гляциального генезиса и предпринимается попытка их типизации с точки зрения перспектив защиты людей и территорий от опасных гляциальных процессов.

Терминология и типизация

В мировой науке к опасным гляциальным (ледниковым) процессам обычно относят ледяные, ледово-каменные и каменные лавины, гляциальные сели и паводки, подвижки ледни-

ков, многостадийные (комплексные) процессы и лахары [26, 35 и др.].

В российской науке понятие «опасные гляциальные процессы» до сих пор однозначно не определено. В Гляциологическом словаре [2] под термином «гляциальный» понимается то, что связано с ледниками. Определение «опасных гляциальных процессов» в упомянутом словаре отсутствует, а под «гляциальной опасностью территории» понимаются все виды воздействия компонентов нивально-гляциальной системы на окружающую среду, то есть воздействие на территорию снега и льда, а не только ледников. На взгляд автора, это не вполне корректно расширяет понятие «гляциальный» из того же источника. Иногда к опасным гляциальным процессам относят только обвалы, подвижки [13], сёрджи ледников и гляциальные сели пульсирующих ледников [8], что приводит к сужению термина «гляциальный».

Приведем такое определение: «*Опасные гляциальные процессы* — это любые процессы, связанные с ледниками, которые могут прямо или косвенно привести к неблагоприятным социальным, экономическим и/или экологическим последствиям» (рис. 1). Некоторые из них локализованы в высокогорной зоне. Вниз по долинам спускаются сели и паводки гляциального происхождения, лахары.

Гляциальная опасность территории зависит от частоты (повторяемости) и интенсивности (объема, скорости) опасных гляциальных процессов.

Гляциальный риск зависит от гляциальной опасности территории и уязвимости (чувствительности) конкретных объектов инфраструктуры и людей к воздействию опасных гляциальных процессов. Иначе говоря, при одинаковой опасности для различных объектов риск может резко различаться. Наиболее высокий гляциальный риск отмечается в горно-ледниковых районах с высокой плотностью населения и развитой инфраструктурой. Это прежде всего Анды, Альпы и Гималаи. В России гляциальный риск наиболее высок на Кавказе.

Опасные гляциальные процессы

Ледяные лавины

Ледяная лавина — это срыв с ледника масс фирна и льда [2]. Это нормальный процесс расхода вещества с висячих ледников, расположенных на крутых склонах. Во время падения лед обычно дезагрегируется до мельчайших кусков и ледяной пыли, поэтому по своему разрушительному воздействию ледяные лавины похожи на снежные.

По характеру зарождения обычно выделяют два типа ледяных лавин: (1) возникшие в результате откола пластин льда с фронтального обрыва ледника и (2) возникшие в результате соскальзывания части ледника вниз по склону [18]. Лавины первого типа имеют небольшой объем и часто возникают на висячих ледниках. Объем лавин второго типа иногда достигает нескольких миллионов м³, они могут приводить к жертвам и разрушениям.

Пик активности ледяных лавин приходится на теплый период, но они сходят в любое время года (рис. 2). По эмпирическим данным, в Альпах критический угол, необходимый для их зарождения, составляет 25° на теплых и 45° на холодных ледниках, а угол наклона их зоны транзита не превышает 17° [18]. В зоне прямого воздействия таких лавин могут оказаться территории не дальше нескольких километров от ледника. Несмотря на это, в Альпах ледяные лавины унесли 38% жертв опасных гляциальных процессов, а в Швейцарии — более 50% [36]. Известны случаи, когда от ледяных лавин гибли десятки человек. Особенно показателен случай с ледяной лавиной, разрушившей лагерь строителей плотины Маттмарк под ледником Аллалин (Швейцария, 1965). При выборе места для будущей плотины была проведена детальная оценка лавинной опасности. Было выбрано единственное безопасное с точки зрения схода снежных лавин место. Опасность ледяных лавин при этом не учитывалась, тем более что исторических прецедентов таких лавин не было (раньше ледник спускался в основную долину). 30 августа 1965 года ледяная лавина с языка ледника Аллалин объемом около 1 млн м³ разрушила строительную площадку (рис. 3) и погубила 88 человек, работавших на строительстве ГЭС. Катастрофа привела к дипломатическому скандалу между Швейцарией и Италией, поскольку большинство погибших были гражданами Италии (по устному сообщению В. Хеберли).

Ледяные лавины могут быть триггером других опасных гляциальных процессов. Так, более 50% прорывов прогляциальных озер в Гималаях было вызвано падением ледяных лавин [37]. Угроза прорыва озера Палькакоча (хребет Кордильера-Бланка, Перу) из-за схода ледяной лавины в 2003 году привела к панике среди жителей нижеле-

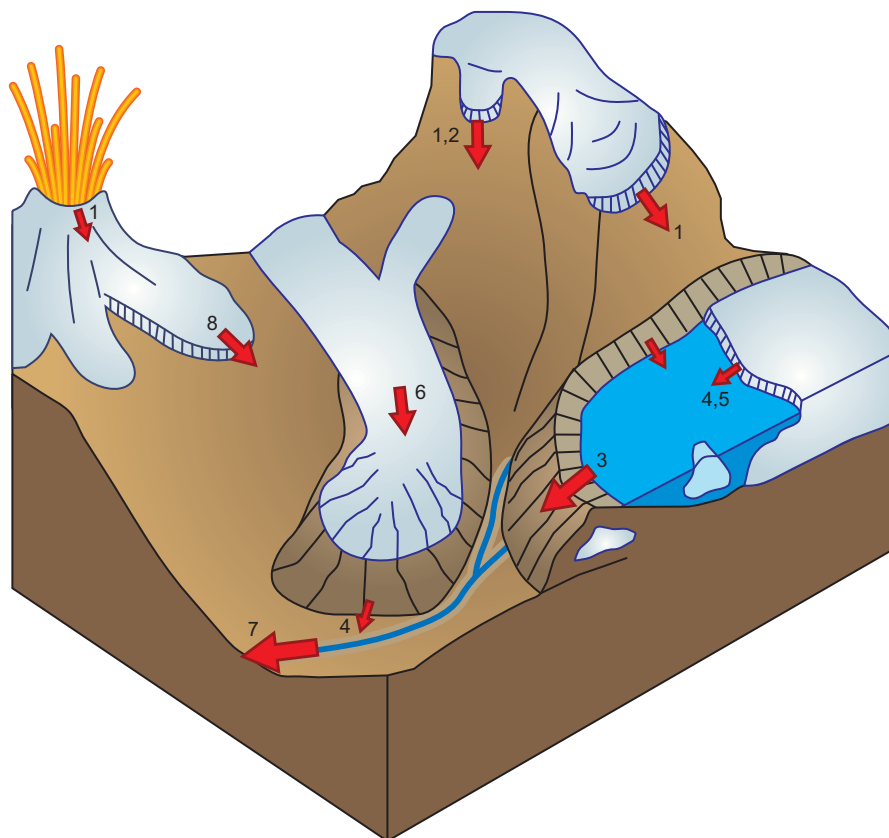


Рис. 1. Опасные гляциальные процессы в горах: 1 — ледяная лавина; 2 — ледово-каменная лавина; 3 — прорыв ледникового озера; 4 — прорыв внутриледниковой полости; 5 — откол айсбергов; 6 — подвижка; 7 — гляциальный паводок или сель; 8 — лахар

жащего города Уарас и ко многомиллионным убыткам из-за сокращения туристического потока [19]. К счастью, катастрофы не произошло.

В России от ледяных лавин гибли только альпинисты, но при развитии инфраструктуры в горно-ледниковых районах возможность схода ледяных лавин учитывать необходимо. Так, инфраструктура Чегетской поляны в Приэльбрусье находится под угрозой схода ледяной лавины с ледника Когутай.

Ледово-каменные лавины

Ледово-каменная лавина — это срыв части ледника вместе с нижеле-

жащими горными породами (г. Стил, хр. Св. Ильи, Канада, 2007; г. Стеллер, горы Чугач, Аляска, США, 1973 г. и др., рис. 4). [23, 29]. Такие лавины образуются вследствие землетрясений (Уаскаран, 1970), геотермальных/вулканических воздействий, роста температуры многолетней мерзлоты на ложе ледников [22], климатически обусловленного увеличения температуры льда холодных ледников или роста абляции теплых ледников.

Ледово-каменные лавины могут двигаться с большой скоростью (до 100–150 м/с) и имеют ограниченную дальность выброса, которая возрастает

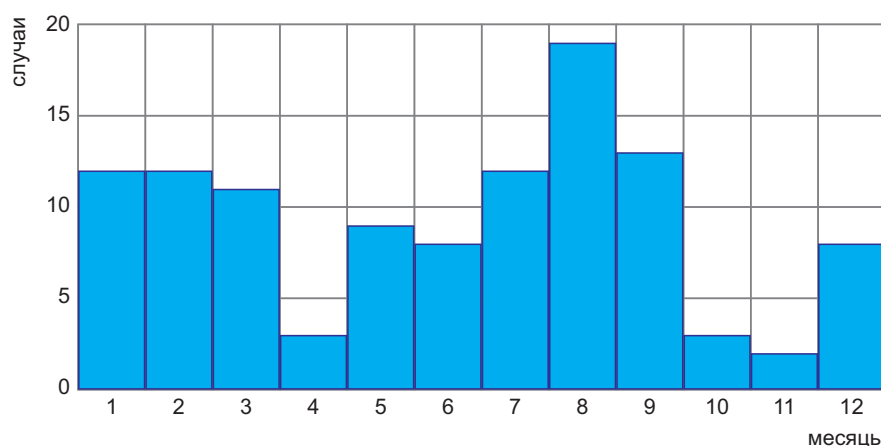


Рис. 2. Распределение зарегистрированных случаев схода больших ледяных лавин в Альпах по месяцам (по материалам проекта «Гляциориск», см. <http://www.nimbus.it/glaciorisk/GlacierList.asp?vista=rischio&IdTipoRischio=9>)

по мере увеличения объема лавины. Зона действия ледово-каменных лавин обычно ограничена нивально-гляциальным поясом, поэтому они представляют угрозу главным образом для туристов и альпинистов. При определенных условиях ледово-каменные лавины могут трансформироваться в селевые потоки (Уаскаран, 1962, 1970; Девастейшн, 1973), что приводит к резкому возрастанию дальности выброса.

Каменные лавины в нивально-гляциальном поясе

Зачастую к опасным гляциальным процессам относят и *каменные лавины в нивально-гляциальном поясе* [26]. Скольжение по поверхности ледников приводит к уменьшению трения и увеличению дальности выброса каменных лавин. Каменные лавины могут включать в свой состав снег и лед, что приводит к их разжижению и трансформации в селевые потоки.

Многостадийные ледниковые катастрофы

Многостадийная ледниковая катастрофа представляет собой опасный гляциальный процесс, обычно начинающийся как оползень или обвал, моментально трансформирующийся в высокоскоростной лавинный поток и далее — в дистальный селевой поток (Уаскаран, 1970; Кармадон, 2002). Г.Н. Голубев использовал для обозначения таких событий образное название «*лавино-сель*» [3], а В.Ф. Перов назвал их «ультраселевыми потоками» [11]. Особенностью этого редкого, но разрушительного типа опасных гляциальных процессов является промежуточная между лавиной и селом стадия лавинного потока. На этой стадии в потоке уже появляется жидкая вода, но ее количества еще недостаточно для «нормального» селя.

Лавинный поток отличают экстремально высокие скорости и дальность

выброса (даже при малом угле наклона зоны транзита), наличие ударной волны, заплески потока на склон, разжижение материала по мере продвижения вниз, вовлечение рыхлых отложений за счет эрозии. Такие особенности приводят к тому, что многостадийные ледниковые катастрофы могут воздействовать на территории, находящиеся далеко за пределами нивально-гляциального пояса. Именно такими примерами стали Уаскаранские катастрофы 1962 и 1970 годов. Высшая точка Перу, гора Уаскаран, поднимается ледяной стеной над цветущей и густонаселенной долиной реки Санта. Перепад высот между вершиной и дном долины составляет более 4 км. 10 января 1962 года с северной вершины Невадо-Уаскаран (6654 м) обвалилось около 3 млн м³ скал и льда. Причина катастрофы осталась неизвестной. Пролетев более 1 км вдоль крутой (65°) западной стены, ледокаменная лавина содрала снег с поверхности ледника и превратилась в лавинный поток из-за дробления камней, pulverизации льда и таяния льда и снега. Ниже ледника поток вовлек в свое движение около 10 млн м³ морены. Средняя скорость потока составляла 37 м/с [20]. В долине реки Шаска этот поток оставил заплески высотой до 150 м. Городок Ранраирка в долине реки Санта был полностью уничтожен. По разным оценкам, погибло от 650 [20] до 4000 человек [32]. Город Юнгай, защищенный гребнем Серро-дель-Айра высотой 230 м, не пострадал. Дистальный селевой поток/паводок прошел вниз по долине реки Санта 46 км и был остановлен плотиной водохранилища. Высота паводковой волны между городами Юнгай и Карас (18 км от Юнгай) превышала 10 м.

31 мая 1970 года в 15:23 местного времени в Перу произошло землетрясение с магнитудой 7,9. Его эпицентр располагался в 150 км от горы Уаскаран. Сразу после толчка вершина этой

горы дрогнула и обрушила вниз 7,5 млн м³ льда и камней [20]. События развивались по схожему с 1962 годом сценарию, но объем и скорости потока были намного больше (табл. 1). В поселке Хуашао несколько десятков человек погибли под «каменным градом» — каменными глыбами массой до 1 т, прилетевшими туда из лавинного потока. Такого явления не наблюдалось больше нигде. Скорость потока в момент вылета из него глыб должна была достигать 230 м/с. Лед был полностью pulverизирован — в Хуашао людям было трудно дышать из-за развеванной в воздухе ледяной пыли. Около 3 млн м³ грязи, камней и льда переклестнулись через водораздел Серро-дель-Айра и погребли город Юнгай (рис. 5). По разным оценкам, погибло от 6000 [20] до 18 000 [34] и даже до 25 000 человек [28] (хотя первая оценка представляется более обоснованной). Скорость потока в месте переклеста, оцененная по формуле полной энергии, достигала 67 м/с. На подходе к Кладбищенскому холму скорость потока понизилась до 20 м/с и он трансформировался в сель. Из всего населения города Юнгай в живых осталось только около 400 человек — 300 детей, которые были на цирковом представлении в другом месте, и 100 человек, которые спаслись на Кладбищенском холме, возвышающемся над городом на 50 м. Ударной волны на этом участке уже не было.

В поселке Матакото на другой стороне долины реки Санта скорость потока достигла 40 м/с. Ударной волной были повалены деревья. Поворот долины под прямым углом остановил большую часть обломочного материала, но селевой поток/паводок прошел еще 180 км и достиг Тихого океана. На участке между Юнгаем и Карасом его скорость составляла 28 м/с, далее она понизилась до 8 м/с.

Крупнейшая гляциальная катастрофа в истории России также была многостадийной. Она произошла 20 сентября 2002 года в долине реки Геналдон в Северной Осетии. Ледник Колка сорвался вниз почти целиком — более 110 млн м³ льда, воды и камней пронеслось вниз по долине на расстояние 19 км со средней скоростью 50 м/с. Теснина Скалистого хребта остановила ледяную стихию, но дистальный сель прошел еще 17 км и не дошел до большого поселка Гизель всего 2 км. По последним оценкам, погибло 135 человек, а экономический ущерб составил 1385 млн руб., или 45 млн евро по курсу ЦБ РФ на сентябрь 2002 года [6].

Причины данной катастрофы анализировались в многочисленных публикациях [7, 9, 12, 16, 21 и др.], но единого мнения о них до сих пор нет. Можно выделить несколько факторов, оказавших совместное воздействие. Экстремально высокие летние температуры в 1998–2001 годах способствовали



Рис. 3. Ледяная лавина с ледника Аллалин 30 августа 1965 г. (фото С.Г. Эванса)

дестабилизации северного склона горы Джимарай-хох. Небольшое землетрясение 14 июля 2002 года привело к дальнейшей дестабилизации склона и сходу многочисленных ледяных и ледово-каменных лавин в тыловую часть ледника Колка. Это привело к перегрузке последнего, росту скоростей движения льда в его тыловой части, блокировке его дренажной системы и накоплению воды под его тыловой частью. В результате ледник перед катастрофой был дестабилизирован. Химический состав талых вод в цирке Колка после катастрофы указывает на возможность газового извержения [9], однако непонятно, было это извержение причиной или следствием катастрофы. Непосредственным триггером данного события мог стать и очередной обвал со склонов горы Джимарай-хох.

Описанные события стали полной неожиданностью для республиканских и федеральных властей и привели к росту социальной напряженности в Северной Осетии. Споры о возможности предсказания Геналдонской катастрофы 2002 года выплеснулись на страницы центральной печати и телевидения. По этому поводу появилось множество спекуляций. По мнению швейцарских экспертов, время и размеры катастрофы не могли быть предсказаны [25], поскольку нигде в мире раньше не отмечалось схода целого ледника и такое развитие событий представлялось невероятным.

Многостадийные ледниковые катастрофы отмечались в Андах, Кордильерах и на Кавказе. Это редкое и потому слабоизученное явление. Многостадийным ледниковым катастрофам свойственна повторяемость, поэтому использовать территории, уже подвергавшиеся их воздействию, следует с осторожностью.

Гляциальные сели и паводки

Гляциальные сели и паводки отмечаются во всех горно-ледниковых районах мира. На территории России их опасность наиболее высока на Кавказе и Камчатке.

Гляциальные сели — это селевые потоки, формирование которых связано с нарушением устойчивости ледниково-моренных комплексов [2].

Сели непрорывного типа образуются вследствие оползания/обрушения морены в русло реки (Герхожан, 2000) или вниз по склону из-за избыточного обводнения. Обводнение морены может происходить как из-за повышенной абляции, так и за счет интенсивных осадков. По составу такие сели являются преимущественно грязекаменными. Их скорость достигает 10–15 м/с, а объем — первых млн м³. Дальность выброса непрорывных селей обычно не очень велика и не превышает 10–20 км.

Примером гляциальных селей непрорывного генезиса являются селевые потоки, сходящие на город Тырнауз в



Рис. 4. Ледово-каменная лавина с г. Стил 24 июля 2007 г. (фото П. Фон Газа, 02.08.2007 г.)



Рис. 5. А. Зона Уаскаранской ледниковой катастрофы 31.05.1970 г. (фото В. Вельша)

Кабардино-Балкарии раз в 10–20 лет. Они образуются при оползании морен малого ледникового периода в русло реки Каяарты-су — одного из истоков реки Герхожан-су. Ниже по течению селевые потоки насыщаются обломочным материалом, поступающим в русло с крутых склонов долины. Сели доходили до Тырнауза в 1960–1962, 1977, 1999 и 2000 годах. Для защиты города был построен селепропускной лоток, выдержавший сели 1977 года. В июне 1999 года в строй была введена селезащитная плотина, но уже в августе она была проломлена селевым потоком. Город не пострадал, но селепропускной лоток оказался заполненным селевой массой. Эти отложения из лотка так и не были убраны к лету 2000 года, когда в июле установилась экстремально жаркая погода. В итоге

поздним вечером 18 июля на Тырнаузе обрушилась первая волна селя, продолжавшаяся 8 дней. Следующие волны проходили 19, 21 и 24–25 июля. Забитый ранее селепропускной лоток не справился с селевым потоком — и было разрушено несколько многоквартирных домов (рис. 7). По официальным данным, погибло 8 человек и сотни людей остались без крова. Селевой конус выноса подпрудил реку Баксан, в результате чего центральная часть города Тырнауза оставалась под водой больше месяца. Из долины реки Герхожан-су было вынесено около 4 млн м³ твердого материала, русло было углублено на 20–30 м [17].

Паводки прорывного типа формируются при прорыве прогляциальных озер (Уарас, 1941) и внутриледниковых полостей (Булунгу, 2007). Прорыв внутри- и подледниковых полостей обычно происходит при переполнении дренажной системы ледника водой. Это бывает как вследствие геотермального воздействия (например, в Исландии), так и при интенсивных осадках после периода повышенной абляции. Именно такой случай и был отмечен 2–3 августа 2007 года на Центральном Кавказе, когда прорывы внутриледниковых полостей привели к образованию селевых потоков в нескольких долинах. В Цейском ущелье (РСО-Алания, Северная Осетия) селевой поток, сформировавшийся после прорыва полости в леднике Пас-

сионария, повредил канатную дорогу и строения альплагеря Цей. В селе Булунгу (Кабардино-Балкария) сели разрушил несколько домов, один человек погиб. В ходе обследования было установлено, что причиной этого селя стал прорыв внутриледниковой полости в леднике Ракыт [5].

После прорыва озера собственно селевой поток формируется в русле реки за счет донной и боковой эрозии при наличии уклона, достаточного для эрозивно-сдвигового процесса.

Прорывы прогляциальных озер могут случаться по ряду причин, но роль погодных условий здесь не столь велика [1]. Например, в Гималаях 53% прорывов озер были вызваны ледяными лавинами или айсбергами, 8% — каменными лавинами, 12% — обрушениями морен из-за инфильтрации воды, 4% — таянием ледяного ядра морен (причины же оставшихся 23% прорывов остались неизвестными) [37].

Прорывные паводки могут проходить первые сотни километров и уходить далеко за пределы гор. Так, подвижка ледника Чон-Камдан в горной системе Каракорум (Пакистан, Китай, Индия) в 1928–1929 годах привела к перекрытию реки Шайок и формированию подпрудного озера объемом около 4 км³, прорыв которого в 1932 году привел к наводнению, зафиксированному на 1200 км ниже по течению [1].

13 декабря 1941 года прорыв озера Палькаоча в Перу привел к гибели 4–6 тыс. человек и уничтожению части города Уарас (рис. 6, табл. 1). Причиной прорыва была ледяная лавина со склонов горы Палькараху. Уровень озера упал почти на 50 м, из него вылилось около 10 млн м³ воды. Находившееся ниже по долине озеро Хиркаоча с объемом воды до 5 млн м³ было полностью спущено [38]. Река Санта была запружена два дня, а прорывной паводок дошел до Тихого океана. После данной трагедии была создана специальная комиссия по контролю за озерами хребта Кордильера-Бланка. Более чем на 30 озерах были проведены мероприятия по предотвращению их прорывов и регулировке их уровней.

Прорыв озера Диг-Тшо в Непале (1985) нанес убытки в 500 млн долларов из-за разрушения гидроэлектростанции и вынужденного отказа от планов по сооружению более мощной ГЭС. Гляциальный паводок прошел около 100 км [37].

В Альпах из-за прорывов ледниковых озер с середины XVI века погиб 421 человек [36], в Андах количество жертв прорывных паводков и селей приближается к 10 тыс. человек.

Лахары

Лахар — это селевой поток, возникающий на склонах вулкана и переносимый преимущественно обломки вулканических пород. Различают горячие



Рис. 6. Разрушения в г. Уарас (Перу) после прорыва прогляциального озера Палькаоча 13.12.1941 г. (фото из архива Национальной аэрофотографической службы Перу)

Таблица 1

Некоторые примеры катастрофических гляциальных процессов								
Место события	Год / месяц	Объем перемещенного вещества, млн м ³	Перепад высот Н, км	Длина пути L, км	Н/L	Количество жертв	Скорость, м/с	Тип процесса*
Долина Геналдон (Северная Осетия, Россия)	1902 июль	75–110	1,7	14	0,12	36	20–35	МСП
	2002 сентябрь	140	2; 2,5	19; 36	0,11; 0,07	125	50	МСП; ДС
Девдоракский ледник (гора Казбек, Грузия)	1832 июль	15	0,95	7,5	0,13	-	40	-
Ледник Девастейшн (Британская Колумбия, Канада)	1975 июль	13–30	1,22	7	0,17	4	30	МСП
Хоматту Бальмен (Швейцария)	1597	-	1,4	4,9	0,29	81	-	ЛЛ
Гора Стил (Канада)	2007 июль	27,5–80,5	1,86	5,76	0,32	-	105–205	ЛКЛ
Вулкан Руис (Колумбия)	1985 ноябрь	90	-	>100		23000	5–15	Л
Гора Уаскаран (хребет Кордильера-Бланка, Перу)	1962 январь	13	3,60	15,5	0,23	650–4000	37	МСП
	1970 май	60	3,85; 2,5	15,6; 180	0,25; 0,01	6000–25000	70; 8–28	МСП; ДС/П
Долина Герхожан (Кабардино-Балкария, Россия)	2000 июль	4	2	12	0,16	8	10	ГС
Озеро Палькаоча (хребет Кордильера-Бланка, Перу)	1941 декабрь	10–17	1,6; 4,6	23; 243	0,07; 0,02	4000–6000	-	ПП/ГС; ДС/П

* ГС — гляциальный селя; ДС — дистальный селя; Л — лахар; ЛЛ — ледяная лавина; ЛКЛ — ледово-каменная лавина; МСК — многостадийный процесс; П — паводок; ПП — прорывной паводок.

лахары, связанные с извержениями вулканов, и холодные, с извержениями непосредственно не связанные [11]. Холодные лахары образуются при прорыве кратерных озер и при интенсивных осадках.

Активные вулканы, несущие на себе ледники, находятся преимущественно в Андах, Кордильерах, в Исландии, а в пределах России — на Камчатке.

Ледники и снежные покровы, находящиеся на склоне вулкана, быстро тают под воздействием раскаленных масс пирокластического материала или лавы и играют роль своеобразного катализатора, усиливающего разрушительный эффект извержения. Так, извержение вулкана Руис (Колумбия) в 1985 году было слабым и имело магнитуду 3 балла. Непосредственно от извержения не погиб ни один человек, но оно привело к таянию 60 млн м³ льда. В итоге по нескольким долинам сошли лахары объемом 90 млн м³ и уничтожили город Армеро в 90 км от вулкана [24]. Погибло более 20 тыс. человек.

Ученые предупреждали об угрозе уничтожения Армеро за несколько недель до катастрофы, но власти призывали сохранять спокойствие, несмотря на то что весь город был построен на отложениях гигантского (300 млн м³) лахара 1845 года [24]. Система раннего оповещения так и не была налажена. Более того, несмотря на то что лахар шел вниз по долине более двух часов,

тревога не была объявлена и эвакуация населения не была проведена.

В России опасность лахаров существует на Камчатке. В прошлом сход лахаров происходил и на Кавказе (при извержениях Эльбруса и Казбека).

Подвижки ледников

Подвижкой ледника называют резкое ускорение его движения, являющееся либо одной из регулярных стадий пульсации ледника, либо единич-

ным процессом, возникающим в результате резкого изменения внешних условий (накопления воды, обвала, землетрясения) [2]. Основной причиной подвижек служит накопление льда в условиях, когда его расход затруднен узостью долины, ее крутыми поворотами, подледными препятствиями и т.д. Поверхность пульсирующего ледника покрывается густой сетью трещин, язык ледника превращается в хаотическое нагромождение ледяных



Рис. 7. Город Тырныауз после схода гляциального селя 18–25 июля 2000 г. (фото А.А. Алейникова)

Типы опасных гляциальных процессов					
Тип процессов	Процессы	Примеры	Скорость, м/с	Дальность	Мероприятия по снижению гляциального риска*
Склоновые	Ледяные и ледово-каменные лавины	Аллалин, 1965; Стил, 2007	30–100 м/с	Первые км	АП, И (только ледяные лавины)
Русловые	Гляциальные сели и паводки, лахары	Уарас, 1941; Тырныауз, 2000	до 20 м/с	До десятков, реже сотен км	ПР, АП, ОТ, И
Колебания ледников	Подвижки, наступления/отступления ледников	Колка, 1969/70; Медвежий, 1937, 1951, 1963, 1973, 1989	до 280 м/сут.	Первые км	АП, ОТ
Многостадийные	Многостадийные ледниковые катастрофы	Уаскаран, 1962, 1970; Кармадон, 2002	до 100 м/с	До десятков км; до первых сотен км в виде последующего селя/паводка	АП
* АП — административно-профилактические мероприятия; ОТ — организационно-технические мероприятия; И — инженерные мероприятия; ПР — предотвращение и регулирование.					

блоков, разделенных многометровыми провалами (рис. 8). Скорости движения льда при подвижках возрастают на один—три порядка, фронт пульсирующего ледника может продвигаться вперед со скоростью до первых сотен метров в сутки. Так, ледник Кутях в горной системе Каракорум в 1953 году продвинулся вниз по долине на 12 км за три месяца, при этом средняя скорость его продвижения составляла 130 м/сут. Скорость продвижения фронта ледника Колка при подвижке 1969–1970 годов в отдельные периоды доходила до 274 м в сут [10].

Как правило, фронт ледника при движении продвигается вперед на первые километры, но известны и случаи, когда пульсирующие ледники продвигались на 10 км и более [4].

Подвижки могут приводить к уничтожению приледниковых полей, пастбищ, инфраструктуры, но сами не несут непосредственной опасности для жизни людей. А вот последствия таких подвижек бывают намного опаснее. Быстрое продвижение фронта ледника нередко приводит к перекрытию рек, образованию подпрудных озер и к возникновению мощных гляциальных паводков из-за прорыва последних. Если фронт пульсирующего ледника подходит к крутому склону, возникает угроза схода ледяных лавин.

По сравнению с другими горно-ледниковыми районами в пределах России выявлено не так много пульсирующих ледников. Они сконцентрированы на Кавказе и Камчатке. Следует отметить, что систематическое изучение пульсирующих ледников в России не проводилось, поэтому их реальное количество может быть больше известного на сегодняшний день.

Меры по снижению гляциального риска

Важно попытаться типизировать опасные гляциальные процессы с инженерной точки зрения, поскольку их воздействие на людей, инфраструктуру

и окружающую среду будет различным в зависимости от типа процесса. Соответственно будут различаться и системы мероприятий по снижению гляциального риска (табл. 2).

Комплекс мер по снижению гляциального риска можно разделить на две группы: (1) мероприятия по снижению гляциальной опасности и (2) мероприятия по снижению уязвимости людей и инфраструктуры.

Снижение гляциальной опасности достигается путем предотвращения или регулирования опасных гляциальных процессов. Это сложная научная и техническая проблема. Ее решения существуют пока только для приледниковых озер, вероятность прорыва которых может быть понижена путем строительства искусственных дамб, обычно соединяемых с водосбросами. Такой способ широко применяется, например, в Перу (рис. 9), где он зарекомендовал себя с положительной стороны.

Регулирование уровня приледниковых озер осуществляется путем строительства водосбрасывающих тоннелей или открытых водосливов. Тоннели пробиваются в коренных породах ниже уровня озер, а открытые водосливы делаются в моренных грунтах. В Альпах такие тоннели сооружались уже в XIX веке [6]. Водосливы необходимо бетонировать во избежание эрозии. При этом оптимально использование ворот, регулирующих расход воды. При понижении уровня небольших озер бетон можно заменить пластиком, стеклотканью и/или брезентом. Для экстренного понижения уровня озера при его быстром подъеме можно использовать систему сифонов и насосов [35].

При искусственной регулировке уровня воды в приледниковых озерах необходимо тщательно просчитывать все возможные последствия. Так, ошибки при понижении уровня воды в озере Ханкаруиш (хребет Кордильера-Бланка, Перу) привели к его прорыву 20 октября 2010 года и к гибели до 500 человек и многочисленным разрушениям [30].

Мероприятия по снижению уязвимости людей и инфраструктуры можно разделить на три группы: (1) административно-профилактические, (2) организационно-технические и (3) инженерные.

К административно-профилактическим мероприятиям относится мониторинг очагов опасных гляциальных процессов, моделирование этих процессов, зонирование гляциального риска, прогноз гляциальной опасности во времени, наложение ограничений и запретов на землепользование в зонах гляциального риска, перемещение зданий/сооружений/элементов линейной инфраструктуры. По сути, административно-профилактические мероприятия включают в себя исследования опасных гляциальных процессов, необходимые для выработки научно обоснованных рекомендаций для органов власти, и прямые административные запреты/ограничения, принятые на основе предлагаемых рекомендаций. В качестве примера таких мероприятий можно назвать перенос города Юнгай в Перу на новое место.

К организационно-техническим мероприятиям относится установка систем раннего оповещения, информирование населения и его подготовка к действиям в чрезвычайных ситуациях. Каждый житель и турист должен знать, что ему делать и куда бежать при сигнале тревоги.

К инженерным мероприятиям относится строительство защитных сооружений. В населенных районах гляциальная опасность представлена преимущественно селевой опасностью, поэтому целесообразно использовать стандартные методы селезащиты, описанные в нормативных документах [15]. Инженерная защита от многостадийных катастроф и ледово-каменных лавин пока проблематична, хотя, например, и были высказаны некоторые предложения по защите долины реки Геналдон. Для защиты от ледяных лавин логично использовать те же сооружения, что и для защиты от снежных лавин [31].



Рис. 8. Поверхность пульсирующего ледника Твидсмюр во время подвижки (Канада, хребет Св. Ильи, фото И.Н. Каргаполовой)

Заключение

Опасные гляциальные процессы — один из основных факторов риска в горно-ледниковых районах мира и, в частности, России. Недоучет этого фактора приводит к человеческим жертвам и к необоснованным экономическим потерям. Быстрые изменения ледников приводят к возможности проявления опасных гляциальных процессов даже на территориях, ранее считавшихся безопасными.

По мере роста населения и развития инфраструктуры горно-ледниковых районов будет увеличиваться и гляциальный риск, поэтому следует проводить мероприятия по его снижению. В комплекс таких мероприятий должен входить регулярный мониторинг зон зарождения опасных гляциальных процессов и оценка изменений в них. Для предотвращения жертв и ущерба при строительстве в горно-ледниковых районах необходимо оценивать гляциальную опасность выбранной территории, а понятие «опасные гляциальные процессы» следует включить в соответствующие нормативные документы.

Данная работа была выполнена при поддержке РФФИ (проект 09-05-00934), при содействии Программы поддержки ведущих научных школ РФ (проект НШ-3271.2010.5) и при помощи программы Science for Peace (проект 982143).



Рис. 9. Дамба и водосборос на озере Льяка (хребет Кордильера-Бланка, Перу, фото Д.А. Петракова)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградов Ю.Б. Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. Л.: ГИМИЗ, 1977. 154 с.
2. Гляциологический словарь / под ред. В.М. Котлякова. Л.: ГИМИЗ, 1984. 527 с.
3. Голубев Г.Н. Гидрология ледников. Л.: ГИМИЗ, 1976. 247 с.
4. Долгушин Л.Д., Осипова Г.Б. Пульсирующие ледники. Л.: ГИМИЗ, 1982. 192 с.
5. Запорожченко Э.В., Каменев Н.С., Кориков К.В., Красных Н.Ю., Никулин А.С. Селевая обстановка в бассейне р. Булунгу-су — отражение опасностей и угроз, вызываемых климатическими изменениями в высокогорьях // Труды Международной конференции «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита», Пятигорск, 22–29 сентября 2008 г. / ред. С.С. Черноморец. Пятигорск: Институт «Севкавгипроводхоз», 2008. С. 110–113.
6. Кортиев Л.И., Кортиева В.Л., Чочиев С.В. Анализ социального, экологического и экономического ущерба от разрушений ледника Колка // Вестник Владикавказского научного центра. 2009. Т. 9. № 3. С. 41–42.
7. Котляков В.М., Рототаева О.В., Носенко Г.А., Лебедева И.М. Ледник Колка и Кармадонская катастрофа 2002 г. // Оледенение Северной и Центральной Евразии в современную эпоху. М.: Наука, 2006. С. 224–240.
8. Минаева Е.А., Беляев Г.М., Борисов Б.А. Требования по созданию дополнительных карт и схем к комплексу Гостеолкарты-1000/3. Карта геологических опасностей. СПб., 2005. 31 с.
9. Муравьев Я.Д. Газовое извержение в цирке — возможная причина развития подвижек ледника Колка по катастрофическому сценарию: Материалы гляциологических исследований. 2005. Вып. 98. С. 44–55.
10. Панов В.Д. Эволюция современного оледенения Кавказа. СПб.: ГИМИЗ, 1993. 431 с.
11. Перов В.Ф. Селевые явления: Терминологический словарь. М.: МГУ, 1996. 45 с.
12. Петраков Д.А. Многостадийные ледниковые катастрофы как особый тип стихийно-разрушительных процессов гляциального генезиса // Материалы гляциологических исследований. 2008. Вып. 105. С. 87–96.
13. Природные опасности России. Геоэкологические опасности / ред. Л.С. Гарагуля, Э.Д. Ершов. М.: Крук, 2000. 316 с.
14. СНиП 11-02-96. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. М.: Минстрой России, 1996. — <http://www.docload.ru/Basesdoc/1/1771/index.htm>
15. СНиП 22-02-2003. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. М.: Росстрой, 2004. — <http://www.docload.ru/Basesdoc/39/39317/index.htm>
16. Тутубалина О.В., Черноморец С.С., Петраков Д.А. Ледник Колка перед катастрофой 2002 года: Новые данные // Криосфера Земли. 2005. Т. 9. № 4. С. 62–71.
17. Черноморец С.С. Селевые очаги до и после катастроф. М.: Научный мир, 2005. 180 с.
18. Alean J. Ice avalanches: some empirical information about their formation and reach // Journal of Glaciology. 1985. V. 31. № 109. P. 324–333.
19. Carey M. Living and dying with glaciers: People's historical vulnerability to avalanches and outburst floods in Peru // Global and Planetary Change. 2005. V. 47. P. 122–134.
20. Evans S.G., Bishop N.F., Smoll L.F., Murillo P.V., Delaney K.B., 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 // Engineering Geology. 2009. V. 108. № 1–2. P. 96–118. — DOI: 10.1016/j.enggeo.2009.06.020
21. Evans S.G., Tutubalina O.V., Drobyshev V.N., Chernomorets S.S., McDougall S., Petrakov D.A., Hungr O. Catastrophic detachment and high-velocity long-runout flow of Kolka Glacier, Caucasus Mountains, Russia in 2002 // Geomorphology. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2009. V. 105. № 3–4. P. 314–321. — DOI: org/10.1016/j.geomorph.2008.10.008
22. Huggel C. Recent extreme slope failures in glacial environments: effects of thermal perturbation // Quaternary Science Reviews. 2009. V. 28. P. 1119–1130.
23. Huggel C., Caplan-Auerbach J., Gruber S., Molnia B., Wessels R. The 2005 Mt. Steller, Alaska, rock-ice avalanche: A large slope failures in cold permafrost / Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost, 29 June — 3 July 2008, Fairbanks, AK. 2008. P. 747–752.
24. Huggel C., Ceballos J.L., Ramirez J., Pulgarin B., Thouret J.C. Review and reassessment of hazards owing to volcano-ice interactions in Colombia // Annals of Glaciology. 2007. V. 45. P. 128–136.
25. Huggel C., Haeblerli W., Käb A. Glacial hazards: perceiving and responding to threats in four World regions / The Darkening Peaks: Glacial retreat in scientific and social context. Ed. by B. Orlove, B. Luckman, E. Wiegandt. Berkeley, London: University of California Press, 2008. P. 68–80.
26. Kaab A., Huggel C., Fischer L., Guex S., Paul F., Roer I., Salzmann N., Schläefli S., Schmutz K., Schneider D., Strozzi T., Weidmann Y. Remote sensing of glacier- and permafrost-related hazards in high mountains: An overview // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2005. V. 5. P. 527–554.
27. Käb A., Reynolds J.M., Haeblerli W. Glacier and permafrost hazards in high mountains / Global change and mountain regions: A state of knowledge overview. Ed. by U.M. Huber, H.K.M. Bugmann, M.A. Reasoner. Dordrecht: Springer, 2005. P. 225–234.
28. Keefer D.K., Larsen M.C. Assessing landslide hazards // Science. 2007. V. 316. P. 1136–1138.
29. Lipovsky P.S., Evans S.G., Clague J.J., Hopkinson C., Couture R., Bobrowsky P., Ekström G., Demuth M.N., Delaney K.B., Roberts N.J., Clarke G., Schaeffer A. The July 2007 rock and ice avalanches at Mount Steele, St. Elias Mountains, Yukon, Canada // Landslides. 2008. V. 5. P. 445–455. — DOI: 10.1007/s10346-008-0133-4
30. Lliboutry L., Morales Arnao B., Schneider B. Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru. I. Historical failures of morainic dams, their causes and prevention // Journal of Glaciology. 1977. V. 18. № 79. P. 239–254.
31. Margreth S., Funk M. Hazard mapping for ice and combined snow/ice avalanches — two case studies from the Swiss and Italian Alps // Cold Regions Science and Technology. 1999. V. 30. P. 159–173.
32. Morales B. The Huascan avalanche in the Santa Valley, Peru / IASH Publication. 1966. № 69. P. 304–315.
33. Petrakov D.A., Chernomorets S.S., Evans S.G., Tutubalina O.V. Catastrophic glacial multi-phase mass movements: a special type of glacial hazard // Advances in Geosciences. 2008. V. 14. P. 211–218.
34. Plafker G., Ericksen G.E. Nevados Huascarán avalanches, Peru / Rockslides and Avalanches. Natural Phenomenon. Ed. by B. Voight. New York: Elsevier Sci., 1978. V. 1. P. 277–314.
35. Reynolds J.M. (ed.). Development of glacial hazard and risk minimization protocol in rural environment / Report № R7816. UK: Reynolds Geo-Sciences LTD, 2003. 36 p.
36. Richard D., Gay M. Survey and prevention of extreme glaciological hazards in European mountainous regions / GLACIORISK EVG1 2000 00512. Final report. Report Period: 01.01.2001–31.12.2003. Section 6 — ANNEXES. 2003. — <http://glaciorisk.grenoble.cemagref.fr>
37. Richardson S.D., Reynolds J.M. An overview of glacial hazards in the Himalayas // Quaternary International. 2000. V. 65–66. P. 31–47.
38. Vilimek V., Zapata M.L., Klimes J., Patzelt Z., Santillan N. Influence of glacial retreat on natural hazards of the Palcacocha Lake area, Peru // Landslides. 2005. V. 2. P. 107–115 DOI: 10.1007/s10346-005-0052-6.