

О перемещении материала в условиях многолетней мерзлоты и оледенения в высокогорье. Часть 5

Заглавное фото: pixabay.com/ru/photos/grosser-aletschgletsche-ледник-вале-2808275/ [5]

АНАЛИТИЧЕСКАЯ СЛУЖБА «ГЕОИНФО»

info@geoinfo.ru

Предлагаем вниманию читателей пятую, заключительную, часть обзора материалов статьи «Процессы перемещения материала, связанные с многолетней мерзлотой и оледенением» [3] с привлечением дополнительных рисунков и информации. Указанная работа [3] была написана исследователями из Швейцарии и Канады – Робертом Кеннером, Лукасом Аренсоном и Лоренцом Грамигером. Она была опубликована на английском языке в январе 2021 года на сайте ResearchGate [3], представляющем собой европейскую академическую социальную сеть для ученых, направленную на продвижение результатов научных исследований [8]. Эта объемная работа также вошла в виде отдельной главы в книгу *Treatise on Geomorphology* («Трактат по геоморфологии») [4], опубликованную на английском языке издательством Elsevier.

В своей статье [3] Роберт Кеннер с соавторами основное внимание уделяют разрушению скальных склонов и перемещению обломочного материала в высокогорных районах, подверженных воздействию многолетней мерзлоты и оледенения. Они обсуждают многогранное модулирующее влияние гляциальных, парагляциальных и перигляциальных процессов на эрозию и формообразование в горах в разных масштабах времени, включая текущую фазу быстрого потепления климата. Рассмотренные этими авторами процессы перемещения материала, происходящие в различных объемах и с разной скоростью, варьируют от медленных деформаций каменных глетчеров до крупномасштабных разрушений скальных склонов с возникновением обвалов, камнепадов, потоков обломочного материала и пр. И это должно представлять большой интерес для инженеров-изыскателей и для организаций, занимающихся проектированием инфраструктурных объектов и их инженерной защиты в горных регионах. Поэтому консультационную помощь редакции при подготовке обзора оказали специалисты российского представительства компании Trumer Shutzbauten, которая предлагает экономически выгодные и эффективные системы защиты от опасных склоновых процессов.

Сегодня речь пойдет о процессах, связанных с дегляциацией, а также о «ледяных фартуках» на скальных склонах. Отметим, что нумерация рисунков продолжит начатую в предыдущих частях, а список источников будет отдельным.

Связь между ледниковыми циклами и нарушениями скальных склонов

Ссылаясь на ряд публикаций, Кеннер с соавторами [3] пишут, что циклы наступания и отступления ледника создают меняющиеся механические нагрузки на подледниковые грунты. В зависимости от этих нагрузок, структуры и прочности грунтов, топографии и других условий, изменения в напряжениях, вызванные ледниковыми циклами, могут привести к повреждениям массива. Многочисленные исследования конкретных случаев активных обрушений пород вблизи отступающих ледников (рис. 30) указывают на связь между дегляциацией и устойчивостью склонов. Однако детальная механика подготовки этих процессов остается плохо изученной. Кроме того, исследования многих крупных доисторических событий показали, что после локальной дегляциации начало активных обрушений запаздывало на несколько тысяч лет, что делает не такой уж очевидной роль прекращения подпирания склонов ледником (исчезновения укрепляющей их ледниковой «распорки»).

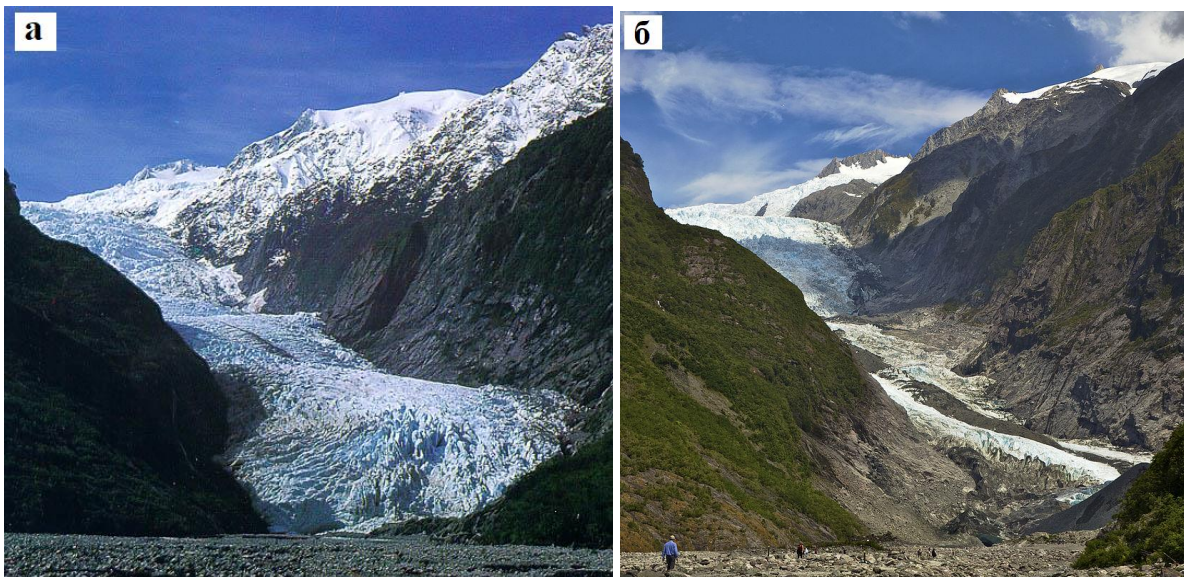


Рис. 30. Циклически отступающий и наступающий ледник Франца-Иосифа в Новой Зеландии в 2001 году (а) и в настоящее время (б) [1]

Исследования действия ледников в качестве «распорок» или «подпорок» для грунта, на которые ссылаются авторы статьи [3], показывают, что такая поддержка склонов является довольно ограниченной из-за вязкопластического поведения льда (рис. 31). То есть ледники нагружают прилегающие склоны только своим весом, но не обеспечивают жесткого подпирания. Более того, несколько недавних исследований исключили роль снятия этой подпорной функции в качестве прямого триггера для возникновения нестабильностей и разных видов оползневых явлений, преобладающие причины которых – это скорее перераспределение напряжений в массивах пород из-за снятия ледниковой нагрузки и гляциоизостатического поднятия поверхности грунта, а также эрозия подножий склонов в то время, когда они еще были под ледником.



Рис. 31. Движущийся ледник нагружает прилегающие склоны своим весом, но не обеспечивает жесткого подпирания из-за своего вязкопластического поведения (Аляска) [6]

Однако, как опять подчеркивают Кеннер и др. [3], в большинстве случаев механическая связь между ледниковыми циклами и нарушениями скальных склонов остается неясной. Эти неопределенности, вероятно, возникают из-за сложных изменений термических, гидрогеологических и гидрологических граничных условий, сопровождающих отступление ледников и влияющих на устойчивость скальных склонов (см. рис. 26 в предыдущей части). Коренная порода, соприкасающаяся с умеренным ледником, является почти изотермической при температуре около $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а отступление ледника подвергает ее поверхность воздействию новых температурных граничных условий с суточными и сезонными температурными циклами. Температурные деформации вызывают термомеханические напряжения. Изменения температуры также приводят к вторичным термическим эффектам, таким как расклинивание льдом в условиях многолетней мерзлоты или перигляциальных условий. Кроме того, для умеренных ледников преобладает высокое давление подледниковых вод вблизи подошвы льда, что влияет на состояние грунтовых вод на прилегающих склонах. Если происходит дегляциация, то режим грунтовых вод на этих склонах меняется, а изменение давления воды в трещинах влияет на эффективные напряжения и, следовательно, на прочность скального грунта в зонах разрывов сплошности.

Численное моделирование, выполненное одним из авторов статьи [3] ранее, показало, что чисто механическая разгрузка скальных склонов ото льда вызывает относительно ограниченные новые нарушения в грунтовых массивах средней прочности. Это подтверждает ограниченность подпирающей роли ледника в стабилизации грунта из-за вязкопластического поведения ледниковых масс в течение длительного времени. С другой стороны, ледниковая эрозия вызывает удаление скальной опоры (природного «контрфорса») с подножия склона, способствуя значительному нарушению стабильности слагающего его грунта, которая может быть активирована во время первой дегляциации.

Кроме того, компьютерное моделирование показало, что снятие нагрузки от ледника приводит трещины на прилегающих склонах в более критическое состояние за счет снижения нормальных напряжений и увеличения напряжений сдвига в зонах разрывов сплошности, что, в свою очередь, может повысить эффективность дополнительных процессов развития усталости скального грунта.

Следовательно, термо- и гидромеханические эффекты при дегляциации, вероятно, играют ключевую роль в подготовке склонов к разрушениям. В сочетании с температурным

напряжением ледниковые циклы способны вызывать значительные нарушения скальных склонов. Тепловое расширение массива скальных грунтов из-за нагревания после отступления ледника увеличивает напряжения, что вызывает развитие трещин по критически напряженным плоскостям. Деформации от долговременных изменений температуры после дегляциации могут распространяться даже дальше соответствующих температурных фронтов. Но первое воздействие годовых температурных циклов на коренную породу после отступления ледника приводит к неглубоко расположенному фронту нарушений рядом с границей отступающего льда.

Учет в численных моделях изменений гидрогеологических условий на ближайших склонах, вызванных высоким давлением подледниковых вод, показало значительные нарушения в массивах скальных грунтов при ледниковых изменениях. При сокращении размеров ледника происходит переход от устойчивого поля высокого давления под ледовым покровом к годовым циклам грунтовых вод на склонах, связанным с сезонной инфильтрацией талой и дождевой воды. И эти изменения являются основным фактором, вызывающим нарушения в массивах скальных пород. К примеру, гидромеханическая усталость является важной причиной возникновения разных видов оползней, особенно в сочетании с долгосрочными колебаниями уровней грунтовых вод (которые могут быть связаны, например, с изменениями толщины ледника).

Недавно начался и продолжается до сих пор полевой мониторинг вблизи крупного отступающего ледника Алец в Швейцарии (рис. 32), где изучаются термогидромеханические процессы в скважине. Ссылаясь на работу с анализом этих исследований, авторы статьи [3] отмечают следующее. Уже доступный временной ряд результатов измерений в указанной скважине подтверждает, что температурные и гидравлические граничные условия, связанные с присутствием ледника, коррелируют с обратимыми и необратимыми смещениями в масштабах отдельных трещин при вариациях порового давления или при экстремальных изменениях температуры.



Рис. 32. Алец – самый большой ледник в Альпах, который сейчас постепенно отступает (в 1973 году он имел длину около 24 км и площадь примерно 86,63 кв. км и был включен ЮНЕСКО в «Список всемирного наследия») [1]

На основе данных из различных публикаций Кеннер с савторами пишут о том, что переход устойчивого скального склона в нестабильное состояние происходит в результате непрерывного процесса накопления и развития нарушений массива скальных грунтов – обычно в течение нескольких ледниковых циклов. Хотя вышеупомянутая роль ледников в подпирании прилегающих склонов и является ограниченной, все же, как показал анализ методом предельного равновесия, вязкопластическое деформирование льда вносит важный

вклад в скорости смещений в неустойчивом склоне. Поэтому в ответ на дрящущийся процесс дегляциации могут так же долго развиваться глубокие гравитационные деформации склонов.

При отступании ледников часто обнажаются как скальные склоны с чрезмерно увеличенной крутизной, так и крутые поверхности ледниковых отложений. Поэтому парагляциальные процессы влияют не только на стабильность скальных склонов, но и на движение моренного материала. На территориях, с которых недавно отступили ледники, часто происходит возобновление перемещения ледниковых отложений в результате оползневых процессов (обвалов, камнепадов, оползаний и пр.) из-за наличия талой ледниковой воды, однако ее течение замедляется как со временем, так и по мере удаления от конца ледника. Однако, как отмечают Кеннер и др. [3], исследования, посвященные механике склонов морен после недавнего отступления ледников, немногочисленны, и эта проблема осложняется сильной неоднородностью слагающего их обломочного материала. Часто считают, что исчезновение подпирającego влияния ледников является возможным триггером для возникновения крупных оползней на боковых моренах. Также высказывается мнение, что ухудшение всасывания во время дегляциации влияет на предел прочности на сдвиг неводонасыщенных ледниковых отложений, что в дополнение к разгрузке от ледника, вероятно, снижает общую устойчивость склонов морен.

Сценарии будущего

Авторы работы [3] еще раз подчеркивают следующее. Поскольку потепление климата приведет к дальнейшему отступанию ледников, снятие ледовой нагрузки может значительно повлиять на напряженное состояние скальных склонов, изменив режимы температуры и грунтовых вод, что приведет к прогрессирующим разрушениям.

Будущее потепление климата и отступление ледников подвергнут обнажившиеся ото льда скальные породы воздействию совершенно иных тепловых условий, что может привести к увеличению интенсивностей камнепадов в соответствующих регионах. Скальные стенки в более высокогорных районах, которые остались покрытыми льдом со времени последнего оледенения и пока еще не испытали сезонных температурных циклов, во время первой дегляциации могут особенно сильно подвергнуться неглубоким нарушениям из-за «параледникового теплового удара».

Хотя подпирющее действие ледника и невелико, его лед влияет на скорости оползневых процессов на прилегающих склонах. Поэтому дегляциация может усилить оползневую активность ранее подледниковых участков склонов, которые уже были нестабильны. Но все же ключевыми факторами в подготовке будущих обрушений парагляциальных скальных склонов являются унаследованные нарушения массива пород и общая предрасположенность к таким нарушениям (рис. 33). Будущее отступление ледника может также далее обнажить моренные отложения и боковые моренные гребни с критической степенью неустойчивости, что может вызвать крупные моренные оползни.

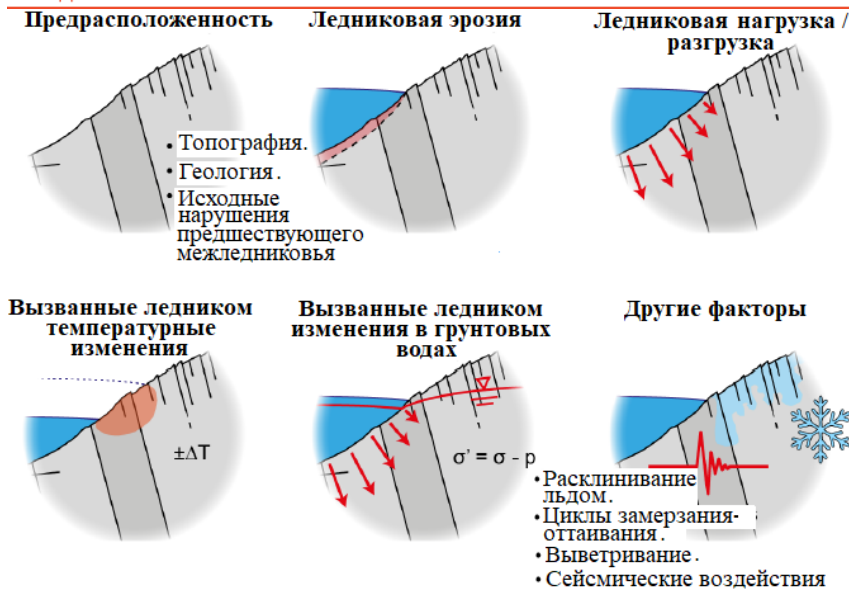


Рис. 33. Факторы подготовки неустойчивости парагляциального скального склона (по [2, 3])

Ледяные фартуки

Так называемые ледяные фартуки (ice aprons), как поясняют Кеннер с соавторами [3], относятся к особому типу оледенения. Это довольно тонкие и гладкие слои льда, покрывающие скальные склоны со средними углами наклона приблизительно от 45 до 60 град. Этот лед является примерзшим к скальной поверхности и демонстрирует лишь незначительные внутренние деформации.

Ледяные фартуки являются типичными индикаторами многолетней мерзлоты. Но их влияние на скальные склоны изучалось лишь при нескольких исследованиях, на которые ссылаются Кеннер и др. [3]. При измерении температуры в неглубоких скважинах, пробуренных в постоянно покрытых тонким слоем льда породах, не было обнаружено ни влияния ледяного фартука на среднегодовые температуры скальных грунтов, ни воздействия выделения скрытого тепла из-за их повторного заморозания. Однако налицо было явное сглаживание среднегодовой амплитуды температур, а также чисто кондуктивный теплообмен (в результате теплопроводности материала). Это подчеркнуло роль ледяного фартука в качестве эффективного изолятора от инфильтрации воды и от боковых адвективных (с воздухом) потоков тепла в массив скальных пород.

Изучение разными авторами датировок показало, что некоторым из изученных ледяных фартуков может быть по несколько тысяч лет. Тем не менее сейчас происходит их быстрая деградация, и многие из них уже исчезли. Как только не защищенная слоем льда скальная поверхность начинает подвергаться непосредственному воздействию атмосферы, в грунтовом массиве быстро появляется деятельный слой, иногда впервые за несколько тысячелетий. Потенциальные неустойчивости, развившиеся в течение этого длительного периода нахождения подо льдом, после исчезновения ледяного фартука очень быстро показывают себя из-за начала инфильтрации воды и действия циклов промерзания-протаивания. В результате активность камнепадов на участках скальных склонов, недавно обнажившихся от ледяных корок, многократно превышает среднюю активность камнепадов (рис. 34).

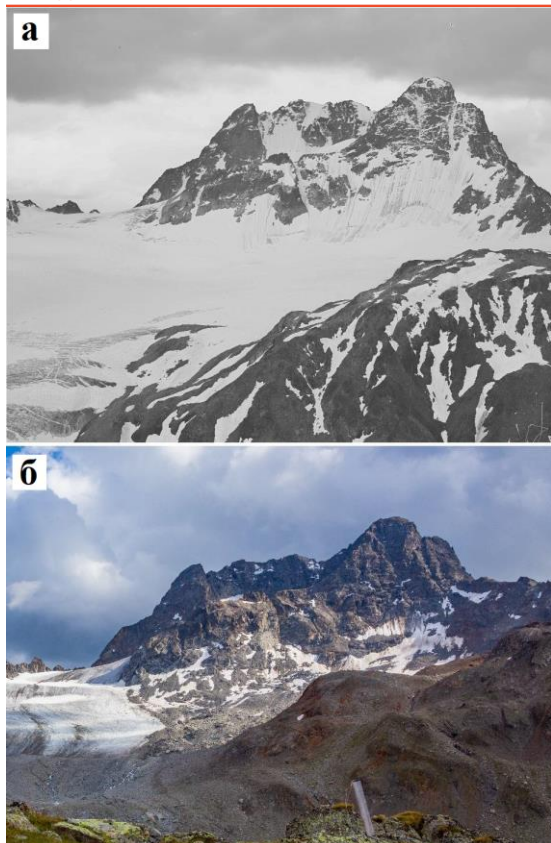


Рис. 34. Северный фланг вершины Пиц-Кеш в Швейцарских Альпах в середине августа 1936 года (а) и 2020 года (б). В 1936 году крутые скальные склоны были полностью покрыты ледяными фартуками, от которых в 2020 году почти ничего не осталось. При этом явно возросла интенсивность камнепадов разных объемов (вплоть до 150 000 куб. м). Ранее чистый ледник Порчабелла (видный как сплошной белый покров на рисунке «а») теперь почти полностью покрыт обломочным материалом (что хорошо видно на рисунке «б») [3]

На больших высотах некоторых горных регионов ледяные фартуки, вероятно, существовали в течение всего голоцена. Следовательно, их возраст может быть значительно больше, чем было известно ранее. Степень дезинтеграции скальных пород под такими старыми ледяными покровами трудно оценить. Поэтому при продолжающейся деградации ледяных фартуков в результате потепления климата возможна дальнейшая интенсификация камнепадов на все увеличивающихся высотных отметках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение хотелось бы еще раз подчеркнуть, что рассмотренные в статье [17] разрушение скальных склонов и перемещение обломочного материала в высокогорных районах, подверженных воздействию многолетней мерзлоты и ледников, а также деградация мерзлоты и оледенения в результате наблюдающихся изменений климата в ряде случаев могут приводить к возникновению каменно-ледяных лавин, обвалов, камнепадов, потоков обломочного материала, селей и пр. И это требует большого внимания со стороны компаний, занимающихся инженерными изысканиями, проектированием инфраструктурных объектов и их инженерной защиты в горных регионах.

Список литературы, использованной авторами публикации [3], который состоит из 104 пунктов, можно посмотреть в конце их статьи по адресу: researchgate.net/publication/353592255.

ИСТОЧНИКИ

1. en.wikipedia.org/wiki/Franz_Josef_Glacier.
2. Gramiger L.M., Moore J.R., Gischig V.S., Loew S., Funk M., Limpach P. Hydromechanical rock slope damage during late Pleistocene and Holocene glacial cycles in an Alpine valley // Journal of Geophysical Research. Earth Surface. 2020. Vol. 125. № 8. P. e2019JF005494. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019JF005494>.
3. Kenner R., Arenson L.U., Gramiger L. Mass movement processes related to permafrost and glaciation // ResearchGate. January 2021. DOI: 10.1016/B978-0-12-818234-5.00112-7. URL: researchgate.net/publication/353592255.
4. Kenner R., Arenson L.U., Gramiger L. Mass movement processes related to permafrost and glaciation // Treatise on Geomorphology (2d edition, ed. by J.F. Shroder). Elsevier, 2022. Vol. 5. P. 283–303. DOI: 10.1016/B978-0-12-818234-5.00112-7. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128182345001127?via%3Dihub](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128182345001127?via%3Dihub).
5. pixabay.com/ru/photos/grosser-aletschgletsche-ледник-вале-2808275/.
6. pixabay.com/ru/photos/аляска-горы-пейзаж-природа-снег-4965534/.
7. ru.wikipedia.org/wiki/Алечский_ледник.
8. xn--80aegcaabcbngm5abc1ci.xn--p1ai/prodvizhenie-rezultatov-researchgate/.