

О перемещении материала в условиях многолетней мерзлоты и оледенения в высокогорье. Часть 3



Заглавное фото: pixabay.com/ru/illustrations/гора-шамони-горы-природа-пейзаж-6882286/ [6]

АНАЛИТИЧЕСКАЯ СЛУЖБА «ГЕОИНФО»

info@geoinfo.ru

Предлагаем вниманию читателей третью 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 [11]. 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 формирование 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 слабольдистых многолетнемерзлых отложениях и о многолетней мерзлоте в массивах трещиноватых скальных грунтов. Отметим, что нумерация рисунков продолжит начатую в предыдущих частях, а список источников будет отдельным.

Слабольдистые многолетнемерзлые отложения

Роберт Кеннер с соавторами в своей статье [3] указывают, что объемное содержание льда в слабольдистых многолетнемерзлых грунтах меньше, чем объем их порового пространства. Из-за меньшего количества скрытой теплоты (тепла, высвобождаемого или поглощаемого термодинамической системой при фазовых переходах без изменения температуры этой системы [7]) распределение и температура льда строго контролируются среднегодовыми температурами воздуха и солнечным излучением.

Слабольдистыми многолетнемерзлыми могут стать все типы отложений с любыми стратиграфическими особенностями и гранулометрическим составом. При этом на крутых склонах их деятельный слой часто состоит из более крупных фрагментов обломочного материала, чем остальная толща. Ледяной «каркас» может стабилизировать рыхлый материал на склонах с большим наклоном, чем угол его естественного откоса, потому что низкое содержание льда препятствует ползучести мерзлого грунта [3].

Таким образом, в устойчивых климатических условиях слабольдистый многолетнемерзлый материал, который до замерзания был рыхлым, не склонен к самопроизвольному деформированию (если не станет более льдистым). Однако деятельный слой в ответ на ежегодные циклы промерзания-протаивания часто деформируется поверх подстилающей его многолетнемерзлой толщи. Пучение грунта при замерзании (морозное пучение) может привести к образованию рыхлого незатвердевшего деятельного слоя с нулевым эффективным напряжением, который при оттаивании будет вести себя как вязкая масса. Поэтому на многолетнемерзлом склоне с углом наклона, близким к углу естественного откоса покрывающего его деятельного слоя, может происходить второй, прерывистый, деформационный процесс, касающийся этого слоя. Процесс жидко- или вязкотекучего движения увлажненного мелкозернистого деятельного слоя, оттаявшего в теплое время года (или оттаявшего сезонно-мерзлого слоя) известен как солифлюкция (иногда для перигляциальных условий его называют гелифлюкцией) [3, 5, 8] (рис. 18). Ползучесть деятельного слоя приводит к вогнутому профилю деформации, а скорости деформирования коррелируют с толщиной этого слоя.

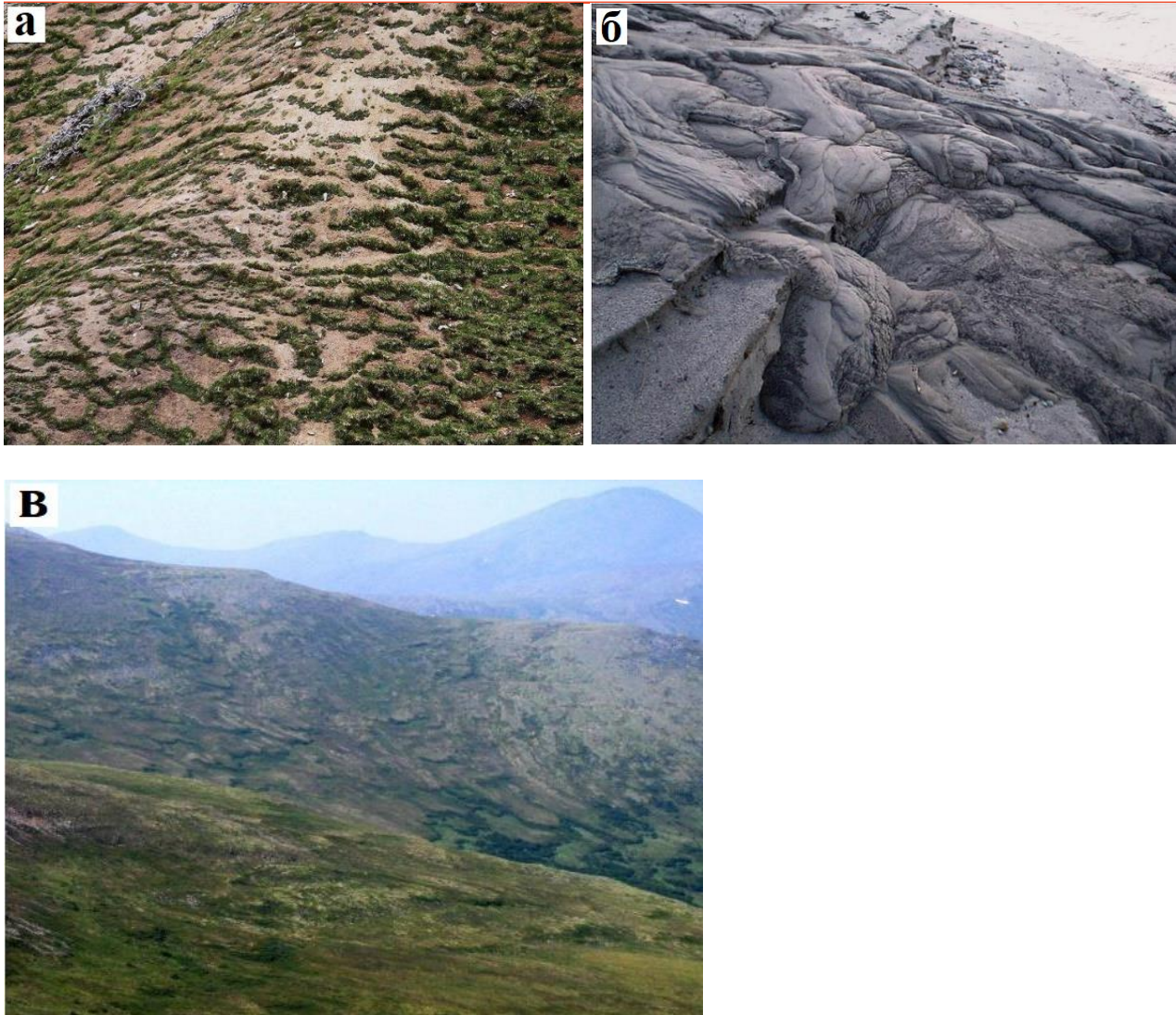


Рис. 18. Примеры солифлюкционных склонов в Швейцарии (а), Якутии (б), на Аляске (в) [5]

К деформированию всего деятельного слоя и его движению по кровле многолетней мерзлоты, как отмечают Кеннер с соавторами [3], могут привести два конкретных процесса.

1. Увеличение глубины подошвы деятельного слоя и связанное с этим таяние порового льда делает возможным сдвиг мелкозернистых отложений, которые ранее были скованы льдом и которые в сочетании со снижением эффективных напряжений из-за ограниченных возможностей дренирования имеют более низкое сопротивление сдвигу, чем типичный крупнозернистый материал ранее существовавшего деятельного слоя.

2. Интенсивные дожди могут привести к избыточным поровым давлениям и связанному с этим снижению эффективных напряжений на кровле многолетней мерзлоты.

Отсоединение деятельного слоя от нижележащей многолетнемерзлой толщи может приводить к быстрым смещениям грунтовых масс (камнепадам, потокам обломочного материала, селям) и инициировать регрессию многолетней мерзлоты из-за исчезновения ее теплоизоляции. Это может позволить сформировать новый деятельный слой из верхней части ранее многолетнемерзлых отложений. Но, с другой стороны, такое дополнительное таяние может спровоцировать дальнейшее развитие неустойчивости, что потенциально создает «порочный круг», и это может продолжаться до тех пор, пока не растает весь грунтовый лед.

Как предполагают авторы статьи [3], по сравнению с сильнольдистыми слабольдистые многолетнемерзлые грунты более чувствительны к потеплению климата, то есть реагируют на него сразу. Толщина деятельного слоя слабольдистого многолетнемерзлого грунта варьирует сильнее и реагирует на изменения в атмосфере быстрее из-за недостатка буферной скрытой теплоты таяния льда.

Кеннер и др. [3], ссылаясь на других авторов, также полагают, что высокая чувствительность стабильности деятельного слоя к дождям в будущем станет более критичной, поскольку ожидается, что жидкие атмосферные осадки будут чаще достигать больших высот в горах и их интенсивность будет увеличиваться.

Сочетание углубления подошвы деятельного слоя и увеличения интенсивности дождей снизит предельное сопротивление сдвигу материала, находящегося на кровле многолетней мерзлоты, и может привести к более высокой частоте отрывов от нее деятельного слоя на крутых склонах с соответствующим иницированием камнепадов, потоков обломочного материала и селей. Однако трудно прогнозировать, возрастут ли масштабы этих опасных событий или нет. Если активный слой не будет полностью установившимся, то объемы этих явлений будут ограничены более тонким слоем протаявших отложений.

Многолетнемерзлые трещиноватые скальные грунты в горах

Авторы статьи [3] отмечают, что лед содержится в микро- и макроструктуре многолетнемерзлых скальных пород. Если они нетрещиноватые, то обычно содержат очень небольшое количество льда (в зависимости от пористости). Кроме того, в поровом пространстве скальных грунтов даже при отрицательных температурах может иметься также немного жидкой воды.

В трещинах скальных пород может находиться больше льда. А на границах раздела «лед – порода» также могут иметься небольшие количества жидкой воды при минусовых температурах.

Распространение многолетней мерзлоты на скальных склонах, как правило, сильно зависит от среднегодовой температуры воздуха и солнечной радиации. На крутых склонах из-за отсутствия изолирующего снежного покрова, ограниченности содержания льда, а также из-за теплопередачи преимущественно за счет кондуктивного теплообмена (теплопроводности) максимальная годовая мощность деятельного слоя особенно сильно зависит от метеорологических воздействий и может значительно варьировать.

В ответ на различные воздействия и их комбинации многолетнемерзлые скальные склоны, особенно крутые, могут стать неустойчивыми и разрушиться. Масштабы этого варьируют от неглубоких нарушений стабильности, вызывающих небольшие камнепады, до крупномасштабных глубоких гравитационных деформаций, проявляющихся в виде уступов, террас, трещин растяжения, а также удлиненных траншеевидных впадин и бугров без четко выраженных разрывов сплошности. Такие движения больших масс могут вызывать опасные каменные лавины объемом в несколько миллионов кубических метров с дальностью выброса в несколько километров.

В долгосрочной перспективе на устойчивость скальных склонов влияют следующие перечисленные Кеннером с соавторами [3] процессы (рис. 19):

- структурная предрасположенность;
- криостатическое давление вызываемое циклами промерзания-протаивания или сегрегационным льдовыделением;
- инфильтрация воды и гидростатическое давление;
- оледенение;
- термомеханические процессы;
- сила тяжести;

- старение, или развитие усталости скальной породы (образования и развития трещин, физического выветривания).

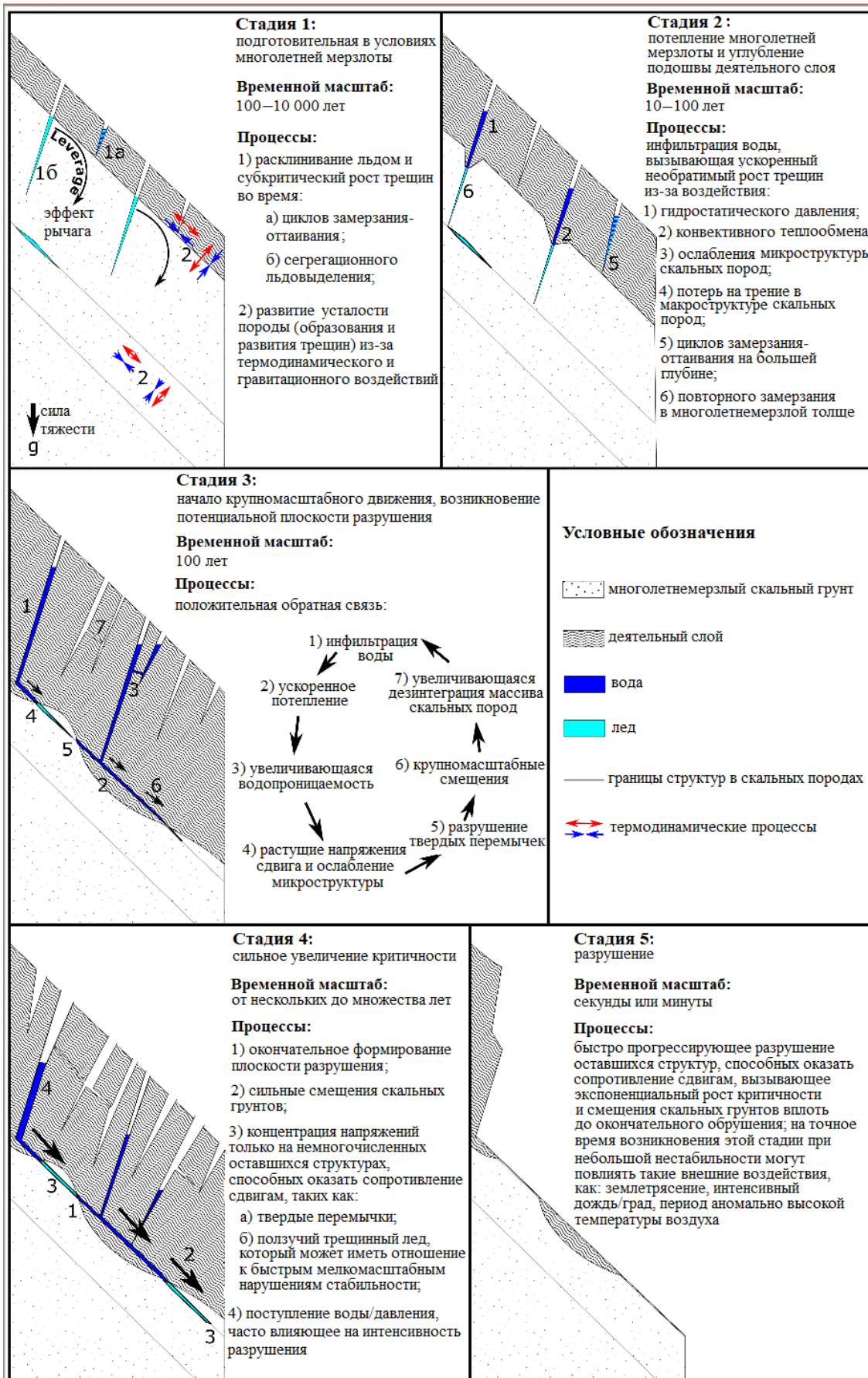


Рис. 19. Схематические разрезы многолетнемерзлого скального склона, иллюстрирующие различные стадии развития его нестабильности с указанием соответствующих этим стадиям временных масштабов и основных процессов (по [3])

Далее авторы статьи [3] подробнее останавливаются на криостатическом и гидростатическом давлении, а также на инфильтрации воды, так как эти факторы наиболее сильно влияют на условия многолетней мерзлоты.

Криостатическое давление вызывается объемным расширением во время фазового перехода от воды ко льду, которое составляет около 9%. Однако внутри скального грунта этот фазовый переход обычно ограничивается окружающим материалом (в том числе жестким мерзлым поверхностным слоем и нижележащей многолетней мерзлотой при повторном промерзании после оттаивания). Реальное изменение объема бывает разным в зависимости от скальной породы и ее структуры, поскольку вода замерзает в трещинах и порах, вызывая повышение давления и деформации сдвига в грунтовом массиве. Развитие давлений морозного пучения зависит от времени. Их величины могут достигать нескольких десятков мегапаскалей, что может привести к разрушению связей между зернами, возникновению и необратимому раскрытию трещин. Однако в основном криостатическое давление вызывает субкритическое развитие трещин (когда сдвигающие силы меньше, чем сопротивление скального грунта сдвигу). Это означает, что криостатические силы вызывают дестабилизацию скальных склонов в долгосрочной перспективе, а не в течение одного периода замерзания (см. рис. 19).

В микромасштабах циклы промерзания-протаивания скальных грунтов могут вызывать их циклические деформации из-за замерзания и оттаивания поровой воды. Это сопровождается снижением их прочности на сжатие и растяжение, а также увеличением пористости в результате повреждения микроструктуры.

Если говорить о более крупных масштабах, то в летние месяцы в трещинах может скапливаться вода, а в зимнее время там образуются ледяные клинья и вызывают напряжения, что приводит к дальнейшему раскрытию и распространению трещин. Этот процесс расклинивающего действия льда известен как конгелифракция, или морозобитие, морозное выветривание. Он наиболее эффективен, когда ограничено дренирование воды. В деятельном слое многолетнемерзлых скальных пород это обычно имеет место, поскольку сезонный мороз распространяется от поверхности внутрь, образуя фронт (нижнюю границу) промерзания. Поэтому жидкая вода оказывается между фронтом сезонного промерзания и кровлей многолетнемерзлого грунта, что также может привести к высокому криостатическому давлению. Направление промерзания относительно ориентации трещины является решающим дестабилизирующим фактором, причем наиболее эффективным в этом отношении является промерзание сверху вниз. На глубине более нескольких метров циклы промерзания-протаивания уже не происходят, поэтому морозобитие относительно мало способствует неустойчивости глубоких зон в массивах скальных пород [1–3].

Вода может также поступать из поровых пространств окружающих участков массива и транспортироваться к ледяному клину за счет криовсасывания – переноса водяного пара по температурному градиенту (или подъема воды по мелким трещинам за счет капиллярных сил), и при ее замерзании (сегрегационном льдовыделении) также может происходить расклинивание скальной породы льдом. На этом процессе Кеннер с коллегами [3], ссылаясь на других авторов, останавливаются более подробно.

Для сегрегационного льдовыделения требуются особые условия:

- в скальной породе должно содержаться достаточное количество влаги – более 65%;
- достаточно долго должен существовать градиент температуры, чтобы влага могла переноситься из более теплых участков в более холодные (при этом оптимальный температурный интервал для сегрегационного льдовыделения составляет от минус 3 до минус 6 градусов по Цельсию).

Вода в мелких порах и трещинах грунта может оставаться жидкой при температуре ниже нуля, поскольку границы мелких пор и трещин имеют очень большую кривизну, что может приводить к существованию в них термодинамически стабильной жидкости при температурах ниже точки замерзания ее большого объема (эффекту Гиббса – Томсона). Это позволяет воде просачиваться к ледяным линзам и клиньям, позволяя им расти [10]. Тонкая пленка жидкой воды также может существовать при отрицательных температурах на пограничном слое между скальным грунтом и льдом в трещине. Если дополнительная влага достигнет этой водной пленки, то на границе воды и льда может образоваться новый лед и криостатическое давление увеличится. Параллельно в поровом пространстве вокруг трещины развивается отрицательное давление за счет переноса влаги к трещине. Величина этого криосасывания в направлении сегрегации влаги может достигать нескольких мегапаскалей. Такой градиент давления дополнительно поддерживает рост клиньев льда и вызывает дальнейшее раскрытие и распространение трещин.

Подобно морозобитию эффективность сегрегационного льдовыделения также ограничена по глубине. Ограничивающими условиями здесь являются наличие температурного градиента и величины нормальных напряжений ниже примерно 200 кПа (поскольку нормальные напряжения в большинстве случаев в достаточной степени противодействуют усилиям, вызванным льдовыделением). Глубина, на которой достигаются эти пределы, может сильно варьировать в зависимости от геологического строения массива, размера и ориентации трещин, а также от общей топографии. Но все же сегрегационное льдовыделение может воздействовать на горные породы гораздо глубже, чем морозобитие. Во-первых, оно эффективно в многолетнемерзлых коренных породах на большей глубине, чем толщина деятельного слоя, подвергающегося воздействию циклов промерзания-протаивания. Во-вторых, ледяные линзы, жилы и клинья, образование которых вызвано сегрегационным льдовыделением, могут расти в течение тысячелетий, а не во время повторяющихся годовых циклов, как в случае морозобития. Если ежегодные циклы промерзания-протаивания вызывают усталость неглубоко залегающих зон скальных грунтов (возникновение и развитие в них трещин), то медленный рост сегрегационного льда может приводить к эффектам рычагов (в зависимости от структуры скального грунта), которые проникают глубоко под поверхность скального склона и вызывают распространение трещин за пределы фактического диапазона сегрегационного льдовыделения аналогично тому, что можно наблюдать для термомеханических процессов.

Инфильтрация воды в массивы скальных грунтов действует в разных пространственных и временных масштабах. На микроструктурном уровне инфильтрация воды в ранее относительно сухую породу может на порядок увеличить ее повреждение в зависимости от напряжения (рис. 20).

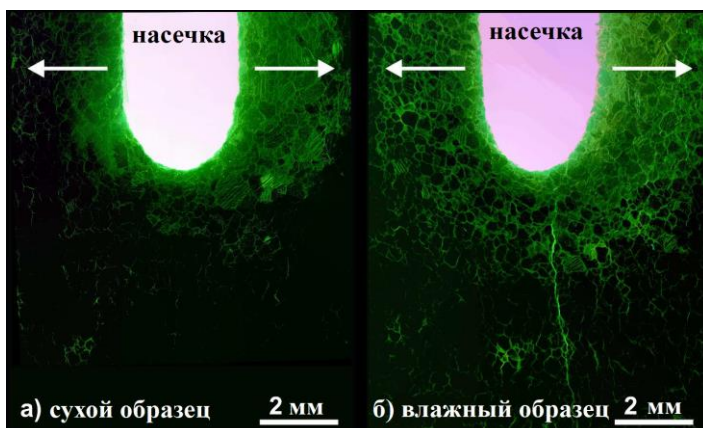


Рис. 20. Два шлифа каррарского мрамора под флуоресцентным микроскопом во время испытаний на изгиб (образцы фиксировались в их центрах, а затем медленно нагружались по краям, причем место разрушения задавалось выпиленной насечкой): а – сухой образец во время испытания (не наблюдается развивающейся одиночной трещины); б – насыщенный водой образец во время испытания (четко видна траектория разрушения по границам зерен) [3, 9]

В масштабе системы трещин дождь может вызвать их временное заполнение водой, что будет сопровождаться развитием *гидростатического давления* величиной до нескольких мегапаскалей в зависимости от уровня воды. Однако в высокогорных скальных грунтах таяние снега с меньшей вероятностью вызовет высокое гидростатическое давление, поскольку их поверхность в сезон снеготаяния обычно покрыта находящимся под снегом слоем льда, который часто препятствует инфильтрации воды в массив. Однако по мере прогревания атмосферы и таяния этого слоя льда дождевая вода начинает беспрепятственно проникать в грунт. Возникающее в результате гидростатическое давление может вызвать разрушение твердых перемычек и снизить предельное сопротивление трещиноватых пород сдвигу. Кроме того, вода обеспечивает быстрый адвективный перенос тепла по системе трещин на большие глубины, где это может вызвать повышение температуры и таяние трещинного льда.

Что касается временного масштаба, то инфильтрация воды может выступать в качестве как долгосрочного фактора, разрушающего скальный склон (например, из-за повторяющихся циклов гидростатического давления или из-за прогрессирующей инфильтрации воды, вызывающей распространение субкритических трещин), так и краткосрочного инициатора возникновения камнепадов (например, из-за создания пика гидростатического давления во время интенсивного дождя).

При этом, как отмечают авторы статьи [3], многолетняя мерзлота сильно влияет на гидропроводность массива скальных грунтов. Например, холодная поверхность скальных пород способствует повторному замерзанию воды на небольшой глубине и длительному закрытию трещин льдом, который эффективно предотвращает инфильтрацию в воды в грунтовый массив.

В следующей части будет рассказано о чувствительности многолетнемерзлых трещиноватых скальных пород к изменениям климата и о связанных с этим неопределенностях в сценариях будущего, а также об эрозии скальных склонов в результате деятельности ледников.

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

ИСТОЧНИКИ

1. en.wikipedia.org/wiki/Ice_segregation.
2. geokniga.org/bookfiles/geokniga-geokriologiya-harakteristiki-i-ispolzovanie-vechnoy-merzloty-t1.pdf.
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.

5. og-mgri.ru/data/documents/04_Ekzogenny-relev-kontinentov-Sklony.pdf.
6. pixabay.com/ru/illustrations/гора-шамони-горы-природа-пейзаж-6882286/.
7. ru.wikipedia.org/wiki/Скрытая_теплота.
8. translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.762f4924-622e35e7-c8f4eca6-74722d776562/https/www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/solifluction.
9. Voigtländer A., Leith K., Krautblatter M. Subcritical crack growth and progressive failure in Carrara marble under wet and dry conditions // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2018. Vol. 123. № 5. P. 3780–3798. DOI: 10.1029/2017JB014956/.
10. wikidea.ru/wiki/Frost_heaving.
11. xn--80aegcaa6cbngm5a6c1ci.xn--p1ai/prodvizhenie-rezultatov-researchgate/.