

О перемещении материала в условиях многолетней мерзлоты и оледенения в высокогорье. Часть 1



Заглавное фото: pixabay.com/ru/photos/пейзаж-горы-ледник-альпы-вале-3612893/ [9]

АНАЛИТИЧЕСКАЯ СЛУЖБА «ГЕОИНФО»

info@geoinfo.ru

Предлагаем вниманию читателей обзор материалов статьи «Процессы перемещения материала, связанные с многолетней мерзлотой и оледенением» [7] с привлечением дополнительных рисунков и информации. Указанная работа [7] 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 [7], представляющем собой европейскую академическую социальную сеть для ученых всех научных дисциплин, направленную на продвижение результатов научных исследований [14]. Эта объемная работа также вошла в виде отдельной главы в книгу *Treatise on Geomorphology* («Трактат по геоморфологии») [8], опубликованную на английском языке издательством Elsevier.

В своей статье [7] 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 временных масштабах, 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-исследователей 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 представляем первую часть обзора, в которой рассмотрим процессы, связанные с льдистыми, сильнольдистыми и очень сильнольдистыми многолетнемерзлыми обломочными отложениями в высокогорье.

ВВЕДЕНИЕ

В высокогорных регионах оледенение и многолетняя мерзлота совместно влияют на перемещение материала в различных масштабах и с разными скоростями. Медленное деформирование ледников или каменных глетчеров обычно не критично для деятельности человека, но быстрые перемещения обломочных материалов, высвобождаемых из криосферы (камнепадов, обвалов, селей, каменных, снежных и ледяных лавин и пр.) могут быть опасными для имеющейся на склонах инфраструктуры, например для населенных пунктов и транспортных или энергетических коридоров. В статье «Процессы перемещения материала, связанные с многолетней мерзлотой и оледенением» [7] Роберт Кеннер, Лукас Аренсон и Лоренц Грамигер уделяют основное внимание разрушению скальных склонов и движению обломочного материала в высокогорных районах, подверженных воздействию многолетней мерзлоты и оледенения. Их работа носит обзорный характер и основана на анализе очень большого количества публикаций.

Ссылаясь на других авторов, Кеннер с коллегами [7] говорят о том, что высокогорная криосфера является одной из наиболее чувствительных сред к изменениям климата. Локальная деградация многолетней мерзлоты и ледников из-за глобального потепления может вызывать положительную обратную связь в виде самоусиливающегося потепления атмосферы, криосферы и литосферы. Поэтому во всем мире ожидается чрезмерное потепление в высокогорных и полярных регионах. В сочетании с региональными сдвигами в режимах выпадения атмосферных осадков весьма вероятны продолжение и ускорение деградации и деградации многолетней мерзлоты почти во всех регионах Земли. При этом отступление ледников можно наблюдать визуально, а увеличение температуры многолетней мерзлоты и ее таяние в горных районах в значительной степени невидимы и могут наблюдаться только с использованием дорогостоящих методов мониторинга.

Гляциальные, парагляциальные и перигляциальные процессы, подготавливающие быстрые перемещения материала, обычно идут на протяжении периодов длиной от нескольких десятилетий до тысячелетий, и только после этого вызывают крупномасштабные нарушения стабильности грунтовых массивов. В устойчивых климатических условиях частота быстрых перемещений масс из этих сред относительно низка. Но под влиянием быстрого изменения климата развитие или активизация нестабильностей могут ускориться.

Кеннер с соавторами [7] подчеркивают, что для гляциальных, парагляциальных и перигляциальных процессов очень важно проводить различие между подготовкой и активизацией движений масс, а также учитывать разные временные масштабы, поскольку для длительных и коротких периодов времени актуальность многих процессов, описанных в работе [7], явно неодинакова. Более того, влияние многолетней мерзлоты и ледников на устойчивость, например, скальных склонов можно даже увидеть с точностью до наоборот,

если рассматривать его в разных временных масштабах: в краткосрочной перспективе это воздействие может быть стабилизирующим, а в долгосрочной – разрушительным.

Поэтому авторы статьи [7] обсуждают как подготовительные процессы, так и краткосрочные триггеры быстрых перемещений грунтовых материалов, высвобождаемых из криосферы высокогорных областей в результате глобального потепления. Кроме того, они рассматривают динамику медленных движений масс, а также описывают возможные сценарии будущего с учетом чувствительности рассмотренных процессов к изменениям климата.

Рассматриваемая публикация [7] состоит из двух основных частей:

1) анализа роли многолетней мерзлоты в движении высокогорных масс с обсуждением многолетнемерзлых обломочных отложений разной степени льдистости и коренных скальных пород;

2) рассмотрения многогранного влияния ледников на топографию горных регионов и на устойчивость отдельных склонов с выделением различных форм ледниковой эрозии, их микроклиматических эффектов и последствий влияния повторяющихся ледниковых циклов.

Однако представляемый аналитической службой обзор материалов статьи [7] с использованием дополнительной информации будет состоять из большего количества частей в силу объемности рассматриваемой публикации [7].

ВЫСОКОГОРНАЯ МНОГОЛЕТНЯЯ МЕРЗЛОТА

Многолетнемерзлые обломочные отложения разной степени льдистости и их потенциальные перемещения

Содержание льда в многолетнемерзлых грунтах обуславливает их льдистость, то есть содержание льда, выраженное в процентах или долях единицы. По ГОСТ 25100-95 [4] такие грунты подразделяются на нельдистые, слабольдистые, льдистые, сильнольдистые и очень сильнольдистые. Для дисперсных (в том числе обломочных) отложений содержание льда для перечисленных разновидностей составляет соответственно: 0–3; 3–20; 20–40; 40–60; 60–90% [4].

Как указывают авторы статьи [7], объем льда, содержащегося в льдистых, сильнольдистых и очень сильнольдистых многолетнемерзлых грунтах, значительно превышает объем их порового пространства в незамерзшем состоянии. В горах деятельный слой такого грунта (периодически оттаивающий и замерзающий в разные сезоны [11]) ближе к поверхности в основном состоит из крупнообломочных осыпных отложений, валунов и булыжников, а с глубиной в нем увеличивается доля мелкозернистых материалов.

Льдистые, сильнольдистые и очень сильнольдистые многолетнемерзлые грунты до определенных нижних высотных отметок горных регионов могут существовать даже в пределах конкретных форм рельефа, вне которых нет многолетней мерзлоты. Их сезонные температурные профили в этих более низких диапазонах высот часто характеризуются протяженными нулевыми завесами, которые указывают на процессы таяния и замерзания, вызывающие выделение или потребление скрытого тепла массивными ледяными телами. (Напомним, что нулевая завеса – это подвижная во времени температурная преграда возникающая в толще мерзлых грунтов при смене фазы воды на фазу льда и обратно при нулевой температуре и препятствующая теплообмену. Основной причиной ее появления и существования служит выделение скрытой теплоты льдообразования при промерзании грунта и поглощение скрытой теплоты при таянии подземного льда. В начале зимы нулевая завеса начинается почти с дневной поверхности, затем она постепенно понижается до мерзлой толщи к началу лета. А потом все происходит в обратном порядке [3, 12].)

На склонах сильнольдистые и очень сильнольдистые многолетнемерзлые грунты деформируются под собственным весом и часто образуют формы рельефа, известные как каменные глетчеры, типичное объемное содержание льда в которых варьирует от 50 до 70% [7].

Каменные глетчеры состоят из крупнообломочного материала и льда и обычно являются стратифицированными. Они имеют вид языков, лопастей и террасовидных шлейфов. Лопастевидные и языковидные каменные глетчеры обычно имеют слабонаклонную поверхность и крутые боковые и фронтальные откосы (уступы). Они способны к медленному пластическому течению вниз по уклону подстилающей их поверхности из-за деформирования содержащегося в них льда. В плане они состоят из зон питания, транзита и разгрузки. Зона питания обычно представлена осыпями и потоками обломочного материала различного генезиса, абляционной мореной на концах ледников или даже техногенными отвалами и терриконами. Зона транзита представлена собственно каменным глетчером, где происходят основные деформации течения. Зона разгрузки (абляции) находится в краевой части вблизи фронтального откоса (уступа) и у его подножия (рис. 1–7) [5–7, 10, 12].



Рис. 1. Зоны питания и транзита каменного глетчера Штайнигкарле в Эцтальских Альпах [10, 13]



Рис. 2. Нижняя часть каменного глетчера Рейченкар в Тирольских Альпах [10, 13]



Рис. 3. Фронтальный уступ-откос (зона разгрузки) активного каменного глетчера в Северном Тянь-Шане [1]



Рис. 4. Каменный глетчер Иннере-Ольгрубе в Эцтальских Альпах [10, 13]



Рис. 5. Каменный глетчер Сульцкар в западной части Штубайских Альп [10, 13]



Рис. 6. Каменный глетчер в Северном Тянь-Шане [1]

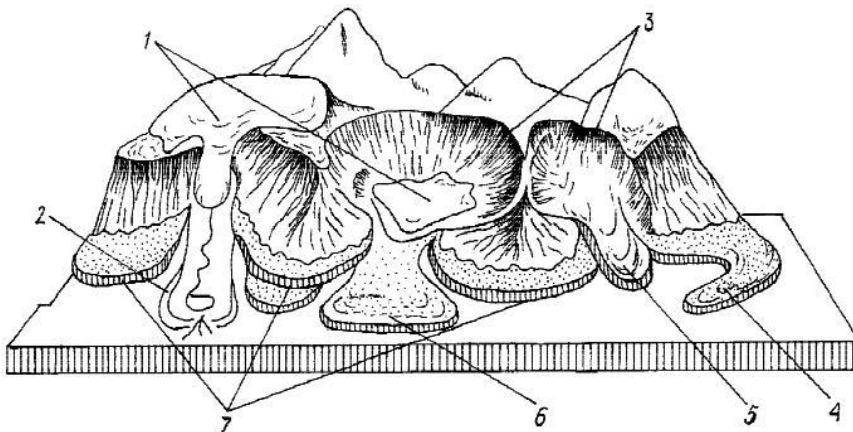


Рис. 7. Генетические и морфологические типы каменных глетчеров: 1 – ледники; 2 – ледниковые морены; 3 – кары (цирки); 4 – осыпной присклоновый языковидный каменный глетчер; 5 – ледниковый долинный языковидный каменный глетчер; 6 – долинный лопастевидный (лопатообразный) каменный глетчер; 7 – осыпной террасовидный каменный глетчер [1]

Кеннер с соавторами [7] отмечают, что на склонах крутизной более 30 град. сильнольдистые и очень сильнольдистые многолетнемерзлые грунты переходят в состояние непрерывного разрушения (когда напряжение сдвига превышает локальную прочность на сдвиг). Если фронтальная часть каменного глетчера достигает более крутой подстилающей поверхности, то из нее высвобождается каменный материал в виде камнепадов, потоков обломочного материала или даже селей, что в основном ограничивается частичным или полным обрушением деятельного слоя. Однако в некоторых случаях могут обрушиться большие части всего каменного глетчера в виде крупной каменно-ледяной лавины.

Динамика движения каменных глетчеров

Каменный глетчер, по образному сравнению авторов работы [7], движется по типу конвейерной ленты, в то время как для движения ледника основным механизмом является скольжение его подошвы по подстилающей поверхности. Это существенное отличие объясняет повсеместное отсутствие морен напора перед фронтами каменных глетчеров. (Однако наглядным доказательством консолидированного движения каменного глетчера

являются небольшие дерновые валики напора (рис. 8), которые могут возникать у подножия фронтального уступа, если каменный глетчер надвигается, например, на альпийский луг [1].)



Рис. 8. Дерновые валики напора у подножия уступа-откоса каменного глетчера в Северном Тянь-Шане [1]

На рисунке 9 показан типичный профиль деформации каменного глетчера, взятый авторами статьи [7] из работы Аренсона и др. [2]. Как правило, слой А толщиной до нескольких десятков метров с относительно небольшими скоростями внутренних деформаций наблюдался поверх четко определяемого слоя Б толщиной в несколько дециметров или несколько метров с относительно высокими скоростями деформаций. В некоторых случаях было идентифицировано более одной последовательности наложенных друг на друга слоев типа А и Б. Доминирующим процессом для слоя А считается пластическое деформирование массива сильнольдистого или очень сильнольдистого многолетнемерзлого грунта в соответствии с законом Глена (то есть с моделью пути деформирования льда, основанной на экспериментах с ледяными блоками, проведенных в начале 1950-х годов Дж. В. Гленом, который обнаружил, что скорость деформирования в блоке льда, находящемся под постоянным напряжением, достигает устойчивого значения; позже эта модель была адаптирована Дж. Ф. Наем для применения к ледникам). Этот тип деформирования, обычно называемый ползучестью, сильно зависит от напряжения и температуры. Слой Б (см. рис. 9) характеризуется значительно более сильными ползучестью, сдвиговыми деформациями или комбинацией того и другого. Как правило, ползучесть связана со смещениями в микроструктуре материала, а сдвиг возникает в результате непрерывного разрушения микроструктуры. Чтобы упростить проведение различия между обоими слоями, Кеннер с соавторами [7] называют слой А зоной пластического деформирования, а слой Б – зоной сдвига, хотя в некоторых случаях подходящим описанием для процессов в слое Б может быть «ползучесть, сконцентрированная в пределах ограниченного слоя». В реальности переход от деформирования каменного глетчера с преобладанием ползучести к деформированию с преобладанием сдвига является сложным и зависит от местных условий, поэтому обычно не может быть четко различимым.

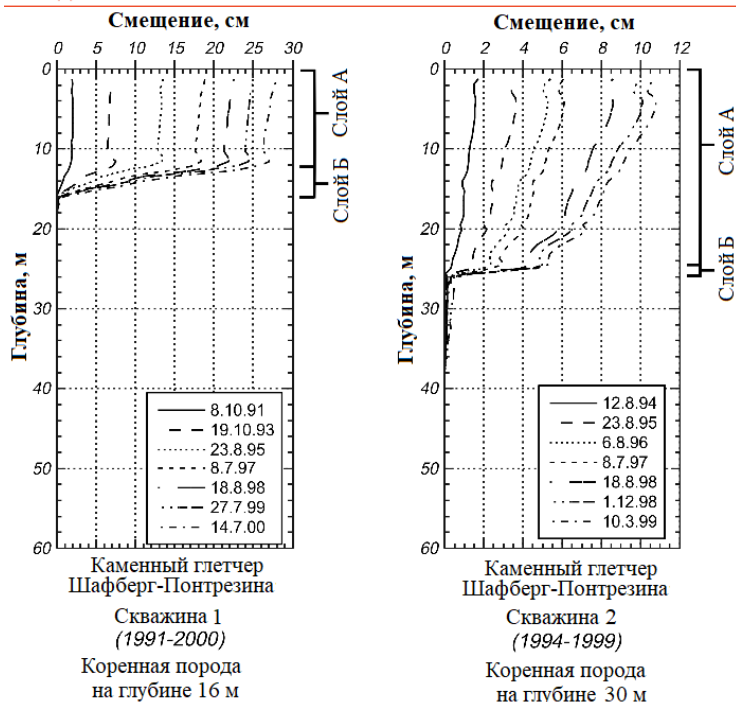


Рис. 9. Деформации в каменном глетчере Шафберг-Понтрезина в Швейцарии. Отчетливо виден хорошо выраженный горизонт сдвига на глубине 15 м для скважины 1 и на глубине 25 м для скважины 2. Для скважины 2 пластическое деформирование составляет почти 50% от общего деформирования, но оно практически отсутствует для скважины 1. Нижняя граница многолетнемерзлого грунта находится на глубине около 60 м для скважины 1 и на глубине примерно 40 м для скважины 2 [2, 7]

Как отмечают Кеннер с соавторами [7], в зонах зарождения каменных глетчеров или в относительно небольших или холодных каменных глетчерах деформации ползучести могут составлять 50% от всех деформаций. Доля сдвиговых деформаций и, соответственно, скорость движения растут вниз по склону, а также с увеличением его крутизны (если слой, в котором преобладают деформации сдвига, относится к слабьдистому многолетнемерзлomu грунту, то скорость сдвига также может зависеть от его температуры). Многие из исследованных зон сдвига в каменных глетчерах расположены близко к подошве многолетней мерзлоты, что, вероятно, связано с идеальным сочетанием самых высоких температур многолетнемерзлых грунтов, самого большого напряжения и сосуществования воды и избытка льда.

Вклад деформаций ползучести в общую деформацию составляет не более нескольких дециметров в год, а сдвиги могут вызывать смещения каменного глетчера на несколько метров в год или, в крайних случаях, на несколько десятков метров. Для более быстро движущихся из них (со скоростью более 1 м/год) сдвиговые процессы, вероятно, являются доминирующими, особенно для крупных каменных глетчеров на крутых склонах (поскольку этот их тип наиболее важен для возникновения таких быстрых смещений грунтовых масс с фронтальной части, как камнепады, потоки обломочного материала, сели и пр., авторы статьи [7] далее уделяют ему особое внимание).

В следующей части будет более подробно рассказано о факторах, влияющих на изменения скоростей движения каменных глетчеров, в том числе о воздействии потепления климата.

Список литературы, использованной авторами статьи [7], можно посмотреть в конце их работы по адресу: [researchgate.net/publication/353592255](https://www.researchgate.net/publication/353592255).

ИСТОЧНИКИ

1. Горбунов А.П. Горбунова И.А. География каменных глетчеров мира. М., 2010. URL: geokniga.org/bookfiles/geokniga-geografiya-kamennyh-gletcherov-mira.pdf.
2. Arenson L, Hoelzle M, Springman S. Borehole deformation measurements and internal structure of some rock glaciers in Switzerland // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2002. Vol. 13. № 2. P. 117–135. DOI:10.1002/ppp.414.
3. dic.academic.ru/dic.nsf/enc_geolog/9986/ЗАБЕСА.
4. docs.cntd.ru/document/1200000030.
5. geosystems.ru/use/gornaya-promyshlennost/articles/skanirovanie-kamennogo-gletcherov-v-shveysarii/.
6. ice-snow.igras.ru/jour/article/viewFile/339/191.
7. 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.
8. 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.
9. pixabay.com/ru/photos/пейзаж-горы-ледник-альпы-вале-3612893/.
10. sites.google.com/site/rockglacier/.
11. studref.com/307441/geografiya/geologicheskie_protsessy_oblasti_vechnoy_merzloty.
12. translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.c58cfb04-622ba064-cf42e051-74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/Zero-curtain_effect.
13. uibk.ac.at/projects/rockglacier/intro_surface_re_rg.html.
14. xn--80aegcaa6cbngm5a6c1ci.xn--p1ai/prodvizhenie-rezultatov-researchgate/.