

УДК 551.324
DOI 10.17513/use.38226

АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ ТРАНСФОРМИРОВАНИЯ ГОРНЫХ КРИОГЕННЫХ СИСТЕМ НА ФОНЕ БЫСТРОГО ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА

Калов Р.О., Федченко Л.М.

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Нальчик, e-mail: calov.r@yandex.ru

Аннотация. Основное внимание в статье уделено процессам деградации горных склонов Кабардино-Балкарии, подверженных воздействию многолетней мерзлоты и оледенения. Изложены особенности инфильтрации воды и перемещения обломочного материала. Освещена тенденция корректировки модулирующего влияния водно-ледниковых процессов на интенсивность эрозии грунтов и характера мерзлотного формообразования. Рассмотрена динамика многолетней мерзлоты на ключевых массивах грунта. Произведена оценка состояния фоновых по масштабу многолетнемерзлых слабольдистых мерзлотных отложений. Освещены современные изменения в характере функционирования природных процессов в многолетнемерзлых трещиноватых скальных грунтах. Обоснован прогноз о перспективе существенного повышения тесноты связи условий функционирования криогенных областей с тремя переменными природными факторами: криостатическим давлением, инфильтрацией воды и гидростатическим давлением. Выбор темы исследования обусловлен особой чувствительностью криогенных систем к изменениям климата и критичным повышением рисков ослабления устойчивости скальных грунтов, угрожающих селитебным ландшафтам и объектам жизнеобеспечения в горах. В условиях нарастающих угроз, обусловленных тенденцией многовекторного снижения устойчивости скальных грунтов, необходимы дополнительные комплексные геокриологические исследования, налаживание постоянного мониторинга мерзлотных систем, направленные на выявление всей совокупности современных природных процессов, обуславливающих новый виток снижения стабильности горных склонов.

Ключевые слова: многолетнемерзлые отложения, деформация скальных грунтов, трещиноватые породы, инфильтрация воды, криостатическое давление, деятельная толща

ANALYSIS OF TRENDS IN THE TRANSFORMATION OF MOUNTAIN CRYOGENIC SYSTEMS AT THE BACKGROUND OF RAPID CLIMATE WARMING

Kalov R.O., Fedchenko L.M.

High Mountain Geophysical Institute, Nalchik, e-mail: calov.r@yandex.ru

Annotation. The main attention in the article is paid to the processes of degradation of the mountain slopes of Kabardino-Balkaria, exposed to the effects of permafrost and glaciation. The features of water infiltration and movement of debris are outlined. The tendency to adjust the modulating influence of water-glacial processes on the intensity of soil erosion and the nature of permafrost formation is highlighted. The dynamics of permafrost on key soil masses is considered. An assessment was made of the state of background-scale permafrost, lightly icy permafrost deposits. Modern changes in the nature of the functioning of natural processes in permafrost fractured rocky soils are highlighted. The forecast about the prospect of a significant increase in the close connection between the operating conditions of cryogenic areas and three variable natural factors is substantiated: cryostatic pressure, water infiltration and hydrostatic pressure. The choice of research topic is due to the special sensitivity of cryogenic systems to climate change and the critical increase in the risks of weakening the stability of rocky soils that threaten residential landscapes and life support facilities in the mountains. In the context of growing threats caused by the trend of a multi-vector decrease in the stability of rocky soils, additional comprehensive geocryological studies are needed, establishing constant monitoring of permafrost systems aimed at identifying the entire set of modern natural processes that determine a new round of reduction in the stability of mountain slopes.

Keywords: permafrost deposits, deformation of rocky soils, fractured rocks, water infiltration, cryostatic pressure, active strata

За последние десятилетия опасные природные процессы, связанные со стихийным сходом скальных грунтов в Кабардино-Балкарии, фиксируются на участках, где таких явлений не было сотни лет. Ныне обвальными процессами охвачена практически вся высокогорная зона республики. При этом около 70% стихийных опасных природных явлений формируются на высотах свыше 3600 м, ранее функционировавших в условиях отрицательных температур [1].

Выбор темы исследования обусловлен особой чувствительностью криогенных систем к изменениям климата и критичным повышением рисков ослабления устойчивости скальных грунтов, угрожающих селитебным ландшафтам и объектам жизнеобеспечения в горах. Целью работы является исследование ответной реакции горных мерзлотных комплексов на выраженное потепление климата на примере Кабардино-Балкарской Республики.

Задачами исследования являются:

1. Анализ новых тенденций изменения термодинамических процессов в горной криолитозоне, связанных с фазовыми переходами воды.

2. Оценка состояния слабодыстных многолетнемерзлых отложений, обуславливающая современные геокриологические условия функционирования горных экосистем.

3. Обсуждение ответной реакции многолетнемерзлых трещиноватых скальных грунтов на изменения климата.

Материалы и методы исследования

Исследование тенденций динамики горной криосферы произведено по результатам обработки материалов полевых инженерно-метеорологических работ Высокогорного геофизического института.

Результаты исследования и их обсуждение

Особенность горных склонов Кабардино-Балкарии, подверженных воздействию оледенения, в том, что объемное содержание льда в многолетнемерзлых слабодыстных грунтах ниже, чем объем их порового пространства. Из-за меньшего количества скрытой теплоты распределение льда и его температура находятся в прямой зависимости от мощности солнечного излучения и среднегодовых термических свойств атмосферы. Под скрытой теплотой при этом понимается количество тепла, поглощаемого или высвобождаемого термодинамической системой при фазовых переходах грунтовой влаги без изменения температуры системы.

На рассматриваемых высотах исследуемой территории практически все типы скальных грунтов с различным гранулометрическим составом и стратиграфическими особенностями являются многолетнемерзлыми слабодыстными. В зависимости от особенностей макро- и микроструктуры многолетнемерзлых горных пород, содержание в них льда существенно дифференцировано в соответствии с их пористостью: если породы не трещиноватые, то они содержат незначительное количество льда, и наоборот.

На крутых склонах зоны деятельная толща чаще состоит из относительно крупных элементов обломочного материала. Рыхлая часть склоновой толщи удерживается ледяным «скелетом», причем надежнее, нежели угол ее естественного откоса, что связано с малым содержанием льда в грун-

те, ограничивающей ползучесть мерзлотно-го материала.

Многолетнемерзлые слабодыстные грунты в устойчивых климатических условиях, которые до замерзания были рыхлыми, не предрасположены к самопроизвольному деформированию (если не повысится уровень льдистости). На современном этапе деятельная толща в ответ на неизбежные ежегодные процессы промерзания последовательно деформируется над ее подстилающим многолетнемерзлым слоем [2].

Морозное пучение грунта часто ведет к образованию незатвердевшей рыхлой деятельной толщи с нулевым эффективным напряжением, при оттаивании которого приобретает консистенцию вязкой массы [3]. В силу этого на многолетнемерзлом массиве с углом наклона, близким к углу естественного откоса, покрывающей его деятельной толщи, протекает второй деформационный, прерывистый процесс, касающийся данного слоя. В теплый период года применительно к перигляциальным условиям протекает как процесс гелифлюксии, то есть вязкотекучего сползания мелкозернистой оттаявшей деятельной толщи. Динамика деятельной толщи обуславливает вогнутый профиль деформации, а темпы деформирования пропорциональны мощности данного слоя.

В республике деформирование деятельной толщи и ее сползание по кровле многолетней мерзлоты преимущественно вызывают следующие природные процессы:

1. Углубление подошвы деятельной толщи и обусловленное ею таяние порового льда, которое приводит к сдвигу мелкозернистых, ранее скованных льдом отложений. Они в сочетании с уменьшением эффективных напряжений, в силу ограниченных возможностей дренирования, имеют низкое сопротивление смещения, нежели крупнозернистые слои ранее функционировавшей деятельной толщи.

2. Экстремальные проливные дожди, обуславливающие чрезмерное поровое давление, уменьшение эффективных напряжений на кровле многолетнемерзлого массива.

«Отслоение» деятельной толщи от многолетнемерзлых нижележащих пород в последние годы в Кабардино-Балкарии все чаще приводит к интенсивным сдвигам грунтовых масс (потоки обломочного материала, камнепады, сели и т.д.), инициируя регрессию многолетней мерзлоты в силу потери ее теплоизоляции. Данный процесс фактически подвел к формированию новой

деятельной толщ из верхнего слоя части многолетнемерзлых грунтов. Регрессия верхнего слоя ранее многолетнемерзлых пород грозит началом новой крупномасштабной нестабильности, формированием потенциальной плоскости разрушения склона. Дальнейшее снижение устойчивости грунтов неизбежно приведет к порочному кругу последовательных положительных внутриландшафтных обратных связей (рис. 1).

Из рис. 1 несложно понять, что дальнейшее разворачивание пессимистического сценария схемы станет началом цепи нового быстро прогрессирующего разрушения оставшихся структур, способных оказать сопротивление сдвигам. Кроме этого фоновые в республике слабодистые многолетнемерзлые склоны существенно чувствительнее к росту термических показателей, следовательно, временной промежуток реакции на температурные изменения короче. Толщина последних также оперативнее реагирует на потепление климата в силу дефицита буферной скрытой теплоты таяния льда.

Полагаем также, что повышенная чувствительность устойчивости деятельной толщи многолетнемерзлых слабодистых грунтов к количественно возрастающим дождевым осадкам в среднесрочной перспективе станет критичнее. Обозначенное предположение основано на том, что жидкие атмосферные осадки уже смещаются в верхние

высотные отметки, для которых ранее были характерны осадки в виде снега [4].

Сочетание углубления подошвы деятельной толщи с ростом интенсивности дождей вызовет снижение предельного сопротивления деформации грунта, локализованного на кровле многолетней мерзлоты. Следовательно, возрастут риски увеличения частоты отрывов от мерзлоты деятельной толщи на склонах с инициированием гравитационных обвалов. В то же время нельзя однозначно утверждать, что в данном конкретном случае возрастут масштабы опасных природных явлений: если активный слой не будет целиком установившимся, то риски опасной динамики будут лимитироваться тонким слоем протаявших грунтов.

На крутых склонах характер распространения многолетней мерзлоты существенно зависит от мощности солнечной радиации и среднегодовой температуры приземной атмосферы. На склонах с большим углом наклона исследуемой территории мощность деятельной толщи обусловлена ограниченностью снежного покрова – термоизолятора, минимальным содержанием льда в грунтах, а также механизмом кондуктивного теплообмена. Поэтому годовая мощность деятельной толщи особо тесно коррелирует с метеорологическими параметрами, а последние варьируют в зависимости от геометрии и экспозиции склонов [5].



Рис. 1. Схема возможного замыкания круга взаимообусловленных положительных обратных связей в мерзлотной толще

Характеристики обвалов последних годов в Кабардино-Балкарии [1]

№ п/п	Долина реки (бассейн реки)	Площадь зоны поражения, тыс. м ²	Абсолютная отметка точки отрыва, м	Средний угол наклона пути, градусы	Дальность выброса с учётом наклона, м	Дата события или период, в который оно произошло
1	Адыл-Су (Баксан)	82	4150	45,3	1350	12.07.–13.08.2018 г.
2		930	4162	25,4	3500	24.04.2019 г.
3	Джанкуат (Адыл-Су, Баксан)	86	3550	22,1	1040	Июнь 2003 г.
4	Башиль-Аузу-Су (Чегем)	55	4000	28,5	800	7.07.–9.07.2019 г.
5		24	3560	40,8	900	2013 г.
6		61	3600	33,0	970	2015 г.
7		74	3650	33,9	1075	2017 г.
8	Болдошке (Башиль-Аузу-Су, Чегем)	115	3720	16,4	1055	12.12.–26.12.2017 г.
9		157	3735	24,9	2540	2000 г.
10	Кулак-Су (Гара-Аузу-Су, Чегем)	202	3790	24,9	1215	2011 г.
11	Кара-Су (Черек Балкарский)	146	3700	30,3	1565	2006–2009 гг.
12		105	3800	27,2	1575	2016 г.
13		80	3320	24,5	1010	2015 г.

В ответ на комбинированные воздействия совокупности природных процессов, характер деформаций на склонах республики видоизменяются от неглубоких нарушений устойчивости, вызывающих только локальные камнепады, до обширных гравитационных деформаций в виде террас, уступов, трещин растяжения, протяженных траншевидных бугров и впадин без ярко выраженных разрывов визуального единства.

Обозначенные природные процессы активизировали гравитационную динамику значительных склоновых массивов, которые вызвали в Кабардино-Балкарии серию обширных обвалов с объемом, измеряемым в миллионах кубических метров, и дальностью выброса в несколько километров. Так, из общего числа зафиксированных в регионе случаев ледово-каменных обвалов, около 77% характеризовались дальностью переноса обломков от 1 до 4 тыс. м (таблица). К примеру, дальность выброса обломочного материала с г. Башкара в 2019 г. составила 3500 м.

Судя по таблице, подавляющее большинство стихийных сходов горных пород приурочено к долинам рек Баксан, Чегем, Черек. Очаги зарождения обвалов варьируют в пределах высотных уровней от 3330 до 4200 м. Авторы предполагают, что в средне- и долгосрочной перспективе наиболее вероятными

факторами усугубления ситуации в криосфере может быть следующий ранжированный ряд частично протекающих и перспективных природных процессов:

- повышение криостатического давления, вызываемое ростом числа годовых циклов и глубиной промерзания и оттаивания грунта, что неизбежно обусловит прогрессирующую дестабилизацию горных склонов;

- гидрогеологические процессы, активизируемые перепадами термических параметров воды в трещиноватых скальных грунтах, быстро снижающих устойчивость горных массивов;

- углубление залегания деятельной толщи, обуславливающее выраженный рост площадей с неустойчивыми грунтами;

- повышение гидростатического давления, вызываемое устойчивым разрастанием трещиноватости горных массивов;

- повышение гравитационной напряженности состояния грунтов, обусловленное углом наклона и геометрией склонов;

- активизация физического выветривания и повышение трещиноватости пород, угрожающей назреванием критической «усталости» скальных грунтов;

- термомеханические процессы, связанные с гранулометрическими параметрами горных пород, обуславливающих неравномерное распределение в них температуры.

В среднесрочной перспективе из изложенного выше ранжированного ряда ожидаемых природных процессов особо тесные связи условий функционирования криогенных областей предположительно будут иметь с тремя переменными факторами: криостатическим давлением, инфильтрацией воды, гидростатическим давлением.

Криостатическое давление в грунтах обусловлено объемным расширением воды (в среднем на 9%) в процессе ее фазового перехода [6]. Но влияние фазового перехода внутри скальной породы ограничивается окружающим грунтом, в том числе мерзлой поверхностной толщей и нижележащей мерзлотой в случае ее повторного промерзания после оттаивания. Процентное изменение объема расширения дифференцировано в зависимости от генезиса скальных грунтов, их структуры, поскольку влага замерзает в порах и трещинах, обуславливая повышение давления и очередную деформацию сдвига горных пород [7]. Величина повышения давления при переходе воды к кристаллической структуре достигает нескольких десятков мегапаскалей. Этого достаточно для разрушения структурных связей в гранулометрическом составе пород, образования и необратимого раскрытия трещин. Но в этой стадии формируются в основном субкритические трещины, при которых силы сдвига все еще меньше, чем уровень сопротивления грунта сдвигу. Следовательно, криостатическое давление приводит к дестабилизации горных пород не в течение одного периода замерзания, а в среднесрочной перспективе.

В микромасштабах ежегодные циклы горных пород вызывают их периодические деформации в связи с попеременным замерзанием и оттаиванием поровой влаги. В данном случае уменьшение прочности пород связано с процессами растяжения и сжатия, ростом пористости грунтов из-за повреждения их микроструктуры.

Применительно к макромасштабам циклических процессов в теплое время года в трещинах скапливается влага в жидкой фазе, а в зимний период вода трансформируется в ледяные клинья, следствием которых является формирование достаточных распирающих сил (конгelifлюкция) с дальнейшим раскрытием и разрастанием трещин.

На горных склонах республики процесс раскалывания скального грунта льдом – одна из наиболее распространенных форм эрозии, что связано с лимитированностью дренирования воды зимой. В деятель-

ной толще многолетнемерзлых пород низкие температуры распространяются от поверхности грунтов вовнутрь, то есть сверху вниз, формируя нижнюю границу промерзания. Следовательно, вода в жидкой фазе замыкается между фронтом зимнего промерзания и кровлей многолетнемерзлых горных пород, сопровождаясь выраженным ростом криостатического давления. В данном случае процессы промерзания и оттаивания обуславливают дестабилизацию и «усталость» склонов лишь для неглубоко локализованных пород в виде возникновение сети трещин. На глубине же в несколько метров ежегодных циклов промерзания и оттаивания нет, в силу чего процесс конгelifракции не играет никакой роли в нарушении устойчивости поверхностных скальных пород [8].

В ряде случаев вода доставляется к очагу ледяного клина методом кривосасывания, то есть доставки влаги из поровых пространств грунта по градиенту температуры. Это механизм подъема воды, при котором она по малым трещинам подсасывается за счет межмолекулярных сил, возникающих между поверхностями породы и влагой. В финале данного процесса происходит сегрегационное льдовыделение, при котором горные породы так же расклиниваются льдом. Такие условия в КБР чаще складываются на высотах около 4000 м, активно вовлекаемых в последние годы в процессы деформации мерзлоты. На этих высотных уровнях градиент температуры держится относительно долго, при котором влага успевает мигрировать из относительно теплых участков грунтов в более холодные. Оптимальный термический интервал для сегрегационного льдовыделения при этом варьирует в пределах $-3 - -6^{\circ}\text{C}$ [8].

Примечательно, что в криогенной зоне региона широкое распространение получило функционирование воды в жидкой фазе при отрицательной температуре. Это связано со значительной кривизной трещин и пор, снижающих температуру замерзания. Термодинамически стабильная вода изогнутых пор просачивается к ледяным клиньям и линзам, инициируя дальнейший рост последних. При температурах ниже 0°C в пограничном слое между льдом в трещине и скальным грунтом присутствует и тонкая пленка влаги. В случае достижения дополнительной влагой водной пленки, на границе льда и воды кристаллизуется новый лед, вследствие чего возрастает криостатическое давление.

Одновременно в поровой зоне вокруг трещины образуется отрицательное давление из-за переноса воды к трещине. Величина криовсасывания при сегрегации влаги достигает нескольких мегапаскалей. Данный градиент давления обуславливает дополнительный рост клиньев льда, что по существу является несколько иным механизмом дальнейшего разрастания трещин.

Подобно конгелифракции возможности сегрегационного льдовыделения по глубине тоже лимитированы, но в гораздо меньшей степени. Ограничивающими факторами при этом являются существование градиента температуры и величины механических напряжений ниже 200 КПа. Данный процесс, скорее всего, связан с тем, что силы нормальных напряжений эффективно противодействуют усилиям, обусловленным льдовыделением. Глубина, в которой достигаются данные пределы нормальных напряжений, может колебаться в соответствии с пространственной ориентацией и размером трещин, геологическими осо-

бенностями массива, общей топографией местности.

Как отмечено выше, воздействие сегрегационного льдовыделения существенно глубже, чем мощности деятельной толщи, задействованного в ежегодных циклах промерзания и оттаивания. Ледяные клинья, жилы и линзы, образованные сегрегационным льдовыделением, растут значительно глубже деятельной толщи, но растянуты на столетия, а не только во время ежегодных циклов, как в случае конгелифракции. Расширение сегрегационного льда в долгосрочной перспективе может приводить к эффектам рычагов, выраженность которых обусловлена структурой скального грунта (рис. 2).

Судя по рис. 2, глубоко проникая под поверхность горного склона, сегрегационный лед вызывает разрастание трещин за пределы реального диапазона льдовыделения. Оно проявляется в форме развития «усталости» пород, нередко визуально просматриваемой на поверхности склонов наподобие того, что происходит при термомеханических процессах.

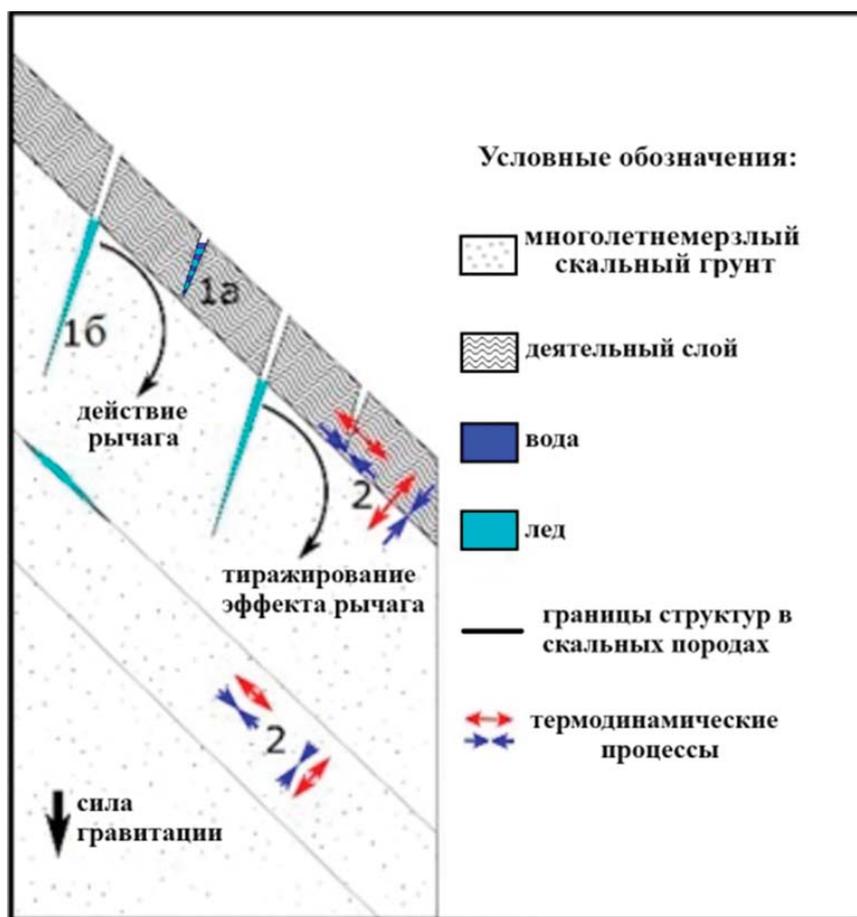


Рис. 2. Схема расширения сегрегационного льда и формирования эффекта «усталости» пород

В деградации многолетнемерзлых грунтов КБР велика роль процесса инфильтрации воды. В зависимости от гидропроводности массивов горных склонов инфильтрация функционирует в разных временных и пространственных масштабах. Применительно к временному масштабу инфильтрация воды выступает в качестве как долгосрочного, так и краткосрочного фактора. В качестве краткосрочного фактора процесс выступает как инициатор возникновения поверхностных сдвигов. Так, в периоды интенсивных дождей из-за достижения экстремального пика гидростатического давления назревают условия для возникновения некритичных локальных селей, камнепадов, оползней, которые нередко остаются вне поля зрения заинтересованных учреждений.

В долгосрочной же перспективе повторяющиеся циклы гидростатического давления будут обуславливать прогрессирующую инфильтрацию воды, что прослеживается на рис. 1. При этом каждый полный цикл сопровождается дебитом кристаллической воды, в результате чего еще больше разрастается система субкритичных трещин по нарастающей, повышая потенциальную нестабильность склонов [8].

В микроструктурном масштабе объемы инфильтрации воды в сравнительно влагодефицитных участках южной позиции на порядок больше из-за повышенной влагоемкости пород, с чем связан значительный уровень напряжения и риски снижения их устойчивости. Иначе формируется гидростатическое давление в зоне высокогорных склонов, поскольку поверхность их грунтов в период снеготаяния покрыта подснежным слоем льда, в силу чего весной фактически блокируется инфильтрация воды.

Однако из-за сезонного роста термических параметров атмосферы и последующего таяния упомянутого слоя льда, осадки в жидкой фазе с некоторым запозданием, но беспрепятственно проникают в грунт. В результате интенсивной инфильтрации возникает мощное гидростатическое давление, которое грозит последовательным разрушением межтрещинных перемычек [9]. Следовательно, резко снижается сопротивление гравитационному сдвигу трещиноватых грунтов. В случае разрушения перемычек, вода с высокой емкостью тепла переносит тепловую энергию в систему глубинных трещин, что вызывает таяние в последних трещинного льда, но уже в более глубоких горных массивах.

Время назревания критичных стадий деградации мерзлотных склонов будет зависеть от характера дальнейшего изменения климата, прочности твердых перемычек пород, состояния ползучего льда в трещинах, частоты и продолжительности аномально жаркой погоды в горах и выпадения ливневых осадков, а также внешнего воздействия эндогенных факторов.

Заключение

Деградация горной криосферы Кабардино-Балкарии обусловлена ее нарастающей гидротермической изменчивостью. В качестве основного дестабилизирующего мерзлотные склоны республики фактора выступает процесс конгелификации.

Новыми условиями нарастания угроз расширения масштабов деградации и интенсификации опасных природных явлений станут: дальнейшее углубление подошвы деятельного слоя в криосфере, ускоренное необратимое разрастание трещин, возникновение потенциальной плоскости разрушения мерзлотных толщ; вовлечение в зону морозного выветривания высотных поясов, ранее находившихся в условиях стабильных отрицательных температур.

Фактически в регионе сформировался и замкнулся порочный круг цепных положительных обратных связей (процессов) в криосистеме, что может стать началом нового витка крупномасштабного сдвига мерзлотных массивов и экспоненциального роста числа кризисных очагов в горах.

В средне- и долгосрочной перспективе авторы прогнозируют существенное повышение тесноты связи термогидрологических условий функционирования криогенной зоны с тремя переменными природными процессами: динамикой уровней криостатического давления, инфильтрации воды и гидростатического давления.

В условиях нарастающих угроз, обусловленных тенденцией многовекторного снижения устойчивости скальных грунтов, необходимы дополнительные комплексные геокриологические исследования, налаживание постоянного мониторинга мерзлотных систем, направленные на выявление всей совокупности современных природных процессов, обуславливающих новый виток снижения стабильности горных склонов. Только на основе достоверной информации можно выработать адекватный уровень угроз компенсационный механизм обеспечения безопасной жизнедеятельности в горных районах.

Представленные материалы могут представлять интерес для хозяйствующих субъектов, занимающихся инженерной защитой селитебных ландшафтов и новым проектированием объектов инфраструктуры в горах Кабардино-Балкарии.

Список литературы

1. Калов Р.О., Эльмурзаев Р.С. Факторы повышения рисков стихийной гравитационной миграции каменных глетчеров на северных склонах Центрального Кавказа // *Экология урбанизированных территорий. Серия: Науки о Земле и смежные экологические науки*. 2023. № 3. С. 11–18.
2. Калов Р.О., Эльмурзаев Р.С. Горная криосфера как особо чувствительная географическая среда к изменениям климата // *Проблемы региональной экологии. Серия: Науки о Земле и смежные экологические науки*. 2023. № 5. С. 59–65.
3. Конищев Н.В. Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // *Криосфера Земли*. 2011. С. 15–18.
4. Северский И.В. К проблеме мониторинга изменений оледенения целостных ледниковых систем // *Вопросы географии и геоэкологии*. 2011. № 2. С. 12–18.
5. 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.
6. Аджиев А.Х., Шевченко А.В., Кондратьева Н.В., Юрченко Н.В. Деграляция оледенения Большого Кавказа под воздействием климатических изменений // *Успехи современного естествознания*. 2022. № 6. С. 27–34.
7. Горбунов А.П., Железняк М.Н., Северский Э.В. Роль криогенеза в селеобразовании // *Вопросы географии и геоэкологии*. 2017. № 3. С. 83–90.
8. Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х. Катастрофические явления последних десятилетий, связанные с деграцией ледников и мерзлоты в горах // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2023. Т. 87, № 7. С. 1065–1078. DOI: 10.31857/S2587556623070051.
9. Докукин М.Д., Савернюк Е.А., Черноморец С.С. Обвальные процессы в высокогорной зоне Кавказа в XXI веке // *Природа*. 2015. № 7 (1199). С. 52–62.