

УДК 551(345.1+506.9):624.139.2

КАСКАДНОЕ ВЛИЯНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ
ИЗМЕНЕНИЙ НА ПРОЦЕССЫ В КРИОЛИТОСФЕРЕ
И ЗАВИСИМОЕ ОТ НИХ СОСТОЯНИЕ
ПРОМЫШЛЕННОЙ И СОЦИАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

А. Н. ГОРДИЕНКО *

*Федеральный исследовательский центр “Кольский научный центр РАН”,
Апатиты, Мурманская область, Россия*

В настоящем кратком исследовании сформировано комплексное представление о влиянии глобальных климатических изменений на процессы в криолитосфере. При этом уделено внимание исходным и зависимым явлениям и процессам, к которым в работе отнесены солнечная активность, деградация многолетней (вечной) мерзлоты, расшатывание составляющих инфраструктуру зданий и сооружений. С учетом выстроенных по каскадному сценарию конкретных экстремальных событий обозначен фактор уязвимости промышленной и социальной инфраструктуры, расположенной на территориях, подверженных воздействию экзогенных геокриологических процессов. Оригинальность данного материала определяется комплексным представлением о последовательной взаимной связи экзогенных событий в природе и техносфере, являющейся средой возникновения и развития чрезвычайной ситуации природно-техногенного характера. Основным выводом данного исследования является доказанное утверждение о необходимости формирования объективного представления о климатических процессах в рамках комплексной прогностической оценки состояния социальной и промышленной инфраструктуры как непереносимое условие обеспечения устойчивого состояния заданной территории.

<https://doi.org/10.46991/PYSUC.2026.60.2.239>

Keywords: climate, cryolithosphere, cryolithozone, cascade processes, emergencies, sustainable state, industrial infrastructure.

Введение. Оценка устойчивости объектов социальной и производственной инфраструктуры, деэвакуирование рисков наступления чрезвычайных ситуаций (ЧС) природно-техногенного характера, минимизация возможных последствий таких ЧС являются основными мероприятиями по защите населения и поддержанию безопасности жизнедеятельности на территориях, подверженных воздействию экзогенных геокриологических процессов. Глобальные природные катастрофы (в которых преобладают природные

* E-mail: an_gordienko@pgi.ru

причины), происходящие на поверхности континентов, в прилегающих к ним слоях атмосферы, связаны с развитием таких опасных явлений, как оползни, сели и др., в общей проблеме безопасности они рассматриваются в категории дестабилизирующих факторов, создающих угрозы устойчивому развитию. При этом деградация многолетнемерзлых пород (ММП), почв, лесов и водных ресурсов, изменения климата и погодные аномалии на фоне эволюции негативных глобальных процессов, происходящих в природной, техногенной и социальной сферах, составляют их основные факторы [1].

Формирование объективного комплексного представления о влиянии глобальных климатических изменений на процессы в криолитосфере в этом контексте становится наиважнейшим при экстраполярной оценке зависимости от них состояния объектов промышленной и социальной инфраструктуры. В этой работе природные и техногенные явления и события методически выстраиваются по каскаду – от проявлений солнечной активности до риска возникновения ЧС природно-техногенного характера.

На стадии оценки воздействия процессов в криолитосфере на объекты промышленной и социальной инфраструктуры, расположенной на территориях, подверженных воздействию экзогенных геокриологических процессов, вырисовывается фактор уязвимости этих объектов, а среда воздействия климатических изменений, метеорологических процессов на процессы в криолитосфере, несомненно, квалифицируется как среда возникновения и развития ЧС. При этом предотвращение ЧС, вызванных процессами деградации многолетней (вечной) мерзлоты, представляется весьма условным. Оно направлено, прежде всего, на минимизацию последствий, то есть минимизацию возможного экономического ущерба – прогноз состояния ММП в местах строительства объектов инфраструктуры является составляющим проектирования зданий, сооружений трубопроводов, социальных и иных объектов хозяйственной деятельности в целом. Учет в инфраструктурных инженерных решениях динамики состояния ММП, прогнозирование и дезавуирование разрушительных процессов в криолитозоне может дать экономический эффект, соразмерный стоимости объектов инфраструктуры со всем их инженерным обеспечением и наполнением.

Учитывая названный экономический фактор, влияние глобальных климатических изменений на процессы в криолитосфере в данном исследовании является объектом особого внимания. В рамках обзора всего каскада природных и техногенных событий и явлений – от солнечной активности до состояния социальной и промышленной инфраструктуры – климатические процессы и явления акцентируются, этот блок выделяется в отдельное обсуждение и обуславливает ценность такого подхода для обеспечения устойчивого состояния заданной территории.

Проблема изменений в климатической системе носит глобальный характер. В современный период изменения климата оценка его современного состояния и возможных будущих изменений является актуальной и важной научной и практической проблемой [2]. Изменения климата очевидно могут оказывать значительное влияние на условия жизни и хозяйственную деятельность населения в разных районах земного шара [3].

Материалы и методы. Данное исследование базируется на принципе и утверждении, что методологической основой прогнозирования служит теория последовательного развития, раскрывающая суть основных причинно-следственных связей, составляющих каскад процессов и явлений. Представляется возможным найти меру влияния отдельных факторов и условий на общую тенденцию развития. Это, в свою очередь, позволяет представить совокупность отдельных объектов каскада как динамическую систему, поведение которой определяется последовательным взаимодействием различных явлений, и тем самым позволить с определенной степенью вероятности предвидеть опасные события.

По сути, в рамках настоящего исследования, осуществлен поиск инструмента совершенствования механизмов прогнозирования ЧС (каскадный сценарий с акцентом на климатические и метеорологические факторы), реагирования, в котором будут мероприятия по стабилизации оказывающихся в зоне риска объектов социальной и производственной инфраструктуры.

Материалами для исследования послужили опубликованные труды отечественных и зарубежных авторов. Метод исследования содержит концептуальный анализ, инструменты обобщения, группировки и композиции блоков аналитической информации.

Материалы и методы. Данное исследование базируется на принципе и утверждении, что методологической основой прогнозирования служит теория последовательного развития, раскрывающая суть основных причинно-следственных связей, составляющих каскад процессов и явлений. Представляется возможным найти меру влияния отдельных факторов и условий на общую тенденцию развития. Это, в свою очередь, позволяет представить совокупность отдельных объектов каскада как динамическую систему, поведение которой определяется последовательным взаимодействием различных явлений, и тем самым позволить с определенной степенью вероятности предвидеть опасные события.

По сути, в рамках настоящего исследования, осуществлен поиск инструмента совершенствования механизмов прогнозирования ЧС (каскадный сценарий с акцентом на климатические и метеорологические факторы), реагирования, в котором будут мероприятия по стабилизации оказывающихся в зоне риска объектов социальной и производственной инфраструктуры.

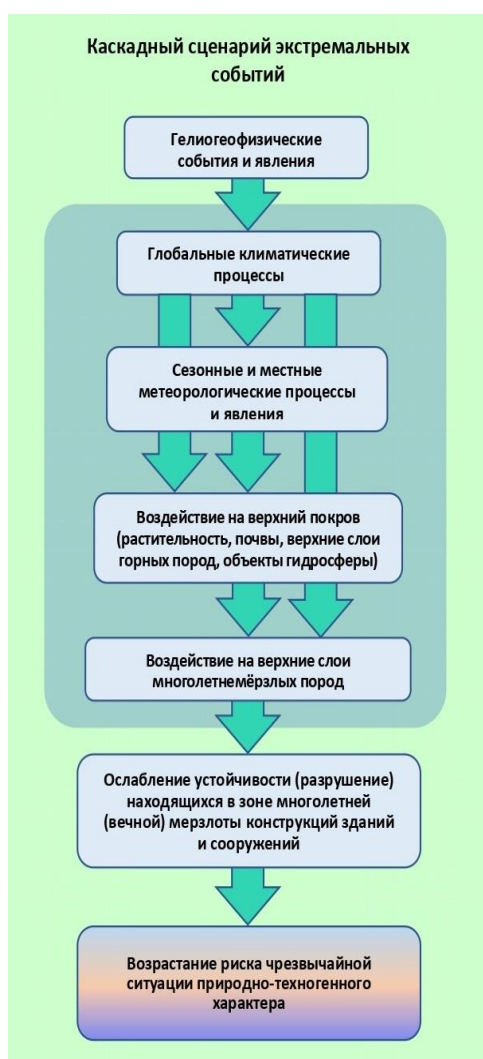
Материалами для исследования послужили опубликованные труды отечественных и зарубежных авторов. Метод исследования содержит концептуальный анализ, инструменты обобщения, группировки и композиции блоков аналитической информации.

Результаты исследований и их обсуждение. Верификация результатов исследования может быть осуществлена путем их практической эмпирической проверки посредством выведения логических следствий из не нуждающихся в проверке утверждений и соотнесения их с выводами данной работы. Также для верификации выводов могут быть применен “принцип свидетелей”, использующий в качестве исходных независимые данные. Каскадные сценарии возникновения и развития ЧС присутствуют в диапазоне любых природных и природно-техногенных экстремальных событий. Для каждого природного

стихийного бедствия или ЧС в техносфере характерно наличие присущих этому бедствию поражающих и неблагоприятных факторов, как правило являющихся импульсом зарождения и развития зависимого стихийного бедствия или ЧС.

Каскадный сценарий взаимозависимых экстремальных событий.

Как уже указывалось, в том числе в работах с участием автора [4], каскадным процессом принято считать процесс, при котором изменение состояния одного элемента безусловно влечет за собой изменение состояния следующего элемента.



Место глобальных климатических процессов, влияющих на процессы в криолитосфере, и зависимое от них состояние промышленной и социальной инфраструктуры.

Протекание в таком каскадном цикле присуще зарождению и развитию событий, вызванных, например, солнечной активностью или атмосферным электростатическим напряжением. В исследуемом случае глобальные климатические процессы позиционируются как подверженные импульсному влиянию глобальных гелиофизических явлений и, в свою очередь, влияющее на процессы в криолитосфере, а через них – на состояние объектов промышленной и социальной инфраструктуры (см. рисунок).

В климатической истории наблюдения за температурой и другими переменными в глобальном масштабе начались в середине XIX в. с наступлением эры инструментальных методов, а с 1950 г. стали доступны более всеобъемлющие и разнообразные ряды наблюдений. Период крайне низкой солнечной активности показательно совпал с самым холодным этапом малого ледникового периода (1300–1850 гг.).

Между тем, большинство специалистов сходится во мнении, что в первой половине XX в. вклад солнечной активности в повышение глобальной температуры был более значительным и, по некоторым оценкам, достигал половины величины в показателе общего потепления [5]. Наблюдаемое же с середины XX в. потепление в подавляющей степени вызвано антропогенными факторами, выбросами парниковых газов. На грани

XX–XXI вв. было принято основные угрозы от природно-техногенных бедствий связывать с глобальным потеплением антропогенной природы. Эта господствующая тогда идея о причинах изменения климатических условий все более вступает в противоречие с новыми научно обоснованными соображениями о природе эволюции климатических условий на Земле [6].

Солнечная активность, наряду с динамичным количеством излучаемой энергии, оказывает влияние на климатические процессы на Земле. Ее средний вклад – по всем частотам вариаций – составляет $K = 17 \pm 5\%$. Однако этот вклад дифференциален в зависимости от временного периода (так для периода голоцена этот показатель составляет величину $\geq 100\%$) [7]. Механизмами этого влияния являются:

1) *изменения общей солнечной светимости (СС)*, определяющей динамику сезонных климатических и метеорологических процессов, снегонакопления и снеготаяния, ледообразования, рост растительного покрова и некоторые другие факторы (хотя общего количества энергии, получаемой Землей от Солнца и изменяющейся циклически с амплитудой около 0,1% за 11-летний цикл, явно недостаточно, чтобы вызвать глобальное изменение климата в сторону потепления, парниковый эффект приводит к удержанию энергии в атмосфере в десятки раз больше, чем изменения СС);

2) *изменение УФ-излучения*: колебания УФ-излучения в течение солнечного цикла значительно сильнее, чем изменения общей светимости (УФ-излучение поглощается в стратосфере, нагревая ее и влияя на формирование и циркуляцию озонового слоя, что, в свою очередь, влияет на динамику атмосферы и на работу погодных систем в нижних слоях);

3) *гипотетическое воздействие космических лучей (эффект Свенсмарка)*: согласно этой гипотезе, во время высокой солнечной активности магнитное поле Солнца сильнее отклоняет галактические космические лучи, способствующие образованию облачности (однако и этот эффект слишком слаб, чтобы играть значительную роль в изменении климата).

Причиной синхронных колебаний являются законы сохранения импульса, которые наблюдаются в геодинамических, гелиофизических и климатических процессах. Таким образом, гармонизация климатических процессов может выявляться на основе репрезентативных наборов гелиогеофизических данных [8, 9].

Динамика изменений глобальной приповерхностной температуры за последние 150 лет была нелинейной. Важной особенностью являлось обусловленное комплексом факторов значительное потепление в первой половине XX в. Среди этих факторов солнечная активность не была основным, но, безусловно, присутствовала наряду с антропогенными. При выведении соотношений между какими-либо климатическими параметрами учитывается дифференциальный характер солнечно-земных связей на разных временных масштабах [10].

Принцип каскада усматривается уже в самом определении экзогенного геологического процесса (ЭГП) как комплекса процессов, идущих на поверхности Земли или в верхних частях земной коры, вызываемых внешней энергией (в основном энергией Солнца) и активизирующих атмосферу,

гидросферу и биосферу, которые в свою очередь воздействуют на литосферу, включая ее криосегмент. При этом наблюдаемые и ожидаемые в ближайшие десятилетия изменения альбедо подстилающей поверхности криолитозоны и тепла из оттаивающих пород до настоящего времени не параметризованы [11].

Опасные ЭГП являются весьма значимым фактором риска возникновения ЧС, в первую очередь в зонах распространения ММП. Непосредственно ЭГП на заселенных и промышленных территориях образуют, так называемые, “медленные” катастрофы. Прогнозирование “медленной” катастрофы на территориях присутствия ММП предполагает набор мероприятий геотехнического мониторинга, обязательно включает сбор в полевых условиях геологической и другой сопутствующей информации, позволяющей заблаговременно получить максимально возможное по объективности представление о месте, времени и мощности процесса изменения в параметрах сопряженного с деградированными ММП или ранее замороженного грунтового массива, способного в ближайшей перспективе утратить свою устойчивость.

В криолитозоне широко развиты залежи подземных льдов, которые при повышении температуры и оттаивании мерзлых толщ определяют значительные деформации поверхности Земли и разрушение наземной инфраструктуры. Области высокотемпературной (выше -2°C) мерзлоты требуют особого внимания – чем больше льда присутствует в мерзлых грунтах, тем выше вероятность тепловых осадок, тем выше риск повреждения или разрушения находящихся на этом участке фундаментов и других конструкций строений или сооружений [12].

Мониторинг функционирования различных по назначению освоенных территорий и расположенных на этих территориях отдельных объектов предполагает такие методы оценки риска возникновения ЧС, когда прогнозируются возможные последствия процессов дестабилизации систем безопасности и жизнедеятельности населения как для заданной территории в целом, так и для отдельных размещенных на ней объектов. Соответственно, обеспечение жизнедеятельности в зоне присутствия ММП требует специальных технологий уменьшения рисков, возникающих из-за сезонных промерзаний и оттаиваний грунтов и изменения зависящей от них несущей способности оснований зданий и сооружений [13].

При необходимости, математический расчет каскадного сценария наиболее эффективен методом стохастического моделирования, учитывающего фактор случайности и неопределенности (особенно важно это для исходного природного события), основанным на представлении цепи исследуемых явлений (событий) в динамике развития с использованием трехпараметрического распределения Вейбулла для задания интенсивностей переходов между критическими состояниями смежных уровней каскада [14].

В данном случае, трехпараметрическое распределение Вейбулла – это удобная гибкая вероятностная модель, позволяющая описать процессы, в которых не предполагаются отказы или изменение вектора протекания процесса, раньше определенного момента времени. Применяемая для прогнозирования процессов по каскадным сценариям стохастическая модель строится с учетом выполнения следующих гипотез:

- о каскаде событий и возможности реализации набора сценариев вследствие инициирующего (гелиогеофизического) события;
- о структуре последовательности событий с ветвлением при переходах на последующие уровни (в совокупности переходов между состояниями системы от первого события до риска возникновения ЧС, представленных вершинами стратифицированного графа) и качественном изменении по мере переходов между элементами, принадлежащими к смежным стратам.

Необходимо оговориться, что при стохастическом методе расчета результат работы такой модели – это вероятность или распределение. Чтобы получить устойчивый результат, нужно проводить очень много симуляций (100 000+), что требует больших вычислительных мощностей.

Климат и его глобальное изменение как драйвер экзогенных процессов в криолитосфере. Глобальное потепление – один из наиболее обсуждаемых факторов в научной литературе, по нему имеются фундаментальные обобщения [15].

Сопоставление климатических показателей показывает ежегодные скачки среднегодовой температуры, по сравнению с предыдущим годом. Так, например, в 2024 г. практически всюду на территории Российской Федерации (Европейской части России (ЕЧР) и Азиатской части России (АЧР)), осредненные по всем федеральным округам аномалии годовые температуры были на 1,21°C и 1,36°C, соответственно, выше климатической нормы (то есть, отклонения от средних за период 1991–2020 гг.) [16, 17]. В 2025 г. на территории Российской Федерации (ЕЧР и АЧР), соответственно, средние годовые температуры были на 1,24°C (1,87°C; 1,00°C) выше нормы. По данным 2025 г. на всей территории России во все сезоны наблюдается потепление. Скорость роста среднегодовой температуры (линейный тренд) составила +0,51°C/10 лет (вклад в общую изменчивость 62%) [18].

Связь между среднегодовой температурой воздуха и среднегодовой температурой горных пород имеет неоднородный характер, разница может составлять $\geq 5^\circ\text{C}$. Температура воздуха всегда выше температуры ММП, что способствует их деградации. К 2030 г. общая площадь вечной мерзлоты может сократиться на 10–12%, а к 2050 г. – на 15–20%, при этом ее граница постепенно сместиться к северо-востоку на 150–200 км, а глубина сезонного протаивания увеличится в среднем на 15–25% [19]. Рост среднегодовых температур приводит к повышению температуры ММП и увеличению глубины сезонного оттаивания.

К неблагоприятным метеорологическим явлениям в представленном каскаде природных явлений относятся те, которые интенсивностью, продолжительностью и временем возникновения способны повлиять на динамику состояния ММП как в сторону протаивания, так и замедления этого процесса. К таким метеоявлениям можно отнести следующие: сильный ливень, очень сильный дождь, очень сильный или продолжительный дождь со снегом, очень сильный мокрый снег, очень сильный снег с дождем, очень сильный снег, сильный мороз, аномально-холодная погода, сильная жара и аномально-жаркая погода.

Естественно, таянию ММП способствуют осадки, имеющие более высокие температуры, при том, что и в 2024 г., и в 2025 г. на территории наибольшего распространения ММП (северо-запад, север и центральная часть Сибири, и север Дальнего Востока) наблюдался избыток осадков (в среднем 106% нормы). При этом в большинстве регионов Сибирского федерального округа выпало 114% годовой нормы – максимальная величина в ряду наблюдений [20, 21]. Что касается снежного покрова, то он оказывает двойственное влияние: с одной стороны, снег отражает солнечную радиацию (альбедо), с другой – является теплоизолятором. Тонкий снег способствует выхолаживанию грунта зимой. Мощный снег (более 40–50 см) сохраняет тепло земли, не давая промерзнуть породам зимой и замедляя их охлаждение, что ведет к деградации мерзлоты.

При этом необходимо учитывать, что определяющие климатические факторы количество солнечной энергии, поступающей на поверхность литосферы и поглощаемое ею, взаимозависимо от широты, облачности в нижней атмосфере и состояния поверхности.

Изменение климата, обогащенное сезонными метеорологическими явлениями, оказывает комплексное и разнонаправленное воздействие на криолитозону – верхний слой земной коры, характеризующийся наличием ММП. В свою очередь криолитосфера оказывает “сопротивление” согревающему воздействию. Более того, в геокриологии описан физический механизм формирования климатического криолитоэффекта как суммарного эффекта обратных климатических связей, обусловленных современной динамикой криолитосферы [11]. При расчетном прогнозировании процессов в криолитосфере надо учитывать эти встречные процессы.

Также изменяется среднегодовая температура горных пород, понижаясь от поверхности слоя протаивания, а затем увеличиваясь из-за потока тепла из недр Земли (в связи с этим за среднегодовую температуру горных пород принимают температуру на глубине нулевых годовых амплитуд). Температура горных пород в целом повышается, если растет температура воздуха, однако в реальности – в меньшей степени из-за метеорологических и иных сопутствующих процессов.

К сопутствующим факторам, в том числе, необходимо отнести наличие и воздействие растительности (мох, лишайник, лес), разрастание которой зависит от природно-климатических и метеорологических условий. Растительный покров играет значительную роль в сохранении мерзлоты – летом он защищает грунт от прогревания, а зимой (в сухом виде) способствует промерзанию, замедляя деградацию ММП. Древесная растительность (деревья, кустарники) летом затеняет почву, способствует снегонакоплению зимой и снегозадержанию весной. Уничтожение этого слоя природными пожарами, антропогенное воздействие в виде нарушения почвенно-растительного покрова (уничтожение этого слоя техникой, снятие дерна, мха или вырубка леса при строительстве дорог, трубопроводов, добыче полезных ископаемых) приводят к резкому увеличению глубины протаивания, что ведет к ускорению деградации ММП.

Такие ЭГП, как оползни, просадки, карстовые провалы, суффозионные процессы, подтопления, разжижения грунтов, приводят к деформации освоенной поверхности, изменению несущей способности грунтов, вызывают перемещения грунтовых масс, что, в свою очередь, приводит к разрушению фундаментов и несущих конструктивных элементов зданий и сооружений. Деформациям подвергаются инженерные сооружения добывающей и транспортной отрасли, вызывается рост аварийности, например, на распределительных центрах и трубопроводах нефтегазового комплекса [22]. При строительстве нефтегазопромыслов и их инфраструктуры возникают проблемы, связанные с оползневыми явлениями, разрывными нарушениями, абразией берега, термокарстами [6]. Значительным деформациям подвержены магистральные трубопроводы с температурой продукта, отличной от температуры вмещающих пород. Около 1000 км пути железных дорог на вечной мерзлоте испытывают осадки и деформации насыпи [23].

Заключение. Климатические факторы, сопутствующие им метеорологические явления, процессы в цепи солнечная активность–атмосфера–литосфера, деградационные процессы в уязвимой для климатического воздействия криолитосфере, состояние несущих и конструктивных элементов находящихся на территориях вечной мерзлоты зданий и сооружений находятся в последовательной зависимости, когда изменение состояния одного элемента безусловно влечет за собой изменение состояния следующего элемента, то есть могут быть выстроены по каскадному принципу, что позволяет получить рассчитываемые математические характеристики комплекса процессов и явлений, прогнозировать опасные последствия этих процессов.

Вышеизложенное является убедительным доказательством необходимости формирования комплексного представления о климатических процессах в рамках прогностической оценки состояния социальной и промышленной инфраструктуры, как непереносимое условие обеспечение устойчивого развития заданной территории. Соответственно, обеспечение жизнедеятельности в зоне присутствия ММП требует специальных технологий для уменьшения рисков, связанных с климатическими факторами и сезонным промерзанием и оттаиванием грунтов и зависимым от этого изменением несущей способности оснований зданий и сооружений.

Поступила 03.06.2026

Получена с рецензии 18.06.2026

Утверждена 28.08.2026

ЛИТЕРАТУРА

1. Лаверов Н.П. Природные и техногенные катастрофы – новые вызовы и угрозы устойчивому развитию. *Право и безопасность* 4 (2010), 16.

2. Севастьянов В.В., Самбуу А.Д., Маргарян В.Г. Современное изменение климата в горных странах (на примере Алтае-Саянской горной страны и Кавказа). *Ученые записки ЕГУ. Геология и география* **59** (2025), 531–542.
<https://doi.org/10.46991/PYSUC.2025.59.2.531>
3. Маргарян В.Г., Ольчев А.В. Пространственная и временная изменчивость температуры воздуха и осадков бассейна р. Дебед. *Ученые записки ЕГУ. Геология и география* **56** (2022), 1–13.
<https://doi.org/10.46991/PYSUC.2022.56.1.001>
4. Гордиенко А.Н., Прус М.Ю. и др. Прогнозирование развития чрезвычайных ситуаций по каскадным сценариям. *Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: Сб. трудов XXII Международной научно-практ. конф. Посвящается 80-летию президента РТУ МИРЭА, акад. РАН, док. физ.-мат. наук, проф. А.С. Сигова. Сочи, 01–10 октября 2025 г.* Москва, Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского... (2025), 65–70.
5. Climate Change, Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Eds.: T.F. Stocker, D. Qin, et al.). Cambridge, United Kingdom, New York, Cambridge University Press (2013).
6. Лаверов Н.П., Дмитриевский А.Н., Богоявленский В.И. Фундаментальные аспекты освоения нефтегазовых ресурсов арктического шельфа России. *Арктика: экология и экономика* **1** (2011), 26–37.
7. Наговицын Ю.А. *Исторические реконструкции солнечной активности и климат Земли.* Пулковская обсерватория РАН, Научные публикации, Санкт-Петербург, 30.08.2018.
8. Berry B.L. Solar System Oscillations and Models of Natural Processes. *Journal of Geodynamics* **41** (2006), 133–139.
<https://doi.org/10.1016/j.jog.2005.08.027>
9. Берри Б.Л. *Периодичность геофизических процессов и ее влияние на развитие литосферы. Эволюция геологических процессов в истории Земли* (ред. Н.П. Лаверов). Москва, Наука (1993), 53–62.
10. Наговицын Ю.А. Солнечная активность и солнечно-земные связи на различных длительных временных шкалах. *Солнечная активность и природа глобальных и региональных климатических изменений: Тезисы докладов, Иркутск, 10–22 июня 2012 г.* Иркутск, Издательский отдел ИСЗФ СО РАН (2012), 20–21.
11. Дзюба А.В. Климатический криолитоэффект. *Вода: химия и экология* **4-6** (2018), 64.
12. Брушков А.В. О зарубежном опыте строительства дорог в криолитозоне. Комплексные технологии в механике и транспортном строительстве: *Сб. статей III межвузовской научно-практической конференции, посв. памяти профессора Г.Н. Гаврилова, Санкт-Петербург, Петергоф, 26 декабря 2024 г.* Санкт-Петербург, Петергоф, Военный институт железнодорожных войск и военных сообщений (2024), 7.
13. Харрис С., Брушков А.В. и др. *Геокриология. Том 1. Характеристики и использование вечной мерзлоты.* (перевод с англ. в 2 т., под ред. А.В. Брушкова). Москва, Берлин, Директ-Медиа (2020), 438.
14. Прус М.Ю., Сериков В.В. и др. Прогнозирование развития чрезвычайных ситуаций по каскадным сценариям. *Потаповские чтения. Сборник материалов X ежегодной Всероссийской научно-практической конференции, посвященной памяти доктора технических наук, профессора Александра Дмитриевича Потапова, Москва, 15–16 мая 2025 года.* Москва, Национальный исследовательский Московский гос. стр. университет (2025), 268–273.
15. Biskaborn B.K., Smith S.L., et al. Permafrost is Warming at a Global Scale. *Nat. Commun.* **10** (2019), 264.
<https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4>
16. IPCC: Technical Summary (Eds.: H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, et al.). IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Cambridge, Cambridge University Press (2019), 755.

17. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 г. Росгидромет (2025).
http://downloads.igce.ru/reports/Doklad_o_klimate_RF_2024_with_cover.pdf
18. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2025 г. Росгидромет (2026).
http://downloads.igce.ru/reports/Doklad_o_klimate_RF_2025_with_cover.pdf
19. Брушков А.В., Васина А.И. и др. Глобальное потепление и состояние вечной мерзлоты в России. *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология* **6** (2024), 6.
<https://doi.org/10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-6-4-11>
20. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2024 году. Минприроды России, Москва (2025).
<https://gosdoklad.mnr.gov.ru/>
21. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2025 году. Минприроды России, Москва (2026).
22. Samsonov R., Lesnykh V., et al. The Climate Change Impact on Thermokarst in West Siberian Territory and Geological Risks in Gas Industry. *Proc. 14th Annual Conf. TIEMS. June 5–8, 2007. Croatia, Split, TIEMS* (2007), 212–218.
23. Дыдышко П.И. Деформации земляного полотна железнодорожного пути и их устранение в условиях вечной мерзлоты. *Криосфера Земли* **21** (2017), 43–57.
[https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-4\(43-57\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-4(43-57))

Ա. Ն. ԳՈՐԴԻՆԵՆԿՈ

ԳԼՈՐԱԼ ԿԼԻՄԱՅԻ ՓՈՓՈԽՈՒԹՅԱՆ ԿԱՍԿԱԴԱՅԻՆ
ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ԿՐԻՈԼԻԹՈՍՖԵՐԱՅԻ ԳՈՐԾՆԹԱՅՆԵՐԻ ԵՎ
ԴՐԱՆՑԻՑ ԿԱԽՎԱԾ ԱՐԴՅՈՒՆԱՐԵՐԱԿԱՆ ԵՎ ՍՈՑԻԱԼԱԿԱՆ
ԵՆԹԱԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐԻ ՎԻՃԱԿԻ ՎՐԱ

Ա մ փ ո փ ու մ

Այս համառոտ ուսումնասիրությունը համապարփակ պատկերացում է տալիս կլիմայի զորքայ փոփոխության ազդեցության մասին կրիոլիթոսֆերայում տեղի ունեցող գործընթացների վրա: Ուշադրություն է դարձվում երկրաբանական և կախված երևույթներին և գործընթացներին, ներառյալ արեգակնային ակտիվությունը, հավերժական սառցակալման քայքայումը և ենթակառուցվածքները կազմող շենքերի ու կառույցների քայքայումը: Հաշվի առնելով կասկադային սցենարով կառուցված կոնկրետ էքստրեմալ երևույթները՝ բացահայտվում է էկզոգեն երկրաբանական գործընթացներին ենթարկված տարածքներում տեղակայված արդյունաբերական և սոցիալական ենթակառուցվածքների խոցելիությունը: Այս նյութի ինքնատիպությունը որոշվում է բնության էկզոգեն երևույթների և տեխնոսֆերայի միջև հետևողական փոխկապակցվածության համապարփակ պատկերացմամբ, որը բնական և մարդածին արտակարգ իրավիճակների առաջացման և զարգացման միջավայր է: Այս ուսումնասիրության հիմնական եզրակացությունը ապացուցված պնդում է կլիմայական գործընթացների օրյեկտիվ ըմբռնում ձևավորելու անհրաժեշտության մասին՝ սոցիալական և արդյունաբերական ենթակառուցվածքների վիճակի համապարփակ կանխատեսողական գնահատման շրջանակներում, որպես տվյալ տարածքի կայուն վիճակի ապահովման էական պայման:

A. N. GORDIENKO

THE CASCADING IMPACT OF GLOBAL CLIMATE CHANGE ON
PROCESSES IN THE CRYOLITHOSPHERE AND THE INDUSTRIAL AND
SOCIAL INFRASTRUCTURE THAT DEPENDS ON THEM

Summary

This brief study provides a comprehensive understanding of the impact of global climate change on processes in the cryolithosphere. At the same time, attention is paid to the initial and dependent phenomena and processes, which include solar activity, the degradation of permafrost, and the loosening of buildings and structures that make up the infrastructure. Taking into account specific extreme events arranged according to a cascade scenario, the vulnerability factor of industrial and social infrastructure located in territories affected by exogenous geocryological processes is indicated. The originality of this material is determined by a comprehensive understanding of the consistent mutual connection of exogenous events in nature and the technosphere, which is the environment for the emergence and development of a natural-technogenic emergency. The main conclusion of this study is the proven statement about the need to form an objective understanding of climate processes as part of a comprehensive predictive assessment of the state of social and industrial infrastructure, as a prerequisite for ensuring the sustainable state of a given territory.