

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Богатова Д.М., Аляутдинов А.Р., Железнова И.В., Кислов А.В., Шишов А.А. — Прогноз развития термоэррозионных процессов в Ямало-Ненецком автономном округе при современных изменениях климата // Арктика и Антарктика. – 2023. – № 4. – С. 9 - 18. DOI: 10.7256/2453-8922.2023.4.69256 EDN: IGQCMY URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=69256

Прогноз развития термоэррозионных процессов в Ямало-Ненецком автономном округе при современных изменениях климата

Богатова Дарья Максимовна

ORCID: 0000-0002-5883-7343

кандидат геолого-минералогических наук

научный сотрудник, Географический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1



✉ aleksyutina@gmail.com

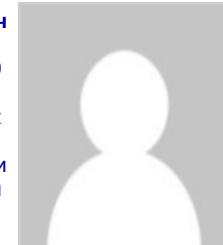
Аляутдинов Али Раисович

ORCID: 0000-0003-3653-3039

кандидат географических наук

с.н.с, МГУ имени М.В. Ломоносова; Географический факультет; Кафедра картографии и геоинформатики

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, оф. ГСП 1



✉ ali_alia@mail.ru

Железнова Ирина Владимировна

ORCID: 0000-0002-4495-8742

кандидат географических наук

с.н.с, МГУ имени М.В. Ломоносова; Географический факультет; Кафедра метеорологии и климатологии

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, оф. ГСП 1



✉ ijeleznova@gmail.com

Кислов Александр Викторович

ORCID: 0000-0003-0092-0643

доктор географических наук

профессор, кафедра Кафедра метеорологии и климатологии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, оф. ГСП-1



✉ avkislov@mail.ru

Шишов Андрей Александрович

студент, кафедра Географический факультет, Кафедра гидрологии суши,Московский государственный

университет имени М.В.Ломоносова

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, оф. ГСП 1

✉ andrej.shishov2015@yandex.ru

[Статья из рубрики "Природные ресурсы Арктики и Антарктики"](#)**DOI:**

10.7256/2453-8922.2023.4.69256

EDN:

IGQCMY

Дата направления статьи в редакцию:

07-12-2023

Дата публикации:

21-12-2023

Аннотация: Изучение экзогенных процессов и их воздействия на природные и антропогенные системы является весьма важным аспектом для освоения арктических территорий. Одним из таких процессов является термоэрзия, широко распространенная в ЯНАО благодаря наличию многолетнемерзлых пород на подавляющей доле его площади. Основные предпосылки для проявления термоэрзационных процессов можно разделить на несколько групп факторов. Во-первых, ключевую роль играет геоморфологическая характеристика территории: длины и уклоны склонов. Во-вторых, литологический и гранулометрический состав пород, а также льдистость и температура, определяющие сопротивление грунта к тепловому и механическому воздействию текущей воды. В-третьих, важным фактором является сумма осадков, в особенности осадки в зимний период и ливневые осадки в летний период. Они способствуют высокой концентрации стока в короткие промежутки времени, что приводит к стремительному разрушению пород и выносу больших объемов рыхлого материала. Наконец, закрепление верхнего слоя грунтов корневой системой можно считать главной причиной, противодействующей развитию термоэрзии. Целью данного исследования является прогностическая оценка рисков развития термоэрзационных процессов в контексте наблюдаемого потепления климата. Для оценки рисков были использованы данные моделирования климата ЯНАО на середину XXI века по ансамблю климатических моделей, входящих в проект CMIP6. Анализ спутниковых снимков Google Earth и сведения о геолого-геоморфологических особенностях региона применены для районирования территории с точки зрения динамики и опасностей проявления термоэрзии. Результатом исследования стало составление карты ЯНАО по категориям рисков, связанных с термоэрзационными процессами. Показано, что в перспективе

нескольких десятилетий более 50% площади региона подвержены интенсификации термоэррозионного разрушения грунтов, что требует тщательного планирования хозяйственного освоения и проектирования защитных сооружений. Сделана попытка оценки воздействия эрозионного и термоэррозионного воздействия на природную среду Ямало-Ненецкого Автономного округа вследствие изменения климата используя рекомендации этой оценки по Приказу Минэкономразвития России от 13.05.2021 N 267. Климатически обусловленные факторы способны серьезным образом усилить причины и негативные последствия развития термоэррозии, при этом локальные проявления должны быть оценены с использованием натурных данных, положенных в основу расчетных методик.

Ключевые слова:

термоэррозия, изменение климата, мерзлые грунты, Арктика, Ямал, Ямало-Ненецкий Автономный Округ, экзогенные процессы, мерзлота, жильный лед, Западная Сибирь

Работа выполнена при поддержке госбюджетной темы НИР лаборатории геоэкологии Севера географического ф-та МГУ, № 121051100167-1 и кафедры метеорологии и климатологии географического ф-та МГУ, № 121051400081-7.

Введение

Эрозионные процессы включают в себя весь комплекс денудационных процессов, связанный с водными потоками. Эрозия – это линейное механическое разрушение грунта и вынос продуктов этого разрушения. В условиях развития многолетнемерзлых пород наиболее опасным процессом является термоэррозия – процесс разрушения мерзлых дисперсных пород за счет одновременного теплового и механического воздействия водных потоков, приводящих к врезанию водного потока в мерзлый массив с образованием борозд, рытвин и промоин [\[8\]](#). В более агрессивной форме этот процесс приводит к формированию оврага и поэтому процесс называют овражной термоэррозией [\[7\]](#).

Основные предпосылки для проявления термоэррозионных процессов можно разделить на несколько групп факторов. Во-первых, ключевую роль играет геоморфологическая характеристика территории, а именно длины и уклоны склонов. Во-вторых, литологический и гранулометрический состав пород, а также их льдистость и температура определяют сопротивление грунта к тепловому и механическому воздействию текущей воды [\[4\]](#). В-третьих, важным фактором является сумма осадков, в особенности осадки в зимний период и ливневые осадки в летний период. Они способствуют высокой концентрации стока в короткие промежутки времени, что приводит к стремительному разрушению пород и выносу больших объемов рыхлого материала [\[2\]](#). Наконец, закрепление верхнего слоя грунтов растениями, в особенности древесными формами (при наличии), можно считать главной причиной, противодействующей развитию термоэррозии.

Термоэррозия приводит к вертикальному расчленению рельефа, нарушению почвенно-растительного покрова и активизации других экзогенных денудационных процессов – оползней, оплывов, солифлюкции, русловой эрозии и других [\[11\]](#). В условиях эксплуатации территорий для добычи полезных ископаемых, сопровождаемых строительством инженерных сооружений, формируются предпосылки для увеличения

темпов развития термоэрозии в связи с сокращением площади растительности, задержанием дополнительных масс снега и увеличением глубины сезонного оттаивания при техногенной нагрузке [12].

В пределах Ямalo-Ненецкого автономного округа термоэрозия проявляется преимущественно в арктической тундре, что связано прежде всего с ландшафтными и климатическими характеристиками данной природной зоны – малым количеством фитомассы и в особенности ее корневой системы, большими запасами воды в снежном покрове и высокими расходами воды при снеготаянии [11]. По мере продвижения на юг, в зоны южной тундры и северной тайги, длина термоэрозионных оврагов и их густота резко уменьшаются, несмотря на увеличение перепадов высот и крутизны склонов.

Для территории ЯНАО по результатам климатического моделирования к середине ХХI века по данным наиболее «жесткого» сценария изменения климата SSP5-8.5 ожидается повышение средних температур в зимний период до 4,5°C и до 2,5°C в летний период, а также увеличение месячных сумм осадков в зимний период на 10% [13]. Увеличение глубины сезонно-talого слоя вкупе с ростом речного стока может приводить к интенсивному росту объемов выноса материала по овражной сети. Деградация многолетнемерзлых пород (ММП) при изменении климата также способствует формированию эрозионных форм в тех районах, где ранее грунты были плотно сцеплены за счет льда-цемента, а также в связи с протаиванием повторно-жильных льдов и развитием овражной термоэрозии по вскрывающимся обнажениям подземного льда в речных и морских береговых уступах.

Территория исследований

Территория исследования расположена в области сплошного распространения многолетнемерзлых пород на севере (полуостров Ямал, Тазовский и Гыдан), в области прерывистого и островного распространения многолетнемерзлых пород в центральной и южной частях ЯНАО [3]. Распространение ММП по площади будет определять развитие термоэрозионных процессов, ввиду их чувствительности к изменению климата. С точки зрения ландшафтов с севера на юг они сменяются от тундровых и лесотундровых до таежных [9].

Методика исследований

Для выявления областей, подверженных термоэрозионным процессам, и для их прогнозирования при изменении климата использовались геологические карты, литературные данные и фоновые материалы. Предгорный и горный районы Уральских гор не рассматривались в данной работе. На первом этапе в программном пакете ArcGIS (ArcMap 10.4.1) производилась привязка карт по уклону поверхности, расчлененности рельефа, геологическому строению и льдистости пород [9]. На следующем этапе проводилось картирование областей распространения термоэрозионных оврагов и повторно-жильных льдов на основе современных космических снимков (Google Earth). Сравнение разновременных снимков позволило уточнить активность и темпы развития термоэрозии на разных участках изучаемой территории. Анализ данных дистанционного зондирования был сопоставлен с привязанными картами для выявления закономерностей протекания термоэрозии при различном наборе геологических и геоморфологических факторов на локальном уровне.

Далее использованы данные современного состояния климата (температуры и осадков

по данным реанализа ERA5 [тут можно добавить ссылку на реанализ и, может быть, еще раз на статью в *Atmosphere*[[УзМ1](#)]) для построения связей между метеорологическими характеристиками и интенсивностью термоэррозионных процессов. Таким образом, выявлены доминирующие факторы, способствующие термоэррозионному разрушению грунтов, на различных участках территории. Следует понимать, что рост летних температур и сумм осадков, безусловно, ускоряет протекание термоэррозии, однако в определенных районах тяжелый гранулометрический состав отложений (суглинки и глины) и малые уклоны поверхностей препятствуют ее возникновению вне зависимости от климатических условий.

Изменения климата, прогнозируемые к 2050 г. по результатам климатического моделирования [\[13\]](#), сопоставлены с имеющимися данными с целью выделения областей, подверженных риску негативного воздействия термоэррозионных процессов в описанной перспективе. Наиболее опасными признаны те районы, где ожидается устойчивое увеличение температур и осадков при геолого-геоморфологической предрасположенности. Средняя степень риска предполагается на участках с неоднозначным сочетанием ландшафтных условий и климатических изменений, в частности, в областях с прерывистым распространением многолетнемерзлых пород. Низкая вероятность развития термоэррозии ассоциируется с районами, мало затронутыми изменениями климата, а также с таликами в долинах крупных рек и других водных объектов.

Результаты и обсуждение

В настоящее время термоэррозионные процессы на территории ЯНАО развиты повсеместно, но с различной интенсивностью (Рис.1). В пределах Ямальского, Гыданского и Тазовского полуостровов при сильном расчленении рельефа овражная термоэррозия широко распространена ввиду наличия повторно-жильных льдов, вытаивание которых провоцирует быстрый рост оврагов. Активность процесса оврагообразования значительно усиливается при локальном взаимодействии с речной эрозией, которая в определенных местах подготавливает высокие обрывистые коренные берега к поперечному воздействию термоэррозии [\[2\]](#). Кроме того, морские абразионные и термоабразионные клифы также подвержены разрушению в связи с термоэррозией по перпендикулярным направлениям. Значительные части Приуральского, Надымского и Шурышкарского районов также отнесены к областям высокого риска, в первую очередь благодаря сильному расчленению рельефа.



Рис. 1. Интенсивность термоэрзационных процессов в ЯНАО к 2050 г.

Важным фактором развития термоэрзационных процессов является техногенное вмешательство в естественные условия. Исследования в районе Бованенковского нефтегазового месторождения показали, что главным условием возникновения и развития овражной термоэрзии является полное или частичное удаление почвенно-растительного покрова, особенно в виде линейных нарушений. На склонах это приводит к перехвату и концентрации рассредоточенного стока при снеготаянии и выпадении дождей, возникновению временных эродирующих потоков, которые за счет теплового и механического воздействия на мерзлые, особенно песчаные, грунты рассекают многолетнемерзлые массивы дисперсных пород на глубину до 8-10 м. В результате возникновения глубоких термоэрзационных врезов прилегающие участки территории теряют устойчивость на расстоянии, превышающем в 3-4 раза глубину вреза. Такие врезы длиной 100-300 м в течение одного-двух месяцев превращаются в типичные V-образные овраги [7]. Таким образом, изменение климата совместно с техногенным фактором может иметь катастрофические последствия для территории вследствие развития термоэрзационных процессов, причем влияние оказывается и на природные ландшафты, и на антропогенную инфраструктуру.

Пуровский, Красноселькупский и южная часть Надымского административных округов расположены в области прерывистого или островного распространения многолетнемерзлых пород, поэтому изменения климата не так сильно будут влиять на термоэрзационные процессы. Однако, поскольку эрозионные врезы являются одним из способов дренирования термокарстовых озер [10], а термоэрзационное разрушение

перемычки между озером и рекой может привести к быстрому (за 1-2 сезона) спуску озера, нельзя не учитывать возможные негативные последствия локального характера.

Анализ космоснимков показал, что почти все участки всех рек в Ямало-Ненецком Автономном округе имеют меандрирующее русло (рис. 2).



Рис. 2. Меандрирующее русло реки Юрибей, Ямал

Такой вид русла свидетельствует о том, что в нем происходит преимущественно боковая эрозия с переотложением аллювия и с ослабленным локальным углублением. Крупные реки местами имеют разветвленное русло, что говорит о том, что аккумуляция в таких частях преобладает над эрозией. Изменение климата, сопровождающееся увеличением осадков и ростом уровня моря будет способствовать дальнейшей аккумуляции материала и замедлению эрозионной деятельности в долинах рек, а также на ровных участках. Районы с наименьшей интенсивностью термоэрэзионных процессов относятся в основном к элементам гидрографической сети территории – рекам Обь, Пур, Таз, Надым и их притокам. Также реки выступают в качестве локального базиса эрозии для временных водотоков, дренирующих их поймы и террасы. Изучение собственно эрозионных и русловых процессов, связанных с транспортом наносов речными потоками, более подробно рассмотрено в других работах [\[5\]](#).

Выводы

Потепление климата Арктики является важнейшим фактором, определяющим динамику различных природных процессов в регионе и требующим комплексных оценок при планировании землепользования, строительства объектов инфраструктуры и развития отдельных отраслей экономики. Термоэрэзия как один из главных и наиболее стремительных процессов рельефообразования может усиливаться многократно при потере устойчивости грунтов, связанной с деградацией мерзлых пород, и может охватывать значительные площади, угрожая безопасности населения и промышленных объектов. В северной части Ямало-Ненецкого автономного округа по сравнению с настоящим временем активизация термоэрэзии может быть обусловлена увеличением температур и оттаиванием грунтов, в южной части – увеличением сумм осадков при уже существующей несплошности многолетнемерзлых пород. Предложенная схема районирования территории по степени рисков является генерализованной и обобщенной, поскольку ее целью было отражение общих особенностей развития данного процесса при наличии обобщенных данных о динамике основных климатических параметров. Более детальная расчетная оценка темпов термоэрэзии на

репрезентативных участках изучаемой территории должна проводиться по данным натурных наблюдений и основанных на этихим данных методоах расчетов.

Библиография

1. Воскресенский К. С. Современные рельефообразующие процессы на равнинах Севера России: диссертация на соискание ученой степени доктора географических наук. Москва, 1999. 360 с.
2. Воскресенский К. С., Совершаев В. А. Роль экзогенных процессов в динамике арктических побережий // Динамика Арктических побережий России. М.: Изд-во МГУ. 1998. С. 35-48.
3. Геокриологическая карта СССР, масштаб 1:2 500 000. К. А. Кондратьева, В. Е. Афанасенк, А. В. Гаврилов и др. Винницкая картографическая фабрика Винница, 1996. 16 с
4. Ершов Э. Д. Кучуков Э. З., Малиновский Д. В. Размываемость мерзлых пород и принципы оценки термоэрзационной опасности территории // Вестн. Моск. ун-та. Сер.4. Геология. 1978. №3. С. 67-76.
5. Иванов В.А., Морейдо В.М., Прокопьева К.Н., Тарбеева А.М., Колесников Р.А., Чалов С.Р. Современные условия гидрологических процессов малых рек юга Ямало-Ненецкого автономного округа // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2023. № 3. С. 52-75. doi: 10.26110/ARCTIC.2023.120.3.004.
6. Косов Б.Ф. Овражная эрозия в зоне тундры // Науч. докл. Высш.школы. Геол.-географ. науки. Москва, 1959. С. 123-131.
7. Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал. Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения, / Под общ. ред. Ю. Б. Баду, Н. А. Гафарова, Е. Е. Подборного, ООО «Газпром Экспо» Москва, том 2, 2013. с. 354-380.
8. Кучуков Э. З., Ершов Э. Д. Термоэрзия в кн. Основы геокриологии Ч.4. Динамическая геокриология, М.: МГУ, 2001, Гл. 10, С. 578-600.
9. Ларин С. И. Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа // Омск: Омская картографическая фабрика. 2004.
10. Санников Г. С. Изменения морфометрических показателей термокарстовых озер западного Ямала как индикатор динамики геологической среды и ее реакции на техногенное воздействие (на примере Бованенковского месторождения): диссертация ... кандидата геолого-минералогических наук: 25.00.08 Институт криосферы Земли СО РАН, Тюмень, 2016. 157 с.
11. Сидорчук А. Ю. Антропогенная овражная эрозия и термоэрзия в западной части центрального Ямала //Геоморфология. 2000. №. 3. С. 95-103.
12. Толманов В.А., Гребенец В.И., Курбатов А.С., Павлунин В.Б. Термоэрзия сильнольдистых грунтов на территории Ямбургского газоконденсатного месторождения // Сборник докладов расширенного заседания Научного Совета по криологии Земли РАН. Т. 1. Москва. 2018. С. 195-201.
13. Kislov A., Alyautdinov A., Baranskaya A., Belova N., Bogatova D., Vikulina M., Zhelezova I., Surkova G. A Spatially Detailed Projection of Environmental Conditions in the Arctic Initiated by Climate Change // Atmosphere. 2023. Т. № 6. <https://doi.org/10.3390/atmos14061003>.

Результаты процедуры рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Предмет исследования являются, по мнению автора, прогноз развития термоэрэзионных процессов в Ямало-Ненецком автономном округе при современных изменениях климата. Однако, на наш взгляд, следовало бы воспользоваться фразой изменения погодно-климатических условий в современный период.

Методология исследования, в статье указаны как использование геологических карты, литературных данных и фоновых материалов. Из анализа статьи можно сделать вывод о использовании методов статистического анализа, анализа космических снимков и материалов дистанционного зондирования, климатологический анализ с построением связей между метеорологическими характеристиками и интенсивностью термоэрэзионных процессов.

Актуальность затронутой темы безусловна и состоит в получении информации о 6 условиях развития многолетнемерзлых пород и наиболее опасным процессом - термоэрэзия - процесс разрушения мерзлых дисперсных пород за счет одновременного теплового и механического воздействия водных потоков, приводящих к врезанию водного потока в мерзлый массив с образованием. Исследования автора статьи помогают понять механизм реакции на изменение погодно-климатических условий и вертикальному расчленению рельефа, нарушению почвенно-растительного покрова и активизации других экзогенных денудационных процессов - оползней, оплывов, солифлюкции, русловой эрозии.

Научная новизна заключается в попытке автора статьи на основе проведенных исследований прогнозная карта территориального развития эрозионных процессов по мере изменения погодно-климатических условий «Интенсивность термоэрэзионных процессов в ЯНАО к 2050 г.». Делается вывод о катастрофических последствиях для территории вследствие развития термоэрэзионных процессов, причем влияние оказывается и на природные ландшафты, и на антропогенную инфраструктуру в следствии изменения климата совместно с техногенным фактором. Это является важным дополнением в развитии геокриологии.

Стиль, структура, содержание стиль изложения результатов достаточно научный. Статья снабжена богатым иллюстративным материалом, отражающим процесс картографического моделирования. Автором предложена генерализованная и обобщенная схема районирования территории по степени рисков при развитии процесса потепления при наличии обобщенных данных о динамике основных климатических параметров. Статья иллюстрирована визуализированными формами карты и фотографии. Однако есть ряд пожеланий, в частности:

Автору статьи следовало бы более подробно остановиться на анализе взаимосвязи изменения среднемесячных температур за теплый и холодный периоды года, при этом учитывая, что повышение температур в теплый сезон более сказывается на эрозии и термоакастовых процессах.

Интересно рассмотреть принципы выделения категории риска связанных с активностью эрозионных процессов и методикой их выделения.

Библиография весьма исчерпывающая для постановки рассматриваемого вопроса, но не содержит ссылки на нормативно-правовые акты и методические рекомендации по геохимическому анализу особенности грунтов.

Апелляция к оппонентам представлена в выявлении проблемы на уровне имеющейся информации, полученной автором в результате анализа.

Выводы, интерес читательской аудитории в выводах есть обобщения, позволившие

применить полученные результаты. Целевая группа потребителей информации в статье не указана.