

УДК 574.9

ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА И ИНТЕНСИВНОСТИ ЭКЗОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ТЕРРИТОРИИ ЯМАЛО-НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА

© 2023 г. А. В. Кислов^{1,2,*}, А. Р. Аляутдинов¹, А. В. Баранская¹, Н. Г. Белова¹, Д. М. Богатова¹,
М. А. Викулина¹, И. В. Железнова¹, Г. В. Суркова¹, Г. Н. Краев^{2,3}

Представлено академиком РАН С.А. Добролюбовым 27.02.2023 г.

Поступило 27.02.2023 г.

После доработки 28.02.2023 г.

Принято к публикации 28.02.2023 г.

Происходящие в Арктике изменения климата выражаются в нарастании экстремальных значений, а также в широком спектре процессов деградации многолетних мерзлых пород, состояние которых, чутко реагирующее на изменения климата, вызывает активизацию быстро протекающих экзогенных процессов. Для прогноза климата ЯНАО на середину 21 века использованы данные 42 моделей проекта CMIP6. Температура января повысится примерно на 3.5°C (на побережье Карского моря даже на 4.5°C), а в июле на ~2.5°C повсеместно. Квантильные 5 и 95% значения вырастут на 3 и 4.5°C в январе и на 2 и 3°C в июле соответственно. Месячные суммы осадков увеличатся в среднем на 10% в январе и останутся неизменными в июле. Квантильные 95% значения увеличатся на 30 и 10% в январе и июле соответственно. Сократится количество дней с заморозками. Потепление в сочетании с ростом осадков приведет к росту активности лавин, водоснежных потоков и селей на восточных склонах Урала, а также скажется на характеристиках оползней, процессов абразии, суффозии, эрозии, термокарста, солифлюкции. К прогнозируемым изменениям природной среды должны быть готовы климатически зависимые отрасли экономики.

Ключевые слова: прогноз климата, прогноз эндогенных процессов в Арктике, CMIP6, прогноз климатических рисков

DOI: 10.31857/S2686739723600388, **EDN:** ULATSW

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе рассмотрены риски, проявляющиеся в широком комплексе природных процессов Арктики. Здесь происходит активизация экзогенных процессов, определяемая наличием мерзлых грунтов, чутко реагирующих на изменения климата. В результате возникают изменения природной среды, к которым должны быть готовы строительный комплекс, транспорт, добывающая промышленность, жилищно-коммунальное хозяйство и др. [1].

Международным стандартом прогнозирования климатических изменений является применение ансамбля данных моделей земной системы (климатических моделей). Нами использован набор из 42 моделей проекта Coupled Model Inter-comparison Project, Phase 6 (CMIP6), для вычисления изменения климата на середину 21 века в рамках сценария SSP5-8.5 [2, 3]. Использование конкретного сценария не уменьшает общности результатов, поскольку климатические различия, отвечающие разным сценариям SSP, начинают значимо проявляться только во второй половине 21 века [3].

Результаты климатического моделирования были использованы в специализированных расчетных схемах, имитирующих связь между климатическими переменными и различными характеристиками окружающей среды, с учетом параметров грунта и растительности. Методология подробно рассмотрена в [4].

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

² Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", Москва, Россия

³ Научный центр изучения Арктики, Салехард, Россия

*E-mail: avkislav@mail.ru

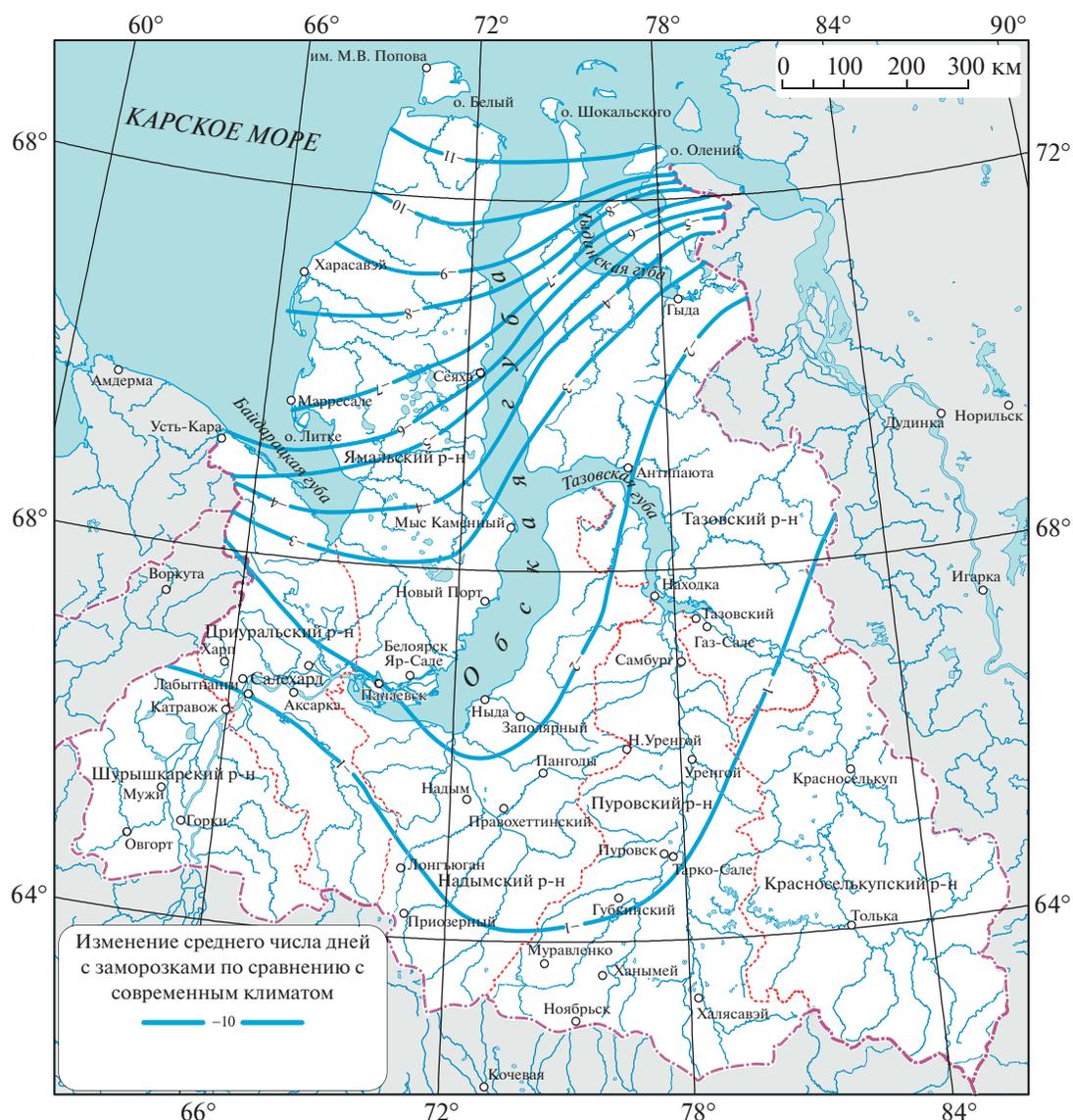


Рис. 1. Изменение среднего числа дней с заморозками в середине XXI века за июнь–август по сравнению с современным климатом.

Исследование выполнено для территории Ямало-Ненецкого автономного округа (далее – ЯНАО, см. рис. 1).

ДАННЫЕ, МЕТОД ПРОГНОЗА, КЛИМАТ ЯНАО В СЕРЕДИНЕ 21 ВЕКА

В работе использован набор данных о месячной температуре и количестве осадков (за период 1966–2018 гг.) со станций, расположенных в пределах ЯНАО. Кроме этого, данные архива SMP6 были интерполированы на сетку $1^\circ \times 1^\circ$ широты и долготы и усреднены между всеми моделями. Расчет прогностических значений осуществлялся

в два этапа. Сначала определялась модельная аномалия между интересующим прогнозным периодом 2035–2065 гг., который соотносится с “серединой 21 века”, и базовым периодом, за 2015–2025 гг. Затем эта модельная величина добавлялась к соответствующему значению современного климата, известному по данным наблюдений или по реанализу ERA5 [5], данные которого были интерполированы на ту же сетку $1^\circ \times 1^\circ$.

Данные моделирования надежно описывают показатели, рассчитываемые по всей выборке, а вот характеристики экстремальности воспроизводятся недостаточно надежно. Чтобы преодолеть последнюю трудность, было выполнено спе-

циальное исследование, в результате которого было получено, что для ЯНАО и окружающих территорий распределение вероятностей температуры и осадков описывается одними и теми же функциями: гауссовым и weibullовским распределением соответственно. Это позволило, оценивая по модельным данным прогностические изменения средних значений, дисперсии, моды и медианы рассчитать новые параметры функций распределения и получить таким путем информацию об изменениях экстремумов.

В результате можно сделать следующие обобщающие выводы. Температура января на территории ЯНАО повысится примерно на 3.5°C (на побережье Карского моря даже на 4.5°C). Потепление в июле составит около 2.5°C повсеместно. Квантильные 5 и 95% значения вырастут на 3 и 4.5°C в январе и на 2 и 3°C в июле соответственно. Месячные суммы осадков увеличатся в среднем на 10% в январе и останутся неизменными в июле. Квантильные 95% значения увеличатся на 30 и 10% в январе и июле соответственно. Таким образом, помимо потепления отмечается рост экстремальности температуры и осадков, преимущественно в холодный период и весной (о чем свидетельствует, в том числе, возрастание стандартного отклонения температуры (σ) на 0.3°C в мае, а в июне — на $0.3\text{--}0.4^{\circ}\text{C}$). Это указывает на то, что продолжится наметившаяся уже тенденция увеличения частоты проникновения мощных североатлантических циклонов далеко на восток, обуславливая возможности резких потеплений, больших сумм осадков и связанных с этим различных природных процессов.

ИЗМЕНЕНИЕ ПОВТОРЯЕМОСТИ ЗАМОРОЗКОВ И ОТТЕПЕЛЕЙ

Прогностическое число дней с заморозками для середины 21 века оценивалось, исходя из средних месячных значений температуры. На стадии изучения современных данных было показано, что между числом дней с заморозками (y) и средней температурой июня-августа ($t, ^{\circ}\text{C}$) существует высокая корреляция (-0.94). Уравнение линейной регрессии: $y = -1.072t + 17.62$. Используя прогностическую температуру, было рассчитано число дней с заморозками в будущем климате (рис. 1). На севере Ямальского и Тазовского районов к середине 21 века повторяемость заморозков в июне-августе уменьшится на одиннадцать дней. К югу значения отклонения от современного режима быстро убывают.

Аналогичное исследование оттепелей показало, что их частота меняется по сравнению с современной незначительно.

ЛАВИНЫ, СЕЛЕВЫЕ И ВОДОСНЕЖНЫЕ ПОТОКИ

Для того, чтобы определить, как изменится уровень лавинного риска для ЯНАО к середине 21 века, повторяемость схода лавин, продолжительность лавиноактивного периода и объем лавин сопоставлены со значениями максимальной декадной высоты снежного покрова, которые, в свою очередь, можно с надлежащей точностью определить, используя зависимость от суммы осадков холодного периода (ноябрь–март) и средней температуры самого холодного месяца [6].

Расчеты показывают, что при прогнозируемых изменениях к 2050 г. (см. выше) значительная часть осадков в горах будет выпадать в твердом виде. Поэтому ожидается возрастание высоты снежного покрова в горах, и лишь на юго-восточной оконечности Урала не произойдет изменений. В связи с этим повторяемость лавин увеличится на протяжении всего хребта на 10%, а в осевых частях Полярного Урала на 20%. Продолжительность лавиноопасного периода к 2050 г. останется в рамках современных значений (200–220 сут) и только на севере произойдет ее увеличение на 5–10%. Повсеместно увеличится (на 5–30%) повторяемость лавин объемом свыше 10000 куб. м. В Приуральском районе такие лавины будут сходить чаще на 25–30 процентов (в среднем 3–4 раза в год). В Шурыкшанском районе их количество увеличится на 15–25% и составит, приблизительно, 1 раз за год.

Увеличение осадков в зимний сезон в сочетании с прогнозируемым ростом частоты резких потеплений (см. выше) станет главной причиной [7, 8] роста частоты схода водоснежных потоков (основного типа селей в пределах Полярного Урала) и роста селевой опасности к 2050 г.

СОЛИФЛЮКЦИЯ И КРИОГЕННЫЕ ОПОЛЗНИ

Медленная солифлюкция в настоящее время проявляется в центральной части полуострова Ямал и Гыдан, северной части Тазовского полуострова. Активно подвержены солифлюкционным процессам берега Байдарацкой и севера Обской губы и в целом Карского моря. Кроме того, в пределах ЯНАО развиты криогенные оползни течения (быстрая солифлюкция). Их число значительно выросло в последние десятилетия [9].

Для учета температурного фактора был проанализирован прирост летних температур к 2050 г. и оценены вариации глубины сезонно-талого слоя (СТС) на основе расчетов по формулам В.А. Куд-

рявцева и С.Н. Булдовича [10] в узлах сетки $1^\circ \times 1^\circ$, которые затем были распространены на весь регион.

Потепление приведет к увеличению глубины СТС на 5–15% в северных и центральных районах полуостровов Ямал и Гыдан, что способствует развитию солифлюкции. В пределах южных частей Ямальского и Тазовского, северных частей Пуровского и Надымского, а также центральной части Уральских административных районов солифлюкция также возможна, но менее распространена. Южнее, в зоне прерывистого и островного развития мерзлых пород, к 2050 г. прогнозируются деградация мерзлоты и сокращение области развития солифлюкции. Границы распространения солифлюкции со скоростями более 1 м/ч совпадают с границами распространения криогенных оползней течения.

Важным фактором криогенных оползней выступает и межгодовая изменчивость термического режима, характеризуемая ростом величины σ августовских температур воздуха (самого теплого месяца на территории ЯНАО). В пределах области развития криогенных оползней максимальный прирост значений $\sigma = 0.3^\circ\text{C}$ к 2050 г. прогнозируется на северо-востоке Гыданского п-ова. В этом регионе прогнозируется также и рост осадков – поэтому здесь участки повышенного риска криогенных оползней несколько расширены.

РИСКИ, СВЯЗАННЫЕ С ПРОЦЕССАМИ ПУЧЕНИЯ

Бугры пучения (положительные формы рельефа с ледяным ядром) образуются в результате неравномерного промерзания и льдообразования грунта.

В 2030 г. наибольшие риски, связанные с пучением, будут, как и в настоящее время, наблюдаться в центральной части ЯНАО. Здесь наиболее высокая концентрация бугров пучения на единицу площади, превышающая 22 на 100 км² [11]. Севернее многолетнемерзлые породы будут меньше подвержены протаиванию, и интенсивность спуска озер в результате деградации мерзлоты и эрозионных процессов не изменится. Таким образом, образование таликов на месте спущенных озер, при промерзании которых развиваются бугры пучения, будет происходить приблизительно с той же интенсивностью. На юге округа, где многолетнемерзлые грунты имеют не сплошное, а прерывистое распространение, пучение будет происходить в границах островов мерзлоты, особенно активно проявляясь в пределах болот и торфяников.

Прогноз (рис. 2 и 3) сделан таким образом, что на карту современных рисков накладывались данные о температуре воздуха в 2030 и 2050 г. за все месяцы, данные о разнице в средней температуре воздуха каждого месяца в 2030 и 2050 г., а также данные о количестве осадков с октября по май. Кроме того, учитывался состав грунтов, поскольку суглинки, глины и торф более подвержены пучинистости, чем пески, галька и гравий.

По критериям опасности риски в центральной части ЯНАО можно было бы оценить как *умеренно опасные* или *опасные*, однако есть еще один фактор, связанный с пучением, который позволяет отнести области их максимальной концентрации к *весьма опасным*. Это недавно открытый феномен формирования на месте бугров пучения воронок газового выброса [12–14].

Развивающееся к середине 21 века потепление происходит ступенчато, оттаивание грунта (с формированием таликов) сменяется промерзанием с образованием бугров. Такой процесс может повторяться много раз за несколько лет, представляя угрозу для сооружений и инфраструктуры. На Западном Ямале ожидаются увеличение количества бугров пучения и повышение рисков, связанных с этим процессом (рис. 3).

Кроме того, ожидается смещение всех границ, показанных на карте 2030 г. (рис. 2), на север. Сдвинется на север и граница прерывистого распространения мерзлых пород. Область наиболее высокого риска пучения также сдвинется на север и охватит уже и северную часть Ямальского и Тазовского районов (рис. 3). На острове Белом и других арктических островах, а также на между-речьях, еще останутся низкотемпературные грунты, которые не будут протаивать с последующим пучинистым промерзанием таликов.

РИСКИ, СВЯЗАННЫЕ С ТЕРМОАБРАЗИЕЙ БЕРЕГОВ КАРСКОГО МОРЯ

Термоабразия состоит из механического разрушения берегов и подводного склона волнами и оттаивания мерзлых пород. При прогнозе к 2050 г. учитывались изменение температуры воздуха, будущее уменьшение площади морских льдов и рост продолжительности безледного периода, которое приведет к изменению волнового, воздействия на берега (количественно оценка осуществлена ретроспективно по методу, описанному в [15]), а также с учетом изменения уровня моря (на 30 см к 2050 г. [3]).

К 2050 г., повышение температуры в летние месяцы пространственно однородно в ЯНАО, однако на берега оно повлияет в разной степени. Особенно быстро начнут отступать берега, сложенные сильнольдистыми породами или отложениями, содержащими пластовые льды: Ураль-

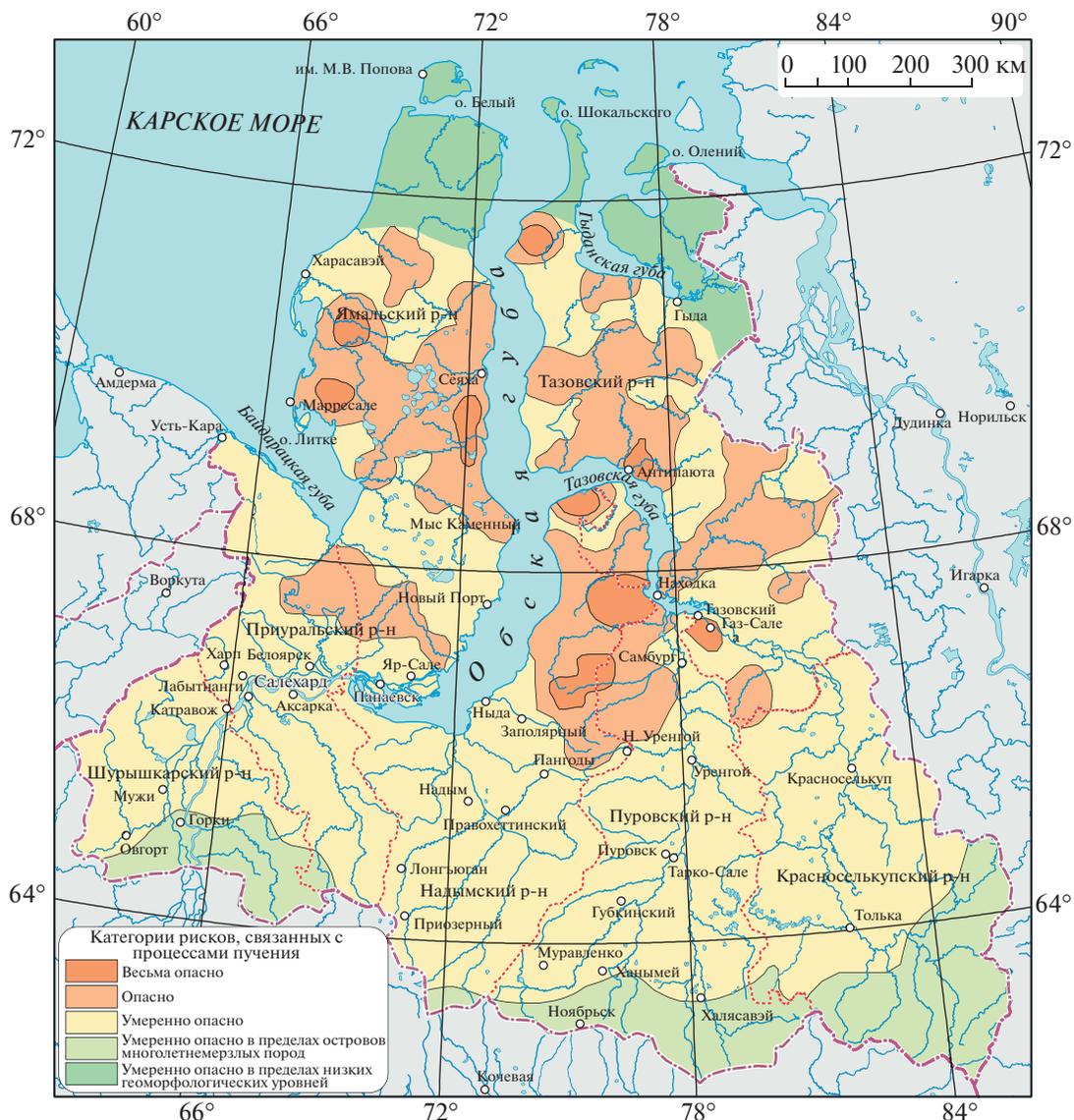


Рис. 2. Прогноз рисков, связанных с процессами пучения на территории ЯНАО на 2030 г.

ский берег Байдарацкой губы, Марре-Сале, западный берег Обской губы. Сегменты берега, относимые к весьма опасным, здесь расширятся. Появятся и новые сегменты с высоким уровнем опасности, например, район западного Ямала к югу от Харасавея.

Помимо прямого воздействия повышения температуры на таяние мерзлых пород береговых уступов, еще более сильным станет косвенное воздействие изменений климата, выражающееся в увеличении энергии волн. Особенно оно затронет северные области ЯНАО, в частности, берега острова Белого, острова Шокальского и др. Появятся и новые участки, относящиеся к весьма опасной категории.

ЭРОЗИОННЫЕ И СУФФОЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ

Потепление климата будет влиять на эрозионные и суффозионные процессы из-за роста осадков и при увеличении глубины СТС. Повышение уровня Карского моря, являющегося базисом эрозии всех впадающих в него рек, учитывалось при оценке эрозионных процессов. Песчаный состав грунтов, расчлененный рельеф и/или уклон поверхности, определяющие напор воды, принимались во внимание при анализе рисков развития суффозии.

Изменение климата будет способствовать активизации термоэрозии и локальному развитию суффозии в области сплошного распространения

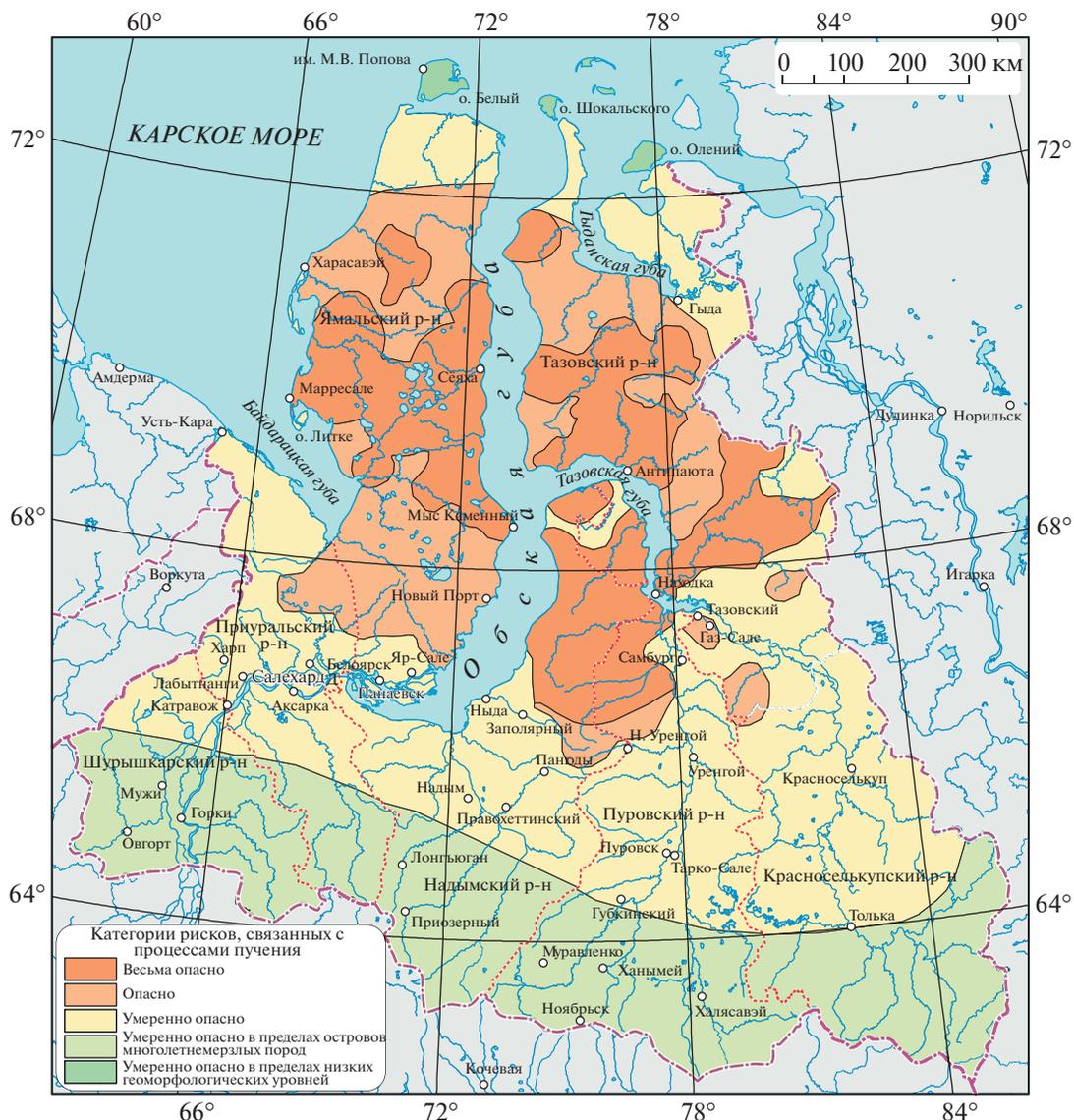


Рис. 3. Прогноз рисков, связанных с процессами пучения на территории ЯНАО на середину XXI века.

многолетнемерзлых пород, т.е. в Ямальском, Гыданском, Уральском и на севере Надымского административных округов, где и в настоящее время ввиду широкого распространения повторно-жильных льдов и сильно расчлененном рельефе преобладает овражная термоэрозия. В центральной и южных областях Пуровского района, как и в восточной части Надымского района и западной части Красноселькупского в связи с более пологим рельефом и, как следствие, заболоченными участками, суффозионные и эрозионные процессы будут маловероятны. В Шурышкарском районе сложенные песчаными грунтами разрезы, а также расчлененный рельеф будут благоприятствовать суффозии.

РИСКИ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ КАРСТА И ТЕРМОКАРСТА

Регионы, подверженные карстовым процессам, встречаются в пределах ЯНАО только на Полярном Урале и Пай-Хое. По результатам анализа выявлено, что под влиянием изменений климата к 2050 г. активность карстовых процессов и связанные с ней риски практически не изменятся по сравнению с сегодняшним состоянием.

Термокарст на территории ЯНАО развит повсеместно. Потепление климата будет влиять на активность термокарстовых процессов ввиду увеличения глубины СТС в сильнольдистых грунтах, характеризующихся осадкой при оттаивании и приводящих к формированию понижений в рельефе, благоприятных для скопления воды и об-

разования термокарстовых западин. При изменении климата в северных районах ЯНАО будут увеличиваться риски развития термокарста, а в южных — еще большее заболачивание территории, однако не чисто термокарстового генезиса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изменения климата в Арктике выражаются в широком спектре процессов деградации многолетних мерзлых пород, вызывая активизацию быстро протекающих экзогенных процессов. Прогнозируемые изменения климата (с учетом роста экстремальности температуры и осадков) сказываются на изменении режима лавин, водоснежных потоков и селей, характеристик оползней, процессов абразии, суффозии, эрозии, термокарста, солифлюкции. Эти процессы распространены на территориях, вовлеченных в хозяйственную деятельность, и создают риски для инфраструктуры. Они могут быть использованы для учета климатических рисков при разработке плана адаптации региона ЯНАО к изменениям климата.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа А.В. Кислова и И.В. Железновой поддержана Московским отделением Русского географического общества, договор № 122, 2022 г. Работа Н.Г. Беловой и Д.М. Богатовой поддержана проектом РНФ 22-17-00097. Работа А.В. Баранской поддержана проектом РНФ 22-77-10031. Работа Г.Н. Краева выполнена по заказу Правительства ЯНАО в рамках подготовки Распоряжения Правительства ЯНАО от 19.12.2022 № 1281-РП “О региональном плане адаптации к изменениям климата”. Работа Г.В. Сурковой поддержана Программой развития Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ им. М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды”. Работа М.А. Викулиной и А.Р. Аляутдинова поддержана исследовательской программой МГУ им. М.В. Ломоносова (№ 121051100164-0).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Общее резюме Третьего оценочного доклада об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. 2022. <https://www.meeteorf.gov.ru/product/climat/>
- Eyring V., Bony S., Meehl G.A., Senior C.A., Stevens B., Stouffer R.J., Taylor K.E.* Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, *Geosci. Model Dev.*, 2016. 9, 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Sixth Assessment Report IPCC <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>
- Эколого-географические последствия глобального потепления климата XXI века на Восточно-Европейской равнине и в Западной Сибири: Монография. Касимов Н.С. и А.В. Кислов, ред. / МАКС Пресс Москва, 2011. 493 с.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Biavati G., Horányi A., Muñoz Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Rozum I., Schepers D., Simmons A., Soci C., Dee D., Thépaut J.-N.* (2018): ERA5 hourly data on single levels from 1959 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (Accessed on “10-Dec-2022”). <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>
- География лавин. Под ред. С.М. Мягкова, Л.А. Канаева, М.: Изд-во МГУ, 1992, 332 с.
- Перов В.Ф.* Селеведение. Учебное пособие. М.: Географический факультет МГУ, 2012. 272 с.
- Рудинская А.И., Беляев Ю.П.* Селевой рельеф Большого и Малого Пайпудынского хребта (Полярный Урал) // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2021. Вып. 8. С. 205–208.
- Ramage J.L., Irrgang A.M., Herzsich U., Morgenstern A., Couture N., Lantuit H.* Terrain controls on the occurrence of coastal retrogressive thaw slumps along the Yukon Coast, Canada // *J. Geophys. Res.: Earth Surf.* 2017. 122. P. 1619–1634.
- Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях. Под ред. Л.С. Гарагули и А.В. Брушкова, М.: Геоинфо, 2016, 512 с.
- Баду Ю.Б., Никитин К.А.* Бугры пучения на площади газоносных структур севера Западной Сибири // Криосфера Земли. 2020. Т. XXIV. № 6. С. 21–32.
- Лейбман М.О., Дворников Ю.А., Стрелецкая И.Д. и др.* Связь формирования воронок газового выброса с эмиссией метана на севере Западной Сибири // Актуальные пробл. нефти и газа. 2018. Т. 4. № 23. С. 1–4.
- Перлова Е.В., Микляева Е.С., Ткачева Е.В. и др.* Ямальский кратер как пример быстроразвивающегося криогенного процесса в условиях потепления климата в Арктике // Вести газ. науки. 2017. № 3 (31). С. 292–297.
- Стрелецкая И.Д., Лейбман М.О., Кизяков А.И. и др.* Подземные льды и их роль в формировании воронок газового выброса на полуострове Ямал // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2017. Т. 1. № 2. С. 91–99.
- Shabanova N., Ogorodov S., Shabanov P., Baranskaya A.* Hydrometeorological forcing of western Russian Arctic coastal dynamics: XX-century history and current state // *Geography, environment, sustainability.* 2018. 11. 1. P. 113–129.

PROJECTION OF CLIMATE CHANGE AND THE INTENSITY OF EXOGENOUS PROCESSES ON THE TERRITORY OF THE YAMALO-NENETS AUTONOMOUS DISTRICT

**Alexander Kislov^{a,#}, Ali Alyautdinov^a, Alisa Baranskaya^a, Nataliya Belova^a, Daria Bogatova^a,
Marina Vikulina^a, Irina Zheleznova^a, Galina Surlova^a, and Gleb Kraev^{b,c}**

^a*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russian Federation*

^b*National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russian Federation*

^c*Scientific Center for the Study of the Arctic, Salekhard, Russian Federation*

[#]*E-mail: avkislov@mail.ru*

Presented by Academician of the RAS S.A. Dobrolyubov February 27, 2023

The climate changes taking place in the Arctic are expressed in the increase in extreme values, as well as in a wide range of processes of degradation of permafrost, the state of which, being sensitive to climate change, causes the activation of rapidly proceeding exogenous processes. To predict the climate of the YaNAO for the middle of the 21st century, data from 42 models of the CMIP6 project were used. The temperature in January will increase by about 3.5 (on the coast of the Kara Sea even by 4.5°C), and in July by ~2.5°C everywhere. The 5 and 95% quantiles will increase by 3 and 4.5°C in January and by 2 and 3°C in July, respectively. Monthly precipitation will increase by an average of 10% in January and remain unchanged in July. The 95% quantile values will increase by 30% and 10% in January and July, respectively. The number of days with frost will be reduced. Warming in combination with an increase in precipitation will lead to an increase in the activity of avalanches, snow flows and mudflows on the eastern slopes of the Urals, as well as on the characteristics of landslides, abrasion, suffusion, erosion, thermokarst, and solifluction. Climate-dependent sectors of the economy should be ready for predictable changes in the natural environment.

Keywords: climate projection, projection of exogenous processes in the Arctic, CMIP6, climate risk projection