

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 551.583

ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТОЛОГИЧЕСКОЙ ГРАНИЦЫ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ В БОЛЬШЕЗЕМЕЛЬСКОЙ ТУНДРЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СЦЕНАРИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

© 2024 г. Г. А. Александров^{1,*}, А. С. Гинзбург¹, М. Л. Гитарский², А. В. Чернокульский^{1,3}, академик РАН В. А. Семенов^{1,3}

Поступило 16.01.2024 г.

После доработки 26.02.2024 г.

Принята к публикации 04.03.2024 г.

Получены прогностические оценки изменения климатологической границы зоны вечной мерзлоты как функции среднегодовой температуры воздуха на территории Большеземельской тундры при различных сценариях развития мировой экономики до середины XXI века. Показано, что наблюдаемое в период с 1950 по 2010 гг. смещение климатологической границы многолетней мерзлоты, определяемой пороговым значением среднегодовой температуры воздуха, в северо-восточном направлении по скорректированным сценарным прогнозам, полученным с помощью климатической модели, продолжится в ближайшие десятилетия при любом сценарии развития мировой экономики и является неизбежным последствием антропогенного влияния на климат. Результаты проведенного исследования важны для оценки перспектив и развития сети долгосрочных наблюдений, которая создаётся для мониторинга состояния многолетней мерзлоты и потоков парниковых газов на территории РФ.

Ключевые слова: изменение климата, многолетняя мерзлота, Большеземельская тундра

DOI: 10.31857/S2686739724060184

ВВЕДЕНИЕ

Арктические и субарктические тундры, расположенные в зоне многолетней мерзлоты, на протяжении нескольких тысячелетий обеспечивали сток углерода благодаря тому, что разложение органического вещества в многолетнемёрзлых почвенных горизонтах происходит крайне медленно. Отступление многолетней мерзлоты и увеличение глубины сезонного оттаивания почв [1] повышает скорость разложения органического вещества почв и, следовательно, ведёт к тому, что территория, занимаемая арктическими и субарктическими тундрами в прошлом веке, может со временем превратиться в источник углерода. По оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата [2], интенсивность положительной обратной связи, возникающей вследствие ожидаемой деградации многолетней

мерзлоты, может достигать 41 ГтС на 1°C (при среднем значении 18 ГтС на 1°C).

В связи с этим, особое значение приобретают исследования, целью которых является получение прогностических оценок изменения климатологических границ распространения многолетней мерзлоты в ближайшие десятилетия. При этом климатологические границы многолетней мерзлоты задаются разными способами [3–5]. Одним из традиционных способов является выделение зон сплошного, прерывистого и островного распространения многолетней мерзлоты на основе среднегодовой температуры воздуха [6–9]. В частности, в тех районах, где многолетняя мерзлота занимает более половины территории, среднегодовая температура воздуха (СГТ) не превышает –2°C [10].

Формирование многолетней мерзлоты обуславливается не только климатическими, но и геоморфологическими и гидрологическими условиями, а также растительным покровом. Поэтому выбор любого отрицательного значения СГТ в качестве границы распространения многолетней мерзлоты можно поставить под сомнение, если не считать выбранное значение

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской Академии наук, Москва, Россия

²Российское энергетическое агентство Минэнерго России, Москва, Россия

³Институт географии Российской Академии наук, Москва, Россия

*E-mail: g.alexandrov@ifaran.ru

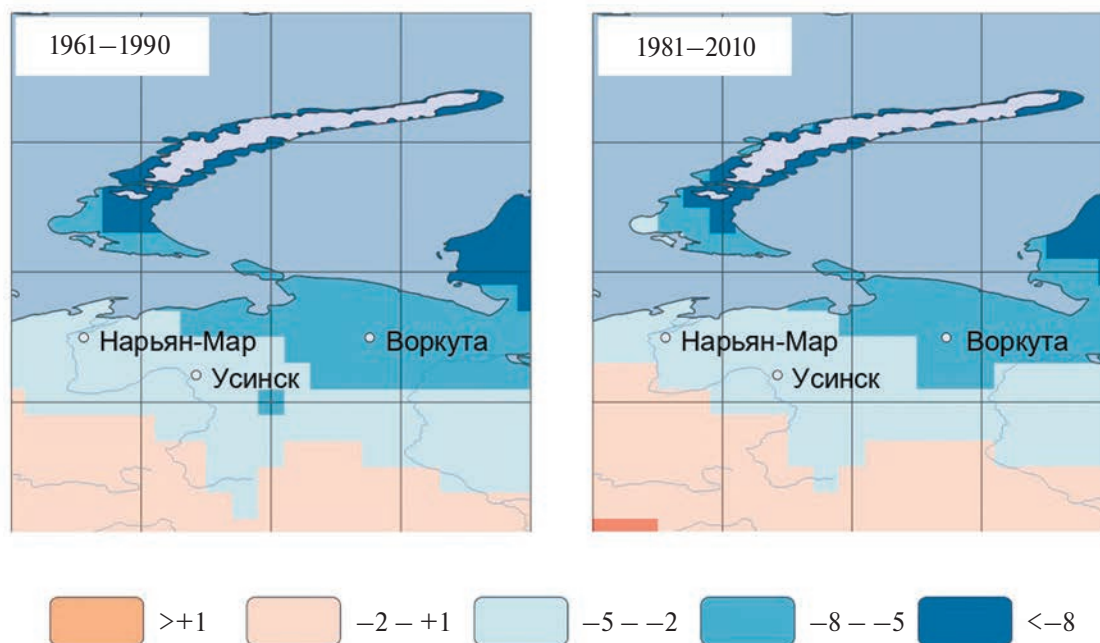


Рис. 1. Среднегодовая температура воздуха в период 1961–1990 гг. и в период 1981–2010 гг. по данным реанализа 20CRv3.

центром некоторого диапазона значений СГТ, ширина которого определяется вариабельностью геоморфологических и гидрологических условий и растительного покрова.

Исследования, необходимые для создания и оценки перспектив системы геокриологического мониторинга [11, 12] и соответствующей сети долгосрочных наблюдений, приобретают особую актуальность в связи с включением фоновго мониторинга состояния многолетней мерзлоты на территории РФ в основные направления государственного регулирования деятельности в области гидрометеорологии [13]. Прогностические оценки изменения климатологических границ распространения многолетней мерзлоты представляются также важными в свете задач Глобальной службы наблюдения за парниковыми газами [14], создаваемой в настоящее время Всемирной метеорологической организацией, которая, в частности, предполагает мониторинг потоков CO_2 с территорий, находящихся в зоне многолетней мерзлоты.

При отступании многолетней мерзлоты стоки углерода могут превратиться в его источники, в связи с этим часть точек наблюдений представляется целесообразным разместить в зоне климатологического перехода от условий, в целом благоприятных для сохранения многолетней

мерзлоты, к условиям, исключающим её сохранение в не очень отдалённой перспективе. На европейской части России распространение многолетней мерзлоты ограничивается Большеземельской тундрой, для территории которой в данном исследовании впервые получены прогностические оценки смещения климатологической зоны многолетней мерзлоты при различных сценариях развития мировой экономики.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В данном исследовании граница климатологической зоны многолетней мерзлоты определена как изолиния, соответствующая значению СГТ равному -2°C . Как видно из рис. 1, данная изолиния смещается в северо-восточном направлении. Для экстраполяции наблюдаемого смещения на период 2031–2060 гг. применялся метод, основанный на корректировке модельных прогностических оценок с использованием данных за современный период [9]: наблюдаемые тенденции изменения СГТ в узлах координатной сетки экстраполировались на период 2031–2060 гг. с помощью корректировочной модели:

$$y = 0.5478x - 0.0579 \quad (1)$$

где y — прогностическая оценка среднего значения аномалии СГТ в период 2031–2060 гг.

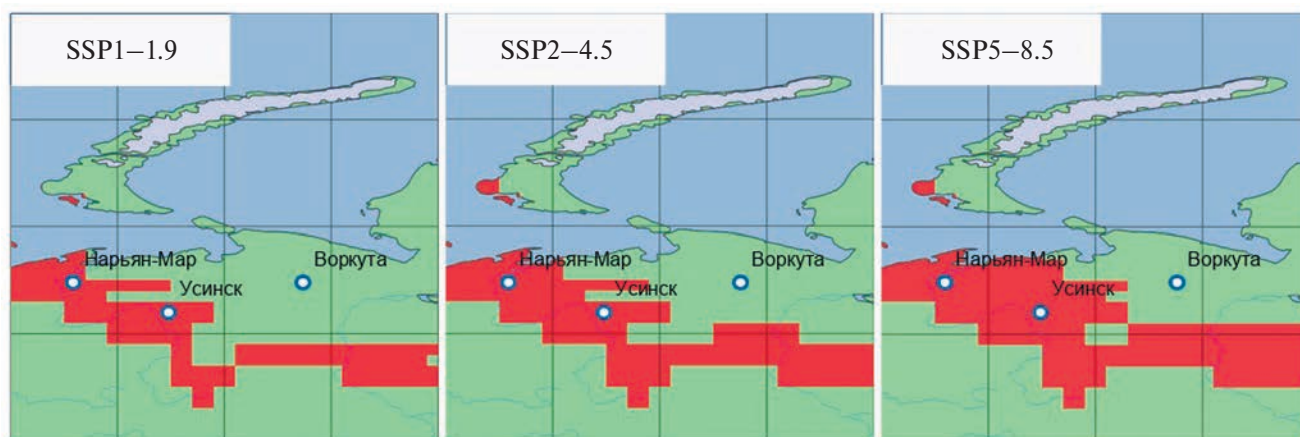


Рис. 2. Зона климатического перехода (выделена красным цветом) от среднегодовой температуры воздуха ниже -2°C в период 1981–2010 гг. к среднегодовой температуре воздуха выше -2°C в период 2031–2060 гг. по данным расчётов с моделью CanESM5 при различных сценариях развития мировой экономики.

относительно периода 1981–2010 гг. в некотором узле координатной сетки, x — среднее значение аномалии СГТ в период 2031–2060 гг. относительно периода 1981–2010 гг. в данном узле координатной сетки согласно численным экспериментам с моделью CanESM5 [15], демонстрирующей наиболее высокую чувствительность к росту концентрации CO_2 в атмосфере.

Коэффициенты корректировочной модели минимизируют среднеквадратичное отклонение получаемых с её помощью оценок медианы 30-летних скользящих средних аномалий СГТ относительно периода 1981–2010 гг. в узлах географической сетки, расположенных между 45-м и 65-м меридианом и между 58-й и 68-й параллелью (μ_{30}), в период 1950–2010 гг. от значений медианы 30-летних скользящих средних аномалий СГТ относительно периода 1981–2010 гг. ($\mu_{30,\text{obs}}$), вычисленных по данным реанализа 20CRv3 [16]. Значения медианы 30-летних скользящих средних аномалий СГТ относительно периода 1981–2010 гг., вычисленные по данным численных экспериментов с моделью CanESM5, ($\mu_{30,\text{mod}}$), выступают в роли предиктора наблюдаемой аномалии СГТ в i -й 30-летний период (т. е. в период, начинающийся в $(1949+i)$ году и заканчивающийся в $(1978+i)$ году):

$$\mu_{30,i} = 0.5478\mu_{30,\text{mod},i} - 0.0579 \quad (2)$$

где i — номер 30-летнего периода, начинающегося в $(1949+i)$ году и заканчивающегося в $(1978+i)$ году, $\mu_{30,i}$ — прогностическая оценка μ_{30} в i -й 30-летний период, $\mu_{30,\text{mod},i}$ — значение $\mu_{30,\text{mod}}$ в i -й 30-летний период, μ_{30} — медиана 30-летних скользящих средних аномалий

СГТ относительно периода 1981–2010 гг. в узлах географической сетки, расположенных между 45-м и 65-м меридианом и между 58-й и 68-й параллелью.

Выбор CanESM5 для экстраполяции данных реанализа связан с её способностью воспроизводить данные реанализа в период 1950–2010 гг. Используемая в работе корректировочная модель в значительной степени нивелирует различия между климатическими моделями, связанные с чувствительностью к CO_2 , так как чувствительность корректировочной модели к CO_2 , по сути дела, определяется данными реанализа. В связи с этим полученные прогностические оценки изменений климатологической границы зоны многолетней мерзлоты могут считаться мало зависящими от выбора климатической модели, которая используется для расчёта предикторов наблюдаемых значений μ_{30} .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Корректировочная модель воспроизводит значения μ_{30} , вычисленные из данных реанализа, с высоким коэффициентом детерминации ($R^2 = 0.9117$). Следовательно, в линейном приближении можно предположить, что в период 2031–2060 гг. величина μ_{30} превысит 1°C (табл. 1).

Повышение СГТ даже на 1°C уже может привести к переходу через -2°C в тех районах Большеземельской тундры, где она была выше -3°C в период 1981–2010 гг. На рис. 2 показаны районы, где можно ожидать переход СГТ через -2°C в период 2031–2060 гг. при прогностических

оценках изменения СГТ для сценария SSP2-4.5, соответствующего современным тенденциям изменения выбросов углекислого газа в атмосферу, а также для “супер-зелёного” (SSP1-1.9) и для “супер-углеродного” (SSP5-8.5) сценария развития мировой экономики [17].

Сценарий SSP5-8.5 предполагает, что мировая экономика будет бурно развиваться, используя ископаемое топливо в качестве основного источника энергии и поддерживая энергоёмкий образ жизни. Этот сценарий рассматривается как крайне нежелательный, так как его реализация переложит все проблемы, связанные с глобальным изменением окружающей среды и климата, на плечи следующих поколений. Поэтому прогностические оценки смещения климатологической границы многолетней мерзлоты, соответствующие этому сценарию представляют интерес с точки зрения теоретически возможного масштаба деградации многолетней мерзлоты. Они показывают, что освобождение северо-восточной части Большеземельской тундры от многолетней мерзлоты в течение следующих трёх десятилетий можно считать маловероятным.

Сценарий SSP1-1.9 предполагает, что главным приоритетом развития мировой экономики является не её бурный рост, а достижение целей устойчивого развития и, в частности, достаточно быстрый переход от использования ископаемого топлива к использованию возобновляемых источников энергии. Так как быстрое сокращение глобальных выбросов углекислого газа представляется маловероятным, прогностические оценки смещения климатологической границы многолетней мерзлоты, соответствующие сценарию SSP1-1.9, характеризуют те изменения климата, которые в течение следующих трёх десятилетий невозможно избежать, так как они являются последствием воздействия мировой экономики на климатическую систему, начиная с XIX века, и демонстрируют неизбежность деградации многолетней мерзлоты в южной и западной частях Большеземельской тундры.

Экстраполяция наблюдаемых тенденций роста среднегодовой температуры (СГТ) на 2031–2060 гг. показала, что при любом сценарии развития мировой экономики на территории, по которой проходит автомобильная дорога, соединяющая Нарьян-Мар и Усинск, то есть в зоне транспортной доступности, ожидается переход СГТ через -2°C в период 2031–2060 гг. На этой территории ранее проводились эпизодические полевые исследования по изучению термокарстовых озёр [18] и по изучению температурного режима

торфяных почв [19]. При термокарстовых явлениях сработка органического вещества почвы происходит быстрее, чем при постепенном отступании многолетней мерзлоты [20], но превращение экосистемы из стока углерода в источник, в конечном итоге, связано с запасами органического вещества в многолетнемёрзлых почвенных горизонтах: чем больше эти запасы, тем больше вероятность зафиксировать превращение стока в источник. Поэтому совместный мониторинг состояния многолетней мерзлоты и потоков парниковых газов в экосистемах торфяных болот может существенно улучшить реалистичность моделей цикла углерода, применяемых для оценки количества углекислого газа, которое вернётся в атмосферу в результате отступления многолетней мерзлоты.

ВЫВОДЫ

Совместный мониторинг состояния многолетней мерзлоты и потоков углекислого газа на той части территории Большеземельской тундры, где будет происходить переход среднегодовой температуры воздуха через -2°C , имеет существенное значение для достижения целей Глобальной службы наблюдения за парниковыми газами, создаваемой в настоящее время под эгидой Всемирной метеорологической организации. Полученные нами прогностические оценки изменения среднегодовой температуры воздуха на территории Большеземельской тундры при различных сценариях развития мировой экономики показывают, что на части территории Большеземельской тундры, находящейся в зоне транспортной доступности, переход среднегодовой температуры воздуха через -2°C произойдёт при любом сценарии мирового развития и, возможно, приведёт к превращению этой части территории в источник углерода. Для фундаментального понимания геофизических процессов, протекающих в этой зоне, и их динамического взаимодействия представляется целесообразным проводить долгосрочные наблюдения как в рамках сети мониторинга состояния многолетней мерзлоты, так и в сети наблюдений, создаваемой для мониторинга потоков парниковых газов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят анонимных рецензентов за содержательные замечания, которые существенно помогли улучшить первоначальный вариант статьи.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения “Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учёта данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах” (рег. № 123030300031-6).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы утверждают об отсутствии у них конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев А. А., Гравис А. Г., Губарьков А. А. и др. Деградация мерзлоты: результаты многолетнего геоэкологического мониторинга в западном секторе российской Арктики // Криосфера Земли. 2020. Т. 24, № 2. С. 15–30.
2. Canadell J. G., Monteiro P. M. S., Costa M. H. L. et al. Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks // Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. P. 673–816
<https://doi.org/10.1017/9781009157896.007>
3. Anisimov O., Nelson F. Application of mathematical models to investigate the interaction between the climate and permafrost // Soviet Meteorology and Hydrology. 1990. № 10. P. 8–13.
4. Демченко П. Ф., Величко А. А., Елисеев А. В. и др. Зависимость условий распространения вечной мерзлоты от уровня глобального потепления: сравнение моделей, сценариев и данных палерестроконструкций // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38. № 2. С. 165–174.
5. Peng X., Zhang T., Frauenfeld O. W. et al. Soil freeze depth variability across Eurasia during 1850–2100 // Climatic Change. 2020. V. 158. № 3–4. P. 531–549.
6. Smith M. W., Riseborough D. W. Climate and the limits of permafrost: a zonal analysis // Permafrost Periglac. Process. 2002. V. 13. № 1. P. 1–15.
7. Chadburn S. E., Burke E. J., Cox P. M. et al. An observation-based constraint on permafrost loss as a function of global warming // Nature Climate Change. 2017. V. 7. № 5. P. 340–344.
8. Гаверилова М. К. Современный климат и вечная мерзлота. Новосибирск: Наука, 1981. 121 с.
9. Alexandrov G. A., Ginzburg V. A., Insarov G. E., Romanovskaya A. A. CMIP6 model projections leave no room for permafrost to persist in Western Siberia under the SSP5-8.5 scenario // Climatic Change. 2021. V. 169. № 3–4. P. 42.
10. Кислов А. В. Климатология. М.: Академия, 2011. 224 с.
11. Мельников В. П., Осипов В. И., Брушков А. В. и др. Развитие геоэкологического мониторинга природных и технических объектов в криолитозоне Российской Федерации на основе систем геотехнического мониторинга топливно-энергетического комплекса // Криосфера Земли. 2022. Т. 26. № 4. С. 3–18.
12. Брушков А. В., Дроздов Д. С., Дубровин В. А. и др. Структура и параметры геоэкологического мониторинга // Научный вестник Арктики. 2022. № 12. С. 78–88.
13. Ф3 №297 от 10.07.2023 // Российская газета. 2023, 12 июля. № 9096(8). URL: <https://rg.ru/documents/2023/07/12/document-1689088543383187.html>
14. WMO. Global Greenhouse Gas Watch Programme. URL: <https://wmo.int/activities/global-greenhouse-gas-watch/global-greenhouse-gas-watch-programme>
15. Swart N. C., Cole J. N., Kharin V. V. et al. The Canadian Earth System Model version 5 (CanESM5.0.3) // Geoscientific Model Development. Copernicus GmbH, 2019. V. 12. № 11. P. 4823–4873.
16. Compo G. P., Whitaker J. S., Sardeshmukh P. D. et al. The Twentieth Century Reanalysis Project: The Twentieth Century Reanalysis Project // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2011. V. 137. № 654. P. 1–28.
17. O'Neill B. C., Kriegler E., Riahi K. et al. A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways // Climatic Change. 2014. V. 122. № 3. P. 387–400.
18. Shirokova L., Ivanova I., Manasyrov R. et al. The evolution of the ecosystems of thermokarst lakes of the Bolshezemelskaya tundra in the context of climate change // E3S Web of Conferences. 2019. V. 98. P. 02010.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199802010>
19. Каверин Д. А., Пастухов А. В., Новаковский А. Б. Особенности современного температурного режима почвогрунтов на участке пересечения буржистого торфяника автодорогой на юге Большеземельской тундры // Криосфера Земли. 2020. Т. 24. № 1. С. 23–33.
20. Rodenhizer H., Belshe F., Celis G. et al. Abrupt permafrost thaw accelerates carbon dioxide and methane release at a tussock tundra site // Arctic, Antarctic and Alpine Research. 2022. V. 54. № 1. P. 443–464.

PERMAFROST BOUNDARY CHANGE IN THE BOLSHEZEMELSKAYA TUNDRA UNDER DIFFERENT SCENARIOS OF CLIMATE CHANGE IN THE XXI CENTURY

G. A. Alexandrov^{1,*}, A. S. Ginzburg¹, M. L. Gytarsky², A. V. Chernokulsky^{1,3},
Academician of the RAS V. A. Semenov^{1,3}

¹*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

²*Russian Energy Agency, Moscow, Russian Federation*

³*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

**E-mail: g.alexandrov@ifaran.ru*

Prognostic estimates of changes in the climatological boundary of the permafrost zone as a function of the average annual air temperature on the territory of the Bolshezemelskaya tundra under various scenarios of the development of the world economy until the middle of the XXI century have been obtained. It is shown that the shift of the climatological boundary of permafrost, determined by the threshold value of the average annual air temperature, in the north-eastern direction observed in the period from 1950 to 2010, according to the adjusted scenario forecasts, obtained using a climate model, will continue in the coming decades under any scenario of the development of the world economy and is an inevitable consequence of anthropogenic influence on the climate. The results of the study are important for assessing the prospects and development of a network of long-term observations, which is being created to monitor the state of permafrost and greenhouse gas fluxes in the Russian Federation.

Keywords: climate change, permafrost, Bolshezemelskaya tundra