

УДК 551.581.1

ТЕМПЕРАТУРА ПОЧВЕННЫХ ГОРИЗОНТОВ В ЯМАЛО-НЕНЕЦКОМ АВТНОМНОМ ОКРУГЕ ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗА ERA5 И МОДЕЛЕЙ CMIP6

© 2026 г. Е. Ю. Штоль^{1,*}, Д. Д. Бокучава¹, Г. Н. Краев²

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

²Высшая школа экономики, Москва, Россия

*e-mail: e.u.shtol@gmail.com

Поступила 01.12.2025 г.

После доработки 18.12.2025 г.

Принята к печати 23.03.2026 г.

Актуальность работы обусловлена современными темпами изменения климата Арктического региона и угрозами, связанными с деградацией многолетнемёрзлых пород (ММП). Проведён анализ изменений приземной температуры воздуха (ПТВ) и температуры ММП на территории Ямало-Ненецкого автономного округа в период 1980–2020 гг. с применением станционных данных, термометрических скважин, реанализа ERA5 и климатических моделей CMIP6. Оценка ансамбля моделей CMIP6 проводилась на основе сравнения ПТВ с данными реанализа ERA5 по трём критериям: ошибка среднего значения, ошибка среднеквадратического отклонения и доля точек, в которых знак линейного тренда ПТВ совпадает с трендом, полученным по данным ERA5. По выбранным моделям анализировалось воспроизведение среднемесячной температуры ММП по горизонтам от поверхности до глубины 3 м с использованием в качестве метрик среднеквадратической ошибки (MSE) и индекса соответствия (AI) данных наблюдений и моделей. Показано, что ERA5 качественно воспроизводит в исследуемом регионе характеристику ПТВ (корреляция до 0.95), но имеет ограничения при оценке температуры почвы, где качество воспроизведения снижается по мере увеличения глубины. Реанализ занижает инструментальные значения значений ММП на 1.5–2.5 °С, а также не воспроизводит отдельные экстремумы. Модели CMIP6 демонстрируют значительные колебания качества воспроизведения температурного режима почвы в зависимости от местоположения и почвенного горизонта. Модель GFDL-CM4 выделяется как наиболее надёжная для оценки температуры почвенного профиля в регионе со значениями MSE 1–13, AI 84–98% и значимой корреляцией годового хода температуры ММП от 0.87 до 0.97 на различных почвенных горизонтах по сравнению с данными наблюдений с двух скважин. Работа подчёркивает необходимость комплексного использования данных наблюдений и данных моделей с тщательной оценкой их качества для прогноза влияния климатических изменений на криолитозону и связанные риски для экосистем и инфраструктуры ЯНАО.

Ключевые слова: климатические модели, ЯНАО, воспроизведение данных, многолетнемёрзлые породы, температура поверхности, ERA5, CMIP6

DOI: 10.7868/S2412376526020113

ВВЕДЕНИЕ

В 2024 г. глобальная средняя приземная температура воздуха (ПТВ) достигла самого высокого значения за всю историю инструментальных наблюдений, выйдя на рубеж в 1.5 °С, установленный Парижским соглашением (Bevacqua et al., 2025), при этом потепление в Арктическом регионе идет в 3–4 раза быстрее среднеглобаль-

ного (Rantanen M. et al., 2021). Одно из основных последствий роста температур — деградация многолетнемёрзлых пород (ММП) в полярных регионах, проявляющаяся в сокращении их площади и увеличении глубины залегания (Oppenheimer et al., 2019; Fox-Kemper et al., 2021; van Soest M.A.J. et al., 2025). Эти изменения приводят к опасным экзогенным процессам, связанным с таянием подземных льдов, таким как эрозия, оседание по-

верхности, отступление берегов водоёмов и водотоков, что может иметь разрушительные последствия для инфраструктуры населённых пунктов и промышленных объектов, включая разрушение дорог, нефтепроводов и газопроводов (Баранов, 2023; Местников, 2023). Деграция ММП может также привести к высвобождению запасов углекислого газа (CO_2) и метана (CH_4), что особенно актуально для торфяников вечной мерзлоты, представляющих большой и уязвимый резерв земель, которые могут подвергнуться быстрому оттаиванию в результате роста температур в современный период (Елисеев, 2018; Аржанов и др., 2018; Miner et al., 2022).

В Арктическом регионе один из потенциально значимых источников эмиссии парниковых газов в атмосферу – термокарстовые озёра, образующиеся в результате деграции вечной мерзлоты, способные вызывать резкие и локализованные всплески эмиссии CH_4 , особенно на начальных стадиях их формирования (Краев et al., 2019; Адушкин и др., 2024).

Согласно данным наблюдений, среднегодовая температура в Ямало-Ненецком автономном округе (ЯНАО) имеет устойчивую тенденцию к росту (Доклад НИУ Росгидромета, 2025), что отражает общую тенденцию потепления в Арктике (Семёнов, 2015). Многолетний мониторинг на мерзлотных стационарах свидетельствует о продолжающейся деграции ММП в ЯНАО (Malkova et al., 2022). Недавние исследования показали, что климатические условия на полуострове Ямал уже достигли или превзошли уровень голоценового оптимума, что сказывается на динамике ММП (Мохов и др., 2022).

Кроме этого, для региона характерны мелководные прибрежные зоны и шельф, где возможна миграция CH_4 из подмерзлотных источников и гидратных залежей в водную толщу и далее в атмосферу (Малахова, 2025). Прогнозы указывают на возможное смещение к северу южной границы криолитозоны до широт посёлка Новый Порт (67° с.ш.) на территории ЯНАО к концу XXI в. (Karjalainen et al., 2019).

Исследование изменений климатических характеристик Арктического региона, в том числе в ЯНАО, осложняется недостаточным количеством и качеством данных наблюдений, что приводит к необходимости использования модельных данных и данных реанализов. Современные реанализы обеспечивают полное пространствен-

ное покрытие и качественное воспроизведение глобальных климатических характеристик для второй половины XX века (Hersbach et al., 2020). Тем не менее, в реанализах также могут наблюдаться значительные отклонения из-за неравномерного покрытия данными наблюдений, в частности в Арктике, что требует оценки качества используемых сеточных данных (Bokuchava, Semenov, 2021) с помощью доступных материалов наблюдений, особенно на узко-региональном уровне. В свою очередь, сравнение моделей из ансамбля CMIP6 с реанализами и эмпирическими данными позволяет оценить качество воспроизведения климатических условий за исторический период (Eyring et al., 2016; Sidorova et al., 2023), что служит основанием для использования данных долгосрочных прогнозов для оценки будущих изменений климата.

Анализ изменения среднегодовой температуры воздуха на территории ЯНАО за период 1980–2024 гг. по данным отдельных метеостанций, расположенных на территории ЯНАО, и данным реанализа ERA5, осреднённым для территории в целом, указывает на наличие тенденции к росту ПТВ с 1980-х годов (рис. 1). Температурные ряды данных метеостанций для Салехарда и Надыма демонстрируют аналогичную друг другу динамику, изменяясь от -8°C в 1980-х годах до -2°C в 2020-х годах. ПТВ на станции Тарко-Сале колеблется от -7 до -3°C в тот же временной период. Эти данные подтверждают региональный тренд потепления. В то же время станции Новый Порт и Морресале, расположенные на севере региона, демонстрируют более выраженное потепление, с изменением ПТВ с -12°C в 1980-х годах до -4°C в 2020-х годах, что указывает на значительные климатические изменения на исследуемой территории и подтверждает концепцию усиления потепления при движении на север. Так, тренды для Салехарда, Надыма и Тарко-Сале для исследуемого периода составляют $0.05^\circ\text{C}/\text{год}$, в то время как для Морресале и Новый Порт $-0.07^\circ\text{C}/\text{год}$; эти тренды вполне значимы ($p < 0.05$). Данные ERA5, осреднённые для территории ЯНАО, соответствуют тенденциям изменения ПТВ по данным станционных наблюдений и составляют $0.08^\circ\text{C}/\text{год}$.

В рамках исследования проводится комплексная оценка данных наблюдений, продуктов реанализа и климатических моделей, включающих основные климатические характеристики для района исследований – ПТВ и температуру ММП. Оценка точности моделей общей цирку-

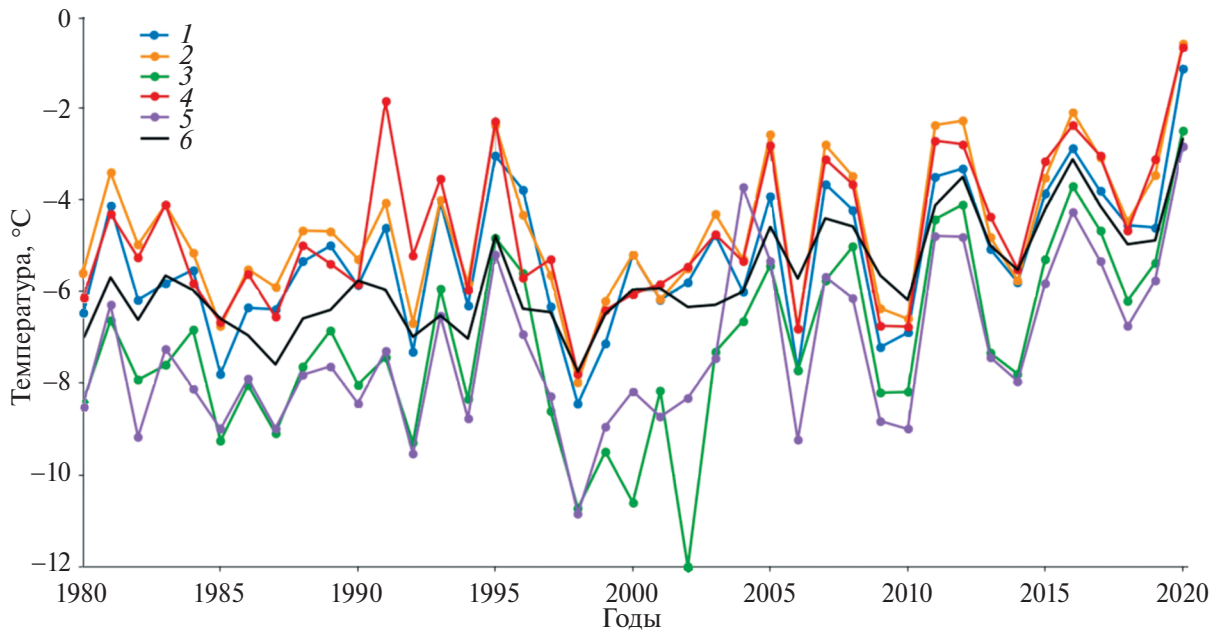


Рис. 1. Изменение среднегодовых значений приземной температуры воздуха по стационарным данным и данным реанализа ERA5, осреднённой для ЯНАО (63° – 75° с.ш., 63° – 85° в.д.) за период 1980–2020 гг. 1 – станция Салехард; 2 – станция Надым; 3 – станция Морресале; 4 – станция Тарко-Сале; 5 – станция Новый Порт; 6 – ERA5

Fig. 1. Mean annual surface air temperature change based on weather station data and ERA5 reanalysis data, averaged for the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug (63° – 75° N, 63° – 85° E) for the period 1980–2020.

1 – Salekhard station; 2 – Nadym station; 3 – Morre-Sale station; 4 – Tarko-Sale station; 5 – Novy Port station; 6 – ERA5

ляции атмосферы и океана (МОЦАО), способных качественно воспроизводить ПТВ на исследуемой территории, выполнялась на основе сопоставления с данными реанализа ERA5. Основная цель исследования – отбор моделей общей циркуляции атмосферы и океана из состава проекта CMIP6, способных качественно воспроизводить ПТВ и температуру ММП на поверхности и различных глубинах с использованием данных термометрических скважин, отражающих изменения температурного режима ММП в регионе.

Во введении представлен аналитический обзор, описывающий проблематику и актуальность исследования, в разделе Данные и методы описаны используемые данные и методика статистической оценки качества модельных данных в сравнении с данными реанализа и данными наблюдений. В результатах представлен анализ изменения климатических характеристик по стационарным данным и реанализу ERA5, проводится оценка качества воспроизведения моделями общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) из ансамбля климатических моделей проекта CMIP6 (Eyring et al., 2016) состояния ММП, которое определяется температурным режимом поверхности и разных почвенных горизонтов.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Данные наблюдений. В рамках исследования применены данные метеорологических станций, включая среднемесячные значения ПТВ и температуры ММП на глубинах до 320 см, полученные с сайта Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД) (Булыгина и др., 2018).

На территории ЯНАО действуют девять метеорологических станций сети Росгидромета, данные которых есть в открытом доступе. На восьми ведётся запись среднемесячных значений температуры воздуха, на девятой станции Халесовая (23656 ; $63^{\circ}23'$ с.ш., $78^{\circ}19'$ в.д.) запись метеорологических данных завершена в 1993 г. Данные о температуре ММП на различных горизонтах для исследуемой территории есть только на станции Тарко-сале (23552 ; $64^{\circ}54'41''$ с.ш., $77^{\circ}46'14''$ в.д.).

Для анализа температур ММП были использованы ежедневные стационарные данные станций Тарко-Сале и Когалым (23748 ; $62^{\circ}11'25''$ с.ш., $74^{\circ}32'12''$ в.д.) на глубине 80 см, которые впослед-

ствии были приведены к среднемесячным значениям ввиду частых пропусков. Станция Когалым находится вблизи границы с ЯНАО, так как в пределах исследуемого региона отсутствуют данные о температуре ММП на глубине 320 см в архиве станций “ВНИИГМИ-МЦД”. Для анализа ПТВ на территории ЯНАО и последующего сравнения с данными реанализа использованы среднемесячные станционные данные – станции Марресале (23032; 69°42'51" с.ш., 66°48'51" в.д.) и Тарко-Сале как наиболее северной и южной точек на территории, где доступны прямые измерения. Также обрабатывались данные наблюдений о температуре ММП со скважин в районе населённых пунктов Надым и Марресале на территории ЯНАО: НАД-11/75 (65°32' с.ш., 72°86' в.д.) и МРС-1/78 (66°81' с.ш., 69°71' в.д.) для периодов 2009–2010 и 2008–2014 гг. соответственно (по данным мониторинга температуры МПП ГИС “Ямал-Арктика”; Malkova et al., 2022). Данные имеют суточное разрешение, множественные пропуски, в связи с чем были представлены среднемесячные значения для каждой из скважин.

Реанализ. Для анализа ПТВ и температуры ММП на территории ЯНАО применён реанализ ERA5 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 2022). ERA5 предоставляет глобальный набор данных атмосферных и океанических переменных с максимальным временным разрешением 1 час и полным пространственным покрытием, имеет сетку с шагом $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, доступен для периода с 1950 г. по настоящее время (Hersbach et al., 2020). В ERA5 температура ММП на различных горизонтах рассчитывается для середины каждого слоя. Более ранние исследования показали, что ERA5 является реанализом, наиболее качественно воспроизводящим температуру ММП среди нескольких доступных продуктов (Li et al., 2020).

В рамках исследования проведён сравнительный анализ климатических характеристик (ПТВ, температура ММП) по данным реанализа ERA5 с данными наблюдений метеостанций Марресале, Тарко-Сале, Когалым. Для исследования выбраны такие уровни почв, которые доступны как в данных реанализа, так и в станционных данных. В исследовании температуры ММП по данным реанализа использованы данные двух уровней – st13 и st14, которые равны значениям глубин 21–100 и 100–289 см соответственно. Для станционных данных были выбраны глубины 80 и 320 см.

На карте (рис. 2) представлено расположение доступных метеостанций и скважин с наложением сетки реанализа ERA5 и данных о среднегодовом значении температуры воздуха на высоте 2 м за 1980–2020 гг. Отмеченные на карте пункты наблюдений демонстрируют пространственное распределение доступных метеостанций и скважин, расположение которых не даёт полного пространственного покрытия. Метеостанции сосредоточены преимущественно в центральной и южной частях ЯНАО. Станция Когалым находится на территории Республики Коми – это ближайшая метеостанция с доступными данными о температуре ММП на глубине 320 см.

Модели CMIP6. Модели из проекта CMIP6, разработанные ведущими мировыми вычислительными институтами, одобренные Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК), представляют собой актуальный инструмент для оценки будущих климатических изменений (Eyring et al., 2016) с учётом мер адаптации и сокращения воздействия на климат. Основная проблема, связанная с воспроизведением характеристик мерзлоты в МОЦАО и реанализах, заключается в точности учёта ландшафтных факторов, таких как снежный покров и почвенно-грунтовые свойства, а также в параметризации уравнений теплообмена на поверхности (Nicolsky et al., 2016). В работе рассматривается ансамбль из 28 моделей, которые имеют одновременно данные о ПТВ и температуре ММП на разных глубинах за исторический период 1980–2014 гг. Воспроизведение температуры ММП возможно только в тех моделях МОЦАО, которые включают блок, описывающий земную поверхность как пространственную сетку, и физические процессы, такие как изменения в толщине слоя снега, который может влиять на температуру почвы (Kirtman et al., 2014).

Методы исследования и оценки качества моделей. Оценка ансамбля каждой из 28 моделей CMIP6 проводилась на основе сравнения ПТВ с данными реанализа ERA5 за период 1980–2014 гг. для территории ЯНАО по трём критериям: ошибка среднего значения ПТВ, ошибка среднеквадратического отклонения и доля точек, в которых знак линейного тренда ПТВ совпадает с трендом, полученным по данным ERA5, по аналогии с исследованием (Sidorova et al., 2023). Температура воздуха – базовый индикатор общего состояния климата, наиболее чувствительный к радиационным воздействиям и влияющий на другие компоненты климатической

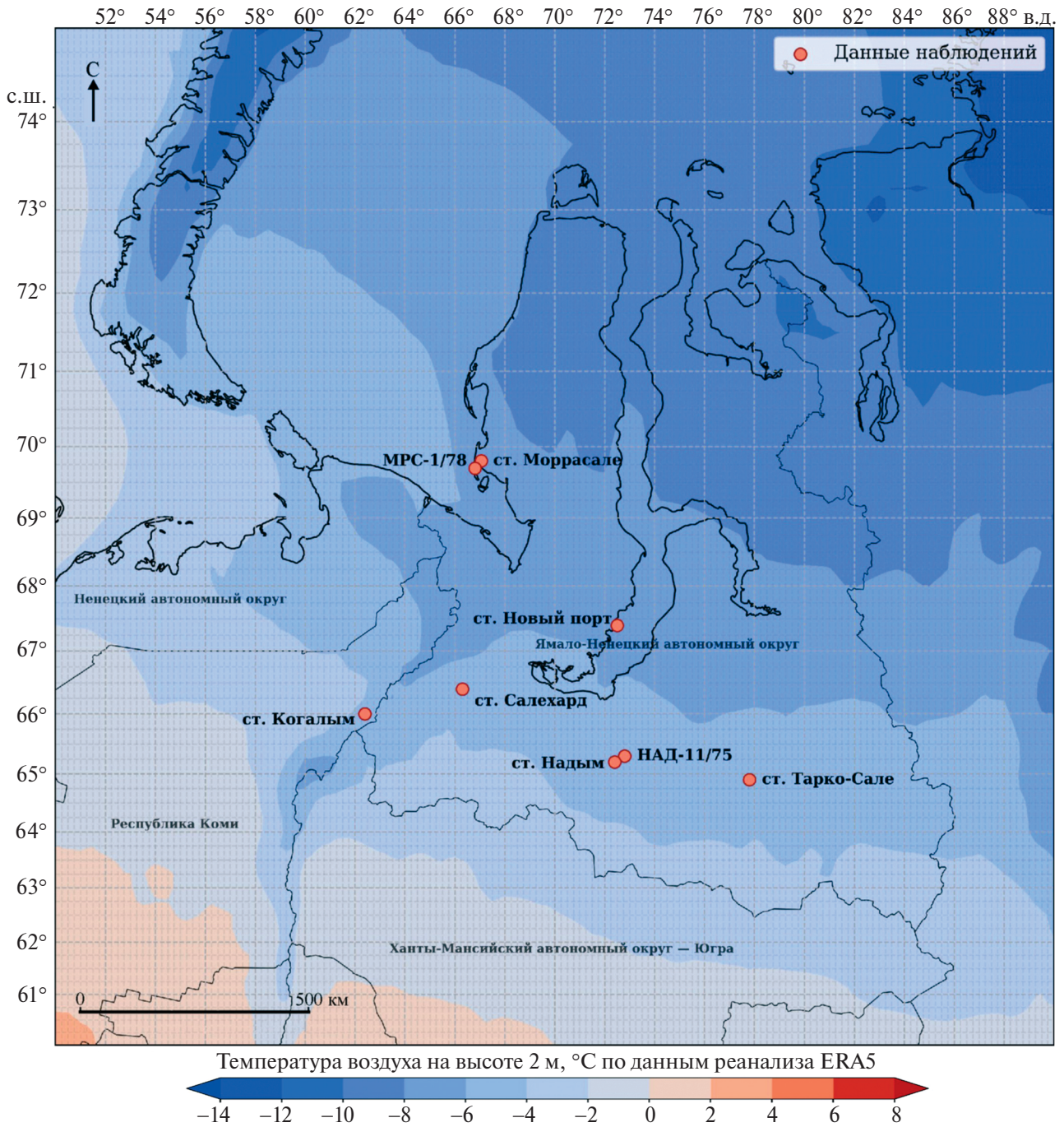


Рис. 2. Среднегодовая температура воздуха на высоте 2 м по данным реанализа ERA5 (1980–2020 гг.) с нанесёнными пунктами инструментальных наблюдений
Fig. 2. Mean annual air temperature at a height of 2 m according to ERA5 reanalysis data (1980–2020) with instrumental observation points marked

системы (Семенов и др., 2012). На основе оценки качества воспроизведения ПТВ по данным моделей производится оценка менее чувствительных или более специфических параметров, в том числе таких как температура почвенных горизонтов.

Пороговые значения для ошибок среднего и среднеквадратического отклонения определялись согласно среднему значению каждого из показателей для всего ряда анализируемых моделей. В результате установлены следующие пороги, отобранные по медианному значению для всего

диапазона среди моделей: ошибка среднего значения ПТВ $\leq 72\%$, ошибка среднеквадратического отклонения $\leq 61\%$. Для критерия совпадения знаков трендов применялся принцип максимального соответствия направления изменений ПТВ, поскольку правильное воспроизведение тенденций играет ключевую роль для оценки пригодности модели. На основании этого пороговое значение доли точек совпадения знака тренда было установлено не ниже 99%. Модели, не удовлетворяющие хотя бы одному из трёх критериев, исключались из дальнейшего анализа. В результате анализа были отобраны пять моделей (TaiESM1, GFDL-CM4, FGOALS-g3, GISS-E2-1-G-CC, BCC-ESM1), которые удовлетворяют перечисленным критериям, а также имеют данные по температуре ММП на всех исследуемых горизонтах.

Далее по выбранным моделям анализировалось воспроизведение среднемесячной температуры ММП по горизонтам от поверхности до глубины 3 м с использованием среднеквадратической ошибки и индекса соответствия в сравнении с данными наблюдений на термометрических скважинах:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Sim_i - Obs_i)^2, \quad (1)$$

где MSE – среднеквадратическая ошибка, Sim_i – значение температуры ММП на заданной глубине по данным МОЦАО, \tilde{y}_i – значение температуры ММП на заданной глубине по данным наблюдений.

Индекс соответствия – это показатель качества модели, который говорит о том, насколько модельные данные отклоняются от среднего значения данных наблюдений. Чем ближе индекс к 100%, тем модель лучше. В данном исследовании критерием качественного соответствия данных принято значение $\geq 85\%$.

$$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Obs_i - Sim_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|Sim_i - Obs_i| + |Obs_i - Obs_i|)^2}, \quad (2)$$

где IA – индекс соответствия, Obs – среднее значение из измеренных.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сравнение реанализа и данных наблюдений. Тенденции по данным реанализа аналогичны значениям стационарных наблюдений и составляют

около 0.05 и 0.07 °C/год для координат станций Морресале и Тарко-Сале соответственно.

Температура воздуха. Сравнение ПТВ по стационарным данным в населённых пунктах Тарко-Сале и Морресале с реанализом ERA5 по координатам данных метеостанций показывает согласованный временной ход (рис. 3). Однако на станции Морресале реанализ не отражает отрицательные экстремумы в начале 2000-х годов, завышая значения до 4 °C. В 1991–1992 гг. реанализ также не отражает положительные экстремумы ПТВ, наблюдаемые на станции Тарко-Сале. Тем не менее значимая ($p < 0.05$) корреляция между стационарными данными и реанализом составляет 0.95 для станции Тарко-Сале и 0.78 для станции Морресале, что указывает на высокую согласованность динамики ПТВ между данными наблюдений и реанализом.

Анализ временного хода ПТВ демонстрирует высокую согласованность между данными реанализа и наблюдениями. Однако выявлены отдельные расхождения, когда реанализ не отражает наиболее выраженные экстремумы, зарегистрированные на станциях в отдельные периоды, что свидетельствует о необходимости проводить оценку качества данных в полярных регионах в зависимости от поставленной задачи. Тем не менее высокая статистически значимая корреляция (до 0.95) между ERA5 и наблюдениями подтверждает надёжность применения данных реанализа для исследований в данном регионе.

Температура ММП. Анализ временных рядов температуры ММП по стационарным данным ВНИИГМИ-МДЦ Когалым и Тарко-але на глубине 80 см и данных реанализа ERA5 на глубине 21–100 см по координатам метеостанций демонстрирует наличие множественных пропусков для станции Когалым на всех глубинах (рис. 4, а–б). В 2010 г. наблюдается резкий рост температуры ММП на станции Когалым, что не воспроизводится данными реанализа, в то время как данные станции Тарко-але и данные реанализа хорошо согласуются друг с другом для всего исследуемого периода (см. рис. 4, а–б). Реанализ ERA5 для всех точек занижает инструментальные значения на 1.5–2.5 °C. Корреляция между данными наблюдений и реанализом для станции Тарко-Сале на глубине 80 см составляет 0.72 и является значимой (см. рис. 4, а). Однако значимые тренды выявлены только для стационарных данных, в то время как данные реанализа для соответствующих станциям координат статистической значимости трендов не демонстрируют (табл. 1).

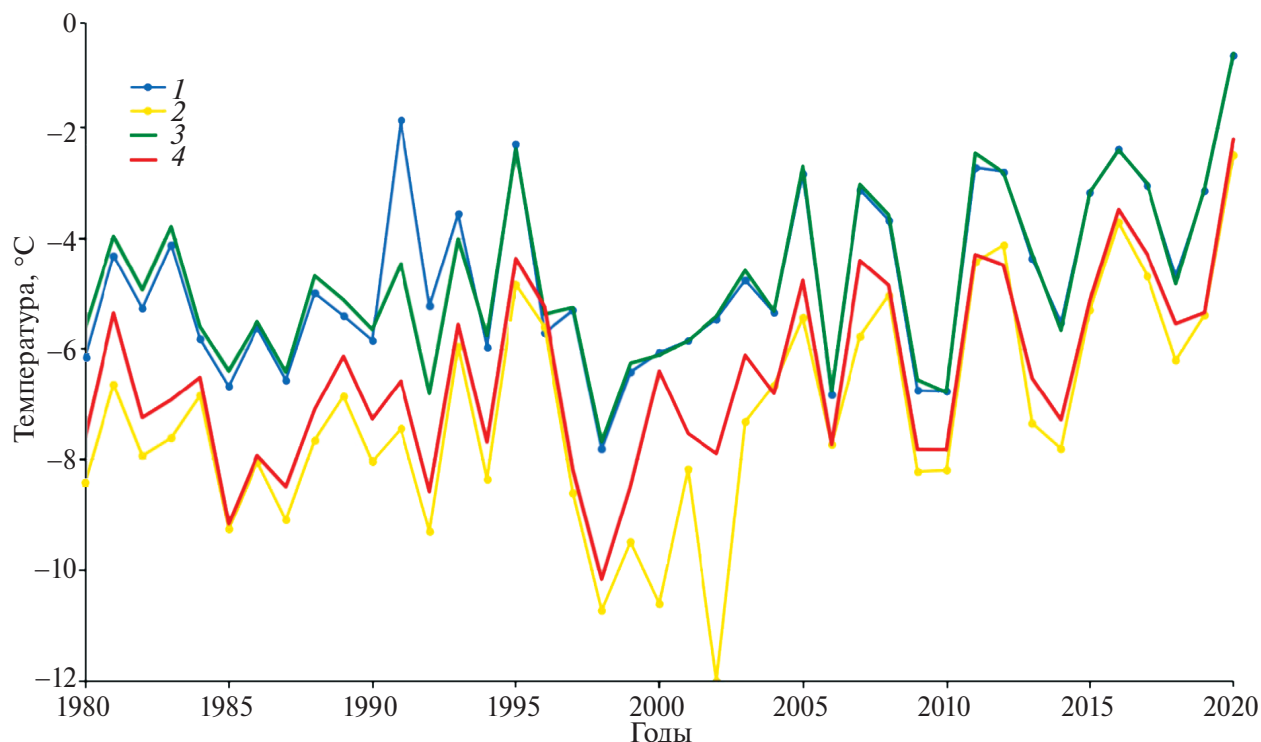


Рис. 3. Изменение ПТВ на метеостанциях и реанализа ERA5 для периода 1980–2020 гг. 1 – ст. Тарко-Сале; 2 – ст. Моррасале; 3 – ERA5 (ст. Тарко-Сале); 4 – ERA5 (ст. Моррасале).
Fig. 3. SAT change at weather stations and according to ERA5 reanalysis data for the period 1980–2020. 1 – station Tarko-Sale; 2 – station Marrasale; 3 – ERA5 (Tarko-Sale station); 4 – ERA5 (Marrasale station).

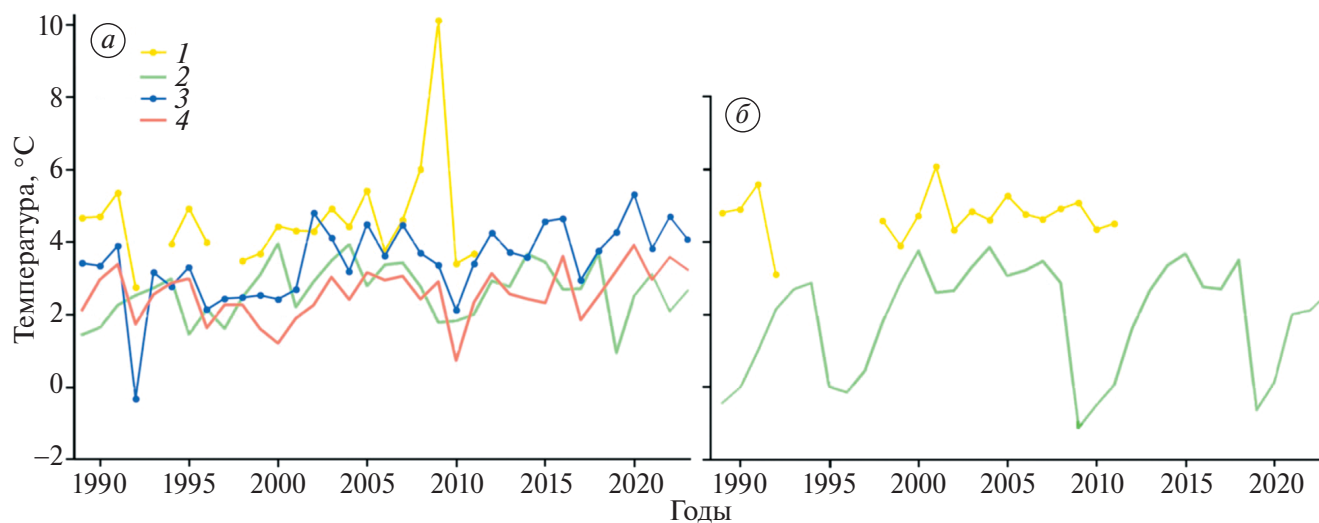


Рис. 4. Сравнение станционных данных температуры ММП на глубине 80 см и данных реанализа ERA5 на глубине 21–100 см на ст. Тарко-Сале (23552; 64°54'41" с.ш., 77°46'14" в.д.) и ст. Когалым (23748; 62°11'25" с.ш., 74°32'12" в.д.) (а) на глубине 320 см и данных реанализа ERA5 на глубине 100–289 см на ст. Когалым за период 1989–2024 гг. (б). 1 – ст. Когалым; 2 – ERA5 (Когалым); 3 – ст. Тарко-Сале; 4 – ERA5 (ст. Тарко-Сале).
Fig. 4. Comparison of station data on soil temperature at a depth of 80 cm and ERA5 reanalysis data at a depth of 21–100 cm at Tarko-Sale station (23552; 64°54'41" N, 77°46'14" E) (a) and Kogalym station (23748; 62°11'25" N, 74°32'12" E) at a depth of 320 cm and ERA5 reanalysis data at a depth of 100–289 cm at Kogalym station for the period 1989–2024 (b). 1 – station Kogalym; 2 – ERA5 (Kogalym station); 3 – station Tarko-Sale; 4 – ERA5 (Tarko-Sale station).

Таблица 1. Значения трендов (°C/год) для периода 1980–2020 гг., на станциях Тарко-Сале и Когалым на глубине 80 см и станции Когалым на глубине 320 см по станционным данным, а также данным реанализа ERA5, рассчитанные для координат станций на глубине 21–100 и 100–289 см соответственно

*Значимые тренды выделены жирным шрифтом

Table 1. Trend values (°C/year) for the period 1980–2020 at Tarko-Sale and Kogalym stations at a depth of 80 cm and Kogalym station at a depth of 320 cm based on station data and ERA5 reanalysis data, calculated for station coordinates at depths of 21–100 cm and 100–289 cm, respectively

*Significant trends are highlighted in bold

	Когалым	Тарко-Сале	ERA5_Когалым	ERA5_Тарко-Сале
80/21–100 см	–0.135 °C/год	0.055 °C/год	0.014 °C/год	0.022 °C/год
320/100–289 см	–0.108 °C/год		0.023 °C/год	

На рис. 4, б показано сравнение температуры ММП по станционным данным ВНИИГМИ-МДЦ и данных реанализа ERA5 в населённом пункте Когалым на глубине 320 см для станции и 100–289 см для реанализа. Зафиксированы пропуски в данных наблюдений в промежутке между 1993–1999 гг. и после 2011 г., что не позволяет провести качественный анализ соответствия данных. Для доступного периода заметно общее согласование тенденций между данными наблюдений и реанализом, однако реанализ не воспроизводит экстремумы, а также занижает инструментальные значения. Анализ данных на станции Когалым на глубине 320 см не показывает значимой корреляции с данными реанализа, тенденции данных реанализа для станции Когалым также не являются значимыми. Такой результат – следствие временной неоднородности эмпирических данных. Кроме этого, данные реанализа – усреднённые по слою (21–100 и 100–289 см), а данные наблюдений зафиксированы на глубинах 80 и 320 см, что также может отражаться на согласованности данных.

Анализ временных рядов температуры ММП для периода 1989–2020 гг. по станционным данным Когалым и Тарко-Сале по сравнению с реанализом ERA5 выявил ряд расхождений, особенно для станции Когалым из-за множественных пропусков в данных наблюдений. Реанализ систематически занижает температуры ММП, не воспроизводит отдельные экстремумы. Значимая корреляция между реанализом и станциями наблюдается только для Тарко-Сале на глубине 80 см, а значимых трендов в данных реанализа нет ни для одной из станций. На глубине 320 см для станции Когалым временные пропуски в данных наблюдений не позволяют провести качественный анализ – имеющегося ряда данных недостаточно для выявления тен-

денций, а статистически значимая корреляция с реанализом отсутствует. Это может объясняться не только временной неоднородностью наблюдений, но и разницей в глубинах измерений для разных типов данных.

ОЦЕНКА МОДЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Согласно проведённому выше анализу, продемонстрировано, что данные ПТВ реанализа ERA5 показывают качественное согласование со станционными данными наблюдений, что делает возможным применение реанализа для дальнейшей оценки модельных данных. Для анализа климатических характеристик произведена оценка качества характеристики ПТВ 28 климатических моделей CMIP6 в сравнении с реанализом ERA5 для ЯНАО. Применялись показатели среднеквадратической ошибки с индексом соответствия (табл. 2) и данные ПТВ за доступный исторический период 1980–2014 гг., где были отобраны пять моделей CMIP6 (TaiESM1, GFDL-CM4, FGOALS-g3, GISS-E2-1-G-CC, BCC-ESM1).

Представленные результаты (см. табл. 2) оценки соответствия пяти климатических моделей показывают, что ошибки воспроизведения средних значений находятся в диапазоне 51–68%, ошибки среднеквадратического отклонения – 49–65%, это ниже средних значений показателей количественной оценки модельных данных. При этом все модели показывают 100%-ное совпадение знака тренда с данными ERA5, что свидетельствует о корректном соответствии тренда изменений ПТВ. Остальные модели из ансамбля, не вошедшие в таблицу, имели более высокие ошибки относительно среднего значения показателей ошибок среднего и среднеквадратического отклонения и мень-

Таблица 2. Показатели количественной оценки климатических моделей CMIP6 по сравнению с данными ПТВ реанализа ERA5 для периода 1980–2014 гг., осреднённых для территории ЯНАО

Table 2. Indicators of quantitative assessment of CMIP6 climate models compared with ERA5 reanalysis STV data for the period 1980–2014, averaged for the territory of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug

Модели CMIP6	Ошибка среднего, %	Ошибка среднеквадратического отклонения, %	Совпадение знака тренда, %
FGOALS-g3	51	65	100
BCC-ESM1	61	51	100
GISS-E2-1-G-CC	62	60	100
GFDL-CM4	68	49	100
TaiESM1	68	50	100

шую долю совпадения трендов, что не позволило удовлетворить установленным критериям отбора и включить их в последующий анализ с использованием характеристики температуры ММП.

Воспроизводимость хода температуры многолетнемерзлых пород по глубинам в отобранных моделях CMIP6. Ввиду того, что данные реанализа ERA5 по температуре ММП на глубинах показали низкую согласованность с данными метеостанций, а данные станционных наблюдений имеют очень ограниченный охват и множественные пропуски – в рамках анализа, оценка данных МОЦАО произведена по данным наблюдений со скважин MPC-1/78 и НАД-11/7 (рис. 5) по среднемесячной температуре ММП по горизонтам на поверхности (0 м) и на глубинах 2 и 3 м по критериям: среднеквадратическая ошибка и индекс соответствия (табл. 3–4) для периода 2008–2014 гг. для MPC-1/78 и 2009–2010 гг. для НАД-11/7.

Данные температуры ММП на глубинах от 0 до 10 м по данным двух скважин: НАД-11/75 (65°32' с.ш., 72°86' в.д.), MPC-1/78 (66°81' с.ш., 69°71' в.д.) имеют существенные различия (см. рис. 5). На всех почвенных горизонтах у скважины MPC-1/78 все сезоны температура на несколько градусов ниже, по сравнению с данными НАД-11/75. Среднегодовая температура за 7 лет на MPC-1/78 почти не изменяется с глубиной (4–4.5 °С), в то время как на скважине НАД-11/75 температура изменяется от +1 до –1 °С с 1 до 10 м. Такие ожидаемые различия связаны с географическим положением. Скважина MPC-1/78 находится значительно севернее, в более холодной климатической зоне, где

среднегодовая температура ММП ниже и практически выравнивается с глубиной, что соответствует более стабильному холодному климату.

Анализ сравнения данных по температуре ММП выбранных МОЦАО с данными со скважины MPC-1/78 для периода 2008–2014 гг. показал, что все пять моделей, включая среднее по ансамблю моделей (см. табл. 3), показывают лучшие результаты в значениях индекса согласованности с данными наблюдений (84–98%) на поверхности (0 м), в отличие от данных на глубине до 2 м (49–95%). Наиболее качественное согласование данных температуры ММП на поверхности показывают модели FGOALS-g3 и GFDL-CM4 со значениями MSE 8.5 и 13.1, а также значениями AI 97 и 95% соответственно. На глубине 2 м наилучшие результаты дают модели FGOALS-g3, BCC-ESM1, GFDL-CM4 со значениями MSE < 3.5 и AI > 87%.

Анализ годового хода температуры ММП на поверхности (рис. 6, а; см. табл. 3) показал, что все модели, а также реанализ ERA5, имеют значимую ($p < 0.05$) корреляцию (от 0.87 до 0.97) с данными измерений на скважине MPC-1/78, с наиболее высокими значениями корреляции 0.95, 0.97 и 0.98 для FGOALS-g3, GFDL-CM4 и среднего по ансамблю моделей соответственно (см. табл. 4). Аналогичный анализ на глубине 2 м (см. рис. 6, б) демонстрирует высокую значимую корреляцию для моделей FGOALS-g3, GFDL-CM4 и BCC-ESM1. Согласно проведённому анализу, модели FGOALS-g3 и GFDL-CM4 качественно согласуются по амплитуде годового хода температуры ММП с данными из скважины MPC-1/78 на поверхности и на глубине 2 м

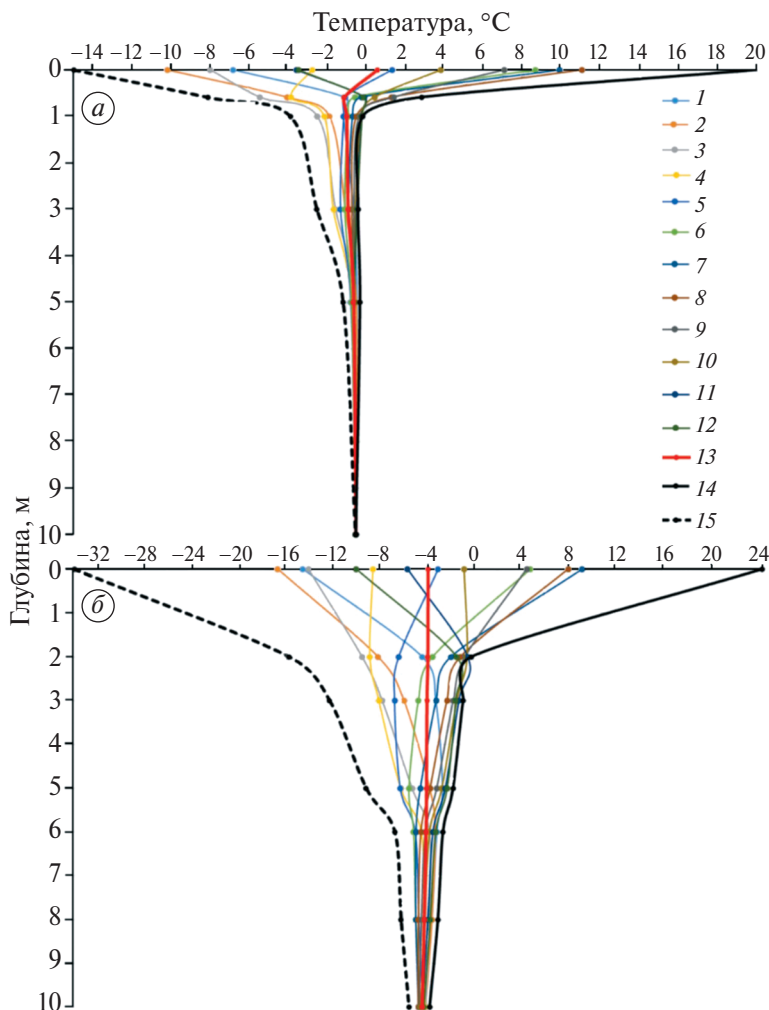


Рис. 5. Распределение температуры ММП по глубине от 0 до 10 м по данным скважин: НАД-11/75 (65°32' с.ш., 72°86' в.д.) за период 2009–2010 (а) и МРС-1/78 (66°81' с.ш., 69°71' в.д.) за период 2008–2014 гг. (б) (Malkova et al., 2022). 1–12 – для всех месяцев в году; 13 – среднегодовые значения; 14 – максимальное значение; 15 – минимальное значение

Fig. 5. Distribution of soil temperature with depth from 0 to 10 m based on boreholes data: NAD-11/75 (65°32' N, 72°86' E) for the period 2009–2010 (a) and MRC-1/78 (66°81' N, 69°71' E) for the period 2008–2014. (b) (Malkova et al., 2022). 1–12 – for all months of the year; 13 – average annual values; 14 – maximum value; 15 – minimum value

в 2008–2014 гг., при этом заметно падение качества оценок модельных данных по сравнению с данными наблюдений с глубиной. Статистические оценки для реанализа ERA5 также показывают качественный результат на поверхности, но низкий на глубине 2 м (см. рис. 6, а; табл. 3).

Анализ сравнения данных выбранных МОЦАО с данными со скважины НАД-11/7 для периода 2009–2010 гг. показал, что АІ по данным температуры ММП МОЦАО по температуре ММП снижается от поверхности к глубине (см. табл. 4), и это согласуется с более ранними исследованиями (Zhou et al., 2024). Модели TaiESM1 и GFDL-CM4 дают качественный результат с наиболее низкими значениями MSE

на всех глубинах (0, 1 и 3 м), но высокими значениями АІ (95–96%) только на поверхности, в то время как на глубинах 1 и 3 м для данных моделей характерны значения АІ от 44 до 50%, что тем не менее представляет лучший результат по сравнению с другими моделями.

Анализ изменения годового хода температуры ММП на поверхности по данным моделей по сравнению с данными со скважины НАД-11/7 для периода 2009–2010 гг. (рис. 7, а) показывает, что единственные модели, имеющие значимую корреляцию, – GISS-E2-1-G-CC и FGOALS-G3 со значениями 0.80 и 0.60 соответственно. Остальные модели и реанализ демонстрируют либо отсутствие значимой корреляции, либо

Таблица 3. Результаты расчётов среднеквадратической ошибки (MSE) и расчёта индекса согласованности (AI) по данным средних многолетних значений температуры ММП, а также корреляции годового хода (ГХ) температуры ММП по данным моделей СМIP6 относительно данных наблюдений в скважине МРС-1/78 на поверхности и на глубине 2 м за период 2008–2014 гг.

*Жирным шрифтом выделены значения MSE и AI: ниже заданного порога в 14.0 для MSE, выше заданного порога в 85% для AI, а также значимая корреляция

Table 3. Results of calculating the mean square error (MSE) and the results of calculating the consistency index (AI) based on the mean long-term soil temperature, as well as the correlation of the annual variation of soil temperature using the CMIP6 models relative to the observation data in the MRC-1/78 borehole at the surface and at a depth of 2 m for the period 2008–2014

*The MSE and AI values are shown in bold: below the specified threshold of 14.0 for MSE, above the specified threshold of 85% for AI, and also significant correlation

скв. МРС-1/78, м	ERA5	GISS-e2-1-G-CC, %	GFDL-CM4, %	FGOALS-g3, %	BCC-ESM1, %	TAIESM1, %	Ср. по ансамблю, %
MSE 0	5.90	22.82	13.13	8.46	58.49	46.04	29.79
MSE 2	43.04	24.88	3.33	1.67	2.94	26.56	11.88
AI 0	98	90	95	97	76	84	88
AI 2	65	57	87%	95	92	49	76
Корр. ГХ 0	0.96	0.91	0.97	0.95	0.87	0.92	0.92
Корр. ГХ 2	0.67	0.60	0.90	0.93	0.92	0.54	0.78

Таблица 4. Результаты расчётов среднеквадратической ошибки (MSE) и результаты расчёта индекса согласованности (AI) по данным средних многолетних значений температуры ММП, а также корреляции годового хода (ГХ) температуры ММП по данным моделей СМIP6 относительно данных наблюдений на скважине скважины НАД-11/7 на поверхности и на глубине 2 м за период 2009–2010 гг.

*Жирным шрифтом выделены значения MSE и AI: ниже заданного порога в 14.0 для MSE, выше заданного порога в 85% для AI, а также значимая корреляция

Table 4. Results of calculating the mean square error (MSE) and the results of calculating the consistency index (AI) based on the average long-term soil temperature, as well as the correlation of the annual variation of soil temperature according to the CMIP6 models relative to the observation data in the NAD-11/7 borehole at the surface and at a depth of 2 m for the period 2009–2010

*The MSE and AI values are shown in bold: below the specified threshold of 14.0 for MSE, above the specified threshold of 85% for AI, as well as significant correlation

скв. НАД-11/7, м	ERA5, %	GISS-e2-1-G-CC, %	GFDL-CM4, %	FGOALS-G3, %	BCC-ESM1, %	TAIESM1, %	Ср. по ансамблю, %
MSE 0	3.30	23.68	8.19	21.77	14.28	11.95	15.97
MSE 1	48.47	17.13	1.32	23.76	16.53	0.68	11.88
MSE 3	45.90	14.69	1.75	16.86	9.41	1.38	8.82
AI 0	98	87	96	91	90	95	92
AI 1	7	25	46	20	13	50	31
AI 3 м	16	40	44	31	37	46	40
Корр. ГХ 0	0.48	0.80	0.37	0.60	0.40	0.35	0.50
Корр. ГХ 1	-0.31	0.08	0.20	0.39	0.16	0.37	0.24
Корр. ГХ 3	0.37	0.81	0.88	0.86	0.73	0.66	0.79

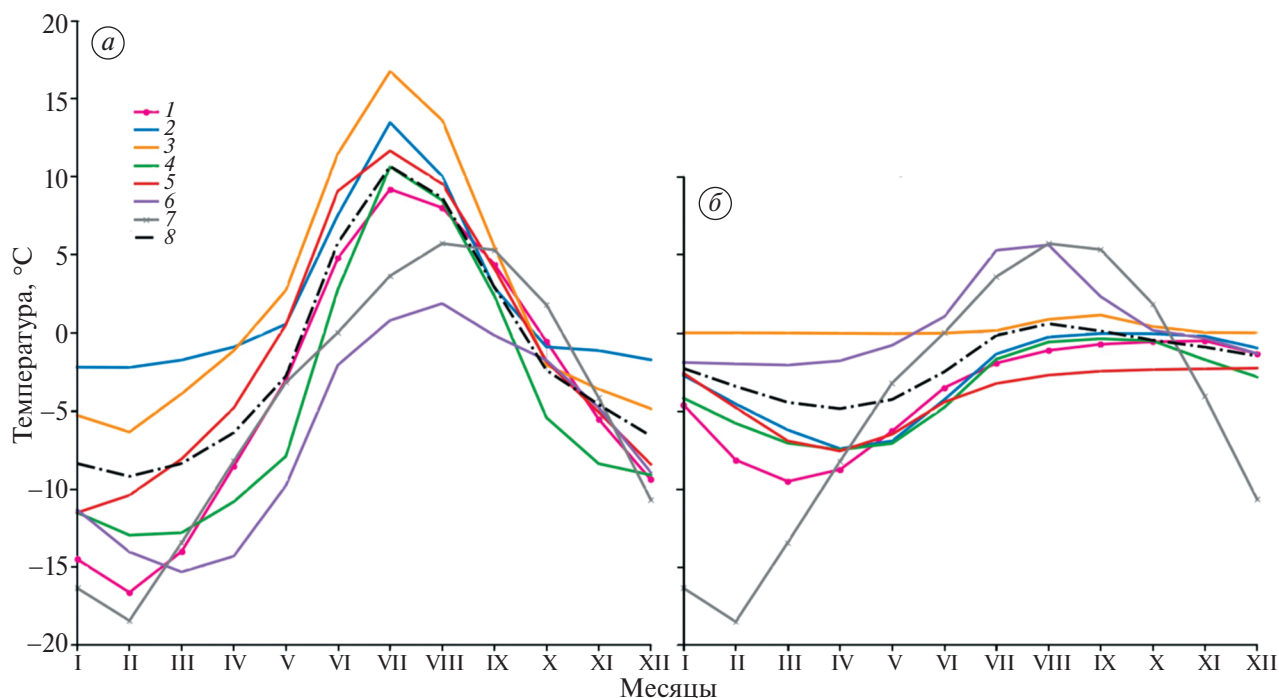


Рис. 6. Средние многолетние значения месячной температуры ММП за период 2008–2014 гг. на поверхности (а) и на глубине 2 метра (б) по данным моделей СМIP6, реанализа ERA5 относительно скважины MPC-1/78 (66°81' с.ш., 69°71' в.д.)

1 – скв. MPC-1/78; 2 – BCC-ESM1; 3 – TaiESM1, 4 – FGOALS-g3; 5 – GFDL-CM4; 6 – GISS-E2-1-G-CC; 7 – ERA5; 8 – ансамбль из 5-ти моделей

Fig. 6. Mean monthly soil temperature for the period 2008–2014 on the surface (a) and at a depth of 2 meters (b) according to CMIP6 models, ERA5 reanalysis relative to borehole MRC-1/78 (66°81' N, 69°71' E)

1 – well MRC-1/78; 2 – BCC-ESM1; 3 – TaiESM1, 4 – FGOALS-g3; 5 – GFDL-CM4; 6 – GISS-E2-1-G-CC; 7 – ERA5; 8 – ensemble of 5 models

её низкие значения (см. табл. 4). Аналогичный анализ на глубине 1 м (см. рис. 7, б) показывает, что все модели на данной глубине имеют незначимую корреляцию с данными наблюдений (см. табл. 4). На глубине 3 м (см. рис. 7, в) все модели показывают значимую корреляцию с данными скважины с максимальными значениями 0.88 и 0.86 для моделей GFDL-CM4 и FGOALS-G3 соответственно (см. табл. 4). Реанализ ERA5 в сравнении с данными наблюдений со скважины НАД-11/7 не показывает надёжных статистических оценок, за исключением поверхностного горизонта.

Неопределённость в модельных оценках значений по температуре ММП на различных горизонтах в том числе зависит от возможностей учёта различных процессов в данных моделях. Разные модели СМIP6 – разные физические схемы и параметризации, которые различаются по чувствительности к обратным связям, например, к толщине, плотности и отражательной

способности (альбедо) снега (Zhou et al., 2024; Luo et al., 2025). Поскольку в северных регионах мало наземных станций измерений, а спутниковые данные имеют высокую неопределённость, это также затрудняет оценку качества модельных данных (Davy, Outten, 2020).

Статистический анализ с использованием данных двух скважин MPC-1/78 и НАД-11/7 показал, что качество воспроизведения температуры ММП моделями СМIP6 существенно различается в зависимости от местоположения, а также горизонтов наблюдений (см. рис. 6–7). В случае скважины MPC-1/78 практически все модели демонстрируют высокую согласованность с данными наблюдений на поверхности: AI составляет 84–98%, а корреляция годового хода достигает 0.87–0.97 для скважины MPC-1/78.

По данным скважины MPC-1/78, наиболее качественный результат выявлен для моделей FGOALS-g3 и GFDL-CM4, которые демонстри-

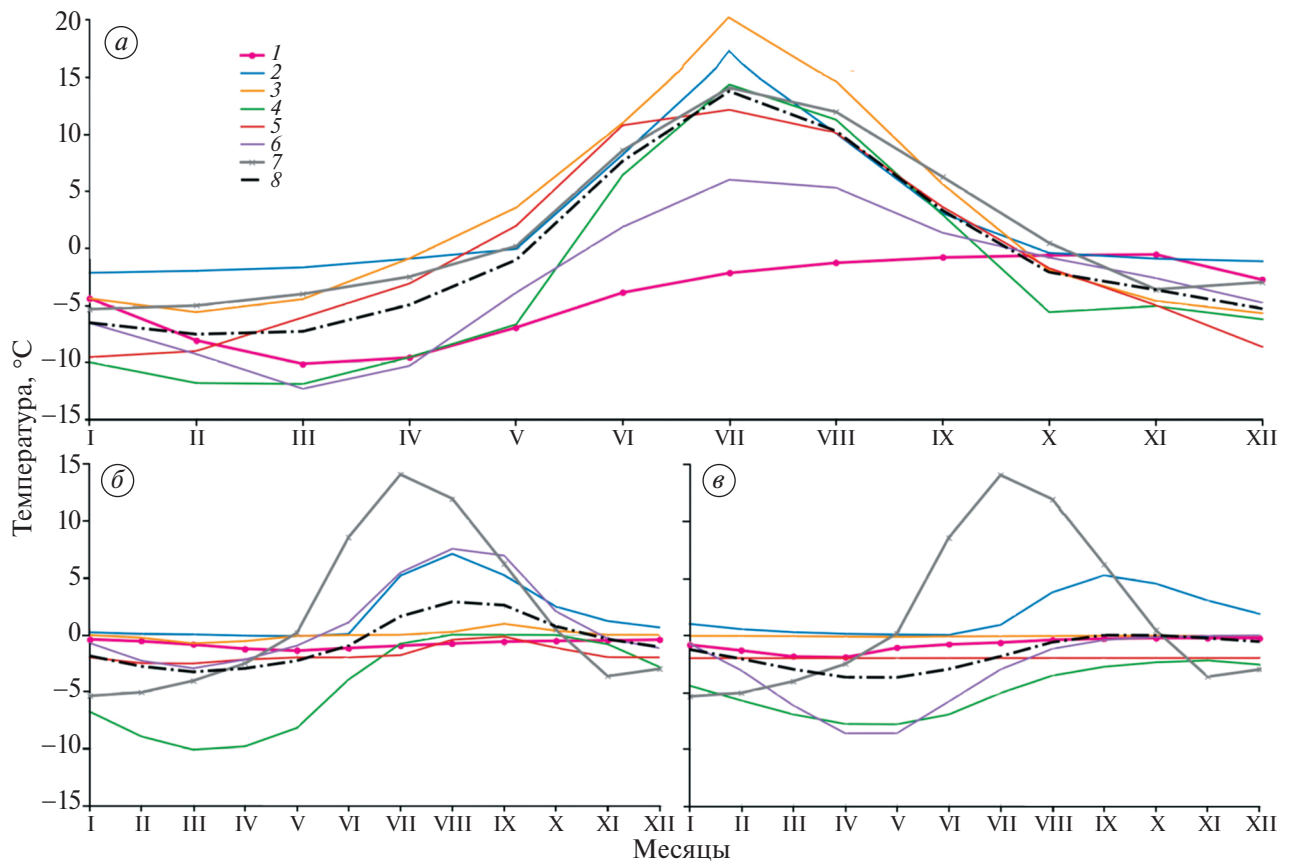


Рис. 7. Средние многолетние значения месячной температуры ММП за период 2009–2010 гг. на поверхности (а), на глубине 1 м (б), и на глубине 3 м (в) по данным моделей CMIP6, реанализа ERA5 относительно скважины НАД-11/7 (65°32' с.ш., 72°86' в.д.)

1 – скв. НАД-11/7; 2 – BCC-ESM1; 3 – TaiESM1, 4 – FGOALS-g3; 5 – GFDL-CM4; 6 – GISS-E2-1-G-CC; 7 – ERA5; 8 – ансамбль из 5-ти моделей

Fig. 7. Mean monthly soil temperature for the period 2009–2010 on the surface (a), at a depth of 1 m (b), at a depth of 3 m (v) according to CMIP6 models, ERA5 reanalysis relative to the borehole NAD-11/7 (65°32' N, 72°86' E)

1 – borehole NAD-11/7; 2 – BCC-ESM1; 3 – TaiESM1, 4 – FGOALS-g3; 5 – GFDL-CM4; 6 – GISS-E2-1-G-CC; 7 – ERA5; 8 – ensemble of 5 models

руют наиболее низкие значения MSE (1–13) и высокие значения AI (до 87–97%) на всех почвенных горизонтах. Эти модели также корректно воспроизводят годовой ход температуры со значимой корреляцией (0.90–0.97) на поверхности и на глубине 2 м. (см. табл. 3; рис. 6, б).

В то же время, по данным скважины НАД-11/7, расположенной южнее скважины MPC-1/7, качество воспроизведения температуры ММП моделями на разных почвенных горизонтах хуже по сравнению со скважиной MPC-1/78. На поверхности лучшая согласованность наблюдается у моделей TaiESM1 и GFDL-CM4 с наименьшими значениями MSE и высокими значениями AI. Однако статистически значимая корреляция годового хода между данными моделей и наблюдениями отмечается для моделей GISS-E2-1-G-

CC и FGOALS-g3 на поверхности и на горизонте 3 м. На глубине 1 м все модели характеризуются незначимыми статистическими оценками, что указывает на недостаточную точность воспроизведения температурного режима в зоне активного талого слоя. Тем не менее, на глубине 3 м все модели демонстрируют значимую корреляцию (0.73–0.88) и умеренные значения MSE (1.38–16), что говорит о более корректной воспроизводимости температуры ММП на данном горизонте (см. табл. 4; рис. 7, в).

Сравнительный анализ между данными наблюдений и моделями CMIP6 температуры ММП на территории ЯНАО показывает лучшую согласованность в районе скважины MPC-1/78, которая находится севернее скважины НАД-11/7, что может быть связано с несколькими факторами.

Скважина MPC-1/78 находится в зоне с более устойчивыми и однородными климатическими и почвенными условиями, что может лучше соответствовать пространственному разрешению моделей CMIP6. В районе скважины НАД-11/7 на почвенные условия могут влиять больше локальных факторов, в том числе топография и микроклимат. Более короткий период наблюдений в НАД-11/7 (два года) по сравнению с MPC-1/78 (семь лет) также может ограничивать статистическую надёжность сравнения, увеличивая вероятность несогласованности данных. Точность моделей падает при переходе от поверхности к глубинам 1–3 м, что может быть связано как с особенностями параметризации снежного покрова и теплообмена в моделях, так и с высокой локальной изменчивостью температуры почв в реальных условиях.

С учётом результатов анализа данных для обеих скважин можно сделать вывод, что наиболее качественные результаты по воспроизведению температуры ММП на разных глубинах дают модели GFDL-CM4 и FGOALS-g3 для станции MPC-1/78 и GFDL-CM4 и TaiESM1 для станции НАД-11/7, они демонстрируют наиболее высокие показатели соответствия и значимой корреляции на почвенных горизонтах.

В целом, полученные результаты позволяют утверждать, что среди анализируемых моделей наиболее качественной для прогноза температурного режима ММП на территории ЯНАО является модель GFDL-CM4, демонстрирующая значимые статистические оценки на всех глубинах для обеих скважин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Актуальность исследования обусловлена возрастающим воздействием климатических изменений на ключевые компоненты природной среды, в частности на криосферу, которая играет ключевую роль в функционировании экосистем арктического региона. Повышение температуры в арктической криолитозоне вызывает деградацию ММП, что приводит к трансформации ландшафта, создаёт угрозы для инженерной инфраструктуры и экономической деятельности, а также усиливает парниковый эффект в результате высвобождения парниковых газов из ММП. Для качественного прогноза динамики состояния ММП необходимы высокоточные и непрерывные эмпирические данные, однако их дефицит в арктических районах, включая ЯНАО,

обуславливает актуальность разработки и внедрения новых методов мониторинга и прогнозирования.

В настоящем исследовании проводится анализ ПТВ и температуры ММП на горизонтах на территории ЯНАО в 1980–2020 гг. с помощью различных наборов данных: стационарных, реанализов и климатических моделей.

Выполненный анализ показал, что реанализ ERA5 может быть применён для оценки региональных изменений ПТВ, о чём свидетельствует высокая степень согласованности температурных рядов ПТВ за период 1980–2020 гг. между ERA5 и данными наблюдений. Несмотря на отдельные расхождения в воспроизведении экстремальных значений, данный реанализ обеспечивает значимые статистические оценки корреляции до 0.95, что подтверждает возможность использования ERA5 для оценки качества воспроизведения ПТВ в данных климатических моделей в исследуемом регионе. Согласно статистическому анализу с использованием характеристики ПТВ из ансамбля 28 моделей CMIP6 для ЯНАО отобрано пять моделей, а именно – TaiESM1, GFDL-CM4, FGOALS-g3, GISS-E2-1-G-CC, BCC-ESM1.

В то же время применение ERA5 для анализа температуры ММП на территории ЯНАО не представляется целесообразным ввиду значительных расхождений с наземными данными и систематического занижения значений. Однако реанализ ERA5 характеризуется высокой согласованностью с данными наблюдений в скважинах для периода 2008–2014 гг., при этом качество соответствия заметно снижается по мере увеличения глубины. Такие различия подчёркивают необходимость осторожности в применении ERA5 для оценки климатических параметров ММП в исследуемом регионе.

Применение данных скважин MPC-1/78 и НАД-11/7 показало существенные расхождения в качестве воспроизведения температуры ММП моделями CMIP6 в зависимости от места и глубины измерений. Наиболее качественный результат по воспроизведению температурного режима почвенных горизонтов для северной скважины MPC-1/78 продемонстрировали модели GFDL-CM4 и FGOALS-g3. Эти модели показали наиболее высокие показатели соответствия наблюдениям, включая значения коэффициента согласованности ($AI > 87\%$)

и значимой корреляции годового хода (>90%) на всех анализируемых горизонтах. При этом качество воспроизведения показателя температуры ММП снижается с глубиной. Для южной скважины НАД-11/7 затруднительно выделить модель, качественно воспроизводящую показатель температуры ММП на всех глубинах. Выделены модели GFDL-CM4 и TaiESM1 по наиболее низким показателям MSE (<12), а также GISS-E2-1-G-CC и FGOALS-g3 с высокой значимой корреляцией годового хода на поверхности и на горизонте 3 м. Для скважины НАД-11/7, находящейся в южной зоне с более сложными локальными факторами, качество моделей было ниже, особенно на глубинах около 1 м, что может указывать на затруднения в корректном моделировании активного слоя почвы. Расхождения в качестве моделей могут быть связаны как с пространственным разрешением и параметризацией процессов в моделях (например, снежного покрова и теплообмена), так и с локальными климатическими и почвенными особенностями, что требует учёта в будущих модельных оценках (Zhou et al., 2024; Luo et al., 2025).

Модель GFDL-CM4 выделяется как наиболее универсальная и надёжная для прогнозирования температурного режима на разных глубинах в регионе ЯНАО и может быть применена для оценки прогнозов температуры на поверхности и на глубинах для территорий ЯНАО южнее 69° с.ш., что будет выполнено в последующих исследованиях.

Финансирование. Исследование спонсировано Российским научным фондом (Соглашение No. 25-27-00327 от 26.12.2024).

Acknowledgements. Research was supported by Russian Science Foundation (Agreement No. 25-27-00327).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Кудрявцев В.П., Лосева Т.В. Эмиссия метана в арктическом регионе и ее влияние на региональное потепление // Динамические процессы в геосферах. 2024. № 1. С. 220–229.
- Аржанов М.М., Малахова В.В., Мохов И.И. Условия формирования и диссоциации метангидратов в течение последних 130 тысяч лет по модельным расчётам // Доклады Академии наук. 2018. Т. 480. № 6. С. 725–729.
- Баранов В.И. Разработка комплекса мероприятий по строительству газопровода в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов. Бакалаврская работа. Томский национальный исследовательский политехнический университет, 2023. <https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/75461/1/TPU1461036.pdf>
- Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швец Н.В. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2014. № 2014621485.
- Елисеев А.В. Глобальный цикл метана: обзор // Фундаментальная и прикладная климатология. 2018. Т. 1. С. 52–70.
- Красулина О.Ю. Арктическая зона Российской Федерации: особенности природно-экономических и демографических ресурсов // Региональная экономика и управление. 2016. № 4 (48). С. 51–58.
- Малахова В.В. Эмиссия метана из донных отложений арктического шельфа при нарушении условий стабильности гидратов // Оптика атмосферы и океана. 2025. Т. 38. № 6. С. 467–473.
- Местников Ф.М. Организация ремонтных работ магистральных газопроводов в условиях низких температур Крайнего Севера. Выпускная квалификационная работа магистра. Томский национальный исследовательский политехнический ун-т, 2023. <https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/76396/1/TPU1470931.pdf>
- Мохов И.И., Малахова В.В., Аржанов М.М. Модельные оценки внутри-и межвековой деградации “вечной мерзлоты” в регионе полуострова Ямал при потеплении // Доклады Академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 506. № 2. С. 219–226.
- Семенов В.А. Колебания современного климата, вызванные обратными связями в системе атмосфера-арктические льды-океан // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. Т. 1. С. 232–248.
- Семенов С.М. Парниковый эффект и его антропогенное усиление // Солнечно-земная физика. 2012. № 21. С. 10–17.
- Bevacqua E., Schleussner C.F., Zscheischler J. A year above 1.5° C signals that Earth is most probably within the 20-year period that will reach the Paris Agreement limit // Nature Climate Change. 2025. V. 15. № 3. P. 262–265.
- Bokuchava D.D., Semenov V.A. Mechanisms of the early 20th century warming in the Arctic // Earth-Science Reviews. 2021. V. 222. P. 103820.
- Davy R., Outten S. The Arctic surface climate in CMIP6: Status and developments since CMIP5 // Journal of Climate. 2020. V. 33. № 18. P. 8047–8068.
- 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 // Geoscientific Model Development. 2016. V. 9. P. 1937–1958.
- Fox-Kemper B.* Ocean, Cryosphere and Sea Level Change // In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. IPCC Sixth Assessment Report. Cambridge University Press, 2021. P. 1211–1362.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Thépaut J.N.* The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. V. 146. № 730. P. 1999–2049.
- Karjalainen O., Luoto M., Aalto J., Hjort J.* New insights into the environmental factors controlling the ground thermal regime across the Northern Hemisphere: a comparison between permafrost and non-permafrost areas // The Cryosphere. 2019. V. 13. № 2. P. 693–707.
- Kirtman B.P., Min D., Infanti J.M., Kinter III J.L., Paolino D.A., Zhang Q., Wood E.F.* The North American Multi-Model Ensemble (NMME): Phase-1 seasonal to interannual prediction, Phase-2 toward developing intra-seasonal prediction // Bulletin of the American Meteorological Society. 2014.
- Kraev G., Rivkina E., Vishnivetskaya T., Belonosov A., Huissteden J., Kholodov A., Zamolodchikov D.* Methane in gas shows from boreholes in epigenetic permafrost of Siberian Arctic // Geosciences. 2019. V. 9. № 2. C. 67.
- Li M., Wu P., Ma Zh.* A comprehensive evaluation of soil moisture and soil temperature from third-generation atmospheric and land reanalysis data sets // International Journal of Climatology. 2020. V. 40. № 13. P. 5744–5766.
- Luo Z., Ji D., Ahrens B.* Assessing Climate Modeling Uncertainties in the Siberian Frozen Soil Regions by Contrasting CMIP6 and LS3MIP // EGUsphere. 2025. V. 2025. P. 1–34.
- Malkova G., Drozdov D., Vasiliev A., Gravis A., Kraev G., Korostelev Y., Tsarev A.* Spatial and Temporal Variability of Permafrost in the Western Part of the Russian Arctic // Energies. 2022. V. 15. P. 2311.
- Miner K.R., Turetsky M.R., Malina E., Bartsch A., Tamminen J., McGuire A.D., Miller C.E.* Permafrost carbon emissions in a changing Arctic // Nature Reviews Earth & Environment. 2022. V. 3. № 1. P. 55–67.
- Nicolosky D.J., Romanovsky V.E., Panda S.K., Marchenko S.S., Muskett R.R.* Applicability of the ecosystem type approach to model permafrost dynamics across the Alaska North Slope // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. 2016. V. 122. P. 50–75.
- Oppenheimer M., Glavovic B., Hinkel J., Van de Wal R.S.W., Magnan A., Abd-Elgawad A., Sebesvari Z.* The ocean and cryosphere in a changing climate. 2019.
- Rantanen M., Karpechko A.Y., Lipponen A., Nordling K., Hyvärinen O., Ruosteenoja K., Vihma T., Laaksonen A.* The Arctic Has Warmed Nearly Four Times Faster than the Globe Since 1979 // Communications Earth & Environment. 2022. V. 3. № 168. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>
- Sidorova M., Alieva M., Shtol E., Oderkova A., Yasinsky S.* Selection of an Ensemble of Atmospheric and Oceanic General Circulation Models of the CMIP-6 Project for estimating possible runoff changes in the Volga and Kama basins // E3S Web of Conferences. 2023. V. 407. P. 02011.
- van Soest M. A.J., Anderson N.J., Bullard J.E.* Arctic soil development under changing climate conditions // Catena. 2025. V. 254. P. 108938.
- Zhou J., Zhang J., Huang Y.* Evaluation of soil temperature in CMIP6 multimodel simulations // Agricultural and Forest Meteorology. 2024. V. 352. P. 110039.

Citation: *Shtol E.Y., Bokuchava D.D., Kraev G.N.* Soil Temperature in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug Based on ERA5 Reanalysis Data and CMIP6 Models. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2026, 66 (2): 379–396. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376526020113

Soil Temperature in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug Based on ERA5 Reanalysis Data and CMIP6 Models

© 2026 E. Yu. Shtol^{a,*}, D. D. Bokuchava^a, G. N. Kraev^b

^a*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Higher School of Economics, Moscow, Russia*

*e-mail: e.u.shtol@gmail.com

Received December 1, 2025; revised December 18, 2025; accepted March 23, 2026

The relevance of this study is determined by the current pace of climate change in the Arctic region and the threats associated with the degradation of permafrost (PF), which results in the landscape transformation, infrastructure damage and the release of greenhouse gases. The analysis of changes of the surface air temperatures (SAT) and permafrost (PFT) in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug

during the period 1980–2020 was carried out using data of weather stations, measurements in thermometric boreholes, the ERA5 reanalysis, and CMIP6 climate models. The CMIP6 model ensemble was evaluated by comparing the SAT values with the ERA5 reanalysis data using three criteria: the error in the mean SAT, the standard deviation errors, and a fraction of points where the sign of the linear SAT trend corresponded to the trend obtained from ERA5 data. The selected models were used to analyze the simulation of average monthly PFT with depth from the surface to 3 meters, using the root-mean-square error (MSE) and the index of agreement (AI) between observational data and models. It is shown that ERA5 qualitatively reproduces the SAT in the study region (correlation up to 0.95), but with limitations in assessing the PRT values, especially at greater depths. The reanalysis underestimates instrumental PFT values by 1.5–2.5°C and also fails to reproduce certain extremes. The CMIP6 models demonstrate significant variations in the quality of simulation of the PRT regimes depending on the location and depth. The GFDL-CM4 model stands out as the most reliable for estimating the PR temperature profile in the region, with MSE values of 1–13, AI values of 84–98%, and a significant correlation (0.87–0.97) between the annual temperature trend of the mean monthly temperature (MMT) across various soil horizons and observational data from two boreholes. This study emphasizes the need for a comprehensive use of observational and model data, with careful evaluation of their quality, to predict the influence of climate change on the permafrost zone and the associated risks for ecosystems and infrastructure in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug.

Keywords: climate models, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, data outliers, permafrost, surface temperature, ERA5, CMIP6

REFERENCES

- Adushkin V.V., Kudryavtsev V.P., Loseva T.V.* Methane emission in the Arctic region and its impact on regional warming. *Dinamicheskie processy v geosferah*. Dynamic Processes in Geospheres. 2024, 1: 220–229. [In Russian].
- Arzhanov M. M., Malakhova V.V., Mokhov I.I.* Simulation of the Conditions for the Formation and Dissociation of Methane Hydrate over the Last 130 000 Years. *Doklady Rossiiskoy Akademii Nauk*. Reports of the Academy of Sciences. 2018, 480 (2): 826–830.
- Baranov V.I.* Development of a set of measures for the construction of a gas pipeline under permafrost conditions. Bachelor's thesis. Tomsk: TGU, 2023. <https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/75461/1/TPU1461036.pdf> [In Russian].
- Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Trofimenko L.T., and Shvets N.V.* Opisaniye massiva dannyh srednemesyachnoy temperatury vozduha na stancyah Rossii. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registracii bazy dannyh*. Description of the dataset of monthly mean air temperature at Russian weather stations. Certificate of State Registration of Database. Obninsk: All-Russian Research Institute for Hydrometeorological Information – World Data Center, 2014: 2014621485. [In Russian].
- Eliseev A.V.* Global methane cycle: a review. *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya*. Fundamental and Applied Climatology. 2018, 1: 52–70. [In Russian].
- Krasulina O.Yu.* Arctic zone of the Russian Federation: features of natural-economic and demographic resources. *Regionalnaya ekonomika i upravlenie: elektronnyy nauchnyy zhurnal*. Regional Economics and Management. 2016, 4 (48): 51–58. [In Russian].
- Malakhova V.V.* Methane emission from bottom sediments of the Arctic shelf under disturbed hydrate stability conditions. *Optika atmosfery i okeana*. Atmospheric and Oceanic Optics. 2025, 38 (6): 467–473. [In Russian].
- Mokhov I.I., Malakhova V.V., Arzhanov M.M.* Model estimates of intra- and intercentennial degradation of permafrost on the Yamal peninsula under warming. *Doklady Rossiiskoy Akademii Nauk. Nauki o Zemle*. Reports of the Academy of Sciences. Earth Sciences. 2022, 506 (2): 782–789.
- Mestnikov F.M.* Organization of maintenance work on main gas pipelines under low-temperature conditions of the Far North. Master's Degree thesis. Tomsk: TGU, 2023. <https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/76396/1/TPU1470931.pdf> [In Russian].
- Semenov V.A.* Variability of the modern climate caused by feedbacks in the atmosphere–Arctic sea ice–ocean system. *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya*. Fundamental and Applied Climatology. 2015, 1: 232–248. [In Russian].
- Semenov S.M.* Greenhouse effect and its anthropogenic enhancement. *Solnechno-zemnaya fizika*. Solar-Terrestrial Physics. 2012, 21: 10–17. [In Russian].
- Bevacqua E., Schleussner C.F., Zscheischler J.* A year above 1.5°C signals that Earth is most probably within the 20-year period that will reach the Paris Agreement limit. *Nature Climate Change*. 2025, 15 (3): 262–265.
- Bokuchava D.D., Semenov V.A.* Mechanisms of the early 20th century warming in the Arctic. *Earth-Science Reviews*. 2021, 222: 103820.
- Davy R., Outten S.* The Arctic surface climate in CMIP6: Status and developments since CMIP5. *Journal of Climate*. 2020, 33 (18): 8047–8068.

- 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. *Geoscientific Model Development*. 2016, 9: 1937–1958.
- Fox-Kemper B.* Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. IPCC Sixth Assessment Report*. Cambridge University Press. 2021: 1211–1362.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Thépaut J.N.* The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020, 146 (730): 1999–2049.
- Karjalainen O., Luoto M., Aalto J., Hjort J.* New insights into the environmental factors controlling the ground thermal regime across the Northern Hemisphere: a comparison between permafrost and non-permafrost areas. *The Cryosphere*. 2019, 13 (2): 693–707.
- Kirtman B.P., Min D., Infanti J.M., Kinter III J.L., Paolino D.A., Zhang Q., Wood E.F.* The North American Multi-Model Ensemble (NMME): Phase-1 seasonal to interannual prediction, Phase-2 toward developing intra-seasonal prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2014.
- Kraev G., Rivkina E., Vishnivetskaya T., Belonosov A., van Huissteden J., Kholodov A., Zamolodchikov D.* Methane in gas shows from boreholes in epigenetic permafrost of Siberian Arctic. *Geosciences*. 2019, 9 (2): 67.
- Li M., Wu P., Ma Zh.* A comprehensive evaluation of soil moisture and soil temperature from third-generation atmospheric and land reanalysis data sets. *International Journal of Climatology*. 2020, 40 (13): 5744–5766.
- Luo Z., Ji D., Ahrens B.* Assessing Climate Modeling Uncertainties in the Siberian Frozen Soil Regions by Contrasting CMIP6 and LS3MIP. *EGUsphere*. 2025, 2025: 1–34.
- Malkova G., Drozdov D., Vasiliev A., Gravis A., Kraev G., Korostelev Y., Tsarev A.* Spatial and Temporal Variability of Permafrost in the Western Part of the Russian Arctic. *Energies*, 2022, 15: 2311.
- Miner K.R., Turetsky M.R., Malina E., Bartsch A., Tamminen J., McGuire A.D., Miller C.E.* Permafrost carbon emissions in a changing Arctic. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2022, 3 (1): 55–67.
- Nicolisky D.J., Romanovsky V.E., Panda S.K., Marchenko S.S., Muskett R.R.* Applicability of the ecosystem type approach to model permafrost dynamics across the Alaska North Slope. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2016, 122: 50–75.
- Oppenheimer M., Glavovic B., Hinkel J., Van de Wal R.S.W., Magnan A., Abd-Elgawad A., Sebesvari Z.* The ocean and cryosphere in a changing climate. 2019.
- Rantanen M., Karpechko A.Y., Lipponen A., Nordling K., Hyvärinen O., Ruosteenoja K., Vihma T., Laaksonen A.* The Arctic Has Warmed Nearly Four Times Faster than the Globe Since 1979 // *Communications Earth & Environment*. 2022, 3 (168). <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>
- Sidorova M., Alieva M., Shtol E., Oderkova A., Yasinsky S.* Selection of an Ensemble of Atmospheric and Oceanic General Circulation Models of the CMIP-6 Project for estimating possible runoff changes in the Volga and Kama basins. *E3S Web of Conferences*. 2023, 407: 02011.
- van Soest M.A.J., Anderson N.J., Bullard J.E.* Arctic soil development under changing climate conditions. *Catena*. 2025, 254: 108938.
- Zhou J., Zhang J., Huang Y.* Evaluation of soil temperature in CMIP6 multimodel simulations. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2024, 352: 110039.