Изменения температуры восточной части российской Арктики по данным наблюдений, реанализам и моделям CMIP6 в 1940–2099 годы

Серых Илья Викторович[1], Трусенкова Ольга Олеговна[2],

Скакун Александра Андреевна[3]

[1] Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва
[2] Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток
[3] Независимая исследовательница, Санкт-Петербург

iserykh@ocean.ru

Мотивация

Климатические изменения в российской восточной Арктике

Потепление меняет ледовые условия и возможности судоходства.
Таяние многолетней мерзлоты создаёт риски для освоения региона.

Арктическое усиление

Потепление в Арктике усиливают обратные связи, связанные с морским льдом и альбедо, а также перенос тепла из средних широт.

Региональная оценка моделей CMIP6

Модели различаются по расчётным схемам и параметризациям. Для оценки будущего потепления важно проверить, как они воспроизводят изменения температуры в регионе с середины XX века.

Введение

Парниковые газы и радиационный форсинг

Рост концентрации парниковых газов вследствие деятельности человека изменяет радиационный баланс и способствует накоплению тепла в климатической системе.

Эксперименты Historical и сценарии SSP

Historical учитывает наблюдавшиеся антропогенные и естественные внешние воздействия. Сценарии SSP задают возможные пути социально-экономического развития и связанное с ними радиационное воздействие.

Климатическая проекция

Оценка возможных изменений климата при заданном сценарии внешних воздействий. В работе рассматривается температура восточной Арктики к середине и концу XXI века.

Цель и задачи

Цель

Сравнить проекции изменений приповерхностной температуры воздуха российской восточной Арктики до конца XXI века по ансамблю CMIP6 при четырёх сценариях радиационного форсинга SSP.

Задача 1. Оценка воспроизведения наблюдаемых изменений

Сопоставить изменения температуры за 1940–2023 гг. по моделям CMIP6 с данными шести метеостанций и реанализа ERA5. Оценить временную динамику и пространственные различия потепления над сушей и морем.

Задача 2. Анализ будущего потепления

Определить величину и пространственную структуру изменений температуры к 2024–2053 и 2070–2099 гг. относительно 1994–2023 гг. Сравнить сценарии и оценить межмодельный разброс.

Регион и исходные данные

Российская восточная Арктика

65–85° с. ш., 70° в. д. – 170° з. д.
Показатель: приповерхностная температура воздуха (ПТВ).

Метеостанции	1940–2023 гг., среднемесячные данные шести станций: Туруханск, Остров Врангеля, Зырянка, Тикси, Сухана, Котельный.
ERA5	1940–2023 гг., среднемесячная ПТВ. Пространственная сетка 0,25° × 0,25°.
CMIP6	Ансамбль из 33 моделей. Historical за 1940–2014 гг. и четыре сценария SSP за 2015–2099 гг.

В регион включена восточная часть Карского моря
для сопоставления с изменениями климата западной Арктики.

Эксперименты и сценарии CMIP6

Historical: 1940–2014 гг. Внешние воздействия по данным наблюдений.

Сценарий	Период анализа	Форсинг к концу XXI века, Вт/м²
SSP1-2.6	2015–2099	2,6
SSP2-4.5	2015–2099	4,5
SSP3-7.0	2015–2099	7,0
SSP5-8.5	2015–2099	8,5

Сопоставление с ERA5 за 1940–2023 гг.:
Historical до 2014 г. и SSP2-4.5 с 2015 г.

Методика

Среднегодовая температура и её аномалии

Из среднемесячных данных рассчитана среднегодовая ПТВ. Для аномалий из месячных значений вычтен средний годовой ход за 1940–1969 гг. Затем месячные аномалии осреднены за каждый год.

Сопоставление наблюдаемых изменений

Изменения температуры оценены по разностям 30-летних средних и линейным трендам. Единичные пропуски в станционных рядах восполнены линейной интерполяцией.

Ансамбль моделей CMIP6

Результаты моделей приведены к общей сетке. Рассчитаны среднее по ансамблю и межмодельное стандартное отклонение. Осреднение сглаживает особенности отдельных моделей и естественную изменчивость.

Периоды сравнения

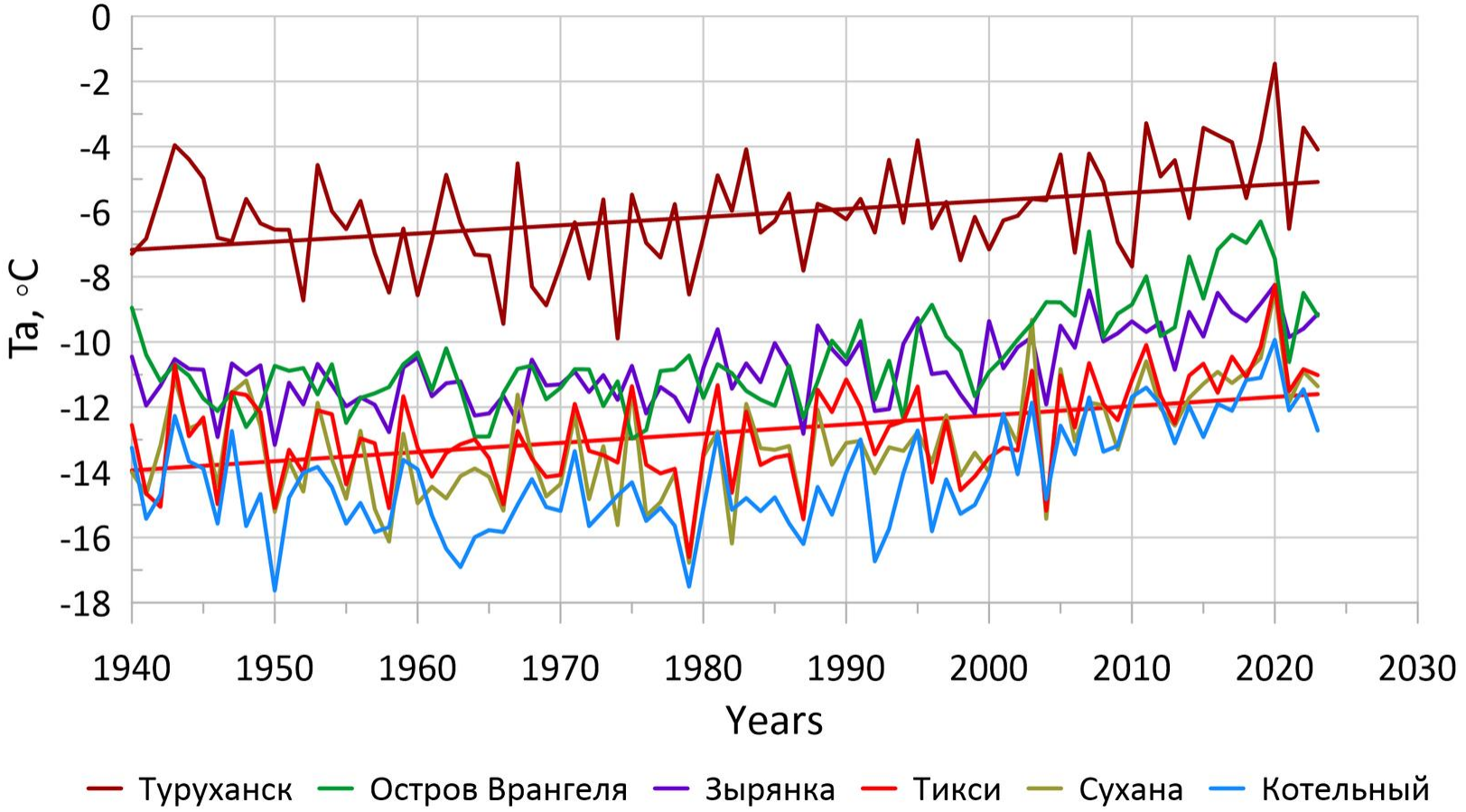
Средняя ПТВ за 30-летние периоды

Период, гг.	Назначение
1940–1969	Климат середины XX века и база для аномалий
1994–2023	Современный климат и база для будущих изменений
2024–2053	Климат середины XXI века
2070–2099	Климат конца XXI века

Наблюдаемое потепление 1994–2023 минус 1940–1969 гг.

Будущие изменения 2024–2053 и 2070–2099 минус 1994–2023 гг.

Потепление по данным метеостанций



1994–2023 минус 1940–1969 гг.

Метеостанция	ΔT, °C
Туруханск	1,4
О. Врангеля	2,3
Зырянка	1,6
Тикси	1,4
Сухана	1,6
Котельный	1,9

На всех шести станциях температура повысилась на 1,4–2,3 °C.

Тренды за 1940–2023 гг.: Туруханск 0,25 °C/10 лет, Тикси 0,29 °C/10 лет.

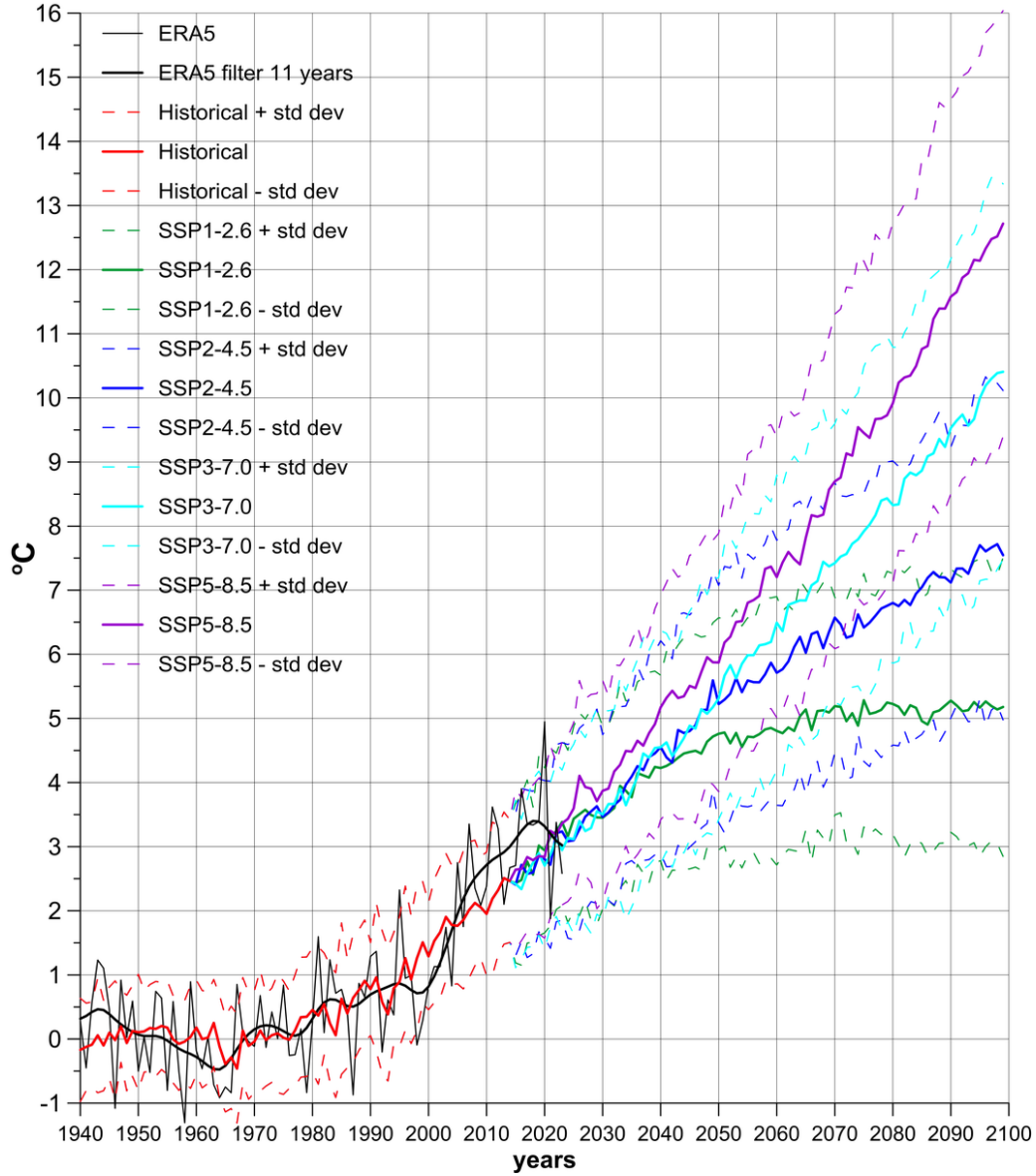
Изменения температуры в 1940–2099 гг.

Потепление от 1940–1969 к 1994–2023 гг.

ERA5: 2,1 °C
CMIP6: 2,04 ± 0,73 °C

Устойчивый рост начинается с конца 1970-х гг. и ускоряется после 2000 г.

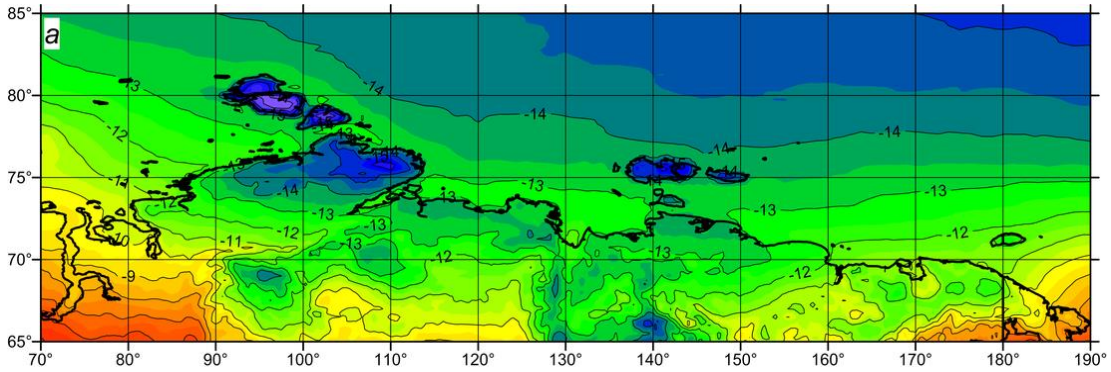
Во второй половине XXI века сценарии всё сильнее расходятся. Потепление сохраняется при каждом сценарии.



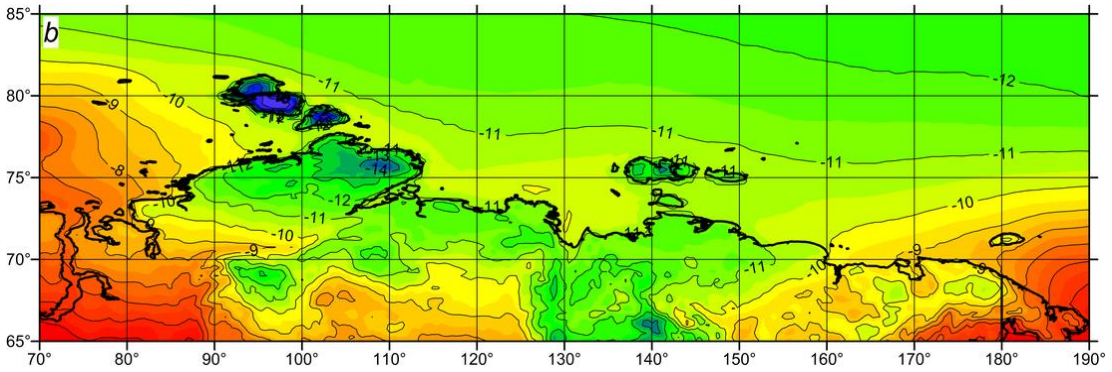
Чёрная линия: ERA5, толстая линия: сглаживание за 11 лет.
Цветные линии: средние CMIP6, пунктир: ±1σ.

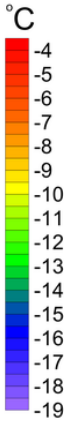
Пространственная картина потепления

ERA5: 1940–1969 гг.

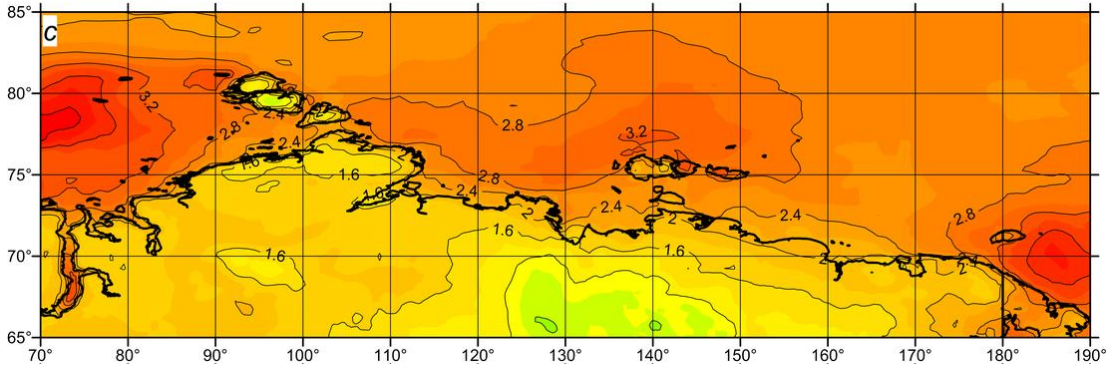


ERA5: 1994–2023 гг.

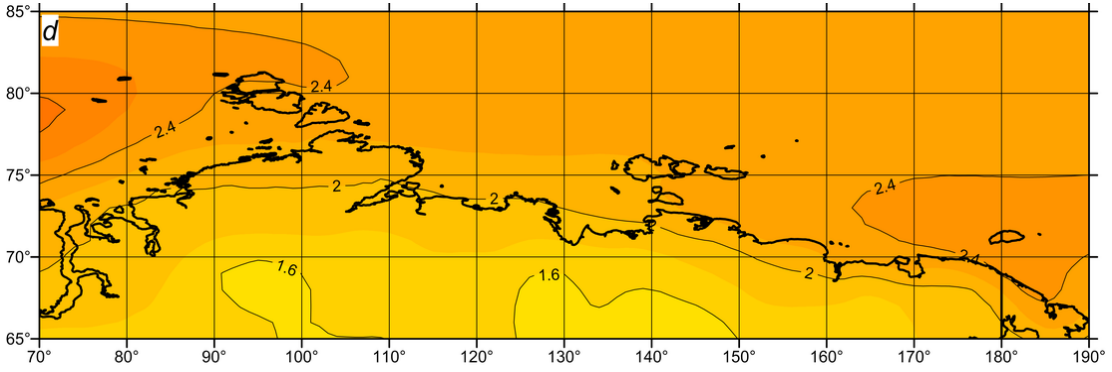


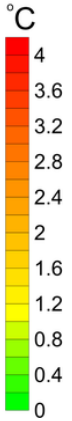


ERA5: изменение ПТВ



CMIP6: изменение ПТВ



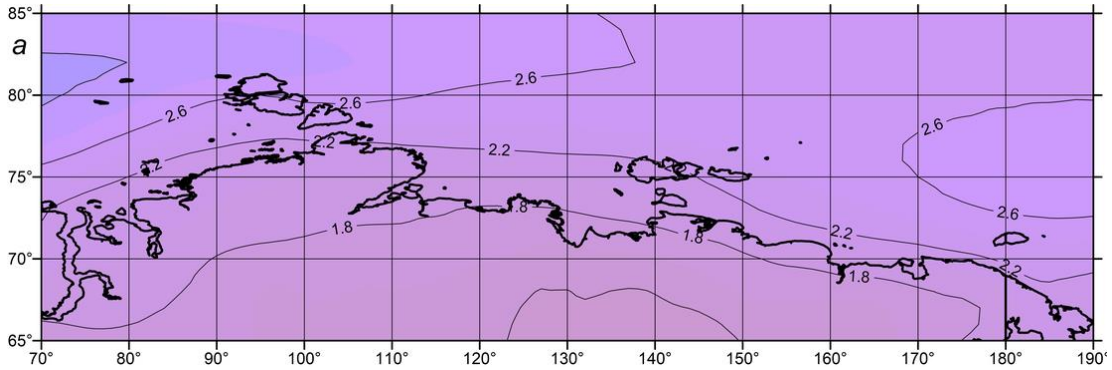


1994–2023 минус 1940–1969 гг.: над морем 2–4 °C, над сушей 1–2 °C по ERA5.

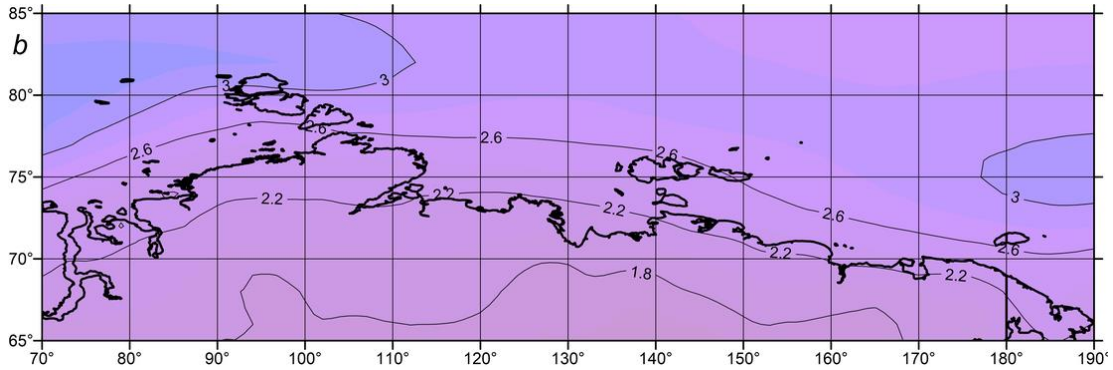
CMIP6 занижает потепление над морем и завышает над сушей.

Потепление к середине XXI века

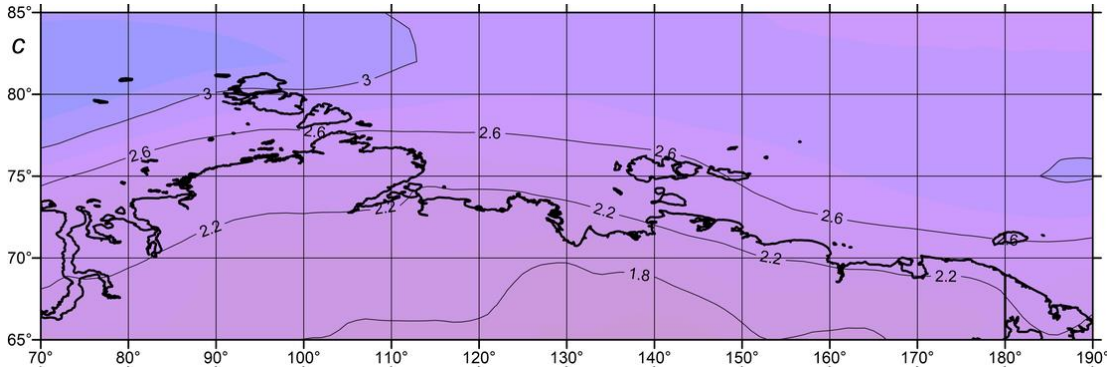
SSP1-2.6



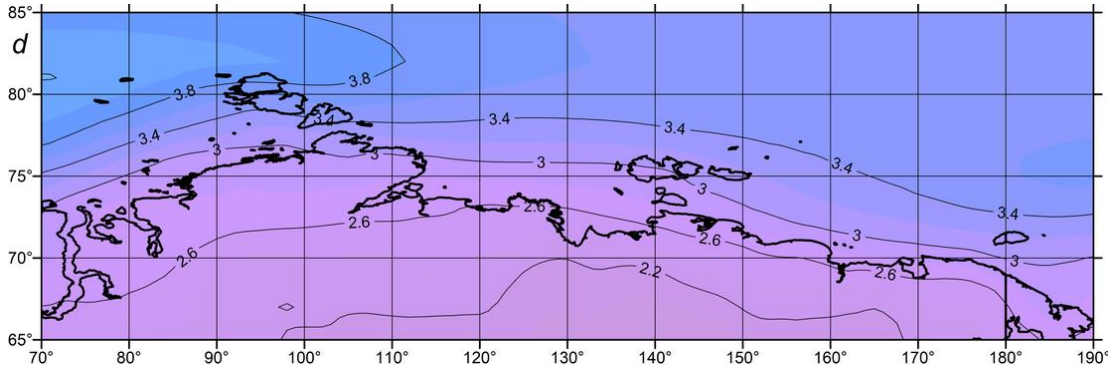
SSP2-4.5



SSP3-7.0



SSP5-8.5



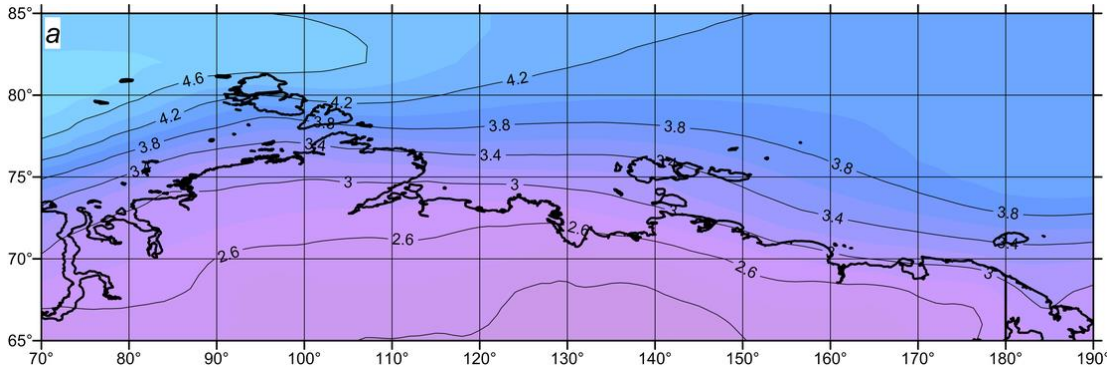


2024–2053 минус 1994–2023 гг. Среднее по региону: от 2,02 до 2,81 °C.

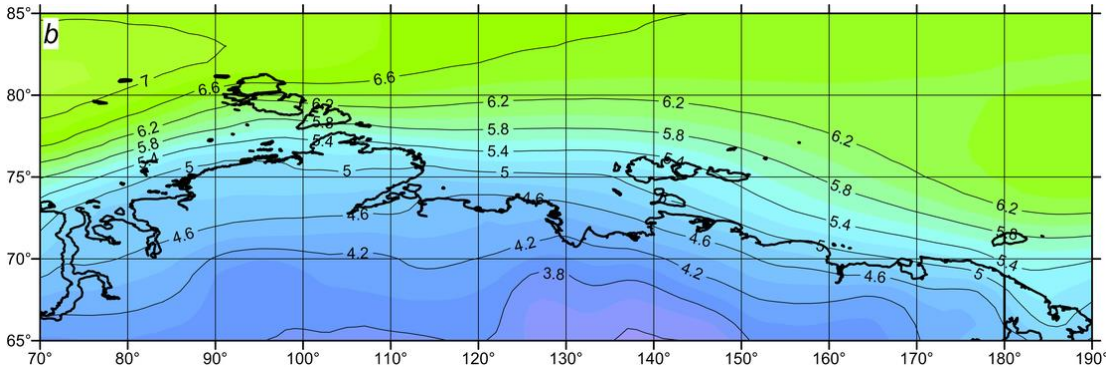
Сценарные различия пока невелики. Потепление сильнее над акваториями.

Потепление к концу XXI века

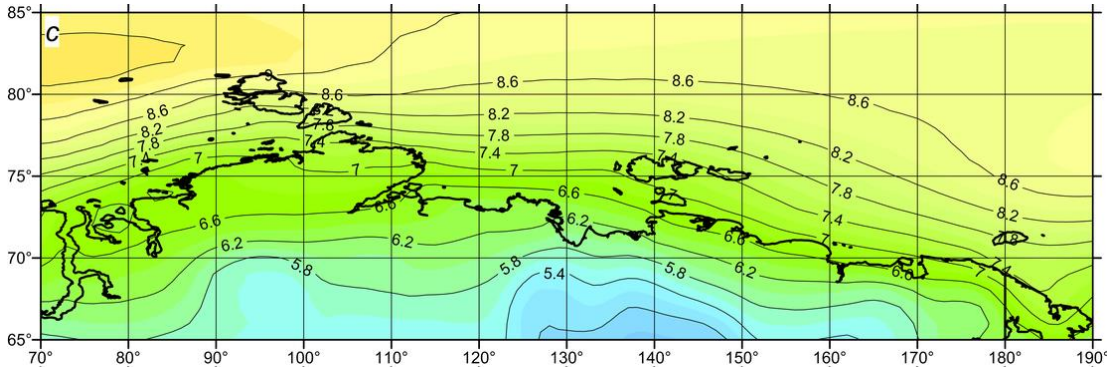
SSP1-2.6: 3,07 ± 1,61 °C



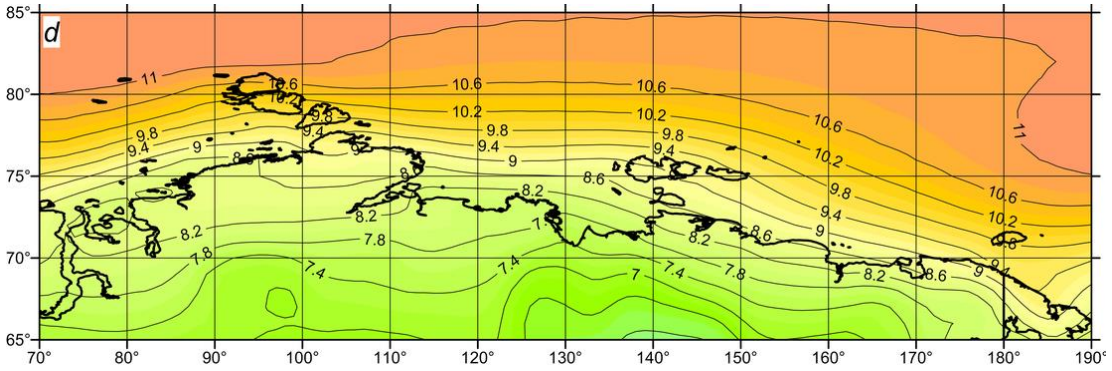
SSP2-4.5: 4,96 ± 1,75 °C



SSP3-7.0: 6,88 ± 2,08 °C



SSP5-8.5: 8,63 ± 2,36 °C



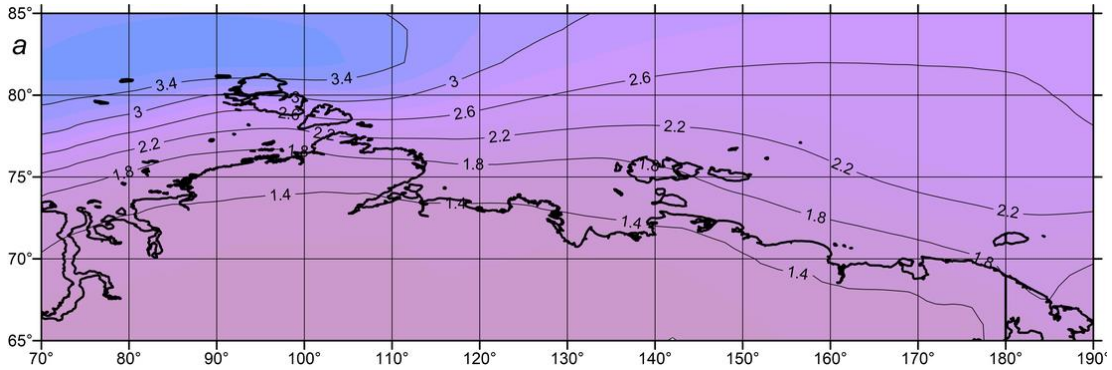


2070–2099 минус 1994–2023 гг. Средние по региону ± межмодельное σ.

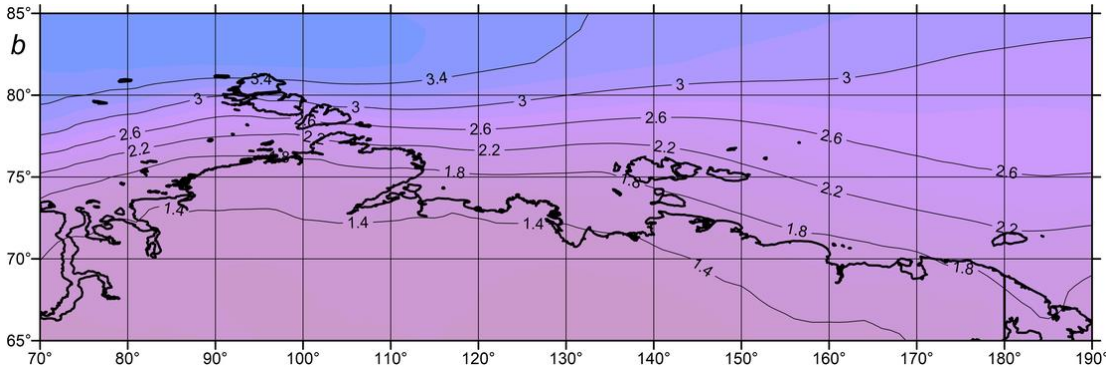
Сценарные различия возрастают. В SSP5-8.5 над морем потепление местами более 10 °C.

Межмодельный разброс оценок

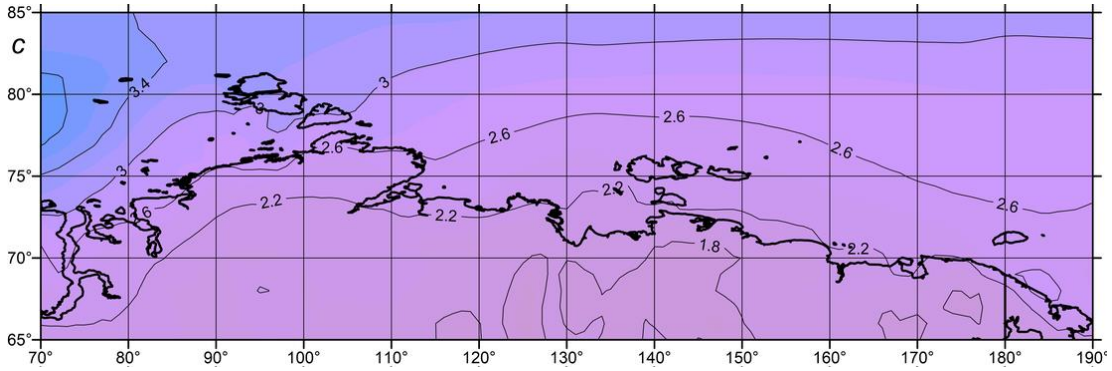
SSP1-2.6



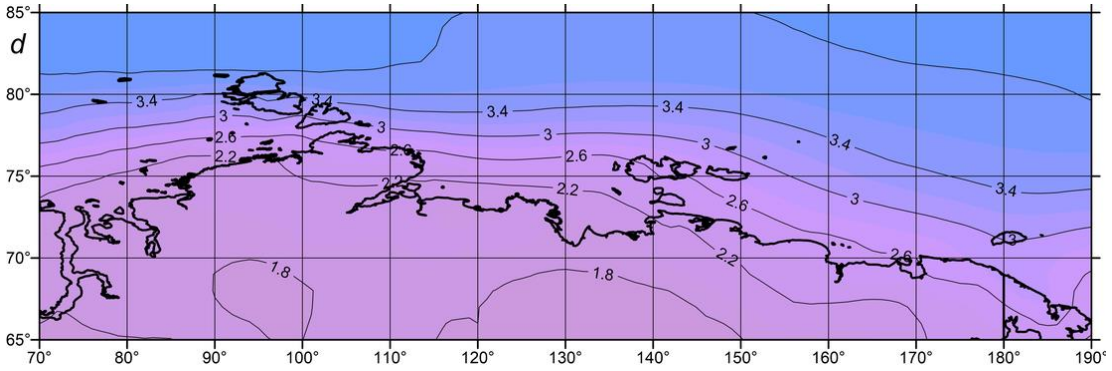
SSP2-4.5



SSP3-7.0



SSP5-8.5





Стандартное отклонение изменений ПТВ: 2070–2099 минус 1994–2023 гг.

Для SSP5-8.5 локальный разброс достигает 3,5–4 °C в зонах сильного потепления.

Средние изменения ПТВ по региону

Изменение относительно 1994–2023 гг., °C

Сценарий	2024–2053 гг.	2070–2099 гг.
SSP1-2.6	2,02 ± 1,02	3,07 ± 1,61
SSP2-4.5	2,29 ± 0,98	4,96 ± 1,75
SSP3-7.0	2,31 ± 1,16	6,88 ± 2,08
SSP5-8.5	2,81 ± 1,11	8,63 ± 2,36

Среднее по 33 моделям ± межмодельное стандартное отклонение.

Проекции не учитывают будущие вулканические извержения.
Осреднение по ансамблю сглаживает естественную климатическую изменчивость.

Основные выводы

1. Все шесть метеостанций показывают потепление. Средняя ПТВ региона выросла примерно на 2 °C от 1940–1969 к 1994–2023 гг.

2. Потепление сильнее над морем, особенно в Карском и Чукотском морях. Горные районы суши прогреваются слабее.

3. Ансамбль CMIP6 воспроизводит крупномасштабную картину изменений, но занижает потепление над морем и завышает над сушей.

4. По моделям, в 2024–2053 гг. ожидается потепление на 2,02–2,81 °C, а в 2070–2099 гг. на 3,07–8,63 °C в зависимости от сценария.

Будущие изменения приведены относительно 1994–2023 гг.

Серых И.В., Трусенкова О.О., Скакун А.А. Потепление климата российской восточной Арктики по ансамблю моделей CMIP6 за 1940–2099 гг. Российская Арктика. 2026. Т. 8, № 1. С. 37–53.

Госзадания ИО РАН № FMWE-2024-0017 и ТОИ ДВО РАН № 124022100079-4