

*V Всероссийская конференция с международным участием «Турбулентность, динамика атмосферы и климата»
посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова*

Изменения климата западной части российской Арктики в 1940-2099 годы по наблюдениям, реанализам и моделям CMIP6

Серых Илья Викторович, ИО РАН

Толстиков Алексей Владимирович, ИВПС КарНЦ РАН



20 ноября 2024 г.
Москва

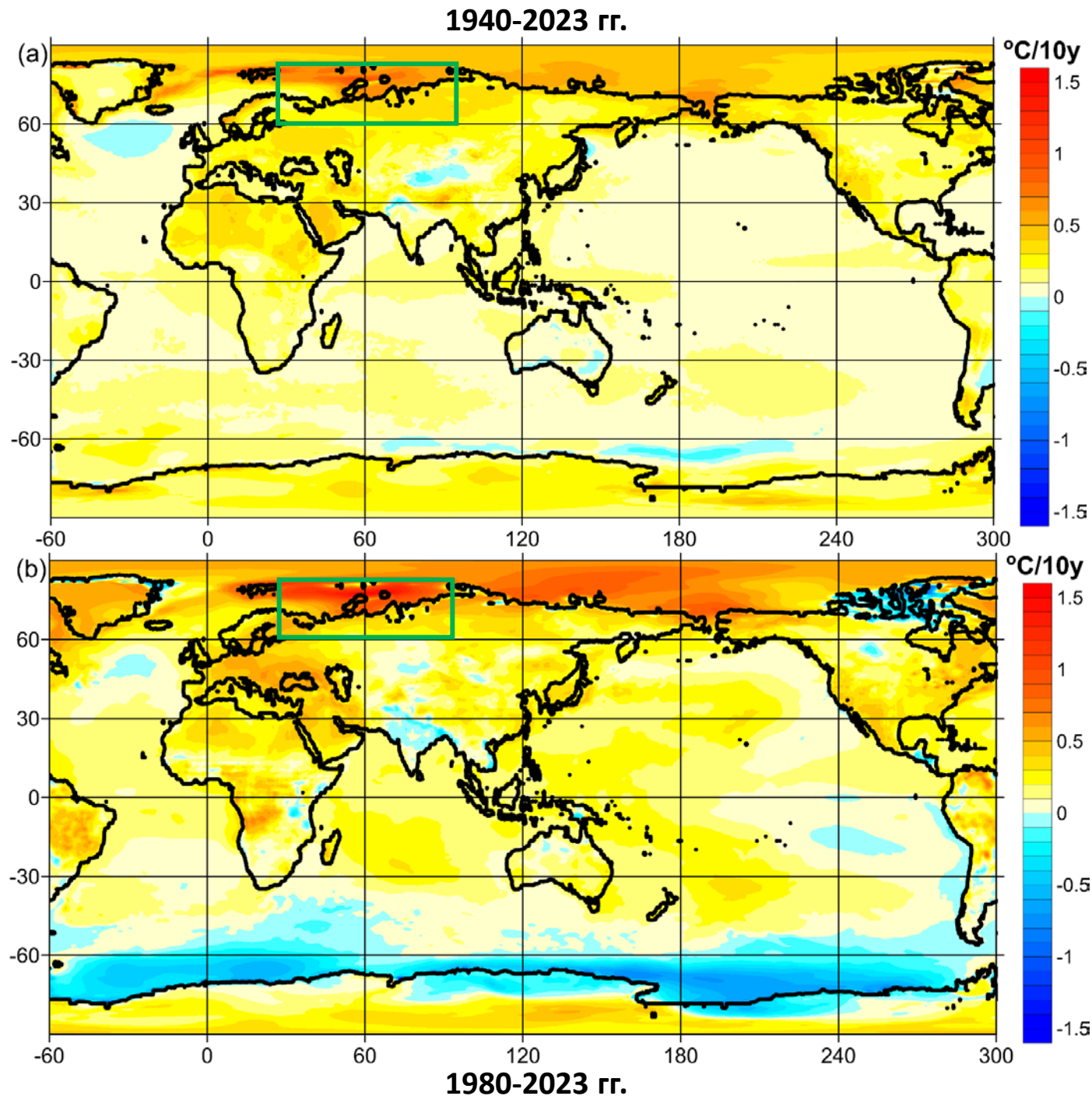


Арктическое усиление потепления

Поля изменений, оцененных линейными трендами ($^{\circ}\text{C}$ за 10 лет), среднегодовых аномалий приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) по данным ECMWF ERA5 за 1940-2023 гг. (a) и по данным NASA MERRA-2 за 1980-2023 гг. (b).

На северо-востоке Баренцева моря скорость роста ПТВ в 1940-2023 гг. составила $0.5\text{--}1.0^{\circ}\text{C}$ за 10 лет, а в 1980-2023 гг.: $0.8\text{--}1.4^{\circ}\text{C}$ за 10 лет.

Скорость роста ПТВ в Арктике превышает скорость роста ПТВ во всех других регионах Земли («Arctic amplification»).



Обратные положительные связи изменения приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) в западной части российской Арктики

- Альбедная положительная обратная связь:

рост ПТВ → сокращение площади морского льда [Серых и др., 2022] и снежного покрова [Серых и Толстиков, 2022, ч2] → уменьшение отражающей способности поверхности (альбедо) → увеличение поглощаемой поверхностью воды и суши солнечной радиации → рост ПТВ.

- Положительная обратная связь с циркуляцией атмосферы:

рост ПТВ → изменение циркуляции атмосферы (усиление в западной части российской Арктики южного ветра зимой и западного ветра летом) [Серых и Толстиков, 2022, ч1] → увеличение адвекции тепла и влаги в исследуемый регион в основном из Северной Атлантики → рост ПТВ.

- Положительная обратная связь с влажностью воздуха:

рост ПТВ → увеличение испарения с поверхности Баренцева, Белого и Карского морей, а также переноса влаги из Северной Атлантики → повышение влажности воздуха в исследуемом регионе [Серых и Толстиков, 2022, ч2] → увеличение нисходящей длинноволновой радиации из-за усиления парникового эффекта от повышения концентрации водяного пара в атмосфере → рост ПТВ.

Материалы и методы

Использованы среднемесячные данные приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ECMWF Reanalysis v5 (ERA5) на сетке $0,25 \times 0,25^\circ$ за 1940-2023 гг.

Анализовалась ПТВ региона западной части российской Арктики ($60-80^\circ$ с. ш., $30-90^\circ$ в. д.).

Изменения ПТВ оценивались с помощью разностей средних значений за 30-летние периоды.

Для проверки полученных результатов использованы среднемесячные данные метеостанций, расположенных в рассматриваемом регионе.

Для анализа произошедших и возможных будущих изменений ПТВ использованы результаты модельных экспериментов Historical и SSP шестого этапа Проекта сравнения совместных климатических моделей CMIP (Coupled Model Intercomparison Project – CMIP6).



Эксперименты CMIP6 с различными сценариями радиационного форсинга

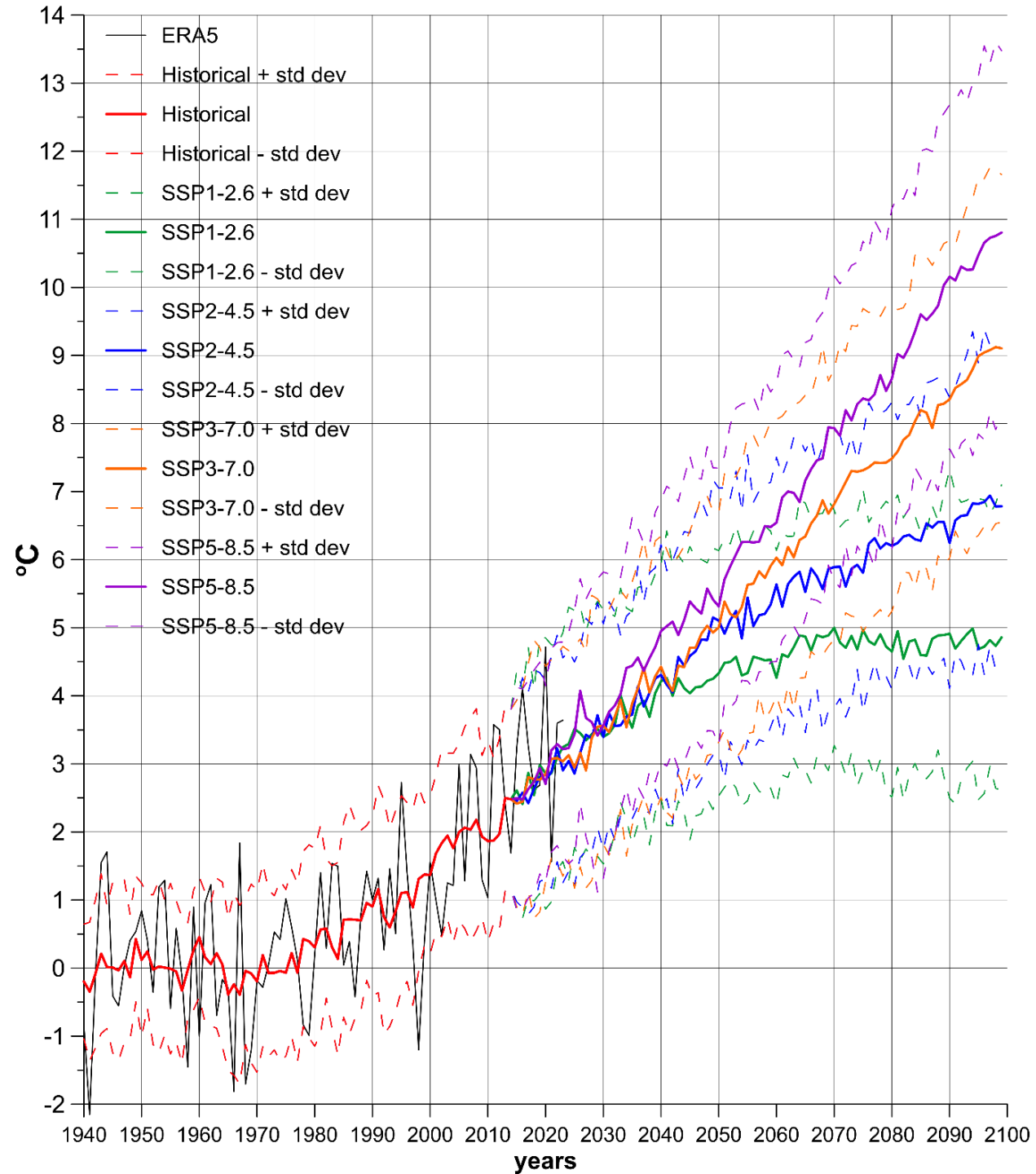
Сценарий	Период, гг.	Форсинг, Вт/м ²	Краткое описание (по терминологии IPCC)
Historical	1850–2014	~2.1	Воспроизведение произошедших изменений климата, зафиксированных по инструментальным наблюдениям
SSP1-2.6	2015–2100	2.6	Устойчивость («зеленый путь») – немедленное существенное сокращение выбросов CO ₂ и их полное обнуление к 2075 г.
SSP2-4.5	2015–2100	4.5	Продолжение текущих тенденций («умеренный путь») – выбросы CO ₂ постепенно сокращаются на протяжении XXI века
SSP3-7.0	2015–2100	7.0	Региональное соперничество («каменистый путь») – выбросы CO ₂ растут и к концу XXI века удваиваются
SSP5-8.5	2015–2100	8.5	Продолжение социально-экономического развития на основе использования ископаемого топлива («скоростное шоссе») – выбросы CO ₂ растут и к концу XXI века утраиваются

Изменения ПТВ за 1940-2099 гг.

Графики изменений годовых аномалий средней приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) западной части российской Арктики (60-80° с. ш., 30-90° в. д.) по данным ERA5 (черный) за 1940-2023 гг., и по результатам экспериментов моделей CMIP6 для сценариев: Historical (красный) за 1940-2014 гг., SSP1-2.6 (зеленый), SSP2-4.5 (синий), SSP3-7.0 (оранжевый) и SSP5-8.5 (фиолетовый) за 2015-2099 гг. Границы диапазонов изменчивости 33 моделей CMIP6 (стандартное отклонение) представлены пунктирными линиями.

Наблюдается рост средней ПТВ исследуемого региона на 2-4°C примерно с середины 1970-х по 2023 г.

Модели CMIP6 на основе различных сценариев SSP выбросов парниковых газов дают заметно различающиеся прогнозы повышения ПТВ исследуемого региона к концу XXI в.: от 2.7°C по сценарию SSP1-2.6 до 7.3°C по сценарию SSP5-8.5.

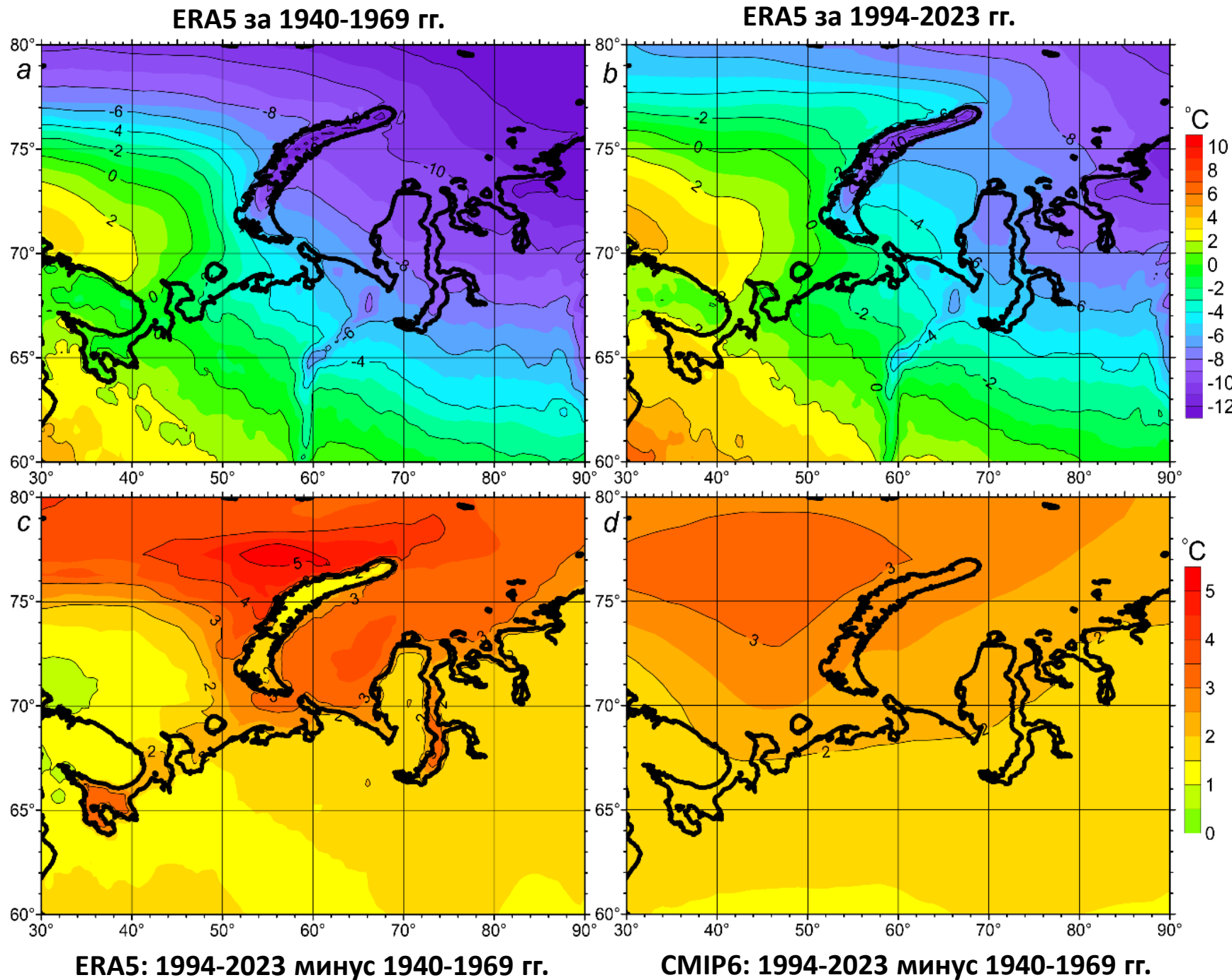


Изменения ПТВ за 1940-2023 гг.

Поля средней приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) по данным ERA5 за 1940-1969 гг. (a), за 1994-2023 гг. (b), разность между ними (c), средняя разность между этими периодами по 33 моделям CMIP6 (эксперименты Historical и SSP2-4.5) (d).

Рост ПТВ заметнее всего проявился в Белом и Карском морях, а также на севере и востоке Баренцева моря.

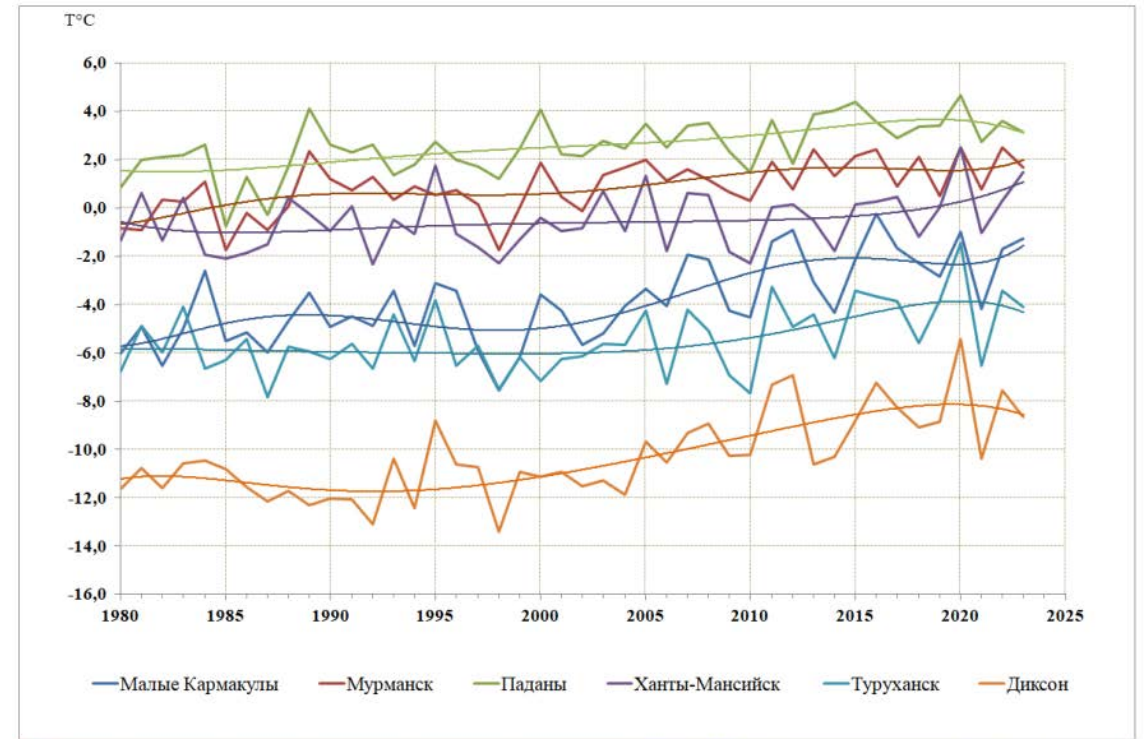
Среднее по 33 моделям CMIP6 поле изменений ПТВ оказалось достаточно близко к аналогичному полю по данным ERA5.



Графики среднегодовой температуры воздуха по данным 6 метеостанций за 1980-2023 гг., их полиномиальные тренды 6-степени и схема расположения станций

По данным шести метеостанций за 1980-2023 гг. изменение приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) исследуемого региона характеризуется положительным трендом.

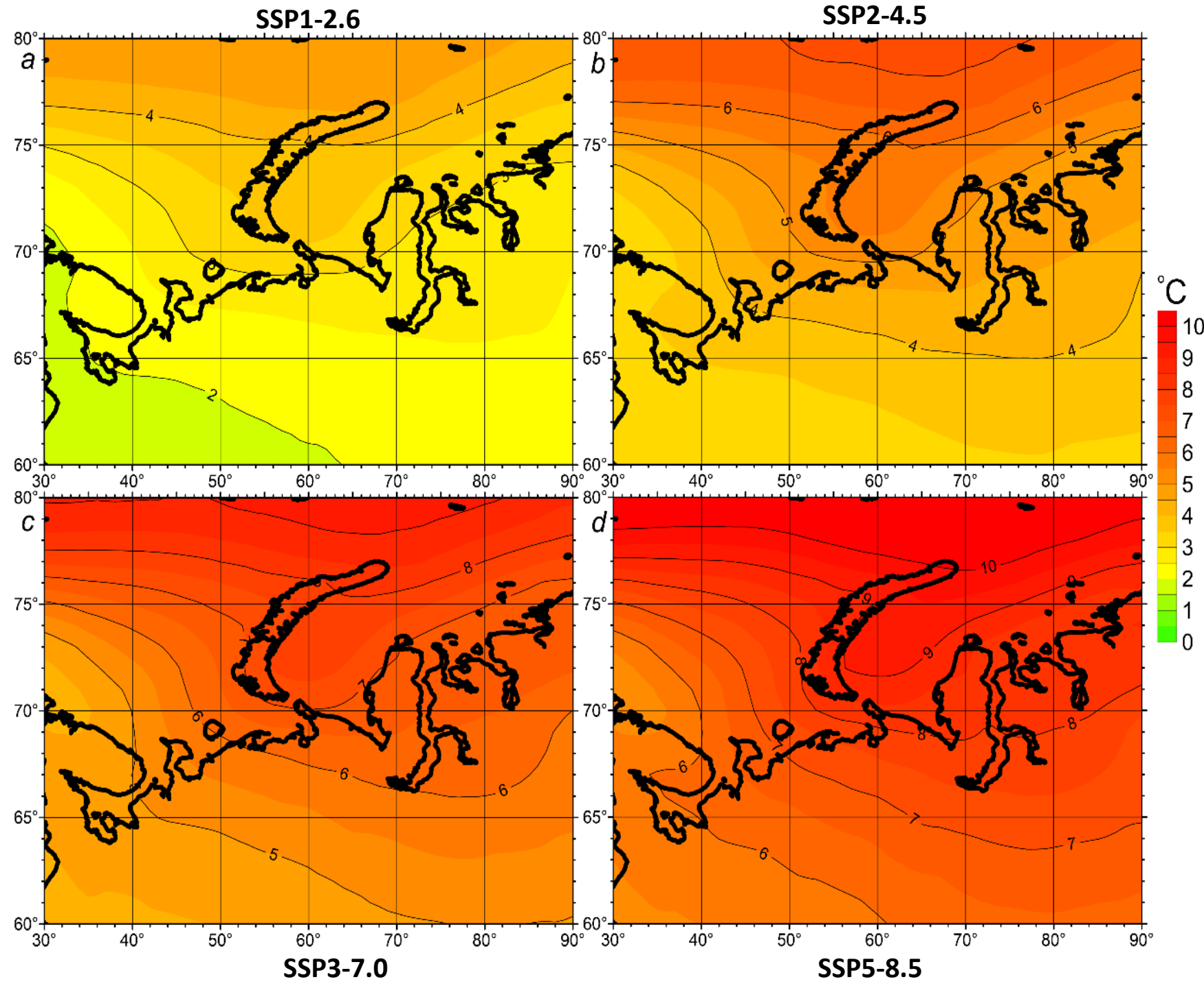
Теплые годы за период 1980-2023 гг. приходятся на конец 1980-х годов, середину 1990-х, 2000, 2005, 2011, 2016 гг., особенно выделяется 2020 г., холодные годы — на середину 1980-х, начало и конец 1990-х, 2003, 2010, 2014, 2021 г.



Изменения ПТВ к концу XXI века

Поля изменений средней приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) по 33 моделям CMIP6 между 1994-2023 и 2070-2099 гг. по результатам сценариев Historical и SSP1-2.6 (a), SSP2-4.5 (b), SSP3-7.0 (c), SSP5-8.5 (d).

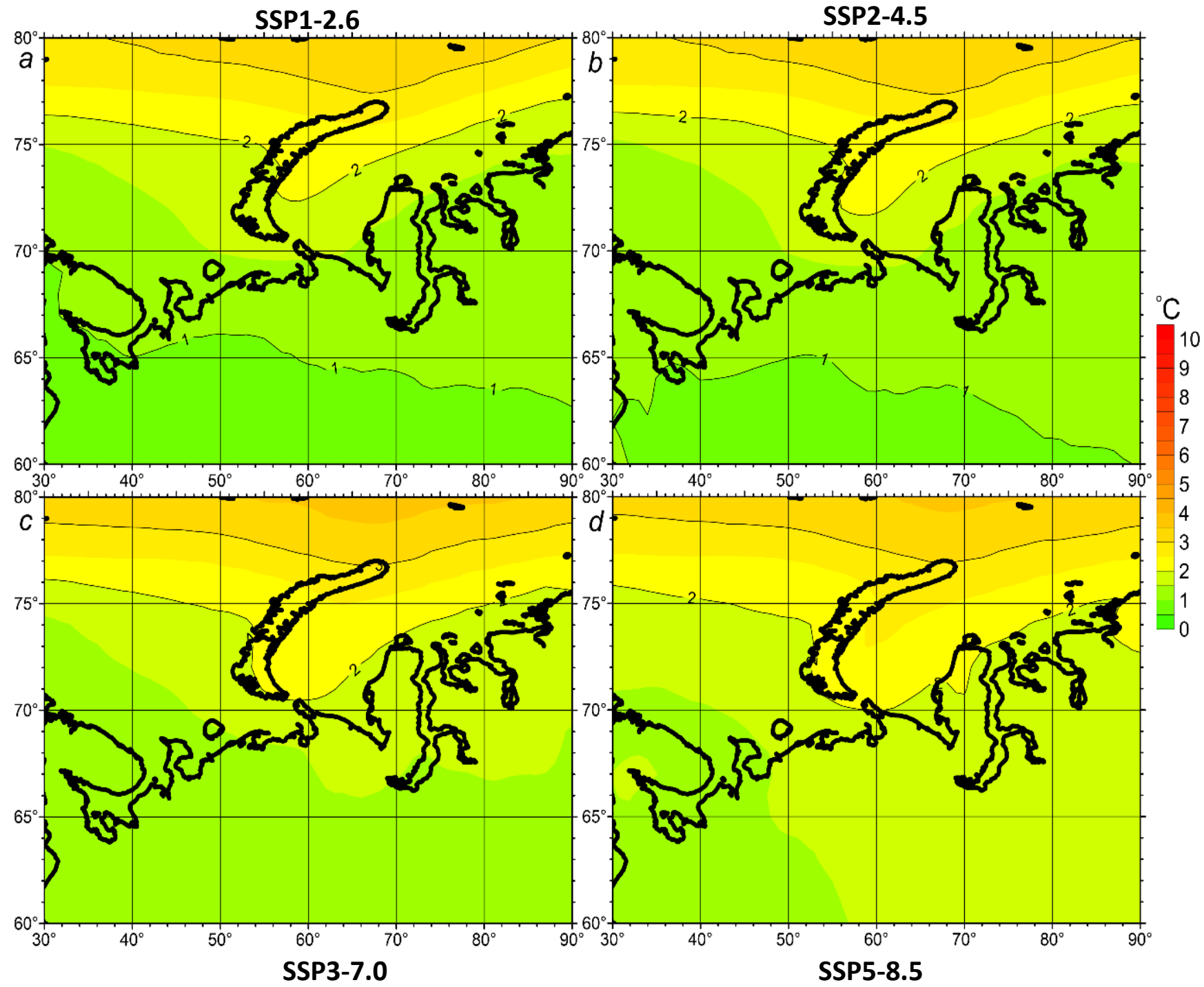
В зависимости от сценария SSP увеличение ПТВ западной части российской Арктики к концу XXI в. может составить от 2-4°C до 6-10°C с более сильным ростом ПТВ на севере исследуемого региона.



Оценка ошибок

Поля среднеквадратических отклонений для изменений средней приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) по 33 моделям CMIP6 между 1994-2023 и 2070-2099 гг. по результатам сценариев Historical и SSP1-2.6 (a), SSP2-4.5 (b), SSP3-7.0 (c), SSP5-8.5 (d).

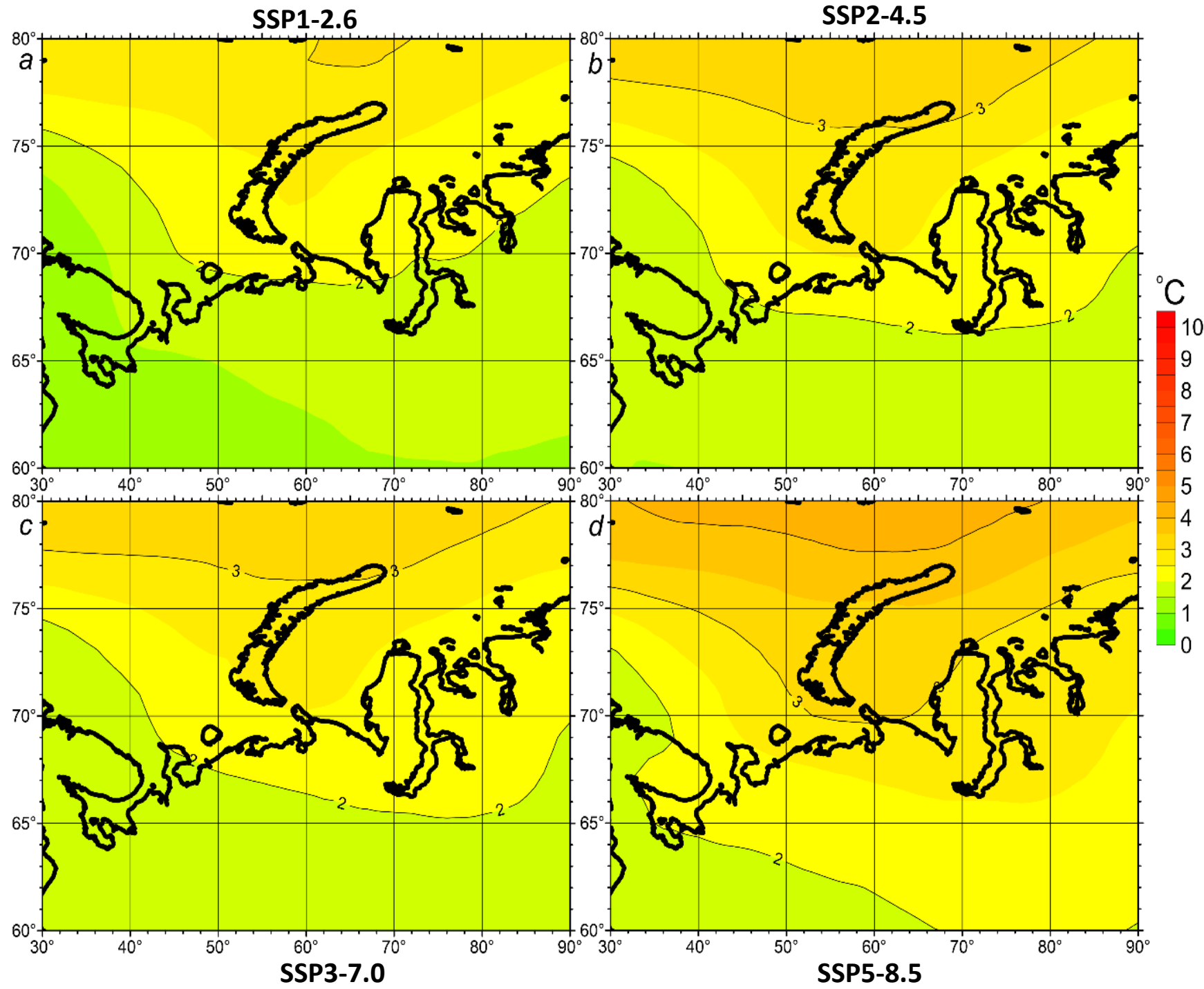
Межмодельный разброс слабо увеличивается от сценария SSP1-2.6 к сценарию SSP5-8.5, с более высокими значениями на севере исследуемого региона.



Изменения ПТВ к середине XXI века

Поля изменений средней приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) по 33 моделям CMIP6 между 1994-2023 и 2024-2053 гг. по результатам сценариев Historical и SSP1-2.6 (a), SSP2-4.5 (b), SSP3-7.0 (c), SSP5-8.5 (d).

В малой зависимости от будущего сценария SSP модели CMIP6 прогнозируют, что в ближайшие 30 лет средняя ПТВ западной части российской Арктики вырастет приблизительно на 2-3°C, причем на севере исследуемого региона ее рост может составить более 3°C, а на юге — около 2°C.



Изменения ПТВ

Изменения средней приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) в регионе западной части российской Арктики (60-80° с. ш., 30-90° в. д.) по различным сценариям и 33 моделям CMIP6 (°C).

По сценарию SSP1-2.6 средняя ПТВ исследуемого региона вырастет к концу XXI в. в среднем на 2.7 °C, а по сценарию SSP5-8.5 — на 7.3 °C.

В ближайшие 30 лет потепление составит от 1.8 °C по сценарию SSP1-2.6 до 2.5 °C по сценарию SSP5-8.5.

Организа-ция	Модель	Измене-ния между 1940—1969 и 1994—2023 гг.	Изменения между 1994—2023 и 2070—2099 гг.				Изменения между 1994—2023 и 2024—2053 гг.			
		Historical и SSP2 4.5	SSP1 2.6	SSP2 4.5	SSP3 7.0	SSP5 8.5	SSP1 2.6	SSP2 4.5	SSP3 7.0	SSP5 8.5
AS-RCEC	TaiESM1	2,26	3,39	5,29	6,89	8,38	2,34	1,90	2,11	2,56
AWI	AWI-CM-1-1-MR	2,02	2,23	4,03	5,80	7,29	2,05	2,36	2,05	2,74
BCC	BCC-CSM2-MR	1,46	2,31	3,39	6,44	7,18	1,39	1,44	2,28	2,34
CAMS	CAMS-CSM1-0	1,12	1,38	2,38	3,33	4,37	1,27	0,90	1,28	0,88
CAS	CAS-ESM2-0	0,92	4,05	5,61	5,36	7,50	2,04	2,00	1,76	2,54
CAS	FGOALS-f3-L	2,49	1,84	4,09	6,48	8,03	1,69	2,60	2,14	3,30
CAS	FGOALS-g3	1,37	1,25	3,09	4,41	5,62	0,52	1,48	1,81	1,66
CCCma	CanESM5	2,64	4,19	5,98	7,96	9,10	3,36	3,22	4,00	3,94
CCCma	CanESM5-CanOE	2,89	4,05	5,57	8,23	9,37	3,19	3,64	4,06	4,09
CMCC	CMCC-CM2-SR5	1,77	2,69	4,65	5,32	6,86	1,54	1,41	1,64	2,00
CMCC	CMCC-ESM2	1,20	3,85	4,86	5,29	6,97	1,46	1,84	1,96	1,52
CNRM-CERFACS	CNRM-CM6-1	2,77	3,38	4,94	7,29	8,55	1,49	1,74	1,15	1,44
CNRM-CERFACS	CNRM-CM6-1-HR	2,34	3,36	4,70	6,63	7,65	2,27	2,22	2,15	2,77
CNRM-CERFACS	CNRM-ESM2-1	3,23	3,02	4,85	6,31	7,61	-0,11	0,79	0,80	2,01
CSIRO-ARCCSS	ACCESS-CM2	1,42	4,20	5,42	6,98	8,60	2,88	2,35	2,81	2,37
CSIRO	ACCESS-ESM1-5	2,29	2,52	3,88	5,00	6,06	0,58	1,74	0,63	1,69
EC-Earth-Consortium	EC-Earth3	5,27	2,60	4,99	7,29	9,13	2,74	2,58	3,00	4,12
EC-Earth-Consortium	EC-Earth3-Veg	4,29	3,40	5,32	7,57	9,07	1,30	2,32	1,92	3,50
INM	INM-CM4-8	0,74	1,62	3,07	4,41	5,65	0,36	1,49	0,97	1,46
INM	INM-CM5-0	1,66	1,33	3,43	4,93	5,79	1,81	1,15	1,93	2,66
IPSL	IPSL-CM6A-LR	2,82	3,09	4,86	6,40	8,30	1,58	1,93	2,12	2,10
MIROC	MIROC-ES2L	1,95	3,37	5,36	6,82	8,13	2,44	2,76	2,28	3,59
MIROC	MIROC6	1,58	3,98	5,18	6,08	7,93	2,55	2,54	2,63	2,72
MOHC	UKESM1-0-LL	2,18	6,37	8,18	10,07	12,20	4,50	4,59	4,77	5,50
MPI-M	MPI-ESM1-2-LR	1,93	1,57	3,63	5,22	6,21	1,59	2,37	1,93	1,85
MRI	MRI-ESM2-0	1,36	1,76	3,23	4,49	4,95	1,85	2,15	2,49	2,80
NASA-GISS	GISS-E2-1-G	1,18	2,58	3,14	4,64	5,00	2,19	1,98	1,43	2,22
NCAR	CESM2	1,80	2,13	2,97	4,37	6,55	2,08	1,64	1,29	2,58
NCAR	CESM2-WACCM	1,66	1,80	3,29	5,28	7,46	1,42	1,74	1,79	2,31
NCC	NorESM2-LM	1,90	0,54	2,16	3,44	5,03	0,48	0,64	0,86	0,73
NCC	NorESM2-MM	1,40	0,82	2,83	5,33	5,46	1,29	1,32	1,67	1,55
NIMS-KMA	KACE-1-0-G	2,74	4,09	5,46	7,84	9,26	3,75	4,05	4,56	5,04
NOAA-GFDL	GFDL-ESM4	0,21	1,77	3,31	4,86	5,55	1,35	2,11	1,29	1,91
Минимум		0,21	0,54	2,16	3,33	4,37	-0,11	0,64	0,63	0,73
Максимум		5,27	6,37	8,18	10,07	12,20	4,50	4,59	4,77	5,50
Стандарт-ное откло-нение		0,99	1,24	1,27	1,48	1,69	0,99	0,87	1,02	1,10
Среднее		2,03	2,74	4,34	5,96	7,30	1,86	2,09	2,11	2,56

Заключения

- По реанализу ERA5 показано увеличение приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) западной части российской Арктики (ЗЧРА) на 2-4 °С с середины 1970-х по 2023 г., которое заметнее всего проявилось на севере и востоке Баренцева моря, а также в Белом и Карском морях.
- Данные расположенных в ЗЧРА метеостанций подтвердили увеличение ПТВ.
- Увеличение ПТВ по модельному эксперименту Historical соответствует данным наблюдений.
- Модели CMIP6 в зависимости от сценария SSP прогнозируют увеличение ПТВ к концу XXI века от 2-4 °С до 6-10 °С, с более сильным повышением на севере ЗЧРА.
- В ближайшие 30 лет потепление составит 2-3°С в малой зависимости от сценария SSP, причем на севере ЗЧРА увеличение ПТВ может составить более 3°С, а на юге – около 2°С.
- Разница средней ПТВ между севером и югом ЗЧРА сократится на протяжении XXI в. при любом из рассмотренных сценариев SSP.
- Происходящее изменение климата ЗЧРА можно назвать его «атлантификацией».

Список литературы

1. Серых И.В., Толстиков А.В. Климатические изменения температуры воздуха западной части российской Арктики в 1940–2099 гг. по данным ERA5 и моделям CMIP6 // Арктика: экология и экономика. 2024. Т. 14, № 3. С. 334–349.
2. Серых И.В., Костяной А.Г. Изменения параметров экстремальных температурных событий западной части Российской Арктики по данным реанализов ERA5 и MERRA-2 в 1980–2022 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. Т. 69, № 4. С. 464–485.
3. Серых И.В., Толстиков А.В. Изменения климата западной части Российской Арктики в 1980–2021 гг. – Ч. 1: Температура воздуха, осадки, ветер // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68, № 3. С. 258–277.
4. Серых И.В., Толстиков А.В. Изменения климата западной части Российской Арктики в 1980–2021 гг. – Ч. 2: Температура почвы, снег, влажность // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68, № 4. С. 352–369.
5. Серых И.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Костяная Е.А. О переходе температурного режима региона Белого моря в новое фазовое состояние // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 1. С. 98–111.
6. Толстиков А.В., Серых И.В., Балаганский А.Ф. Климатические изменения стока рек и количества осадков в регионе Белого моря // Арктика: экология и экономика. 2022. Т. 12. № 4. С. 464–474.
7. Серых И.В., Костяной А.Г. О климатических изменениях температуры Баренцева моря и их возможных причинах // Глава в монографии «Система Баренцева моря» под редакцией Лисицина А.П. Москва. 2021. С. 166–179.
8. Серых И.В., Толстиков А.В. О причинах долгопериодной изменчивости приповерхностной температуры воздуха над Белым морем // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2020. № 4. С. 83–95.
9. Serykh I.V., Kostianoy A.G. Seasonal and interannual variability of the Barents Sea temperature // Ecologica Montenegrina. 2019. Vol. 25. P. 1–13.
10. Серых И.В., Толстиков А.В. О причинах климатической изменчивости скорости ветра в районе Белого моря // Вестник Тверского государственного университета. Серия: География и геоэкология. 2019. № 4 (28). С. 43–56.