



Двадцать вторая международная конференция "СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"



Дистанционные методы исследования атмосферных и климатических процессов

Устойчивый ступенчатый скачок зимнего потепления Арктики в 2005 году, связанный с возросшим нисходящим длинноволновым потоком радиации при ясном небе

Докладчик: Латонин Михаил Михайлович¹ (mikhail.latonin@niersc.spb.ru)

¹Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена, Санкт-Петербург, Россия

*Исследование поддержано Российским научным фондом, № проекта 23-77-01046
(<https://rscf.ru/project/23-77-01046/>)*

Москва, Россия
11–15 ноября 2024 г.

Актуальность исследования

- В последние десятилетия человечество живёт в эпоху глобального потепления климата. При этом в среднем темпы потепления в Арктике в разы превышают среднемировые (Rantanen et al., 2022). Такое свойство климатической системы Земли получило название Арктического усиления глобального потепления.
- При этом потепление Арктики носит неоднородный пространственно-временной характер (Isaksen et al., 2022). Поэтому важно исследовать детальную структуру и механизмы климатических изменений в Арктике с использованием различных современных данных, основанных на измерениях и моделях.

Цель и задачи исследования

Цель

Выявить на основе данных климатического реанализа ERA5 пространственно-временную структуру климатических изменений в Арктике (67° с.ш.– 90° с.ш.) за период 1959–2022 гг. и провести верификацию результатов на основе доступных спутниковых наблюдений, уделяя особое внимание взаимосвязи между радиационными процессами в атмосфере и температурой поверхности Земли.

Задачи

1. По данным реанализа ERA5 для зимнего и летнего сезонов за период 1959–2022 гг. вычислить годы ступенчатых изменений для каждой точки сетки всей Арктики по каждой изучаемой переменной.
2. Оценить статистическую значимость выявленных возможных переходов из одного состояния климатической системы в другое. На основе повторяющегося времени ступенчатых изменений и их значимости по двум сезонам, выявить однородные районы Арктики.
3. Проанализировать характер пространственно-временных климатических изменений и взаимосвязь между параметрами.
4. Количественно оценить расхождения в результатах между данными реанализа ERA5 и данными, основанными на спутниковых наблюдениях.

Данные и методы

Исследовались следующие переменные за период 1959–2022 гг.:

- 1) Температура поверхности Земли (ТПЗ);
- 2) Приповерхностная температура воздуха (Т2м);
- 3) Средние поверхностные потоки нисходящей длинноволновой радиации при ясном небе (НДРЯН), нисходящей длинноволновой радиации при облачном небе (НДРОН) и нисходящей длинноволновой радиации при всём небе (НДРВН).
- 4) Общее содержание водяного пара в вертикальном столбе.

Каждый из параметров осреднялся за зимний сезон (декабрь–март) и летний сезон (июнь–сентябрь).

Данные реанализа ERA5 доступны в Copernicus Climate Change Service (<https://climate.copernicus.eu/climate-reanalysis>).

Полученные в каждой точке сетки Арктики временные ряды анализировались на возможные переходы из одного состояния климатической системы в другое с помощью модели ступенчатых изменений (Latonin et al., 2020). В этой модели момент ступенчатых изменений определяется итерациями по достижению минимального значения суммы квадратов отклонений двух частей временного ряда (S):

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_1} (Y_i - \bar{Y}_1)^2 + \sum_{i=n_1+1}^{n_2} (Y_i - \bar{Y}_2)^2}{n-1}} = \min, \quad (1)$$

где n_1 и n_2 — объёмы двух частей временного ряда, которые составляют исходный временной ряд объёмом n . Минимальный объём первой части временного ряда устанавливается равным $n_1 = 10$, для которого $n_2 = n - n_1$, а затем объём увеличивается: $n_1 = 11, 12, \dots, k$, где $k = n - 10$, при котором $n_2 = 10$. После того, как минимальная сумма найдена, соответствующий индекс присваивается году в исходном временном ряду.

Стандартное отклонение остатков ступенчатой модели для одной ступени и двух стационарных интервалов определяется по формуле:

$$\sigma_{\text{ступ.}} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2(n_1 - 1) + \sigma_2^2(n_2 - 1)}{(n_1 + n_2 - 1)}}, \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{ступ.}}$ — стандартное отклонение остатков ступенчатой модели; σ_1 и σ_2 — стандартные отклонения стационарных отрезков временного ряда; n_1 и n_2 — объёмы стационарных отрезков временного ряда.

Для количественной оценки отличий модели ступенчатых изменений от модели стационарного среднего относительная ошибка $\Delta_{\text{ступ.}}$ рассчитывается следующим образом:

$$\Delta_{\text{ступ.}} = \left(\frac{\sigma_y - \sigma_{\text{ступ.}}}{\sigma_y} \right) * 100\%, \quad (3)$$

где σ_y — стандартное отклонение исходного временного ряда (модель стационарного среднего).

Для оценки статистической значимости ступенчатых изменений во временном ряду применяется критерий Фишера, позволяющий количественно показать, является ли разница между остаточной дисперсией выбранной модели и дисперсией стационарной модели статистически значимой. Статистика критерия Фишера для ступенчатой модели относительно стационарной модели рассчитывается по следующей формуле:

$$F_{step} = \frac{\sigma_y^2}{\sigma_{step}^2}. \quad (4)$$

где σ_y — стандартное отклонение исходного временного ряда (модель стационарного среднего); $\sigma_{ступ.}$ — стандартное отклонение остатков ступенчатой модели.

Результаты

**1. Ступенчатые изменения в нисходящей
длинноволновой радиации при ясном небе и
температуре поверхности Земли и воздуха по данным
реанализа ERA5**

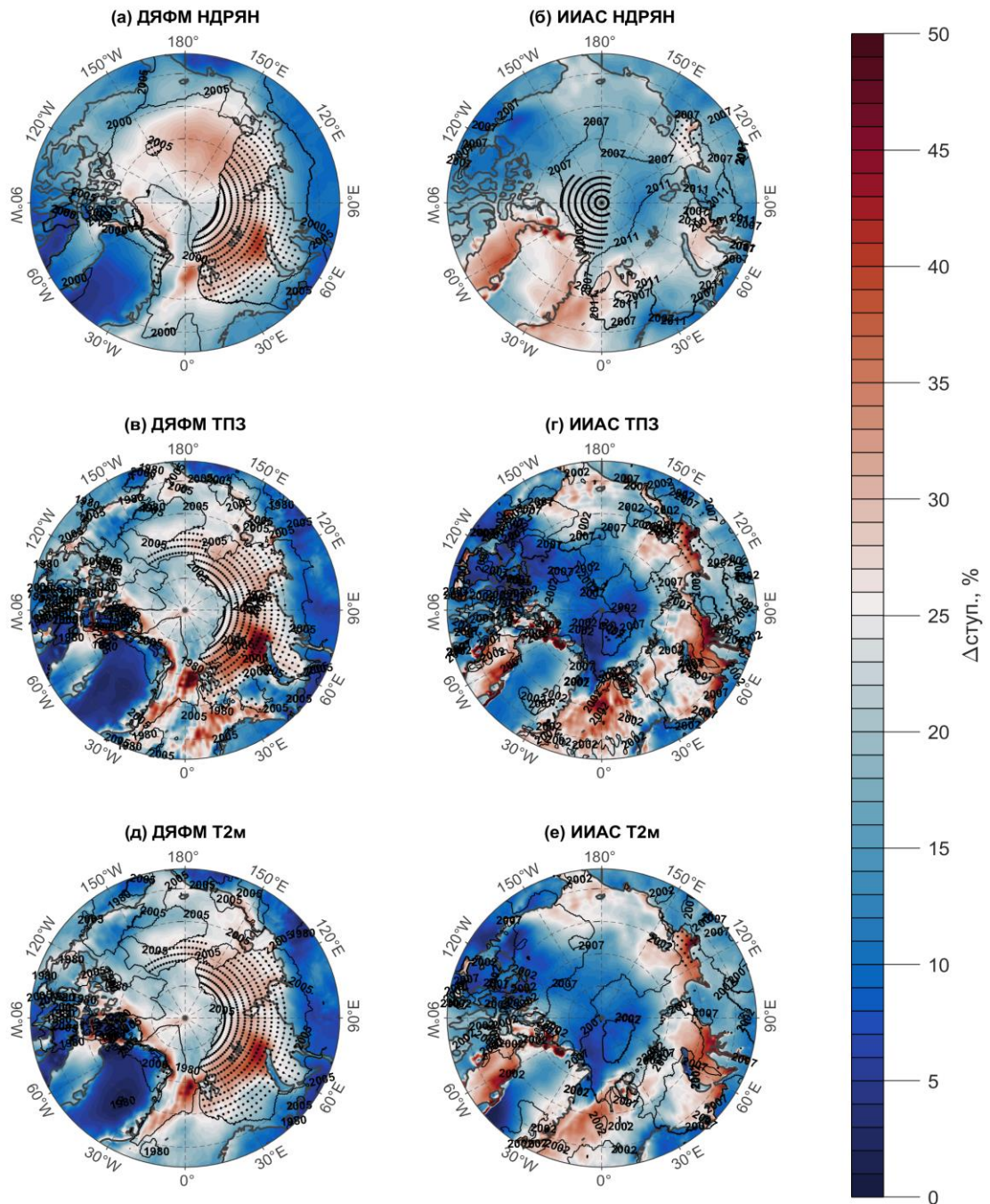


Рис. 1. Результаты применения ступенчатой модели к временным рядам нисходящей длинноволновой радиации при ясном небе (НДРЯН, а–б), температуры поверхности Земли (ТПЗ, в–г) и приповерхностной температуры воздуха (Т2м, д–е) в каждой точке сетки Арктики для зимнего сезона (слева) и для летнего сезона (справа). Области с оттенками цветов с соответствующей цветовой шкалой представляют собой относительные ошибки, обозначенные как $\Delta\text{степ}$ (эффективность ступенчатой модели). Контурные линии показывают два наиболее частых года ступенчатых изменений. Чёрные точки очерчивают регионы, где модель ступенчатых изменений статистически значима в соответствии с критерием Фишера на уровне значимости 5 % для 2005 года в зимний сезон и для 2007 года в летний сезон.

Рис. 2

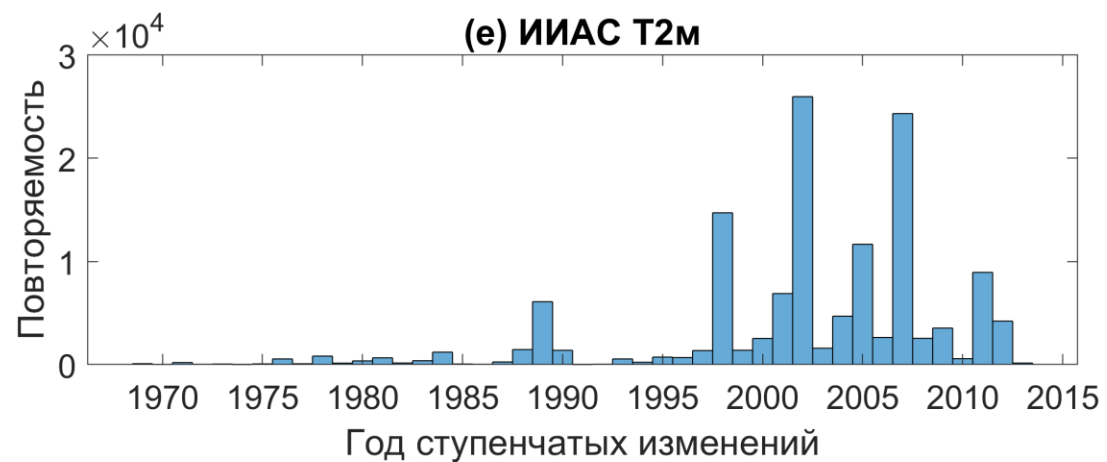
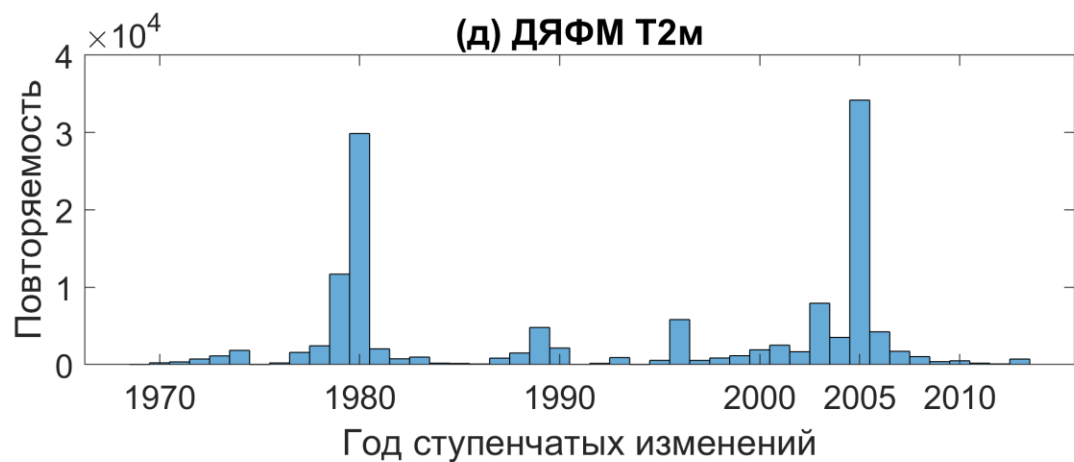
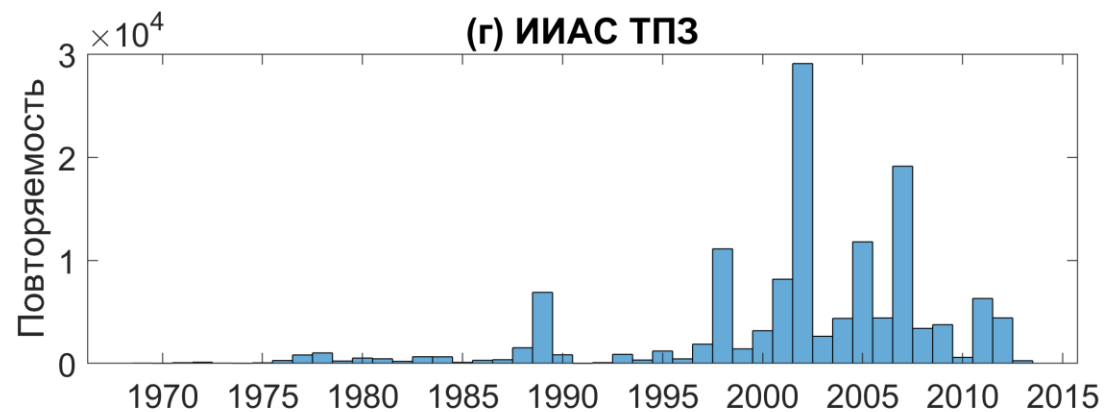
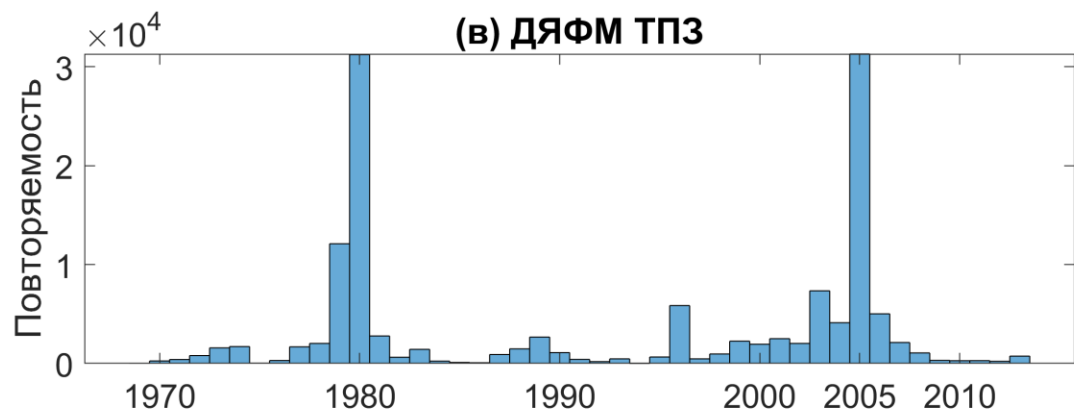
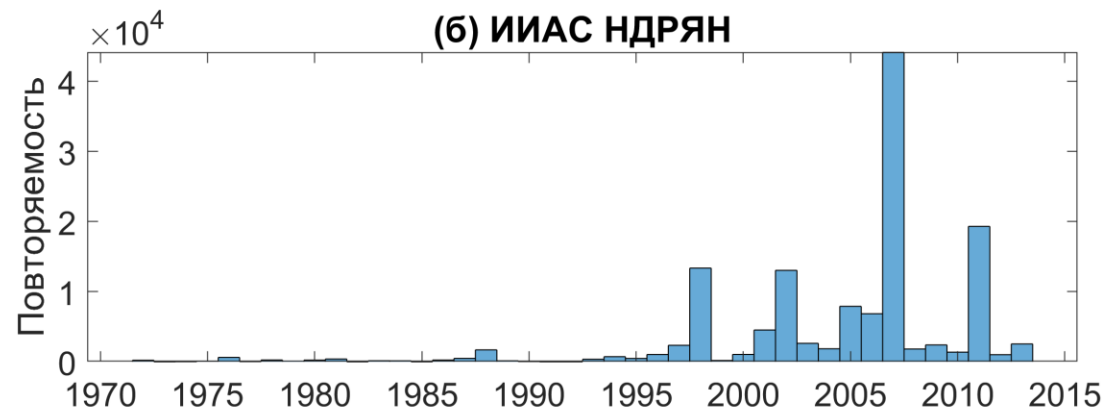
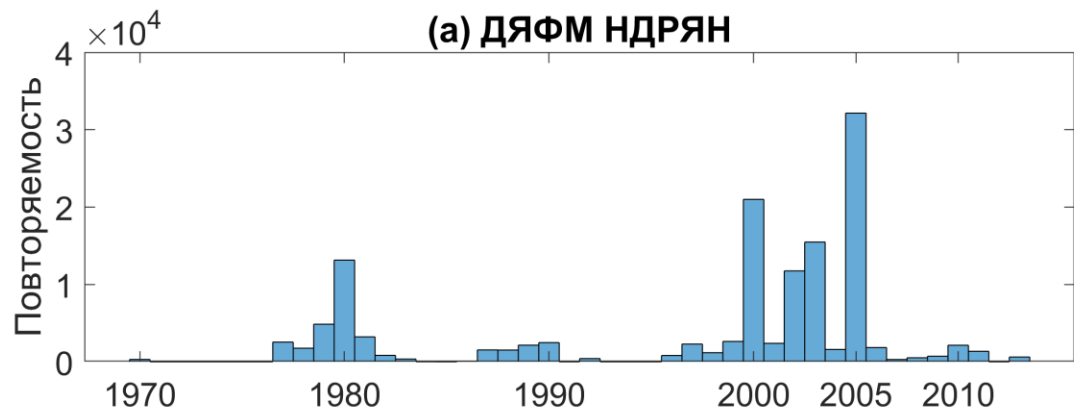


Рис. 3

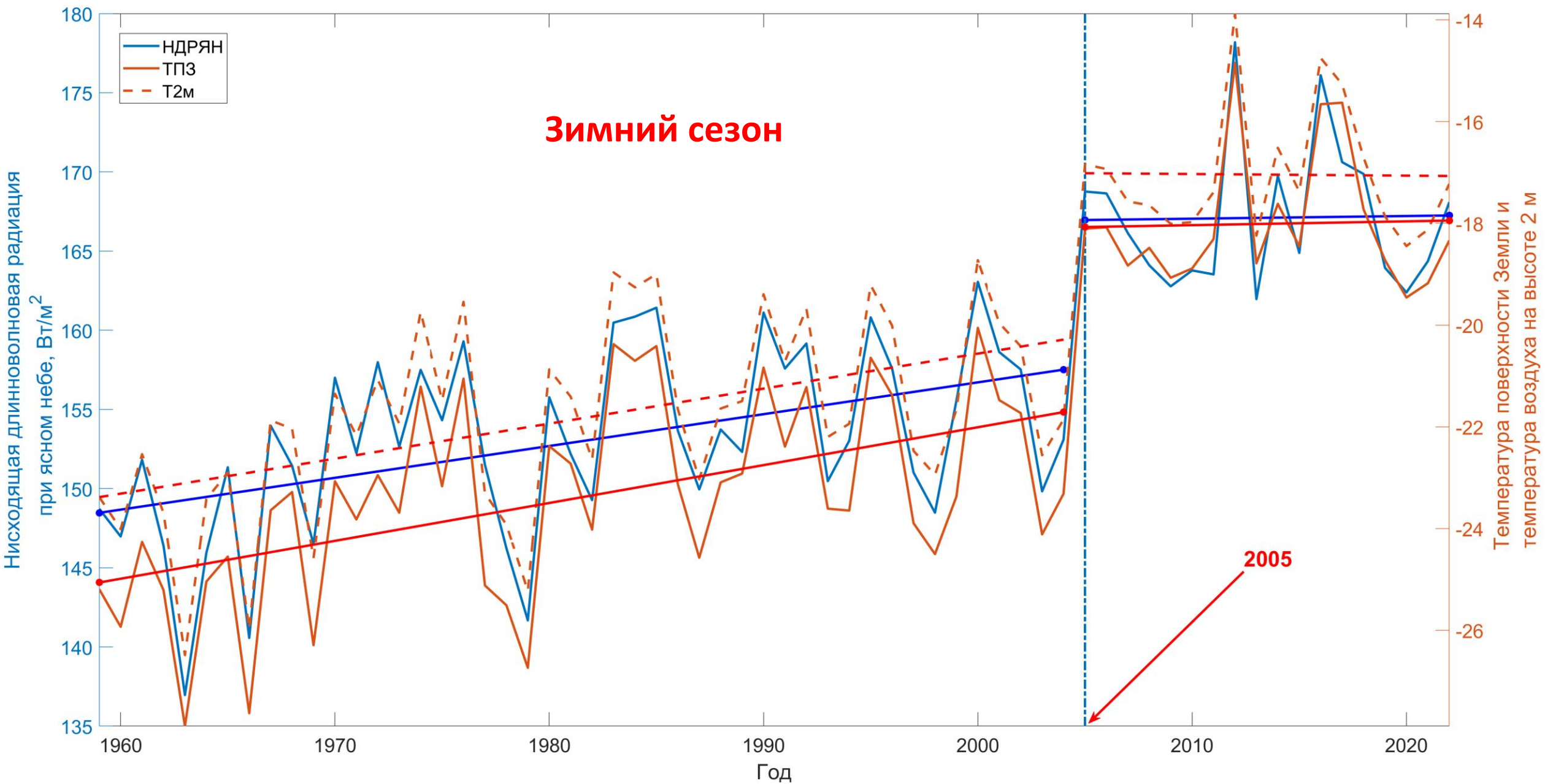


Таблица 1. Статистические характеристики для временных рядов нисходящей длинноволновой радиации при ясном небе (НДРЯН, Вт/м²), температуры поверхности Земли (ТПЗ, °С) и приповерхностной температуры воздуха (Т2м, °С), показанных на Рис. 3. Средние значения, стандартные отклонения и линейные тренды вычислены для периода 1959–2004 гг. (слева) и для периода 2005–2022 гг. (справа). Погрешности средних значений оценены на основе стандартной ошибки. Жирным шрифтом выделены статистически значимые линейные тренды на уровне значимости 5 %.

	НДРЯН		ТПЗ		Т2м	
	1959–2004	2005–2022	1959–2004	2005–2022	1959–2004	2005–2022
Среднее (Вт/м ² и °С)	152,99 ± 1,72	167,10 ± 2,29	–23,39 ± 0,57	–18,01 ± 0,65	–21,83 ± 0,55	–17,04 ± 0,63
Стандартное отклонение (Вт/м ² и °С)	5,81	4,61	1,92	1,31	1,86	1,26
Линейный тренд (Вт/м ² в год и °С в год)	0,20	0,02	0,07	0,01	0,07	0,00

Возрастанию средних зимних температур на 5 °С соответствовало возрастание поверхностного потока нисходящей длинноволновой радиации на 14 Вт/м².

**2. Ступенчатые изменения в нисходящей
длинноволновой радиации при всём небе (суммарной),
радиационном эффекте облаков и общем содержании
водяного пара в вертикальном столбе по данным
реанализа ERA5**

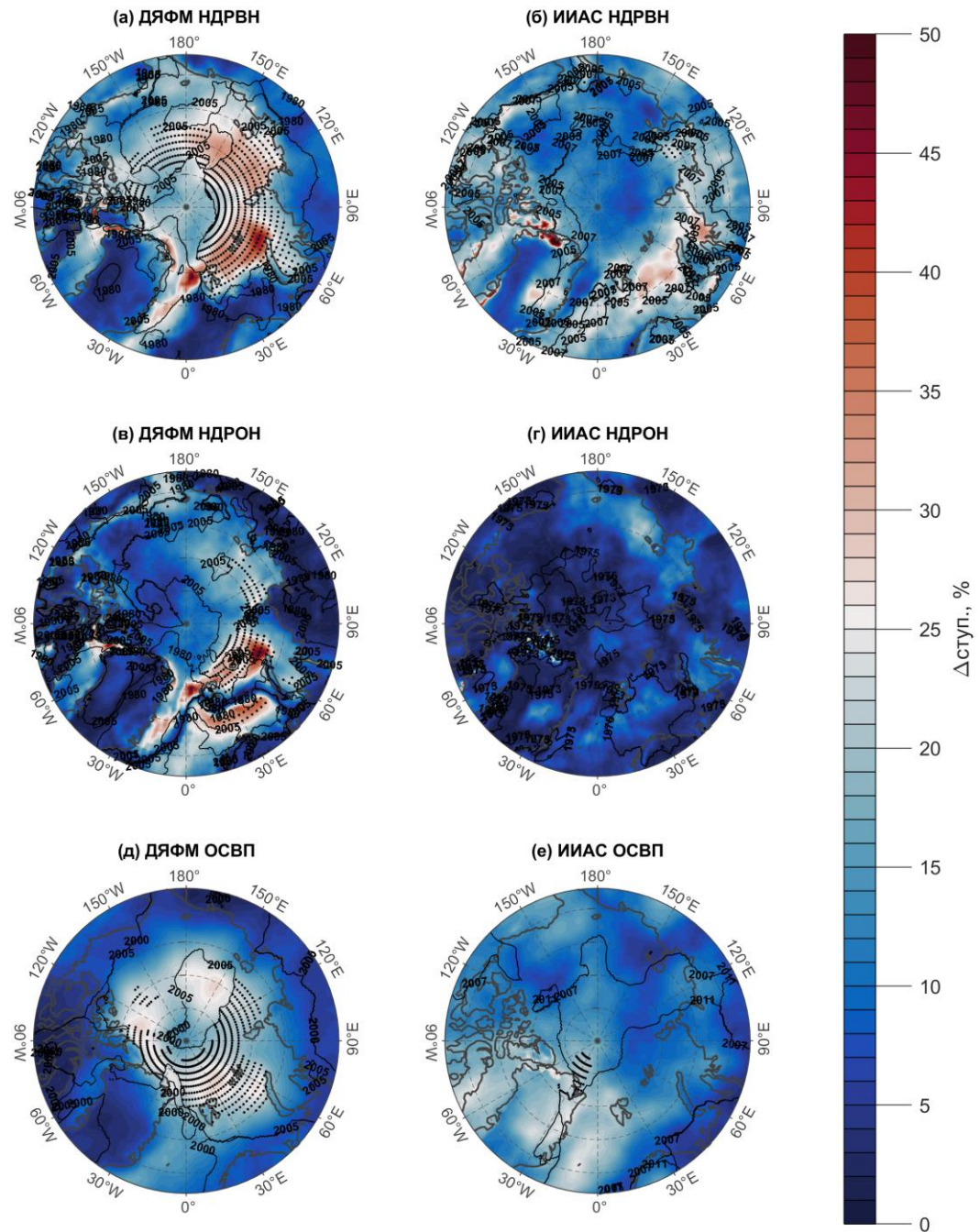


Рис. 4. Результаты применения ступенчатой модели к временным рядам нисходящей длинноволновой радиации при всём небе (НДРВН, а–б), нисходящей длинноволновой радиации при облачном небе (НДРОН, в–г) и общего содержания водяного пара (ОСВП, д–е) в каждой точке сетки Арктики для зимнего сезона (слева) и для летнего сезона (справа). Области с оттенками цветов с соответствующей цветовой шкалой представляют собой относительные ошибки, обозначенные как Δ_{step} (эффективность ступенчатой модели). Контурные линии показывают два наиболее частых года ступенчатых изменений. Чёрные точки очерчивают регионы, где модель ступенчатых изменений статистически значима в соответствии с критерием Фишера на уровне значимости 5 % для 2005 года в зимний сезон и для 2007 года в летний сезон.

Рис. 5

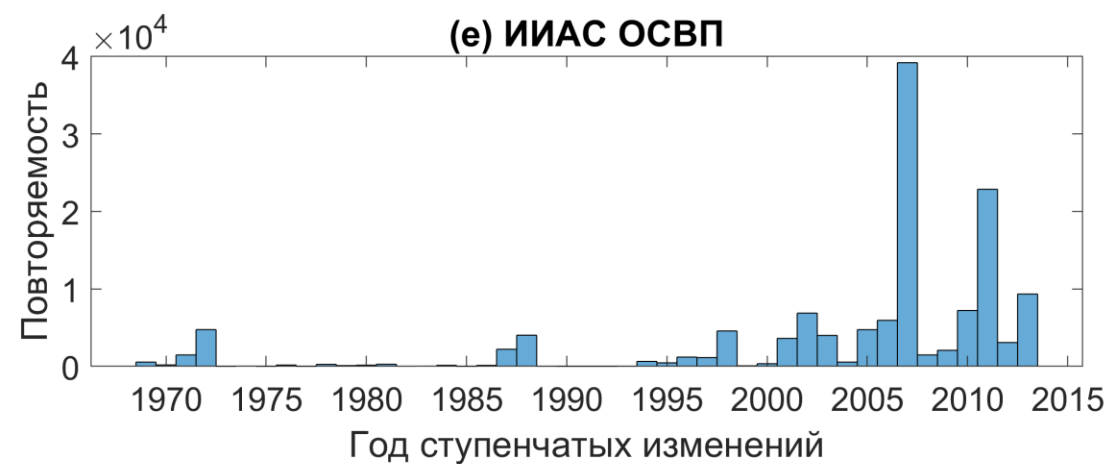
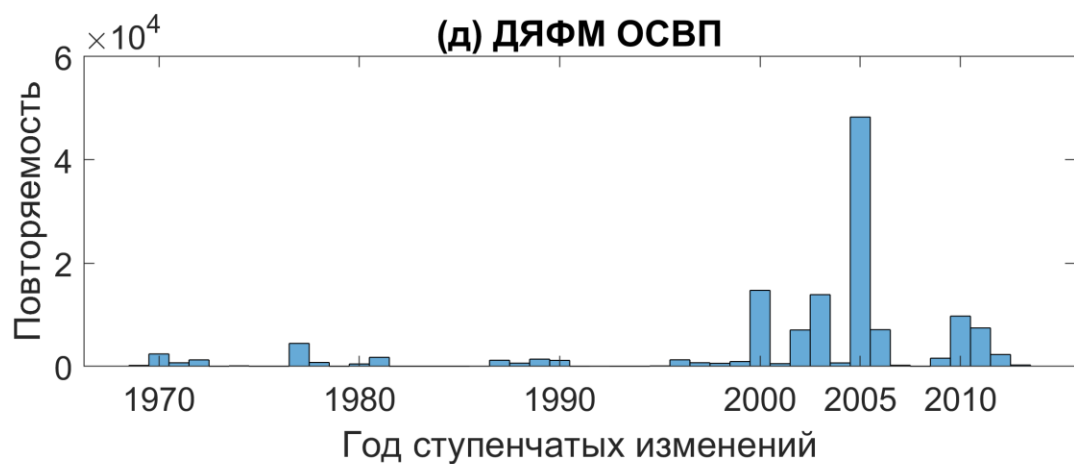
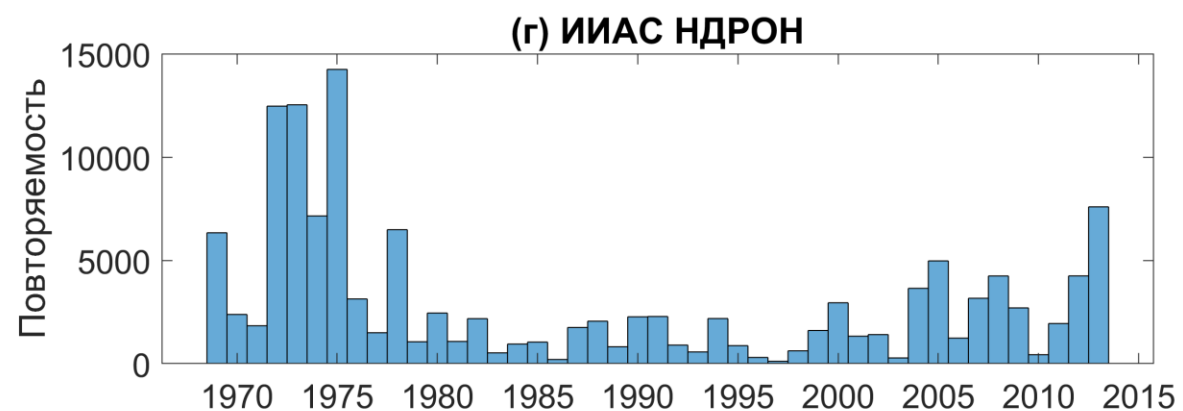
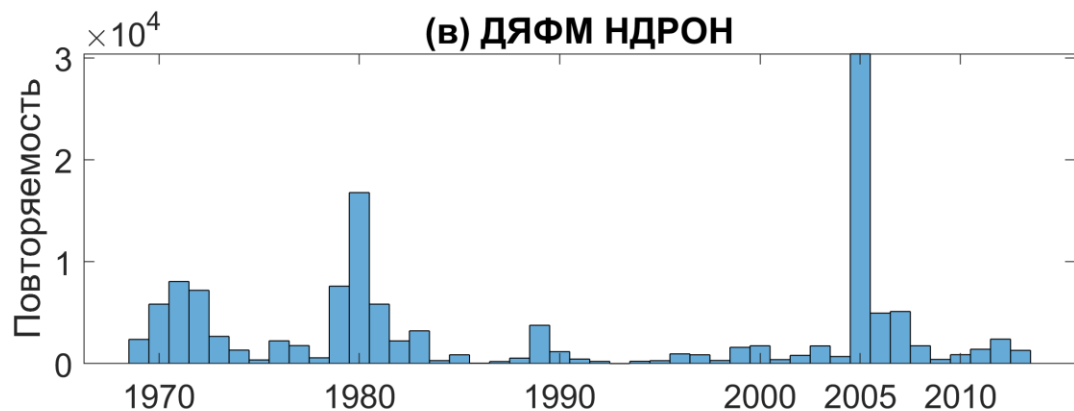
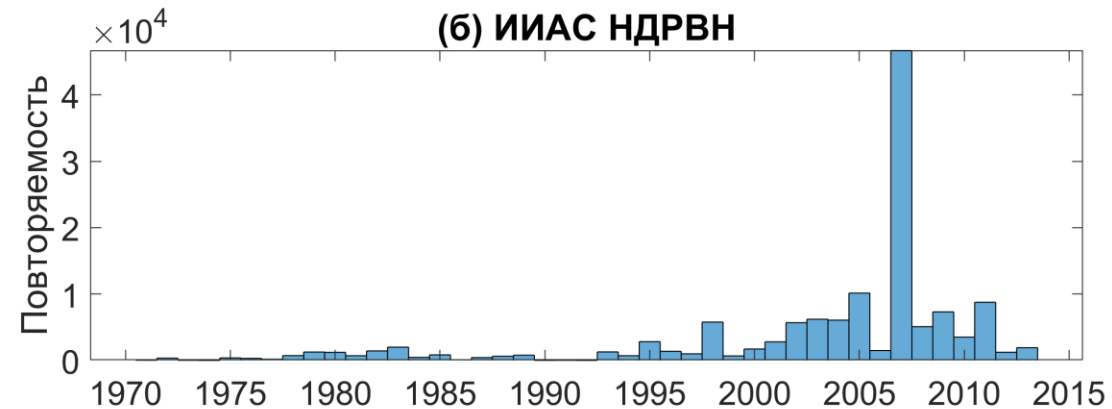
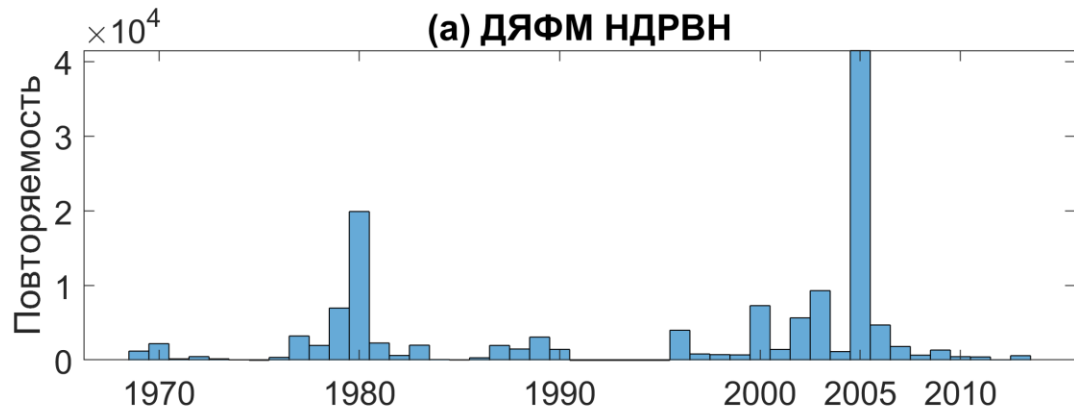
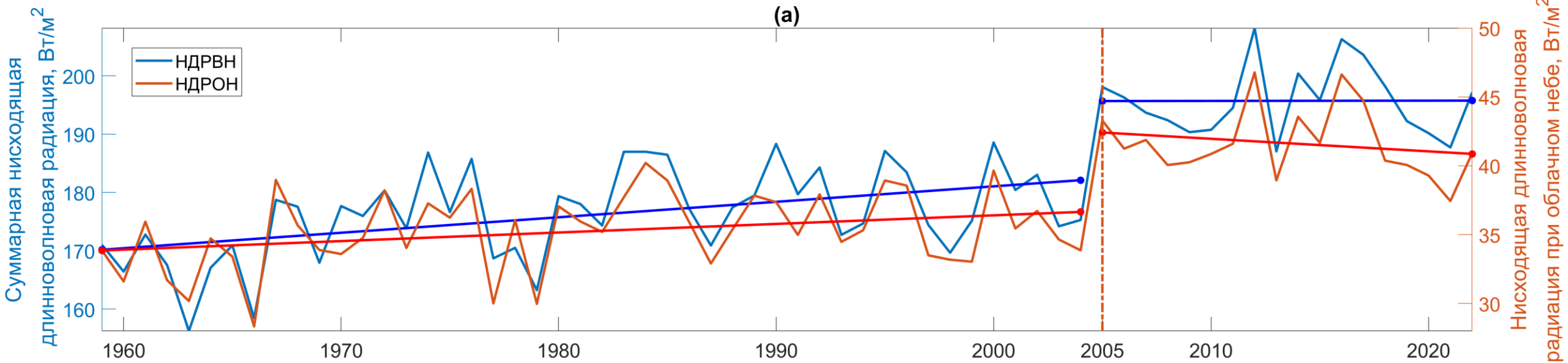


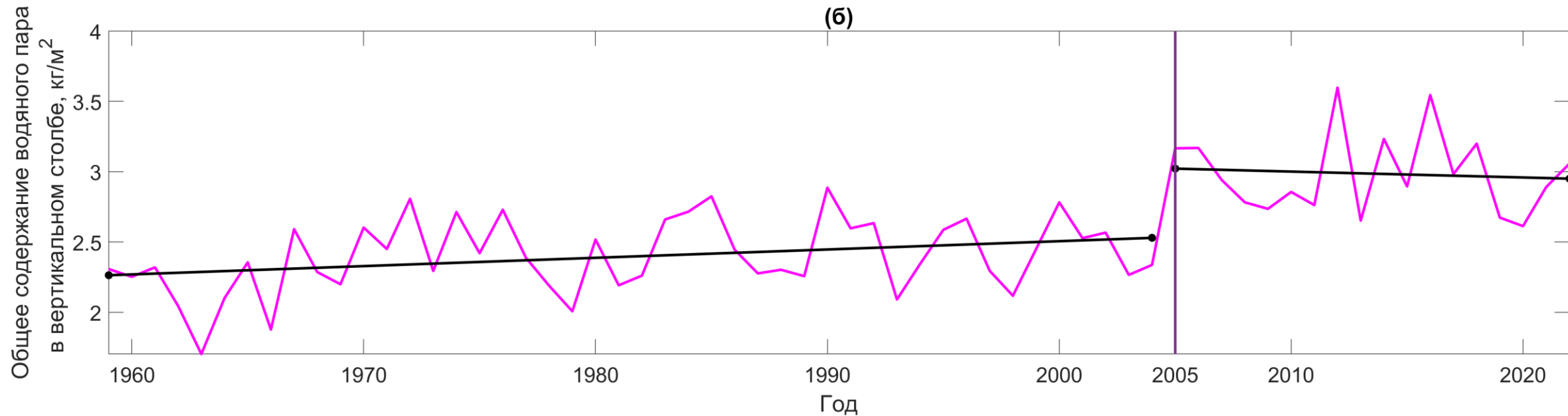
Рис. 6

(а)



Зимний сезон

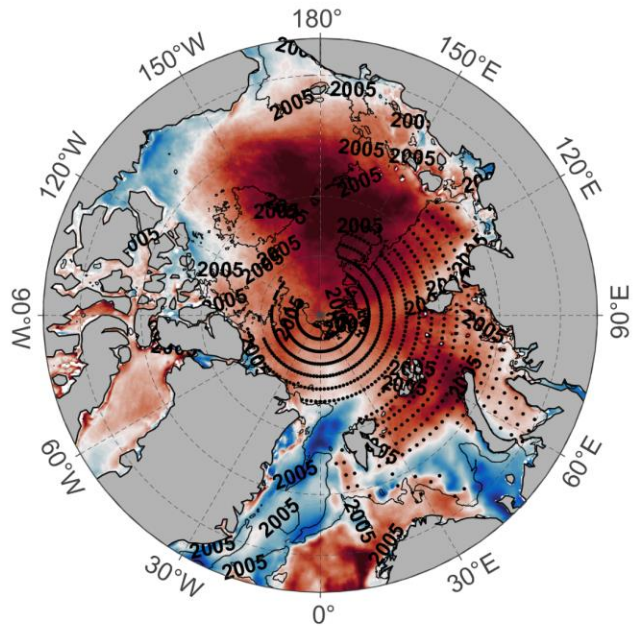
(б)



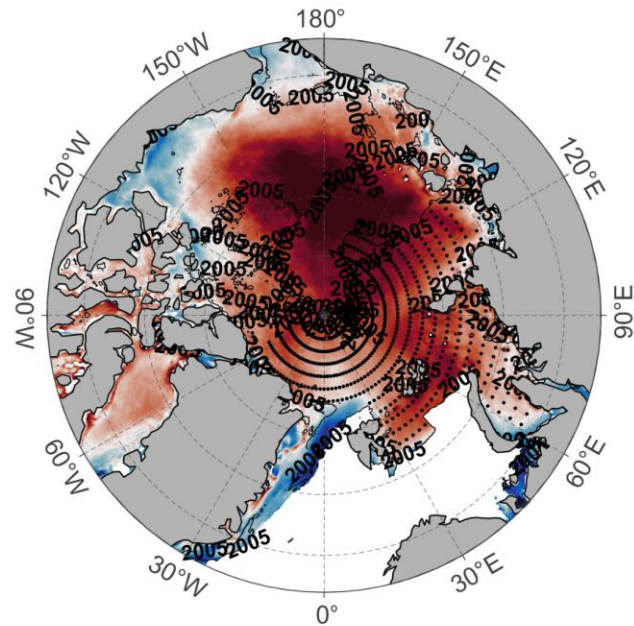
3. Верификация результатов на основе доступных спутниковых наблюдений

Рис. 7

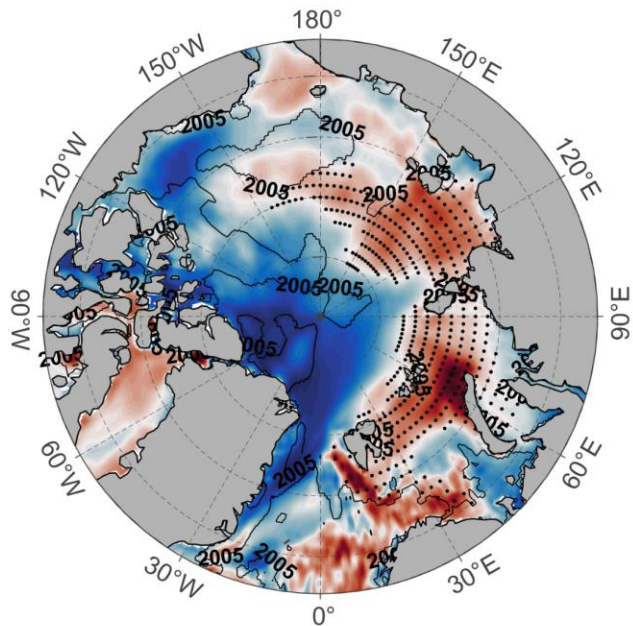
(а) Спутник ДЯФМ ТПЗ



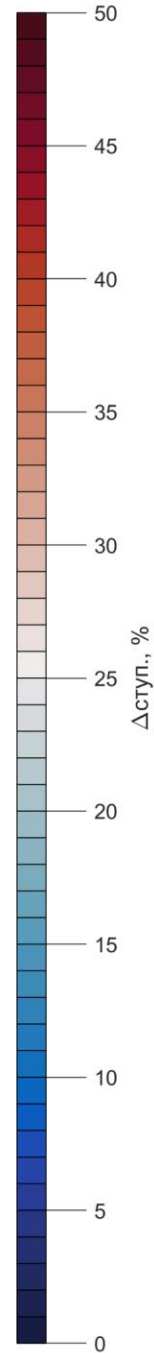
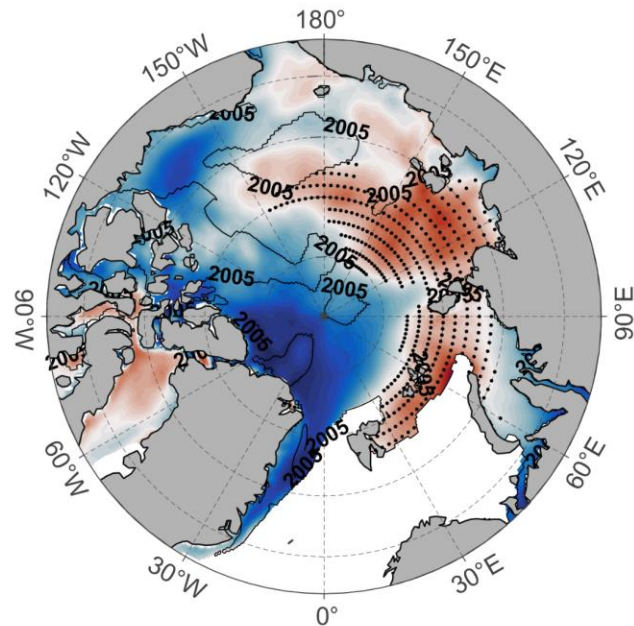
(б) Спутник ДЯФМ Т2м



(в) ERA5 ДЯФМ ТПЗ



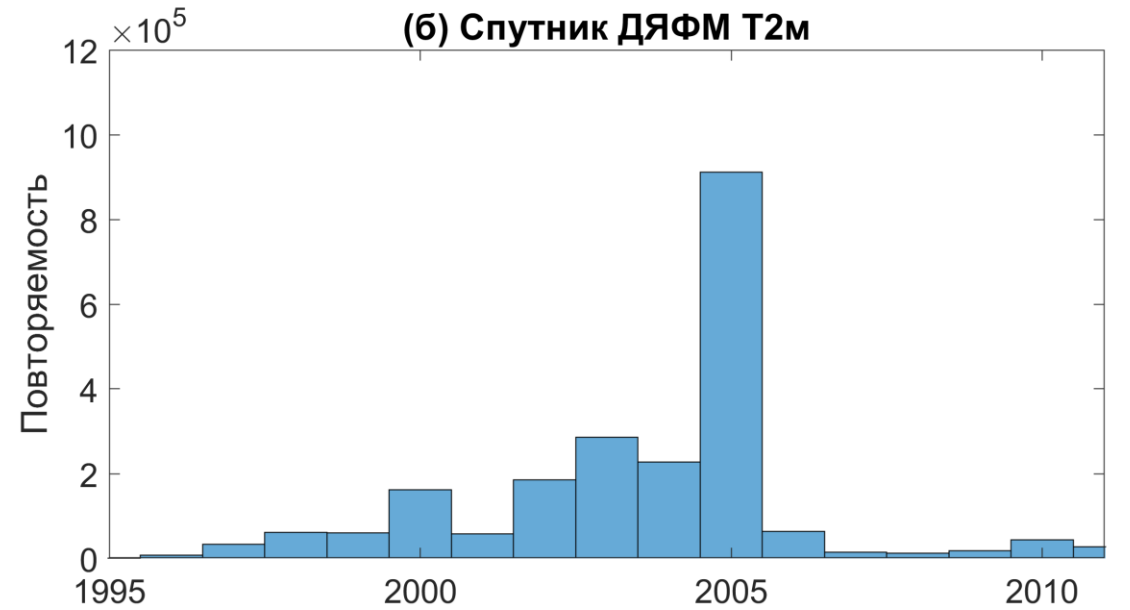
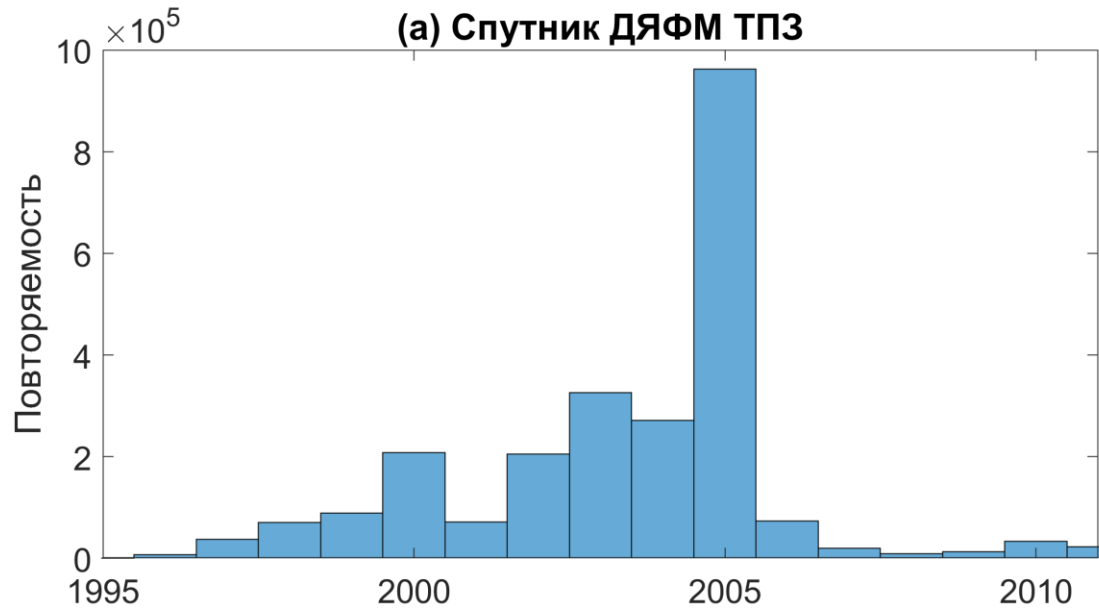
(г) ERA5 ДЯФМ Т2м



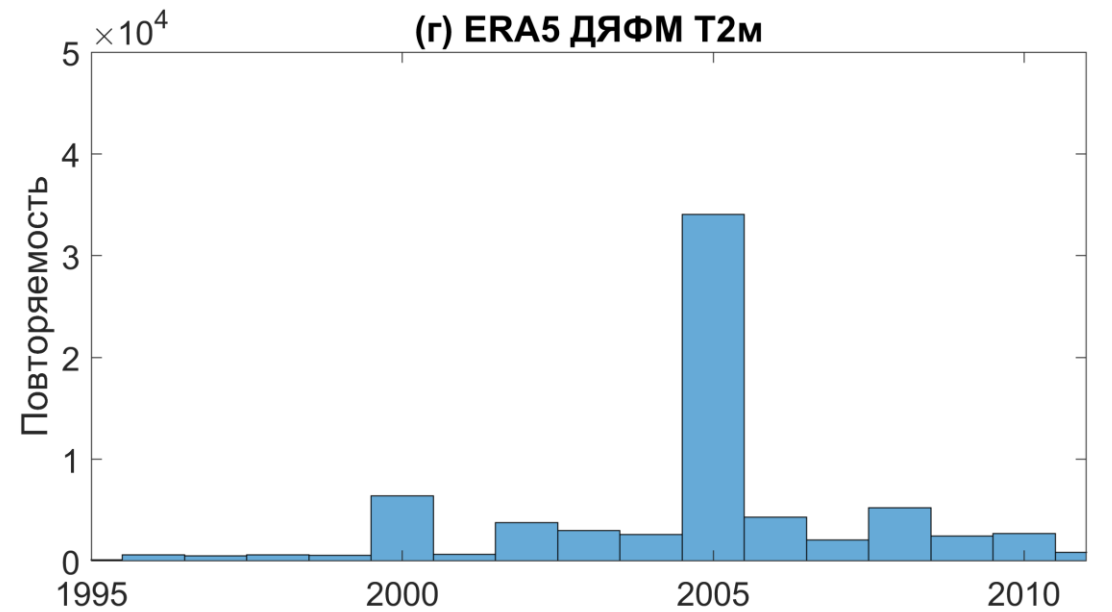
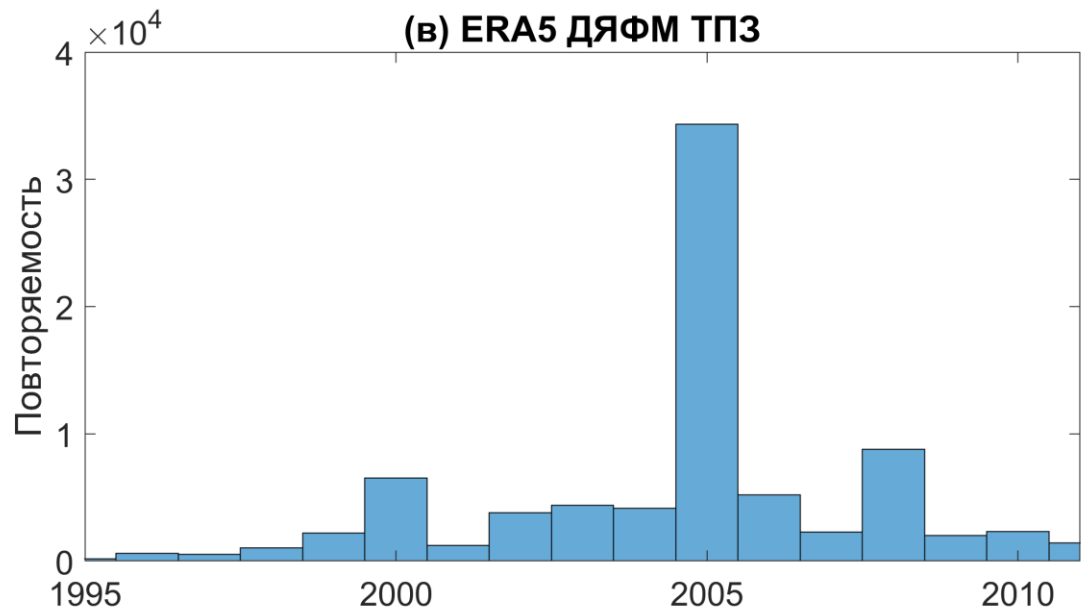
Зимний сезон

Новейшие объединённые спутниковые данные за период 1983–2021 гг. с очень высоким пространственным разрешением $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ (Nielsen-Englyst et al., 2023; Tian et al., 2024).

Рис. 8



Зимний сезон

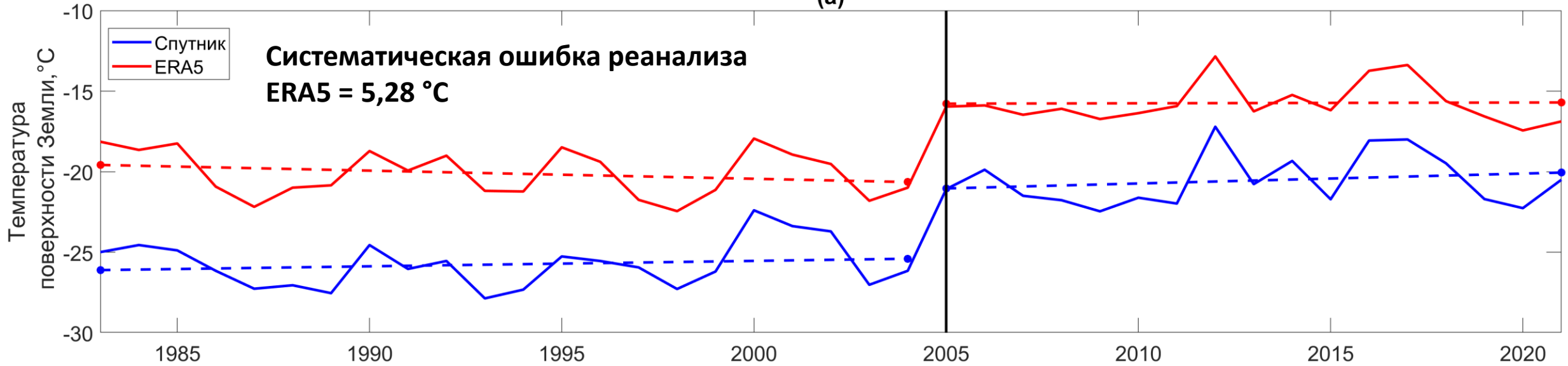


Год ступенчатых изменений

Год ступенчатых изменений

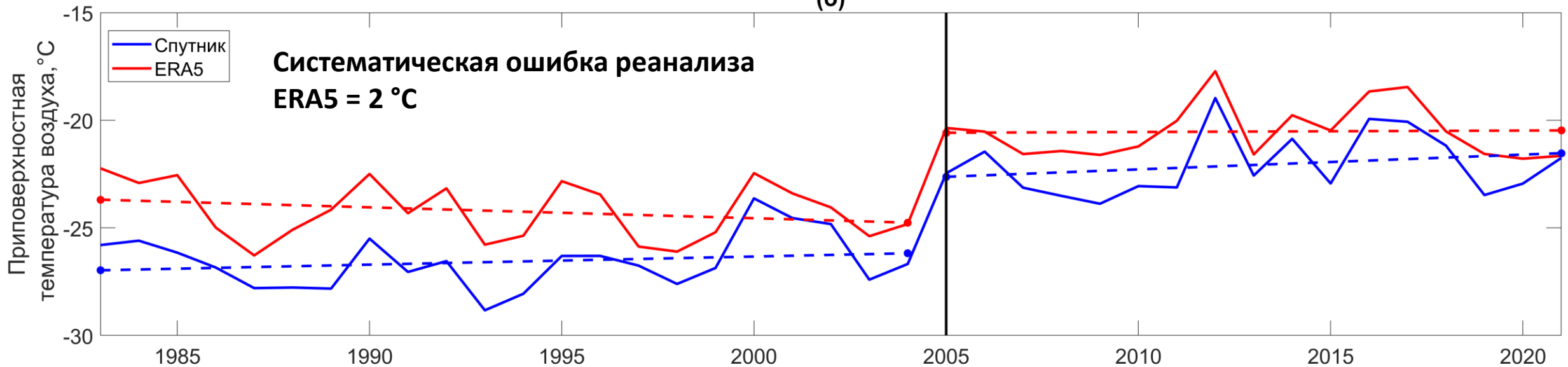
Рис. 9

(a)



Зимний сезон

(б)



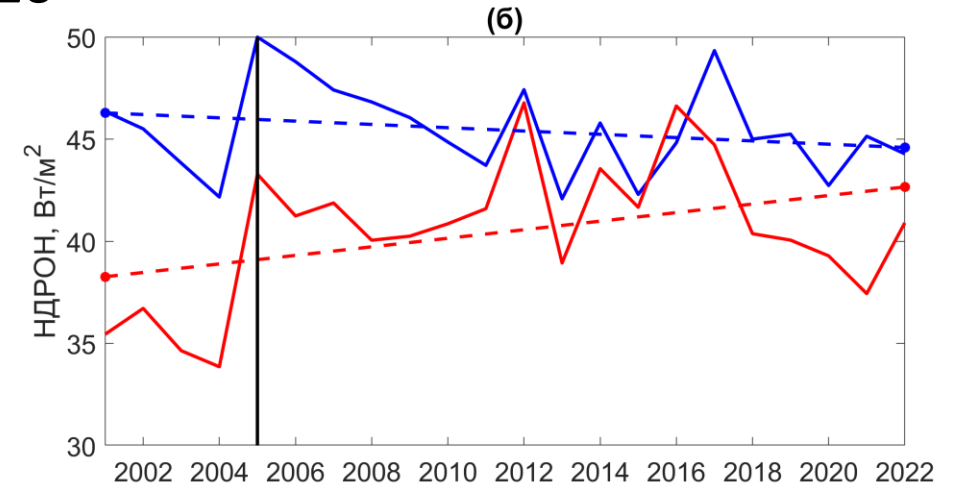
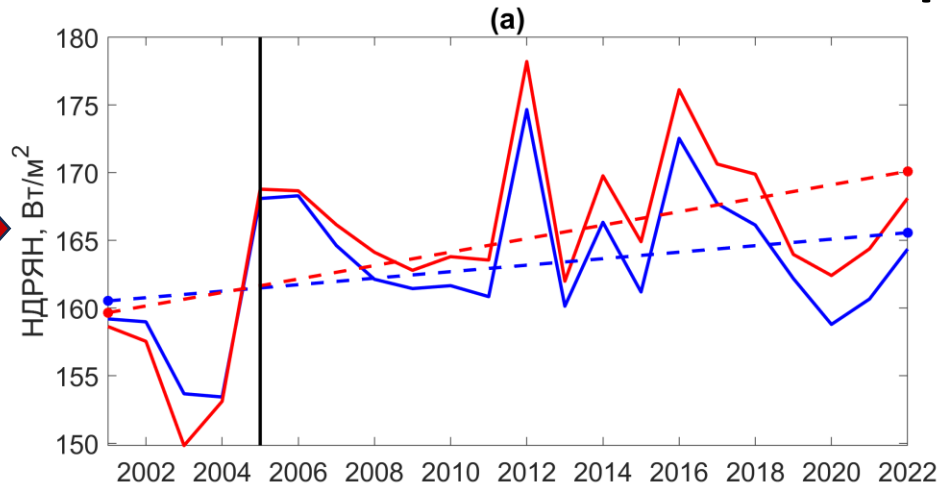
Год

Спутниковые данные по потокам радиации CERES_EBAF_Ed4.2: <https://ceres-tool.larc.nasa.gov/ord-tool/jsp/EBAF42Selection.jsp>

Спутниковые данные по общему содержанию водяного пара в вертикальном столбе атмосферы: <https://www.copernicus.eu/en/access-data/copernicus-services-catalogue/satellite-total-column-water-vapour-land-ocean>

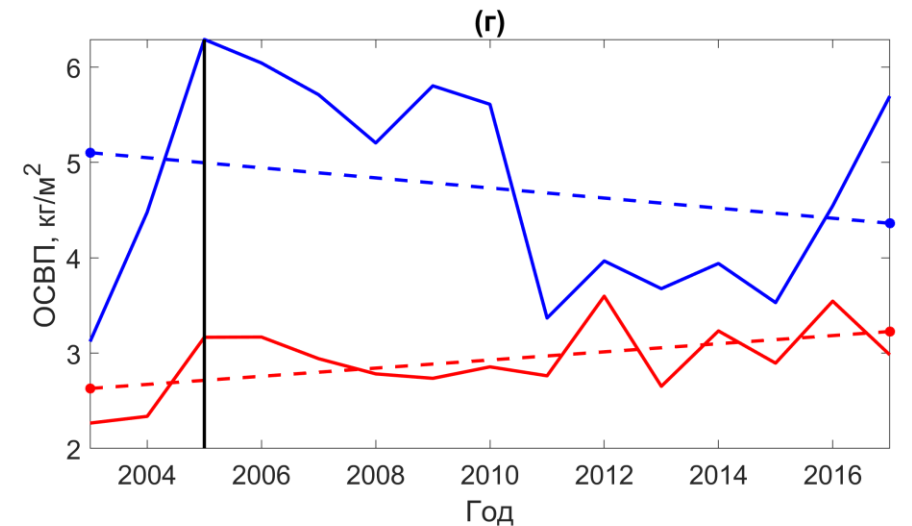
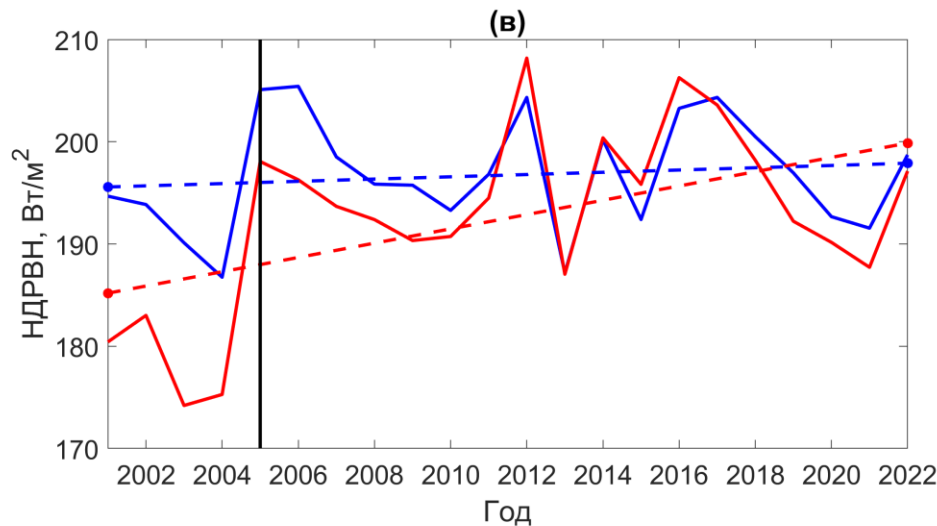
Рис. 10

Систематическая
ошибка реанализа
ERA5 = 1,83 Вт/м²



— Спутник
— ERA5

Зимний сезон



Выводы

- Доминирующим зимним годом ступенчатых изменений в Арктике оказался 2005 год. При этом именно этот переход из одного состояния климатической системы в другое статистически значим на большой территории, расположенной преимущественно в Восточном полушарии.
- Осреднённые по выделенным областям временные ряды водяного пара, потоков радиации и температуры высоко коррелируют между собой, а 2005 год характеризует смену резкого роста величин на их изменчивость без выраженного тренда.
- Имеющиеся спутниковые наблюдения полностью подтверждают временную структуру ступенчатых изменений исследуемых параметров и в значительной степени подтверждают её пространственную структуру.

Список литературы

1. Nielsen-Englyst, P., et al., 2023. A combined sea and sea-ice surface temperature climate dataset of the Arctic, 1982–2021. Remote Sens. Environ. 284, 113331. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113331>.
2. Tian, T., Yang, S., Høyer, J.L., Nielsen-Englyst, P., Singha, S., 2024. Cooler Arctic surface temperatures simulated by climate models are closer to satellite-based data than the ERA5 reanalysis. Commun. Earth Environ. 5, 111. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01276-z>.
3. Isaksen, K., et al., 2022. Exceptional warming over the Barents area. Sci. Rep. 12, 9371. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13568-5>.
4. Latonin, M.M., Lobanov, V.A., Bashmachnikov, I.L., 2020. Discontinuities in wintertime warming in Northern Europe during 1951–2016. Climate 8, 80. <https://doi.org/10.3390/cli8060080>.
5. Rantanen, M. et al., 2022. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. Commun. Earth Environ. 3, 168. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>.

Опубликованная статья

Latonin, M.M., Demchenko, A.Yu. (2024). A robust stepwise jump in the Arctic wintertime warming in 2005 coherent with the increased clear-sky downward longwave radiation flux. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 108, 101503. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2024.101503> (Q2, impact factor 1.9). **Share Link:** <https://authors.elsevier.com/a/1jyaJ1LkTK2B7H>