

11. ТЕМПЕРАТУРА В СВОБОДНОЙ АТМОСФЕРЕ

Температура воздуха в слое атмосферы высотой до 30 километров, наряду с приземной температурой и температурой поверхности океана, является важнейшей характеристикой состояния климатической системы и происходящих в ней изменений. Основной особенностью полей температуры в свободной атмосфере является их зональный характер, т.е. в значительной мере выраженная гладкость полей в направлениях вдоль кругов широты. Поэтому для оценки текущих изменений климата свободной атмосферы применяют зонально обобщенные вдоль широтных кругов характеристики, для которых важнейшими пространственными координатами остаются географическая широта и высота по вертикали (или давление, убывающее с высотой). В этом состоит существенное отличие результатов данного раздела от результатов других разделов, где географическая долгота при расчетах и обобщении оценок играет существенную роль.

Приводимые оценки получены по срочным данным радиозондовых наблюдений, собираемым с каналов связи в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» с глобальной сети аэрологических станций. Общее число станций, по которым ведется сбор аэрологических данных, превышает 900 и варьирует от месяца к месяцу. В их число входят более ста функционировавших в 2023 г российских станций, включая антарктические и СП. Около 700 станций глобальной сети расположены в Северном полушарии. На основе собранных месячных порций радиозондовых данных срочных наблюдений рассчитывается массив статистических характеристик различных метеовеличин в свободной атмосфере, включая статистические характеристики температуры, на стандартных изобарических поверхностях для каждой из станций. На основе взвешенного вертикального обобщения рассчитываются также значения температуры в основных слоях атмосферы: 850-300 гПа (тропосфера), 100-50 гПа (нижняя стратосфера), 300-100 гПа (переходный слой, характеризующийся значительной нестабильностью). Следующим этапом расчетов является расчет месячных аномалий температуры. Аномалии температуры на основных изобарических поверхностях и в каждом из указанных слоев атмосферы для каждого месяца, - вычислялись для каждой станции. В качестве норм использовались соответствующие характеристики температуры для этой станции, осредненные за период 1981-2010 гг. Такой выбор периода вычисления норм объясняется, во-первых, целесообразностью проводить в дальнейшем сопоставления с рядами аномалий температуры в свободной атмосфере, полученными на основе спутниковых наблюдений, начало которым положено с 1979 года. Во-вторых, оценки норм за такой период вычисления наименее, по сравнению с другими вариантами выбора тридцатилетнего периода, подвержены влиянию возможных неоднородностей в рядах, возникающих из-за особенностей функционирования глобальной сети радиозондирования.

При осреднениях, как в пределах месяца, так и при дальнейших обобщениях, использовались веса, равные числу признанных при контроле корректными соответствующих срочных значений температуры.

Путем пространственного осреднения постанционных месячных аномалий рассчитывались аномалии по пятиградусным широтным поясам Северного полушария. Результаты этого осреднения использованы для расчетов и для графического отображения широтно-вертикальных сечений аномалий. Кроме этого, постанционные месячные аномалии взвешенно осреднялись по тридцатиградусным широтным поясам 0-30 с.ш., 30-60 с.ш. и 60-90 с.ш., а также по всему Северному полушарию. В таких осреднениях в качестве веса для учета месячной аномалии каждой станции был использован косинус географической широты этой станции.

Наконец, наряду с пространственным осреднением постанционных месячных аномалий по пятиградусным и тридцатиградусным широтным поясам Северного полушария и по Северному полушарию в целом, проводилось дополнительно осреднение

постанционных месячных аномалий по сезонам для каждого сезона 2023 года (зимний сезон включал декабрь 2022 г и январь-февраль 2023 г), а также для 2023 года в целом.

Особенности температурного режима в свободной атмосфере в 2023 г.

В таблице 11.1 приведены значения аномалий температуры за 2023 год для каждого из 12 месяцев, для двух широтных зон Северного полушария (30-60° с.ш. и 60-90° с.ш.) для отдельных изобарических поверхностей: 850 гПа, 500 гПа, 300 гПа и 100 гПа. Перечисленные изобарические поверхности в среднем для года отвечают примерно высотам 1,23 км, 4,95 км, 8,52 км и 16,21 км над уровнем моря соответственно.

В умеренных широтах в тропосфере в 2023 году во все месяцы, за исключением апреля на высоте 300 гПа, наблюдались положительные аномалии температуры. Наибольшие аномалии температуры наблюдались в марте и сентябре в нижних слоях тропосферы и составили 1,99°С и 1,90°С соответственно. С августа по октябрь превышали или были близки к 1°С. В августе аномалии росли с высотой от 1,29 до 1,48°С, в сентябре и октябре – убывали. Аномалии температуры, превышающие 1°С наблюдались также с января по март и в декабре на высоте 850 гПа и на высоте 500 гПа в декабре. Наименьшие положительные аномалии в умеренных широтах Северного полушария наблюдались в апреле. Во всем слое тропосферы они не превышали 0,20°С, а в верхних слоях тропосферы приблизились к нулевым значениям. В нижней стратосфере положительные аномалии наблюдались в июне и с октября по декабрь. Наибольшие отрицательные аномалии температуры в нижней стратосфере умеренных широт, превышающие -1°С по абсолютному значению, наблюдались с января по март. Наибольшее изменение аномалий температуры с высотой наблюдалось в марте: разность аномалий на поверхностях 850 и 100 гПа составила 3,26°С.

В высоких широтах в верхних и средних слоях тропосферы Северного полушария в 2023 году преобладали отрицательные аномалии температуры с января по март, а также они наблюдались во всем слое тропосферы в декабре. На высоте 850 гПа аномалии температуры не превысили 1°С только в апреле, сентябре, ноябре и декабре. В августе наблюдались самые большие положительные аномалии температуры в тропосфере. В нижних слоях тропосферы (850 гПа) они достигали 2,23°С, а в верхних слоях – 1,77°С. На высоте 850 гПа в мае и с июля по ноябрь аномалии температуры превышали 1°С. В нижней стратосфере высоких широт положительные аномалии температуры наблюдались только в марте и достигали 1,75°С. В январе, мае, ноябре и декабре аномалии температуры в стратосфере превышали -1°С по абсолютному значению, и в январе достигали -2,41°С.

Таблица 11.1 - Аномалии температуры за 2023 год для двух широтных зон Северного полушария (30-60 с.ш. и 60-90 с.ш.) на отдельных изобарических поверхностях. Цветной заливкой показаны отрицательные (голубой) и положительные (желтый) аномалии

МЕСЯЦ	30-60 С.Ш.				60-90 С.Ш.			
	850 гПа	500 гПа	300 гПа	100 гПа	850 гПа	500 гПа	300 гПа	100 гПа
Январь	1.08	0.52	0.43	-1.77	0.42	0.03	-0.63	-2.41
Февраль	1.00	0.71	0.88	-1.76	0.13	-0.59	-0.06	-0.85
Март	1.99	0.92	0.16	-1.27	0.13	-0.36	0.41	1.75
Апрель	0.10	0.20	-0.02	-0.99	0.31	0.16	-0.68	-0.79
Май	0.15	0.34	0.12	-0.47	1.25	0.75	0.29	-1.45
Июнь	0.76	0.33	0.23	0.25	0.41	0.24	0.49	-0.49
Июль	1.29	0.65	0.70	-0.68	1.18	1.17	0.70	-0.46
Август	1.29	1.33	1.48	-0.79	2.32	2.18	1.77	-0.82
Сентябрь	1.90	1.36	0.99	-0.15	1.81	1.97	1.60	-0.62
Октябрь	1.70	1.33	1.15	0.03	1.10	0.97	0.22	-0.64
Ноябрь	0.87	0.97	0.85	0.48	1.43	1.53	0.20	-1.64

Декабрь	1.32	1.25	0.81	0.05	-0.09	-0.32	-0.56	-1.10
----------------	------	------	------	------	-------	-------	-------	-------

Столь существенные различия в величинах аномалий температуры от месяца к месяцу и по вертикали на отдельно рассматриваемых изобарических поверхностях сказываются и на результатах временного обобщения по отдельным сезонам, и на результатах пространственного вертикального обобщения по наиболее часто рассматриваемым слоям свободной атмосферы.

В Таблице 11.2 приведены аномалии температуры, обобщенные для каждого из четырех сезонов 2023 года (зимний сезон включает период декабрь 2022-февраль 2023 г) и для года в целом, осредненные по вертикали внутри слоев 850-300 гПа (тропосфера) и 100-50 гПа (нижняя стратосфера) для тридцатиградусных широтных зон Северного полушария и полушария в целом.

В тропосфере низких широт 2023 год вошел в десятку самых теплых лет во всех сезонах, кроме весеннего. Осенью наблюдалась рекордно высокая температура с аномалией 1,18°C. Рекордные температуры осенью наблюдались и в отдельных широтных поясах: в низких и умеренных широтах. В высоких широтах осень стала второй самой теплой осенью за всю историю наблюдений. Также рекордная температуры наблюдалась летом в низких широтах, аномалия температуры составила 0,74°C. В целом по северному полушарию лето было вторым в ряду самых теплых годов. Весна 2023 года была относительно холодной. Только в умеренных широтах весенняя аномалия температуры попала на десятое место в ряду самых теплых лет, а в низких широтах весной наблюдалась небольшая отрицательная аномалия. В целом за год 2023 год стал вторым в ряду самых теплых лет с аномалией температуры 0,80°C.

В нижней стратосфере в 2023 году в целом по северному полушарию наблюдалась рекордно холодная весна, аномалия температуры составила -1,28°C. Зима и лето заняли третье место в соответствующих рядах самых холодных лет. Их аномалии температуры составили -1,43 и -1,05°C. осенью в умеренных широтах наблюдалась небольшая положительная аномалия температуры, а в высоких широтах рекордно низкая аномалия температуры, равная -1,06°C. В целом по северному полушарию осень 2023 года была относительно теплой. В низких и умеренных широтах все сезонные аномалии температуры, за исключением осенних, попали в десятку самых холодных лет. В целом за год 2023 год занял 4 место в ряду самых холодных лет в нижней стратосфере с аномалией температуры -0,89°C.

Более детально вертикально-широтная структура для годовых аномалий температуры в 2023 г показана на рис. 11.1, а для аномалий температуры отдельных сезонов 2023 г – на рис. 11.2.

На рис. 11.3 представлены посезонно ранги 10 самых теплых в тропосфере и 10 самых холодных в нижней стратосфере лет, причем отдельно выделено положение 2023 г.

Таблица 11.2 – Аномалии температуры в тропосфере и нижней стратосфере от норм 1981-2010 гг.

ΔT_{2023} - величина аномалии в градусах Цельсия

R (- R) – ранг (обратный ранг) в рядах, упорядоченных по возрастанию значений соответствующих аномалий за период 1958-2023 гг.

СЕЗОН	0-30 С.Ш.		30-60 С.Ш.		60-90 С.Ш.		Северное полушарие	
ТРОПОСФЕРА, 850-300 гПа								
	ΔT_{2023}	-R	ΔT_{2023}	-R	ΔT_{2023}	-R	ΔT_{2023}	-R
ЗИМА	0.58	8	0.44	13	0.07	31	0.46	8
ВЕСНА	-0.03	34	0.52	10	0.23	23	0.31	14
ЛЕТО	0.74	1	0.88	5	1.22	3	0.85	2

ОСЕНЬ	0.99	1	1.28	1	1.37	2	1.18	1
ГОД	0.68	3	0.89	2	0.67	5	0.80	2
НИЖНЯЯ СТРАТОСФЕРА, 100–50 гПа								
	ΔT_{2023}	R						
ЗИМА	-1.42	7	-1.48	2	-1.00	18	-1.43	3
ВЕСНА	-1.42	4	-1.35	2	-0.24	24	-1.28	1
ЛЕТО	-1.37	4	-0.90	6	-0.84	2	-1.05	3
ОСЕНЬ	-0.54	19	0.09	31	-1.06	1	-0.21	26
ГОД	-1.08	5	-0.80	4	-0.77	9	-0.89	4

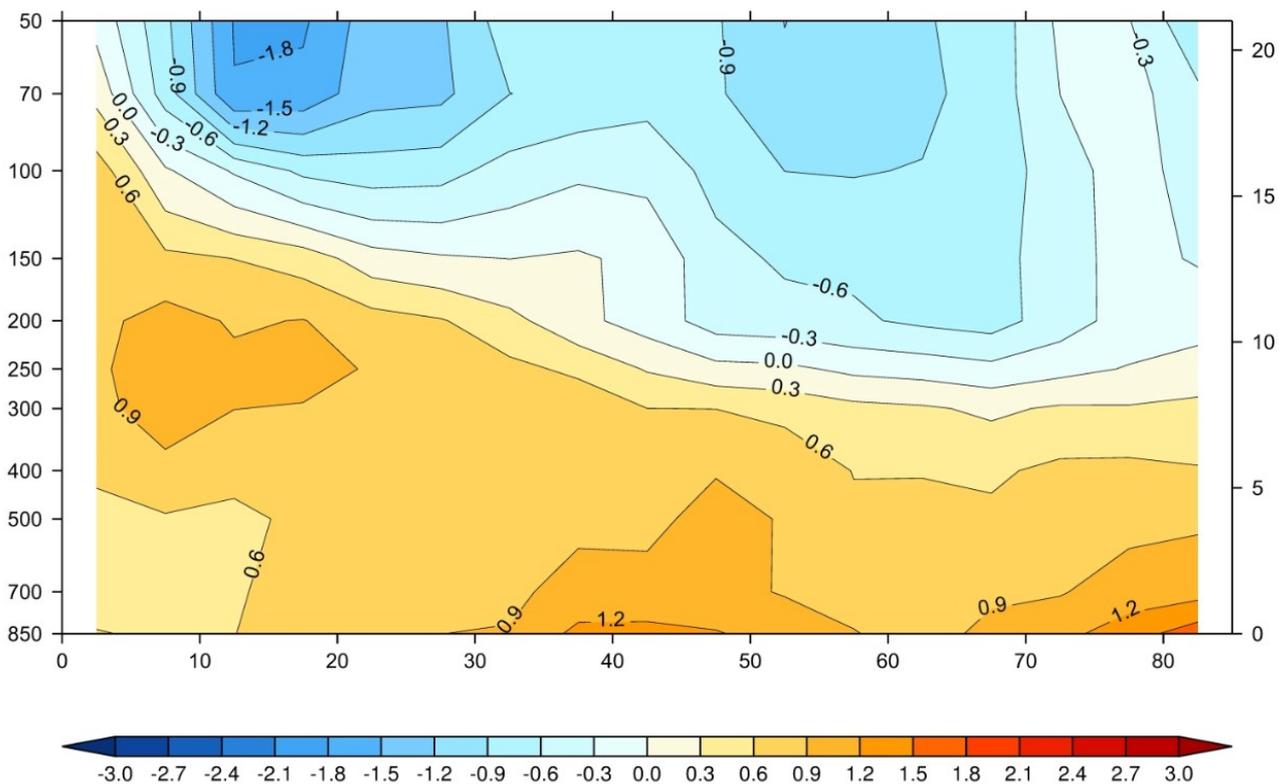
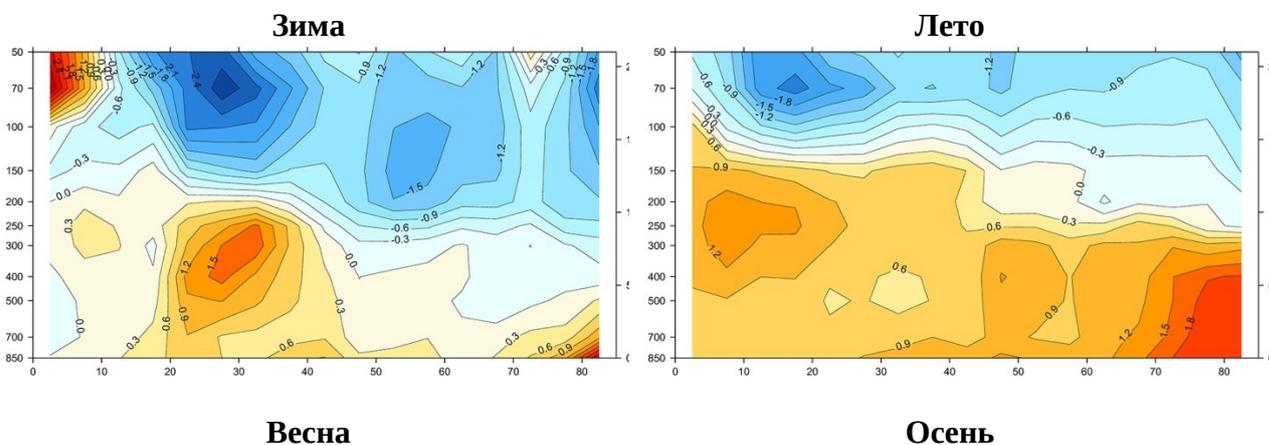


Рисунок 11.1 - Вертикально-широтная структура годовых аномалий температуры свободной атмосферы в 2023 году. Горизонтальная ось – широты, левая вертикальная ось – давление на стандартных изобарических поверхностях, правая вертикальная ось – высоты над уровнем моря в км.



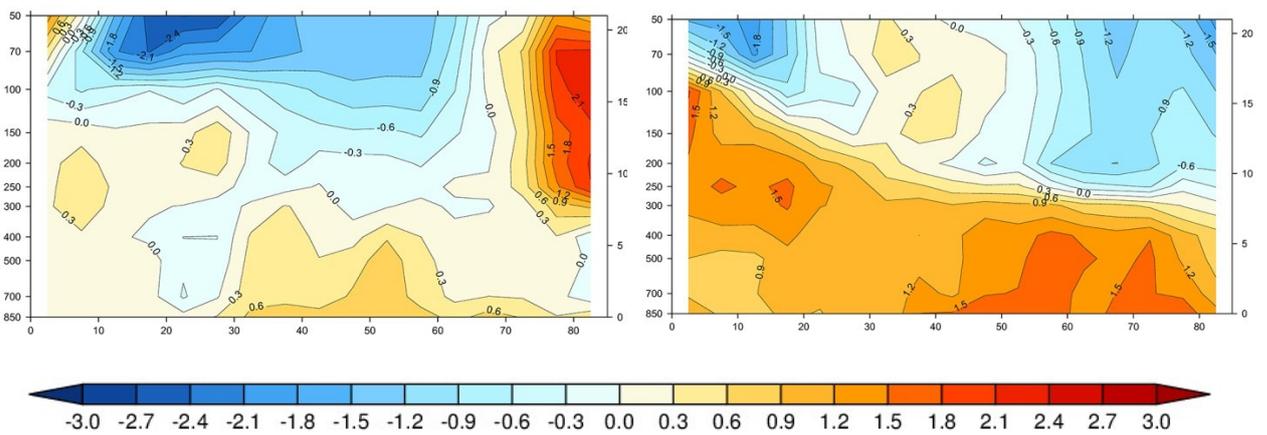


Рисунок 11.2 - То же, что на рис 11.1, но для отдельных сезонов (зима 2022-2023 гг., весна, лето и осень 2023 года)

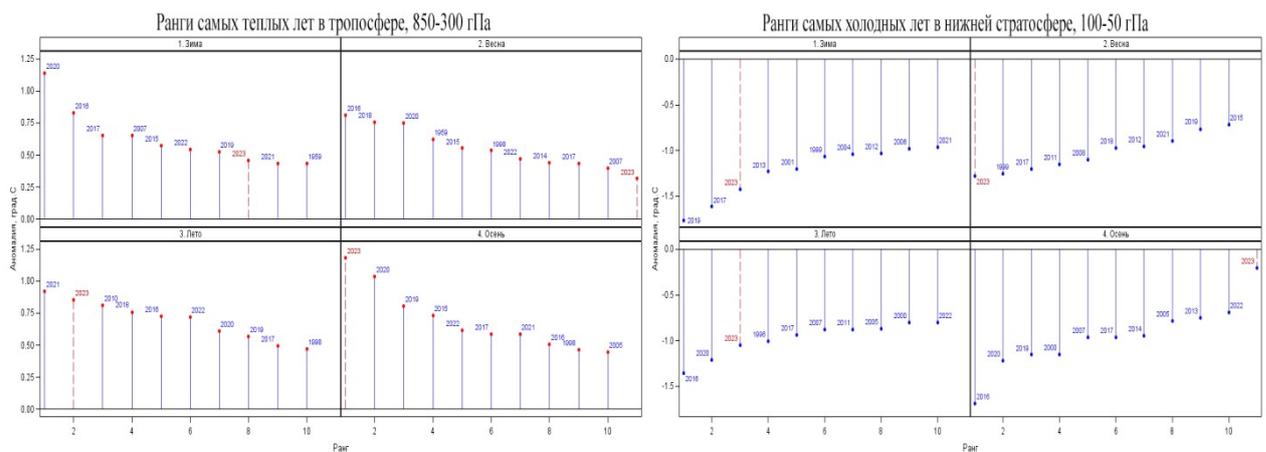


Рисунок 11.3 - Ранги самых значительных сезонных аномалий температуры в свободной атмосфере Северного полушария за период 1958-2023 г. Левая панель – положительные аномалии, тропосфера (850-300 гПа), правая панель – отрицательные аномалии, нижняя стратосфера (100-50 гПа). Обозначения сезонов по аналогии с рис. 11.2, 2023 год выделен красным пунктиром.

Тенденции современных изменений температуры воздуха в свободной атмосфере

Современные тенденции изменения температуры в свободной атмосфере, суть которых сводится к потеплению в тропосфере и похолоданию в нижней стратосфере, проиллюстрированы для сезонов Северного полушария на рис. 11.4, где, наряду с рядами сезонных аномалий, представлены линии трендов.

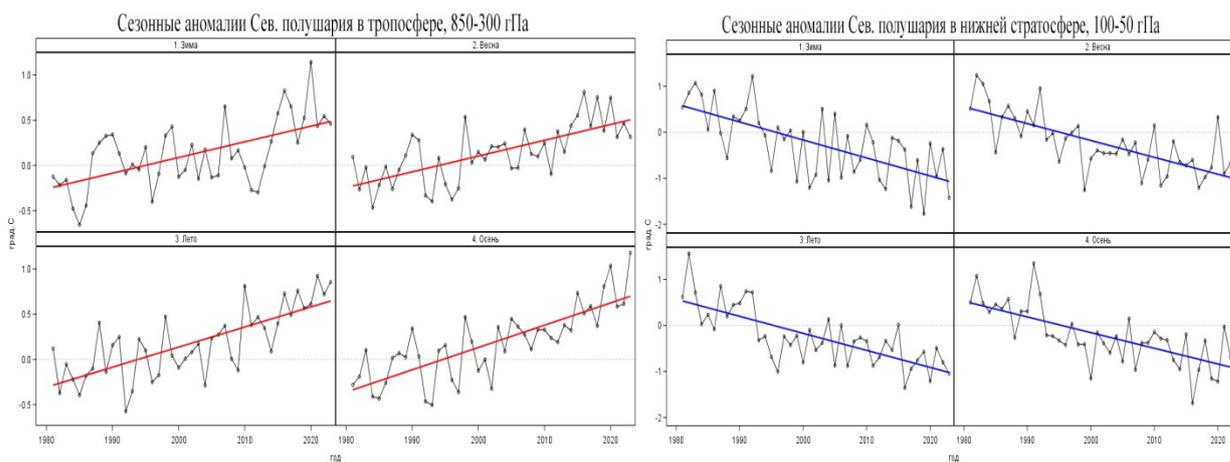


Рисунок 11.4 - Ряды сезонных аномалий температуры в свободной атмосфере Северного полушария за период 1981-2023 г. Левая панель – тропосфера (850-300 гПа), правая панель – нижняя стратосфера (100-50 гПа). Линии трендов построены методом наименьших квадратов для тропосферы (красный цвет) и нижней стратосферы (синий цвет). Обозначения сезонов по аналогии с рис. 11.2.

Таблица 11.3 содержат значения линейных трендов, вычисленных за период 1981-2023 на основе рядов сезонных и годовых аномалий отдельных широтных зон и Северного полушария в целом для тропосферы и нижней стратосферы соответственно.

Как следует из Таблицы 11.3, в тропосфере тенденции потепления во всех широтных зонах всех сезонов статистически значимы. По сравнению с 2022 годом во всех широтных поясах увеличились оценки трендов летних и осенних аномалий. Весенние оценки уменьшились по сравнению с 2022 годом в низких и высоких широтах на $0,01^{\circ}\text{C}/10$ лет. В среднем по Северному полушарию по сравнению с прошлым годом увеличились летний и осенний тренды, а значения трендов температуры принимали значения от $0,17^{\circ}\text{C}/10$ лет зимой и весной до $0,25^{\circ}\text{C}/10$ лет осенью. Годовой тренд по сравнению с 2022 годом увеличился на $0,02^{\circ}\text{C}/10$ лет и составил $0,21^{\circ}\text{C}/10$ лет.

Для нижней стратосферы очевидное статистически значимое похолодание имеет место для всех осуществленных вариантов оценки тренда, за исключением зимнего сезона в высоких широтах. При этом зимний тренд в высоких широтах изменился с $-0,13^{\circ}\text{C}/10$ лет в 2022 году до $-0,15^{\circ}\text{C}/10$ лет в 2023 году. В низких широтах абсолютные значения трендов уменьшились во всех сезонах, за исключением лета. В умеренных широтах абсолютные значения трендов увеличились во всех сезонах, за исключением осени. В высоких широтах увеличились по абсолютному значению зимние и летние тренды, а весенние – уменьшились. В среднем по Северному полушарию увеличились абсолютные значения всех сезонных трендов кроме осеннего. Годовой тренд не изменился и составил $-0,36^{\circ}\text{C}/10$ лет.

Таблица 11.3 – Оценки линейного тренда температуры в тропосфере и нижней стратосфере (1981-2023 гг.)

b – значения сезонного или годового тренда, ($^{\circ}\text{C}/10$ лет)

D – объясненная линейным трендом доля общей дисперсии ряда, в %.

Жирным курсивом выделены значения трендов, значимо отличные от нуля с вероятностью не менее 0,95

СЕЗОН	0-30 С.Ш.		30-60 С.Ш.		60-90 С.Ш.		Северное полушарие	
	<i>b</i>	<i>D</i>	<i>b</i>	<i>D</i>	<i>b</i>	<i>D</i>	<i>B</i>	<i>D</i>
ТРОПОСФЕРА, 850-300 гПа								
ЗИМА	0.21	43	0.16	18	0.14	21	0.17	35

ВЕСНА	0.12	19	0.21	44	0.13	13	0.17	48
ЛЕТО	0.11	26	0.27	55	0.28	45	0.22	55
ОСЕНЬ	0.18	37	0.28	57	0.27	42	0.25	61
ГОД	0.16	42	0.23	63	0.20	48	0.21	63
НИЖНЯЯ СТРАТОСФЕРА, 100–50 гПа								
ЗИМА	-0.57	46	-0.33	25	-0.15	1	-0.39	44
ВЕСНА	-0.48	55	-0.31	33	-0.34	15	-0.37	52
ЛЕТО	-0.49	52	-0.33	47	-0.22	37	-0.37	55
ОСЕНЬ	-0.49	39	-0.29	41	-0.21	39	-0.34	47
ГОД	-0.50	63	-0.31	58	-0.24	24	-0.36	67

Выводы

В 2023 году в тропосфере Северного полушария была рекордно теплая осень и второе самое теплое лето в истории наблюдений с аномалиями температуры 1,18 и 0,85°C соответственно. Также в десятку самых теплых лет в тропосфере попала зима 2023 года. Рекордно высокие аномалии наблюдались летом и осенью в низких широтах (0,74 и 0,99°C), а также осенью в умеренных широтах (1,28°C). Весной в низких широтах наблюдалась небольшая отрицательная аномалия температуры, равная -0,03°C. В среднем за год 2023 год во всех широтных поясах был в пятерке самых теплых лет в тропосфере и в целом по Северному занял второе место в ряду с аномалией температуры 0,80°C. Таким образом, 2015-2023 гг. являются девятью самыми теплыми годами с начала инструментальных наблюдений в тропосфере Северного полушария.

В нижней стратосфере лето во всех широтных поясах попало в десятку самых холодных лет и в целом по Северному полушарию оказалось третьим в ряду самых холодных лет с аномалией температуры -1,05°C. Зима и весна 2023 года попали в десятку самых холодных лет в низких и умеренных широтах. В умеренных широтах они заняли второе место. А в высоких широтах зима и весна оказались на 18 и 24 местах соответственно. Осень 2023 года, наоборот, в низких и умеренных широтах была относительно теплой. В умеренных широтах наблюдалась небольшая положительная аномалия температуры 0,09°C. А в высоких широтах осень была рекордно холодной с аномалией температуры -1,06°C. В целом по Северному полушарию в 2023 году наблюдалась рекордно холодная весна, зима и лето вошли в тройку самых холодных сезонов, а осень была относительно теплой. В целом 2023 год по Северному полушарию оказался четвертым в ряду самых холодных лет в нижней стратосфере.

Структура климатических трендов температуры, исследованных за период с 1981 года по 2023 год, подтверждает тенденции потепления в тропосфере и тенденции значительного похолодания в нижней стратосфере.

В тропосфере добавление оценок аномалий за 2023 год к соответствующим рядам, ранее исследованным за период до 2022 года включительно, привело к увеличению значений летних и осенних трендов во всех широтных поясах, а также к уменьшению весенних трендов в низких и высоких широтах. Среднегодовой тренд температуры в тропосфере всего Северного полушария вырос с 0,19°C/10 лет до 0,21°C/10 лет.

В нижней стратосфере в низких широтах уменьшились по абсолютному значению все сезонные оценки трендов за исключением летней. В умеренных широтах все сезонные тренды, за исключением осеннего, выросли по абсолютному значению. В высоких широтах выросли по абсолютному значению зимний и летний тренды, а весенний уменьшился. Среднегодовой тренд температуры в нижней стратосфере всего Северного полушария не изменился и составил -0,36°C/10 лет.