

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 2022 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 2022 года (зимний сезон включал декабрь 2021 г и январь-февраль 2022 г), а также для 2022 года в целом.

Особенности температурного режима в свободной атмосфере в 2022 г.

В таблице 11.1 приведены значения аномалий температуры за 2022 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 2022 году во все месяцы, за исключением декабря на высоте 850 гПа, наблюдались положительные аномалии температуры. Наибольшие аномалии температуры наблюдались в июне и августе в нижних слоях тропосферы и составили 1,16°С и 1,04°С соответственно. В июле на протяжении всей тропосферы аномалии температуры были около 0,95°С. Такие же аномалии наблюдались в сентябре на высоте 850 гПа и феврале и августе на высоте 300 гПа. Наименьшие положительные аномалии в умеренных широтах Северного полушария, наблюдались в марте и декабре. Во всем слое тропосферы они не превышали 0,25°С, а на высоте 850 гПа в марте составляли 0,16°С, а в декабре были отрицательные со значением -0,23°С. В феврале, марте, мае и декабре аномалии температуры в тропосфере росли с увеличением высоты. В нижней стратосфере положительная аномалия наблюдалась только в январе и составила 0,10°С. Наибольшая аномалия температуры в нижней стратосфере умеренных широт наблюдалась в апреле и составила -1,50°С. Наибольшее изменение аномалий температуры с высотой наблюдалось в июне: разность аномалий на поверхностях 850 и 100 гПа составила 2,13°С.

В высоких широтах в тропосфере Северного полушария в 2022 году отрицательные аномалии температуры наблюдались на высоте 300 гПа с февраля по июнь и в ноябре. В феврале и марте они достигали -1,52 и -1,47°С соответственно. В апреле они были близки к нулю. На высоте 850 гПа аномалии температуры не превысили 1°С только в апреле, сентябре, ноябре и декабре. Наибольшие положительные аномалии температуры на высоте 850 гПа наблюдались в феврале и октябре и составили 1,58 и 1,49°С соответственно. В нижней стратосфере высоких широт в апреле, мае, сентябре и ноябре наблюдались положительные аномалии температуры. В апреле они достигали 0,57°С. С января по март в нижней стратосфере высоких широт наблюдались большие отрицательные аномалии температуры, составляющие -3,10°С, -6,19°С и -4,12°С соответственно.

Таблица 11.1 - Аномалии температуры за 2022 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	0.25	0.39	0.36	0.10	1.12	1.43	0.16	-3.10
Февраль	0.57	0.70	0.97	-0.26	1.58	0.66	-1.52	-6.19
Март	0.16	0.17	0.25	-0.66	1.09	0.04	-1.47	-4.12
Апрель	0.48	0.55	0.38	-1.50	0.70	0.43	-0.07	0.57
Май	0.47	0.52	0.66	-0.32	1.17	0.30	-0.19	0.17
Июнь	1.16	0.84	0.63	-0.97	1.41	0.80	-0.12	-0.47
Июль	0.94	0.97	0.93	-0.79	1.03	1.11	0.79	-0.29
Август	1.04	0.80	0.95	-0.33	1.04	1.03	0.89	-0.17
Сентябрь	0.94	0.77	0.78	-0.25	0.41	0.42	0.47	0.13
Октябрь	0.78	0.47	0.45	-0.38	1.49	0.81	0.21	-0.26

Ноябрь	0.72	0.57	0.12	-0.51	0.69	0.36	-0.45	0.12
Декабрь	-0.23	0.11	0.19	-0.95	0.24	0.27	0.62	-0.98

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 2022 года (зимний сезон включает период декабрь 2021-февраль 2022 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 2022 год вошел в десятку самых теплых лет во всех сезонах. Самым теплым сезоном стала осень с аномалией температуры 0,59°C и 4 местом в ряду самых теплых лет. Рекордных аномалий температуры не наблюдалось ни в одном сезоне ни в одном широтном поясе, тем не менее лето в умеренных и высоких широтах стало 4 и 3 в ряду самых теплых лет за всю историю наблюдений. Аномалии температуры составили 0,90 и 0,98°C соответственно. Остальные сезоны в высоких широтах не попали в десятку самых теплых сезонов, также как и лето низких широт и весна умеренных широт. В целом за год 2022 год вошел в десятку самых теплых лет в тропосфере с аномалией температуры 0,52°C.

В нижней стратосфере в 2022 году зима в высоких широтах стала рекордно холодной за всю историю наблюдений. Аномалия температуры достигла -3,69°C. Предыдущий рекорд (-3,41°C) наблюдался в 1996 году. При этом аномалии температуры зимой в низких и умеренных широтах были близки к нулю. В целом по Северному полушарию весна, лето и осень заняли последние места в десятке самых холодных лет с аномалиями температуры -0,65°C, -0,78 и -0,69°C соответственно. При этом в отдельных широтных поясах в десятку самых холодных лет вошли только весна и лето низких широт с одинаковой аномалией в -1,05°C и осень умеренных широт с аномалией в -0,66°C. В высоких широтах в десятку самых холодных лет не вошел ни один сезон кроме зимнего, а весной вообще наблюдалась нулевая аномалия температуры. В целом за год 2022 год занял 8 место, а в высоких широтах – 3 место, в ряду самых холодных лет в нижней стратосфере с аномалиями температуры -0,68 и -0,94°C соответственно.

Более детально вертикально-широтная структура для годовых аномалий температуры в 2022 г показана на рис. 11.1, а для аномалий температуры отдельных сезонов 2022 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 2022 г.

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

ΔT_{2022} - величина аномалии в градусах Цельсия

R (-R) – ранг (обратный ранг) в рядах, упорядоченных по возрастанию значений соответствующих аномалий за период 1958-2022 гг.

СЕЗОН	0-30 С.Ш.		30-60 С.Ш.		60-90 С.Ш.		Северное полушарие	
ТРОПОСФЕРА, 850-300 гПа								
	ΔT_{2022}	-R	ΔT_{2022}	-R	ΔT_{2022}	-R	ΔT_{2022}	-R
ЗИМА	0.40	9	0.63	6	0.48	11	0.55	6
ВЕСНА	0.63	6	0.41	12	0.33	17	0.48	7

ЛЕТО	0.24	14	0.90	4	0.98	3	0.68	5
ОСЕНЬ	0.52	8	0.63	5	0.57	11	0.59	4
ГОД	0,42	8	0,56	7	0,66	5	0,52	6
НИЖНЯЯ СТРАТОСФЕРА, 100–50 гПа								
	ΔT_{2022}	R	ΔT_{2022}	R	ΔT_{2022}	R	ΔT_{2022}	R
ЗИМА	-0.01	30	-0.07	22	-3.69	1	-0.34	17
ВЕСНА	-1.05	9	-0.54	14	0.00	29	-0.65	10
ЛЕТО	-1.05	9	-0.69	10	-0.40	13	-0.78	9
ОСЕНЬ	-0.87	11	-0.66	8	-0.11	23	-0.69	10
ГОД	-0,84	10	-0,56	11	-0,94	3	-0,68	8

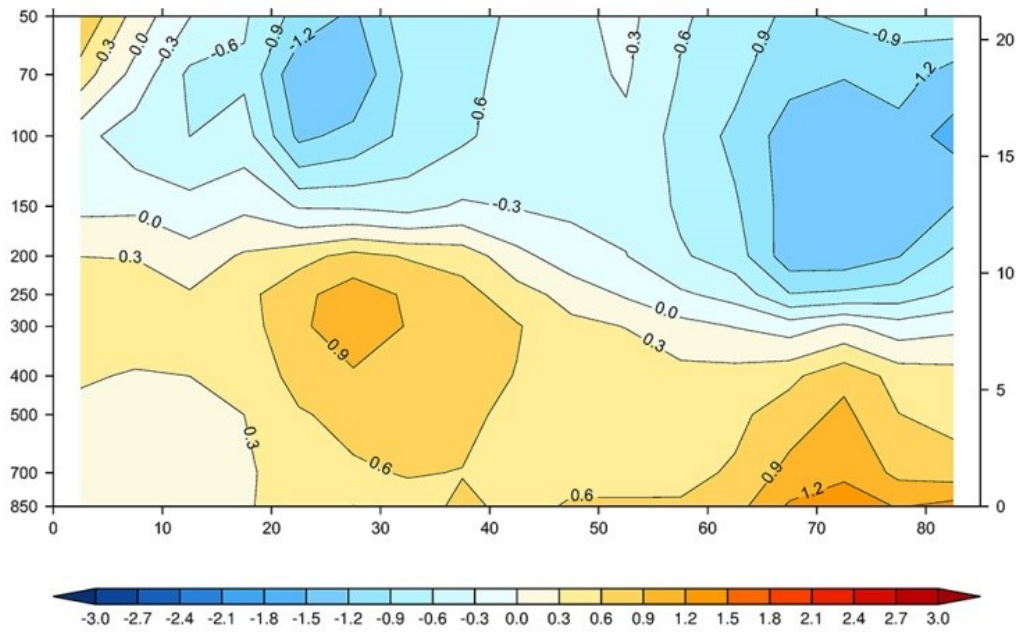
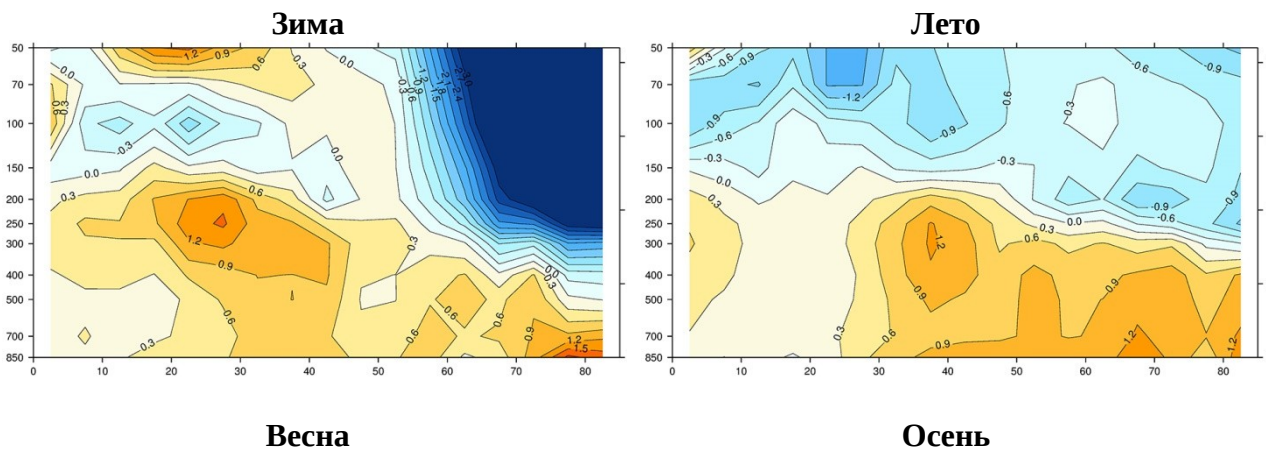


Рисунок 11.1 - Вертикально-широтная структура годовых аномалий температуры свободной атмосферы в 2022 году. Горизонтальная ось – широты, левая вертикальная ось – давление на стандартных изобарических поверхностях, правая вертикальная ось – высоты над уровнем моря в км.



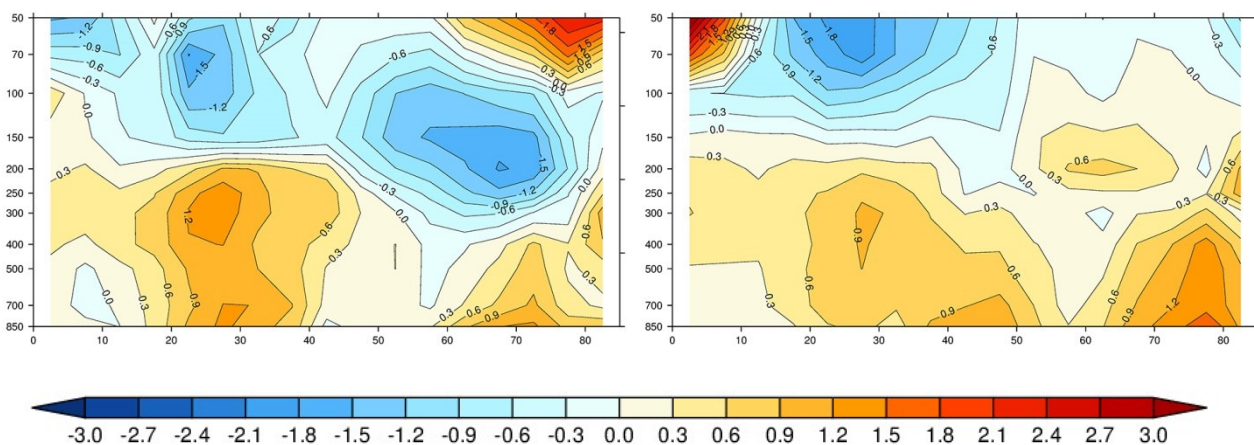


Рисунок 11.2 - То же, что на рис 11.1, но для отдельных сезонов (зима 2021-2022 гг., весна, лето и осень 2022 года)

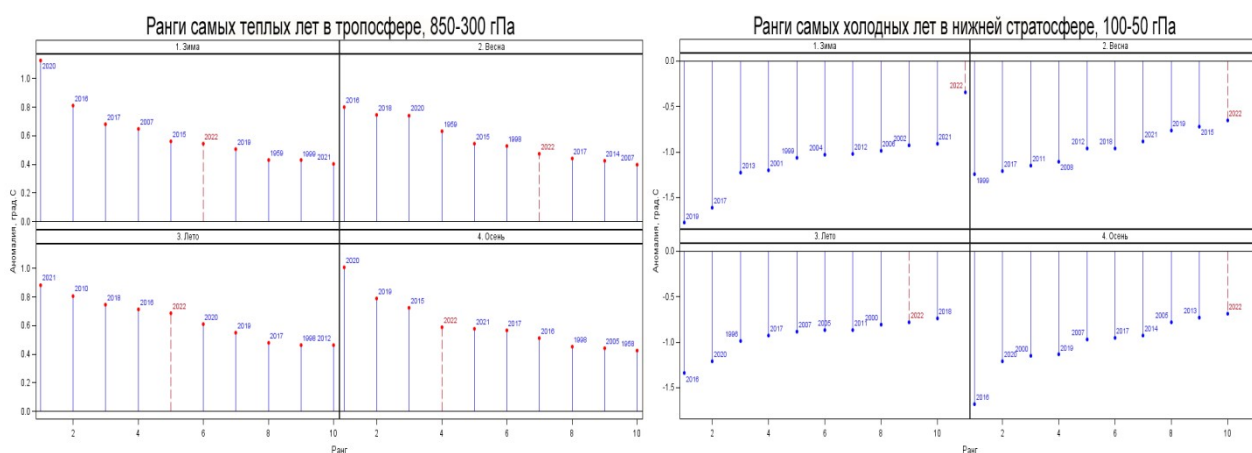


Рисунок 11.3 - Ранги самых значительных сезонных аномалий температуры в свободной атмосфере Северного полушария за период 1958-2022 г. Левая панель – положительные аномалии, тропосфера (850-300 гПа), правая панель – отрицательные аномалии, нижняя стратосфера (100-50 гПа). Обозначения сезонов по аналогии с рис. 11.2, 2022 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.

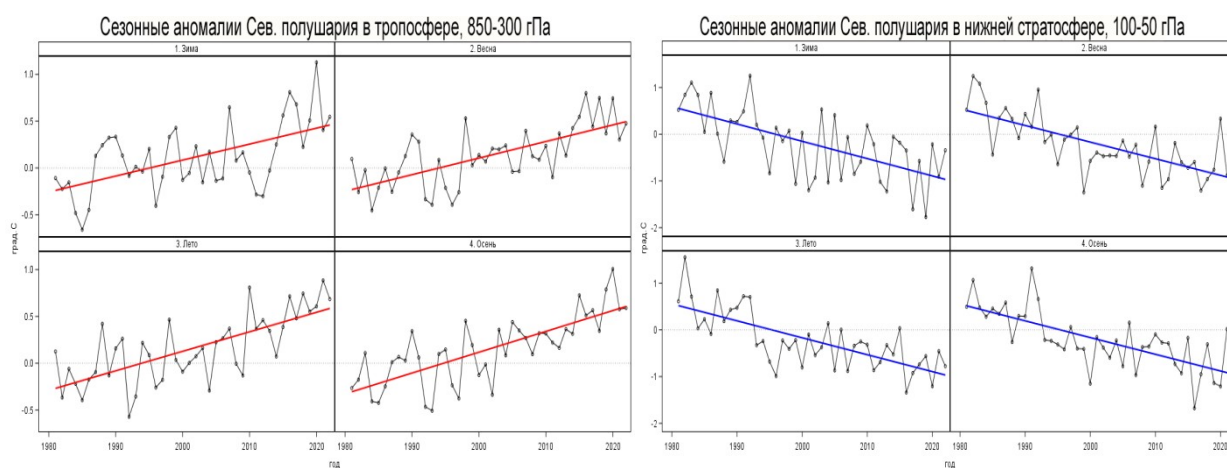


Рисунок 11.4 - Ряды сезонных аномалий температуры в свободной атмосфере Северного полушария за период 1981-2022 г. Левая панель – тропосфера (850-300 гПа), правая панель – нижняя стратосфера (100-50 гПа). Линии трендов построены методом наименьших квадратов для тропосферы (красный цвет) и нижней стратосферы (синий цвет). Обозначения сезонов по аналогии с рис. 11.2.

Таблица 11.3 содержат значения линейных трендов, вычисленных за период 1981-2022 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 2021 годом увеличились оценки трендов весенних аномалий в низких широтах, зимних и летних в умеренных широтах, а также летних в высоких широтах. Во всех случаях оценки тренда увеличилась на $0,01^{\circ}\text{C}/10$ лет. Осенний тренд в высоких широтах уменьшился на $0,02^{\circ}\text{C}/10$ лет и составил $0,24^{\circ}\text{C}/10$ лет. В среднем по Северному полушарию по сравнению с прошлым годом увеличился только летний тренда, а значения трендов температуры принимали значения от $0,17^{\circ}\text{C}/10$ лет зимой до $0,21^{\circ}\text{C}/10$ лет летом и осенью. Годовой тренд по сравнению с 2021 годом не изменился и составил $0,19^{\circ}\text{C}/10$ 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 существенно изменился с $-0,01^{\circ}\text{C}/10$ лет в 2021 году до $-0,13^{\circ}\text{C}/10$ лет в 2022 году. В низких широтах абсолютные значения трендов уменьшились во всех сезонах, за исключением осени. Летом наблюдалось наибольшее уменьшение значений трендов с $-0,54^{\circ}\text{C}/10$ лет до $-0,50^{\circ}\text{C}/10$ лет. В умеренных широтах уменьшился летний тренд по абсолютному значению, осенний – увеличился. Во все остальные сезоны всех широтных зон значения трендов уменьшились по абсолютному значению по сравнению с 2021 годом. Исключение составляет весна низких широт. В этот сезон оценка тренда не изменилась. Наибольшее уменьшение на $0,06^{\circ}\text{C}/10$ лет наблюдалось зимой и осенью в низких широтах. В среднем по Северному полушарию уменьшились абсолютные значения всех сезонных трендов. Годовой тренд уменьшился с $-0,37^{\circ}\text{C}/10$ лет до $-0,36^{\circ}\text{C}/10$ лет.

Таблица 11.3 – Оценки линейного тренда температуры в тропосфере и нижней стратосфере (1981-2022 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	41	0.16	16	0.14	22	0.17	32
ВЕСНА	0.13	22	0.21	41	0.14	15	0.18	47
ЛЕТО	0.10	21	0.26	50	0.27	42	0.21	50
ОСЕНЬ	0.15	29	0.24	49	0.24	37	0.21	55
ГОД	0,15	38	0,22	58	0,20	46	0,19	58
НИЖНЯЯ СТРАТОСФЕРА, 100–50 гПа								
ЗИМА	-0.58	45	-0.30	20	-0.13	1	-0.37	39
ВЕСНА	-0.49	53	-0.29	29	-0.36	16	-0.36	49
ЛЕТО	-0.49	50	-0.32	44	-0.21	34	-0.36	52
ОСЕНЬ	-0.53	42	-0.31	45	-0.21	40	-0.37	51
ГОД	-0,52	63	-0,30	55	-0,23	22	-0,36	65

Выводы

Температурных рекордов в тропосфере Северного полушария в 2022 году не наблюдалось. Тем не менее, в низких и умеренных широтах три сезона из четырех вошли в десятку самых теплых лет с 1958 года. В высоких широтах лето 2022 года стало третьим в ряду самых теплых лет с аномалией температуры 0,98°C. В целом по Северному полушарию 2022 год стал шестым в ряду самых теплых лет с аномалией температуры 0,52°C. Таким образом, 2015-2022 гг. являются восемью самыми теплыми годами с начала инструментальных наблюдений в тропосфере Северного полушария.

В нижней стратосфере зимой в низких и умеренных широтах наблюдались около нулевые аномалии температуры, а в высоких широтах – рекордно низкая аномалия температуры со значением -3,69°C. Предыдущий рекорд (-3,41°C) наблюдался в 1996 году. Помимо этого в умеренных широтах осенью наблюдалась аномалия температуры равная -0,66°C, что является восьмым местом в ряду самых холодных лет. А в низких широтах весной и летом аномалия температуры была равна 1,05°C, что стало девятым местом в ряду самых холодных лет. В целом за год 2022 год стал восьмым самым холодным годом с аномалией температуры -0,68°C. Предыдущим годом, попавшим в десятку самых холодных лет, был 2019 год.

Структура климатических трендов температуры, исследованных за период с 1981 года по 2022 год, подтверждает тенденции потепления в тропосфере и тенденции значительного похолодания в нижней стратосфере. Добавление оценок аномалий за 2022 год к соответствующим рядам, ранее исследованным за период до 2021 года включительно, привело к увеличению значений трендов отдельных сезонов на отдельных широтных полосах: весенних аномалий в низких широтах, зимних и летних в умеренных широтах, а также летних в высоких широтах. В нижней стратосфере во всех сезонах всех широтных зон, за исключением осени низких и умеренных широт, а также зимы высоких широт и весны низких широт, произошло уменьшение абсолютных значений оценок трендов. Среднегодовой тренд температуры в тропосфере не изменился и составил 0,19°C/10 лет. Абсолютное значение среднегодового тренда температуры в нижней стратосфере уменьшилось по сравнению с предыдущим годом на 0,01°C/10 и составило -0,36°C/10 лет.