

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 2019 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 2019 года (зимний сезон включал декабрь 2018 г и январь-февраль 2019 г), а также для 2019 года в целом.

Особенности температурного режима в свободной атмосфере в 2019 г.

В таблице 11.1 приведены значения аномалий температуры за 2019 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 преобладают положительные аномалии температуры. Наибольшие аномалии наблюдались в октябре и превышали 1,04°С во всем слое тропосферы. В сентябре также наблюдались большие положительные аномалии температуры, превышавшие 0,84°С во всем слое тропосферы. В феврале положительная аномалия температуры 1,28°С наблюдалась на высоте 500 гПа, а в декабре 1,75°С наблюдалось на высоте 850 гПа. Отрицательные аномалии в тропосфере наблюдались только в январе, марте и мае на высоте 300 гПа, причем в январе и мае они были близки к нулю, а в марте достигали -0,25°С. В мае в тропосфере наблюдались небольшие аномалии температуры, не превышавшие 0,18°С. В нижней стратосфере с марта по июнь наблюдались положительные аномалии температуры, изменявшиеся от 0,03°С в марте до 0,37°С в июне. В остальные месяцы наблюдались отрицательные аномалии температуры, причем в январе, феврале, сентябре и октябре они превышали -1,19°С по абсолютному значению. Наибольшее изменение аномалий температуры с высотой наблюдалось в декабре и составило 2,4°С. Наибольшая положительная аномалия в умеренных широтах наблюдалась в декабре на высоте 850 гПа (1,75°С), а наибольшая отрицательная – в феврале на высоте 100 гПа (-1,47°С).

В высоких широтах в тропосфере на высотах 850 и 500 гПа на протяжении всех месяцев, за исключением января, преобладали положительные аномалии температуры. На высоте 300 гПа отрицательные аномалии наблюдались с марта по июль, а также в ноябре. В апреле они достигали -1,01°С. На протяжении всех месяцев, за исключением января и февраля, аномалии температуры в тропосфере уменьшались с высотой. На высоте 850 гПа с марта по июнь, а также в сентябре, октябре и ноябре аномалии температуры превышали 1,06°С. Наибольшая положительная аномалия температуры наблюдалась в марте на высоте 850 гПа и составила 2,10°С. В нижней стратосфере отрицательные аномалии температуры наблюдались на протяжении всего года, за исключением января, февраля, мая и июля. В марте и апреле наблюдались наибольшие отрицательные аномалии температуры (-2,10 и -1,10°С соответственно). В январе в нижней стратосфере положительная аномалия температуры достигала 4,91°С.

Таблица 11.1 - Аномалии температуры за 2019 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	0.30	0.32	-0.02	-1.35	-0.31	-0.83	0.75	4.91
Февраль	0.53	1.28	0.49	-1.47	0.80	0.91	0.19	0.73
Март	0.83	0.13	-0.25	0.03	2.10	0.90	-0.62	-2.10
Апрель	0.60	0.57	0.20	0.21	1.29	0.00	-1.01	-1.10
Май	0.05	0.18	-0.04	0.27	1.19	0.54	-0.23	0.58
Июнь	0.72	0.50	0.24	0.37	1.18	0.74	-0.16	-0.04
Июль	0.42	0.36	0.26	0.16	0.39	0.27	-0.06	0.01
Август	0.57	0.71	0.81	-0.21	0.91	0.52	0.11	-0.16
Сентябрь	1.00	0.92	0.84	-1.22	1.06	0.30	0.25	-0.05

ь								
Октябрь	1.04	1.26	1.10	-1.19	1.22	0.55	0.13	-0.34
Ноябрь	0.43	0.95	0.54	-0.10	0.69	0.68	-0.19	-0.66
Декабрь	1.75	0.85	0.64	-0.65	1.06	0.41	0.29	-0.21

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 2019 года (зимний сезон включает период декабрь 2018-февраль 2019 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 лето 2019 года стало рекордно теплым с 1958 года в низких широтах, а аномалия температуры составила 0,58°C. В умеренных широтах рекордно теплой стала осень, а аномалия температуры составила 0,94°C. В низких широтах все сезоны вошли в шестерку самых теплых сезонов, а год в целом стал вторым рекордно теплым с 1958 года. Его аномалия температуры составила 0,55°C. В умеренных широтах год в целом стал третьим в ряду самых теплых лет с аномалией 0,64°C. В высоких широтах весна и осень заняли 7 и 9 ранги в рядах самых теплых сезонов соответственно. В целом по северному полушарию в 2019 году наблюдалась рекордно теплая осень с аномалией температуры 0,79°C, а год в целом стал 3 в ряду самых теплых лет. Зима и лето 2019 также вошли в пятерку самых теплых сезонов по северному полушарию с аномалиями температуры 0,51 и 0,55°C соответственно.

В нижней стратосфере отрицательные аномалии температуры наблюдались на протяжении всех сезонов во всех широтных зонах, за исключением зимы в высоких широтах. Зима 2019 года стала рекордно холодной в умеренных широтах и в целом по северному полушарию со значениями аномалий температуры -1,93 и -1,77°C соответственно. В низких широтах лето 2019 года стало третьим самым холодным летом с 1958 года, а все остальные сезоны и год в целом – вторыми. При этом аномалии температуры во все сезоны превышали -1,32°C по абсолютному значению. В умеренных широтах 2019 год стал пятым в ряду самых холодных лет, а аномалия температуры составила -0,74°C. В высоких широтах зимой наблюдалась положительная аномалия температуры, достигавшая 1,74°C, а весна и осень стали 6 и 3 в ряду самых холодных сезонов с аномалиями температуры -1,21 и -0,53°C соответственно. В среднем по северному полушарию осень и 2019 год в целом стали третьими в соответствующих рядах с аномалиями температуры -1,14 и -1,01°C.

Более детально вертикально-широтная структура для годовых аномалий температуры в 2019 г показана на рис. 11.1, а для аномалий температуры отдельных сезонов 2019 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 2019 г.

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

ΔT_{2019} - величина аномалии в градусах Цельсия

R (-R) – ранг (обратный ранг) в рядах, упорядоченных по возрастанию значений соответствующих аномалий за период 1958-2019 гг.

СЕЗОН	0-30 С.Ш.	30-60 С.Ш.	60-90 С.Ш.	Северное полушарие
-------	-----------	------------	------------	--------------------

ТРОПОСФЕРА, 850-300 гПа								
	ΔT_{2019}	-R	ΔT_{2019}	-R	ΔT_{2019}	-R	ΔT_{2019}	-R
ЗИМА	0.65	3	0.45	10	0.30	16	0.51	5
ВЕСНА	0.43	6	0.30	14	0.63	7	0.37	10
ЛЕТО	0.58	1	0.54	7	0.55	14	0.55	4
ОСЕНЬ	0,57	5	0,94	1	0,62	9	0,79	1
ГОД	0,55	2	0,64	3	0,52	7	0,60	3
НИЖНЯЯ СТРАТОСФЕРА, 100–50 гПа								
	ΔT_{2019}	R	ΔT_{2019}	R	ΔT_{2019}	R	ΔT_{2019}	R
ЗИМА	-2.16	2	-1.93	1	1.74	45	-1.77	1
ВЕСНА	-1.58	2	-0.29	20	-1.21	6	-0.76	7
ЛЕТО	-1.32	3	-0.20	20	-0.34	14	-0.56	11
ОСЕНЬ	-1,97	2	-0,75	6	-0,53	3	-1,14	3
ГОД	-1,69	2	-0,74	5	-0,18	15	-1,01	3

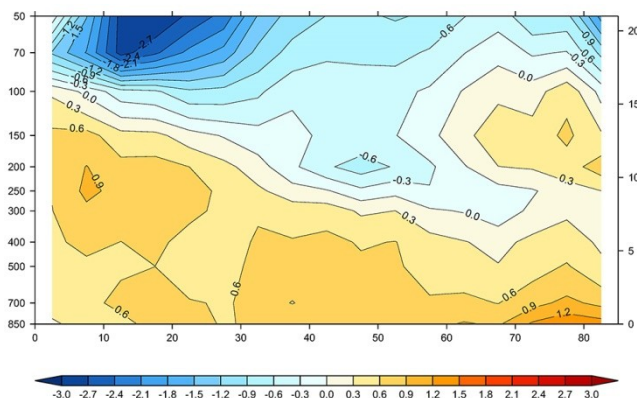
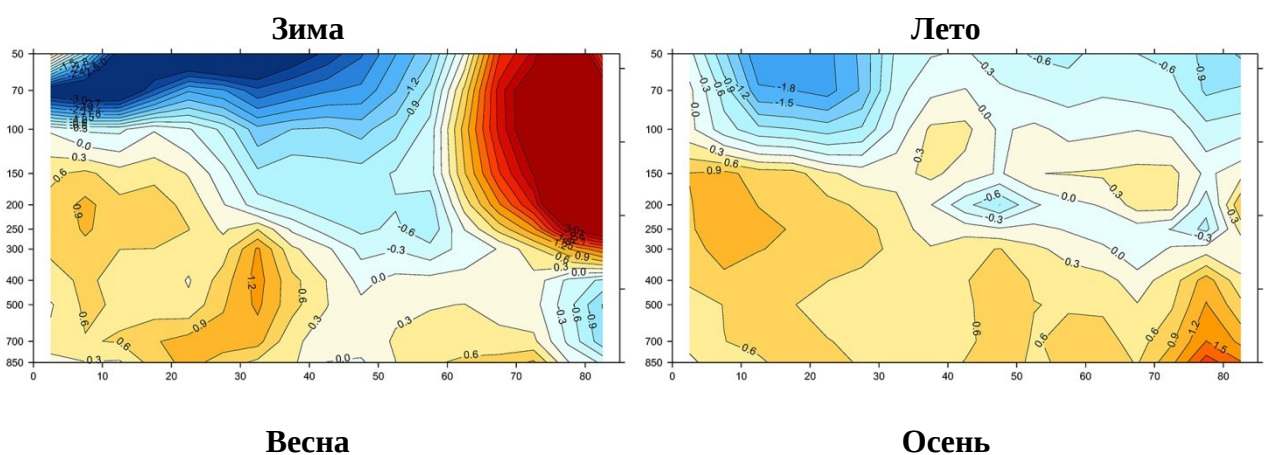


Рисунок 11.1 - Вертикально-широтная структура годовых аномалий температуры свободной атмосферы в 2019 году. Горизонтальная ось – широты, левая вертикальная ось – давление на стандартных изобарических поверхностях, правая вертикальная ось – высоты над уровнем моря в км.



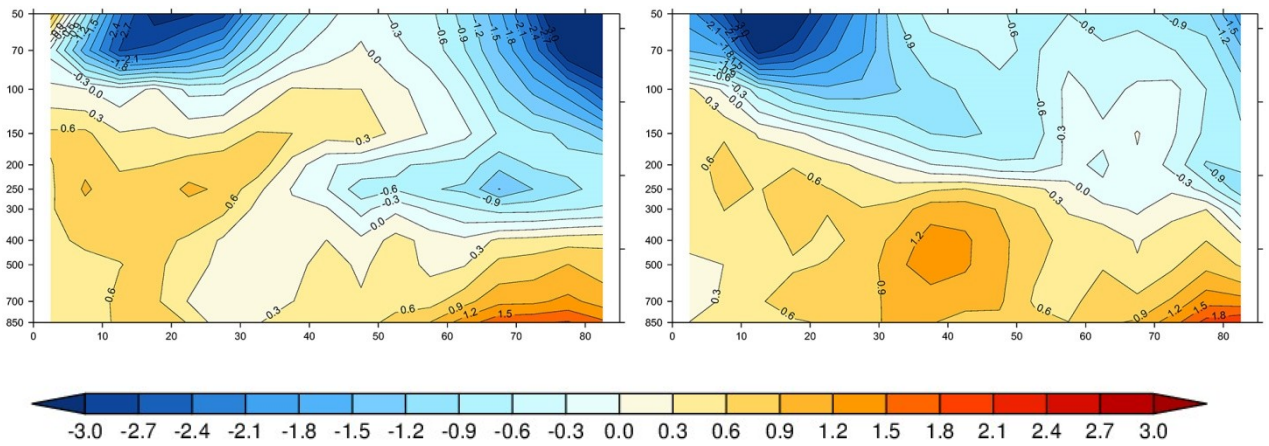


Рисунок 11.2 - То же, что на рис 11.1, но для отдельных сезонов (зима 2018-2019 гг., весна, лето и осень 2019 года)

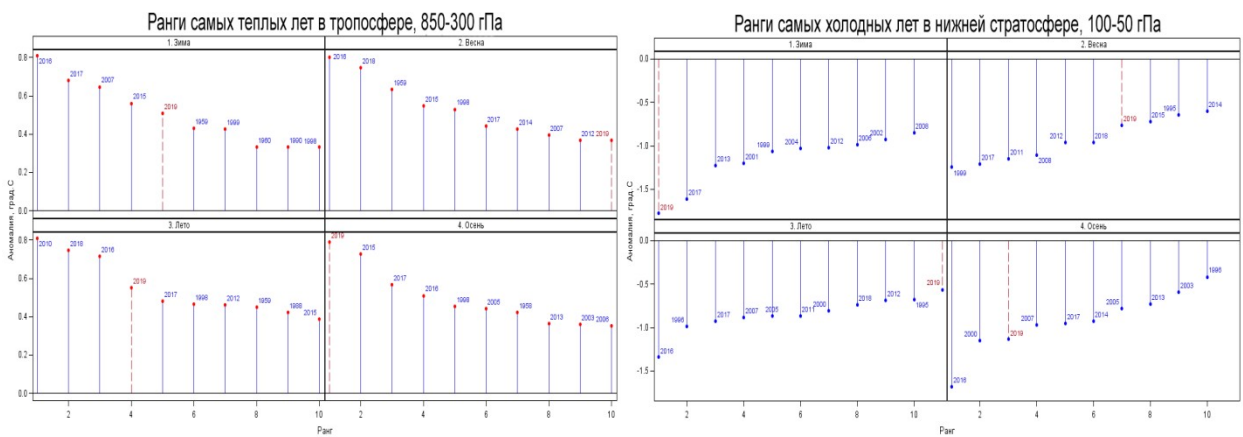


Рисунок 11.3 - Ранги самых значительных сезонных аномалий температуры в свободной атмосфере Северного полушария за период 1958-2019 г. Левая панель – положительные аномалии, тропосфера (850-300 гПа), правая панель – отрицательные аномалии, нижняя стратосфера (100-50 гПа). Обозначения сезонов по аналогии с рис. 11.2, 2019 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.

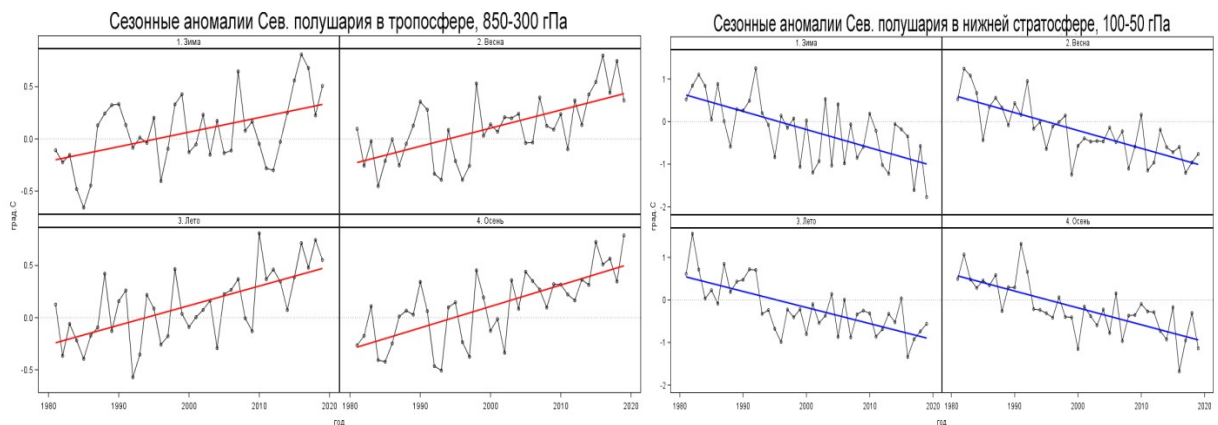


Рисунок 11.4 - Ряды сезонных аномалий температуры в свободной атмосфере Северного полушария за период 1981-2019 г. Левая панель – тропосфера (850-300 гПа), правая панель – нижняя стратосфера (100-50 гПа). Линии трендов построены методом наименьших квадратов для тропосферы (красный цвет) и нижней стратосферы (синий цвет). Обозначения сезонов по аналогии с рис. 11.2.

Таблица 11.3 содержат значения линейных трендов, вычисленных за период 1981-2019 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, статистически для тропосферы значимая тенденция потепления не наблюдается для зимнего сезона в зоне умеренных широт. Тенденция потепления в низких широтах для весны и лета стала статистически значимой по сравнению с 2018 годом. В низких широтах тенденции к потеплению во всех сезонах увеличились по сравнению с 2018 годом. В умеренных широтах увеличились осенний и годовой тренды, а весенний и летний уменьшились. В высоких широтах увеличился только весенний тренд. В целом по северному полушарию увеличились все тренды за исключением весеннего. В целом по северному полушарию наблюдались статистически значимые положительные тренды изменения температуры: от 0,14 °C/10 лет зимой до 0,21 °C/10 лет осенью. Среднегодовой тренд температуры в тропосфере увеличился по сравнению с прошлым годом и составил 0,18 °C/10.

Для нижней стратосферы очевидное статистически значимое похолодание имеет место для всех осуществленных вариантов оценки тренда, за исключением зимнего сезона в высоких широтах. В низких широтах все тренды за исключением летнего увеличились по сравнению с 2018 годом по абсолютному значению. В умеренных широтах зимний тренд увеличился с -0,31 °C/10 в 2018 году до -0,36 °C/10 в 2019 году. Все остальные тренды уменьшились. В высоких широтах уменьшились все тренды за исключением летнего и осеннего. В целом по северному полушарию уменьшились абсолютные значения весеннего и летнего трендов, а абсолютные значения зимнего и осеннего трендов увеличились. В северном полушарии скорость стратосферного похолодания составляла от -0,43°C/10 лет зимой до -0,39°C/10 лет летом. Абсолютное значение среднегодового тренда температуры в нижней стратосфере не изменилось по сравнению с предыдущим годом и составило -0,40 °C/10 лет.

Таблица 11.3 – Оценки линейного тренда температуры в тропосфере и нижней стратосфере (1981-2019 гг.)

b – значения сезонного или годового тренда, (°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	0,19	34	0,11	8	0,17	25	0,14	23
ВЕСНА	0,10	13	0,21	39	0,15	15	0,17	41
ЛЕТО	0,08	14	0,23	42	0,24	35	0,19	41
ОСЕНЬ	0,14	22	0,23	44	0,25	35	0,21	50
ГОД	0,13	29	0,20	51	0,20	43	0,18	51
НИЖНЯЯ СТРАТОСФЕРА, 100–50 гПа								
ЗИМА	-0,68	50	-0,36	23	-0,01	0	-0,43	42
ВЕСНА	-0,56	57	-0,36	38	-0,35	13	-0,42	58
ЛЕТО	-0,50	50	-0,34	41	-0,23	34	-0,38	50

ОСЕНЬ	-0,60	46	-0,33	45	-0,20	32	-0,40	53
ГОД	-0,58	67	-0,34	58	-0,21	16	-0,40	67

Выводы

В тропосфере северного полушария 2019 год стал третьим самым теплым годом с 1958 года. Среднегодовая аномалия температуры составила 0,60°C. Таким образом, 2015-2019 гг. являются пятью самыми теплыми годами с начала инструментальных наблюдений в тропосфере северного полушария. При этом весна и лето 2019 года в северном полушарии вошли в пятерку самых теплых сезонов, а осень стала рекордно теплой с аномалией температуры 0,79°C. Также рекордно теплые лето и осень наблюдались в низких и умеренных широтах соответственно, а их аномалии температуры составили 0,58 и 0,94°C.

В нижней стратосфере 2019 год стал третьим в ряду самых холодных лет по всему северному полушарию со среднегодовой аномалией -1,01°C, уступая только 2016 и 2017 годам. В умеренных широтах наблюдалась рекордно холодная зима с аномалией температуры -1,93°C, а в низких широтах все сезоны заняли второе место в ряду самых холодных сезонов, и только лето – третье. В высоких широтах зимой наблюдалась положительная аномалия температуры, достигавшая 1,74°C.

Структура климатических трендов температуры, исследованных за период с 1981 года по 2019 год, подтверждает тенденции потепления в тропосфере и тенденции значительного похолодания в нижней стратосфере. Добавление оценок аномалий за 2019 год к соответствующим рядам, ранее исследованным за период до 2018 года включительно, привело к увеличению абсолютных значений зимнего, летнего и осеннего трендов в тропосфере, а также зимнего и осеннего трендов в нижней стратосфере. Среднегодовой тренд температуры в тропосфере увеличился на 0,01 °C/10 лет и составил 0,18 °C/10 лет. Абсолютное значение среднегодового тренда температуры в нижней стратосфере не изменилось по сравнению с предыдущим годом и составило -0,40 °C/10 лет.