

## 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 2020 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 2020 года (зимний сезон включал декабрь 2019 г и январь-февраль 2020 г), а также для 2020 года в целом.

### **Особенности температурного режима в свободной атмосфере в 2020 г.**

В таблице 11.1 приведены значения аномалий температуры за 2020 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 2020 году наблюдались только положительные аномалии температуры, за исключением декабря на высоте 300 гПа. Наибольшие аномалии наблюдались с января по март, а также в сентябре и ноябре. Значения аномалий температуры в эти месяцы во всем слое тропосферы превышали 0,98°С и достигали 1,78°С. Наименьшие положительные аномалии температуры наблюдались в апреле. Во всем слое тропосферы они не превышали 0,37°С, а на высоте 850 гПа составляли всего 0,06°С. В нижней стратосфере положительные аномалии температуры наблюдались с января по июнь. В мае и июне они составляли всего 0,02°С, а в марте достигали 1,57°С. Наибольшие отрицательные аномалии температуры наблюдались в сентябре и составляли -1,14°С. Также в сентябре наблюдалось наибольшее изменение аномалий температуры с высотой, которое составило 2,38°С.

В высоких широтах в нижних слоях тропосферы преобладали положительные аномалии температуры. На высоте 850 гПа аномалии температуры не превышали 1°С только в январе, марте, июле, августе и декабре. Наибольшие аномалии на высоте 850 гПа наблюдались в мае и ноябре и составляли 1,68°С и 1,88°С соответственно. На высоте 500 гПа с января по март наблюдались отрицательные аномалии температуры, достигавшие -0,70°С в январе. Наибольшие положительные аномалии наблюдались в апреле и мае и достигали 1,42°С. В верхних слоях тропосферы, на высоте 300 гПа, преобладали отрицательные аномалии температуры с максимальным значением -1,29°С в феврале. Положительные аномалии не превышали 0,43°С. В нижней стратосфере высоких широт преобладали отрицательные аномалии температуры, достигавшие -3,17°С и -3,19°С в феврале и апреле соответственно. Положительные аномалии наблюдались только в июне и октябре и не превышали 0,16°С.

**Таблица 11.1** - Аномалии температуры за 2020 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	1.78	1.33	0.98	0.42	0.05	-0.70	0.16	-0.81
Февраль	1.63	1.47	1.75	0.78	1.38	-0.37	-1.29	-3.17
Март	1.72	1.45	1.42	1.57	0.62	-0.18	-0.75	-0.53
Апрель	0.06	0.24	0.37	0.90	1.75	1.22	-0.22	-3.19
Май	0.20	0.66	0.62	0.02	1.68	1.42	-0.05	-0.40
Июнь	0.49	0.49	0.36	0.02	1.26	0.45	-0.65	0.16
Июль	0.65	0.71	0.73	-0.78	0.14	0.19	0.17	-0.21
Август	0.82	0.65	0.64	-0.52	0.90	0.20	-0.22	-0.49
Сентябрь	1.24	1.40	1.31	-1.14	1.47	0.77	0.27	-0.67
Октябрь	0.46	0.84	0.88	-0.73	1.28	0.71	0.13	0.15
Ноябрь	1.23	1.20	1.10	-0.95	1.88	1.12	0.43	-1.09
Декабрь	0.56	0.28	-0.07	-0.54	0.34	0.05	-0.49	-1.18

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 2020 года (зимний сезон включает период декабрь 2019-февраль 2020 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 2020 год стал рекордно теплым в низких широтах как в среднем за год, так и в отдельные сезоны, за исключением весны. Весенняя аномалия температуры составляет 0,72°C и уступает только 2010 году. В умеренных широтах рекордно большие аномалии температуры наблюдались зимой (1,35°C) и осенью (1,09°C), а также в среднем за год (0,90°C). Весна и лето 2020 года в умеренных широтах вошли в пятерку самых теплых сезонов с 1958 года. В высоких широтах большие значения аномалий температуры наблюдались весной (0,83°C) и осенью (0,95°C), что позволило им стать 3 и 4 самыми теплыми сезонами. В среднем по северному полушарию рекордно большие аномалии температуры наблюдались зимой (1,13°C) и осенью (1,01°C). Весна и лето 2020 года также заняли 3 и 4 место в рядах самых теплых сезонов. 2020 год стал самым теплым в тропосфере северного полушария с 1958 года. Аномалия температуры составила 0,83°C, что на 0,18°C больше предыдущего рекорда 2016 года.

В нижней стратосфере в низких и высоких широтах наблюдались только отрицательные аномалии температуры. Лето 2020 года в низких широтах стало рекордно холодным с 1958 года. Аномалия температуры составила -2,21°C. Осень 2020 года в высоких широтах стала второй самой холодной с 1958 года с аномалией температуры -0,71°C, уступающей только осени 2012 года. В умеренных широтах зимой и весной наблюдались положительные аномалии температуры, достигавшие 0,75°C, а лето и осень вошли в пятерку самых холодных сезонов. В среднем по северному полушарию лето и осень стали вторыми в рядах самых холодных сезонов, а весной наблюдалась положительная аномалия температуры, составляющая 0,33°C. Несмотря на холодные лето и осень 2020 год не вошел в 10 самых холодных лет, а годовая аномалия температуры составила -0,52°C.

Более детально вертикально-широтная структура для годовых аномалий температуры в 2020 г показана на рис. 11.1, а для аномалий температуры отдельных сезонов 2020 г – на рис. 11.2. На них, в частности, видно, что весной 2020 года в умеренных широтах положительные аномалии температуры наблюдались во всем слое атмосферы от 850 до 50 гПа.

На рис. 11.3 представлены посезонно ранги 10 самых теплых в тропосфере и 10 самых холодных в нижней стратосфере лет, причем отдельно выделено положение 2020 г.

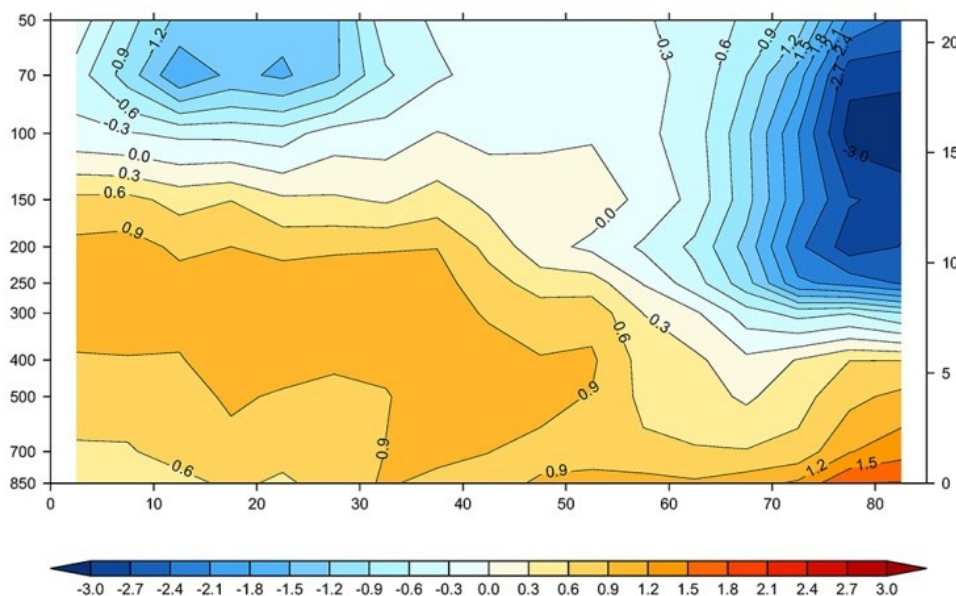
**Таблица 11.2** – Аномалии температуры в тропосфере и нижней стратосфере от норм 1981-2010 гг.

$\Delta T_{2020}$  - величина аномалии в градусах Цельсия

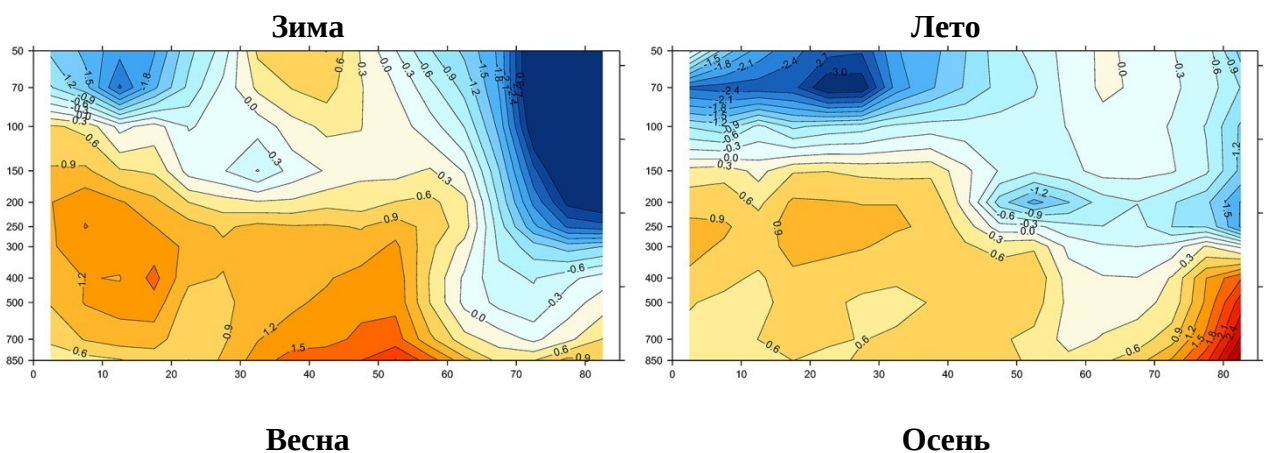
R (-R) – ранг (обратный ранг) в рядах, упорядоченных по возрастанию значений соответствующих аномалий за период 1958-2020 гг.

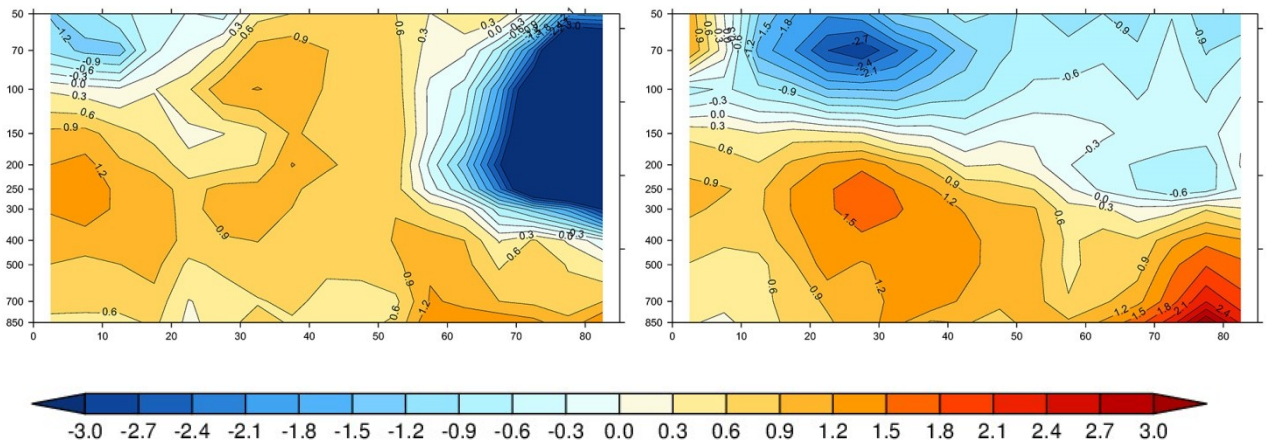
СЕЗОН	0-30 С.Ш.		30-60 С.Ш.		60-90 С.Ш.		Северное полушарие	
<b>ТРОПОСФЕРА, 850-300 гПа</b>								
	$\Delta T_{2020}$	-R	$\Delta T_{2020}$	-R	$\Delta T_{2020}$	-R	$\Delta T_{2020}$	-R
<b>ЗИМА</b>	0.96	1	1.35	1	0.09	29	1.13	1

<b>ВЕСНА</b>	0.72	2	0.75	4	0.83	3	0.74	3
<b>ЛЕТО</b>	0.63	1	0.63	5	0.35	18	0.61	4
<b>ОСЕНЬ</b>	0.86	1	1.09	1	0.95	4	1.01	1
<b>ГОД</b>	0.78	1	0.90	1	0.51	8	0.83	1
<b>НИЖНЯЯ СТРАТОСФЕРА, 100–50 гПа</b>								
	$\Delta T_{2020}$	R	$\Delta T_{2020}$	R	$\Delta T_{2020}$	R	$\Delta T_{2020}$	R
<b>ЗИМА</b>	-0.85	11	0.26	30	-1.45	11	-0.22	16
<b>ВЕСНА</b>	-0.29	24	0.75	48	-0.58	15	0.33	36
<b>ЛЕТО</b>	-2.21	1	-0.89	5	-0.09	21	-1.21	2
<b>ОСЕНЬ</b>	-1.41	6	-1.18	3	-0.71	2	-1.21	2
<b>ГОД</b>	-1.05	5	-0.23	21	-0.73	8	-0.52	13

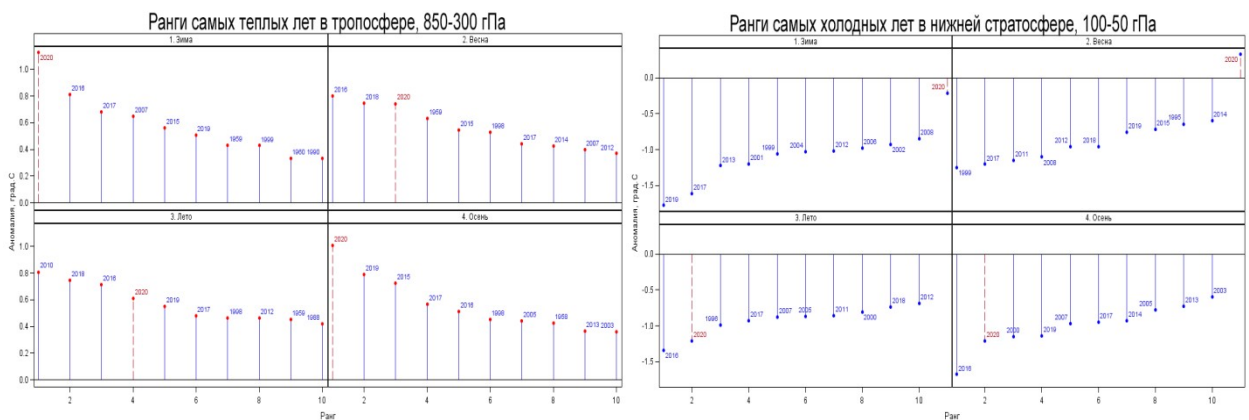


**Рисунок 11.1** - Вертикально-широтная структура годовых аномалий температуры свободной атмосферы в 2020 году. Горизонтальная ось – широты, левая вертикальная ось – давление на стандартных изобарических поверхностях, правая вертикальная ось – высоты над уровнем моря в км.





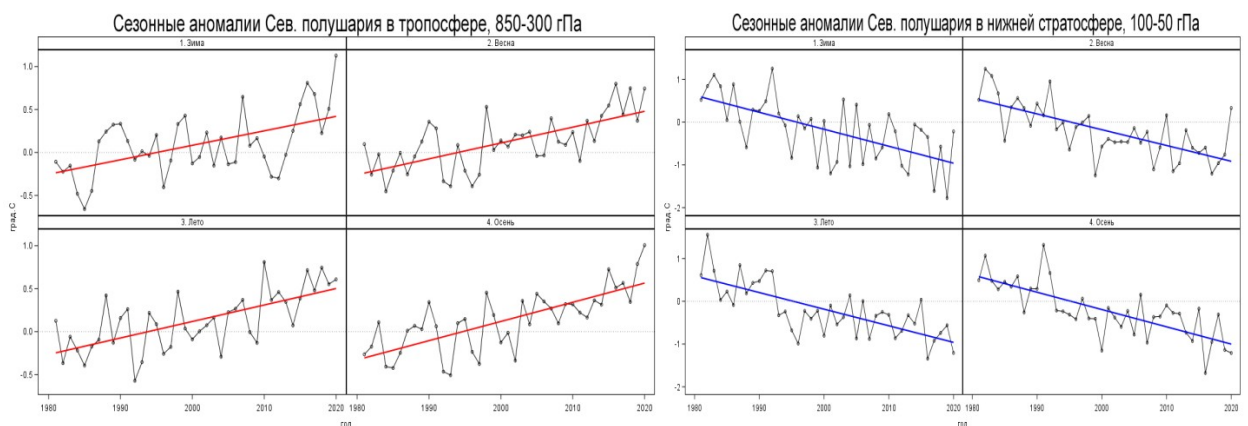
**Рисунок 11.2** - То же, что на рис 11.1, но для отдельных сезонов (зима 2019-2020 гг., весна, лето и осень 2020 года)



**Рисунок 11.3** - Ранги самых значительных сезонных аномалий температуры в свободной атмосфере Северного полушария за период 1958-2020 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, 2020 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 1981-2020 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 1981-2020 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 2019 годом тренды температуры во всех широтных зонах всех сезонов увеличились, за исключением зимы и лета в высоких широтах. Наибольшее увеличение значений тренда (на 0,04°C/10 лет) наблюдалось зимой в умеренных широтах, что привело к его статистической значимости. В среднем по северному полушарию увеличились все тренды за исключением летнего, а значения трендов изменения температуры составили от 0,17°C/10 лет зимой до 0,20°C/10 лет осенью. Среднегодовой тренд температуры в тропосфере увеличился по сравнению с прошлым годом и составил 0,19°C/10.

Для нижней стратосферы очевидное статистически значимое похолодание имеет место для всех осуществленных вариантов оценки тренда, за исключением зимнего сезона в высоких широтах. Зимние тренды уменьшились по абсолютному значению в низких и умеренных широтах, а в высоких широтах зимний тренд увеличился с -0,01°C/10 лет до -0,06°C/10 лет. Весенние тренды уменьшились во всех широтных зонах. Летний тренд в низких широтах увеличился с -0,50°C/10 лет до -0,54°C/10 лет, а в высоких широтах уменьшился. Осенний тренд вырос по сравнению с 2019 годов в низких широтах. В среднем по северному полушарию уменьшились абсолютные значения зимнего и весеннего трендов, а абсолютные значения летнего тренда увеличились. В северном полушарии скорость стратосферного похолодания составляла от -0,40°C/10 лет зимой до -0,37°C/10 лет весной. Абсолютное значение среднегодового тренда температуры в нижней стратосфере уменьшилось по сравнению с предыдущим годом и составило -0,39 °C/10 лет. Скорость уменьшения температуры воздуха в нижней стратосфере убывает с увеличением широты.

**Таблица 11.3** – Оценки линейного тренда температуры в тропосфере и нижней стратосфере (1981-2020 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>
<b>ТРОПОСФЕРА, 850-300 гПа</b>								
<b>ЗИМА</b>	<b>0.21</b>	<b>38</b>	<b>0.15</b>	<b>13</b>	<b>0.15</b>	<b>24</b>	<b>0.17</b>	<b>28</b>
<b>ВЕСНА</b>	<b>0.12</b>	<b>17</b>	<b>0.22</b>	<b>42</b>	<b>0.17</b>	<b>19</b>	<b>0.18</b>	<b>45</b>
<b>ЛЕТО</b>	<b>0.10</b>	<b>19</b>	<b>0.23</b>	<b>44</b>	<b>0.23</b>	<b>34</b>	<b>0.19</b>	<b>44</b>
<b>ОСЕНЬ</b>	<b>0.13</b>	<b>21</b>	<b>0.22</b>	<b>43</b>	<b>0.25</b>	<b>36</b>	<b>0.20</b>	<b>49</b>
<b>ГОД</b>	<b>0.14</b>	<b>34</b>	<b>0.22</b>	<b>55</b>	<b>0.20</b>	<b>45</b>	<b>0.19</b>	<b>54</b>
<b>НИЖНЯЯ СТРАТОСФЕРА, 100–50 гПа</b>								
<b>ЗИМА</b>	<b>-0.65</b>	<b>49</b>	<b>-0.32</b>	<b>20</b>	<b>-0.06</b>	<b>0</b>	<b>-0.40</b>	<b>39</b>
<b>ВЕСНА</b>	<b>-0.52</b>	<b>53</b>	<b>-0.30</b>	<b>27</b>	<b>-0.34</b>	<b>13</b>	<b>-0.37</b>	<b>47</b>
<b>ЛЕТО</b>	<b>-0.54</b>	<b>54</b>	<b>-0.34</b>	<b>43</b>	<b>-0.21</b>	<b>31</b>	<b>-0.39</b>	<b>53</b>

<b>ОСЕНЬ</b>	<b>-0.59</b>	<b>47</b>	<b>-0.32</b>	<b>46</b>	<b>-0.21</b>	<b>36</b>	<b>-0.39</b>	<b>55</b>
<b>ГОД</b>	<b>-0.57</b>	<b>67</b>	<b>-0.32</b>	<b>54</b>	<b>-0.22</b>	<b>18</b>	<b>-0.39</b>	<b>66</b>

### **Выводы**

В тропосфере северного полушария 2020 год стал рекордно теплым годом с 1958 года. Среднегодовая аномалия температуры составила  $0,83^{\circ}\text{C}$ , что на  $0,18^{\circ}\text{C}$  больше предыдущего рекорда 2016 года. Таким образом, 2015-2020 гг. являются шестью самыми теплыми годами с начала инструментальных наблюдений в тропосфере северного полушария. Также в 2020 году наблюдались рекордно большие аномалии температуры зимой ( $1,13^{\circ}\text{C}$ ) и осенью ( $1,01^{\circ}\text{C}$ ). Весна и лето заняли 3 и 4 место в рядах самых теплых сезонов. Рекордные аномалии температуры наблюдались и в отдельных широтных зонах. В низких широтах каждый сезон, за исключением весны, был рекордно теплым. Весна 2020 года в низких широтах стала второй самой теплой весной с начала инструментальных наблюдений.

В нижней стратосфере рекордно низкие аномалии температуры наблюдались летом 2020 года в низких широтах ( $-2,21^{\circ}\text{C}$ ). Зима и весна 2020 года не вошли в 10 самых холодных сезонов ни в одной широтной зоне. В умеренных широтах зимой и весной наблюдались положительные аномалии температуры, достигавшие  $0,75^{\circ}\text{C}$ . В среднем по северному полушарию весной наблюдались положительные аномалии температуры ( $0,33^{\circ}\text{C}$ ), а лето ( $-1,21^{\circ}\text{C}$ ) и осень ( $-1,21^{\circ}\text{C}$ ) стали вторым самыми холодными сезонами с начала инструментальных наблюдений. Годовая аномалия температуры при этом составила  $-0,52^{\circ}\text{C}$ , и не вошла в 10 самых холодных лет с 1958 года.

Структура климатических трендов температуры, исследованных за период с 1981 года по 2020 год, подтверждает тенденции потепления в тропосфере и тенденции значительного похолодания в нижней стратосфере. Добавление оценок аномалий за 2020 год к соответствующим рядам, ранее исследованным за период до 2019 года включительно, привело к увеличению абсолютных значений зимнего, весеннего и осеннего трендов в тропосфере, а также летнего тренда в нижней стратосфере. Абсолютные значения зимнего и весеннего трендов в нижней стратосфере уменьшились по сравнению с предыдущим годом. Среднегодовой тренд температуры в тропосфере увеличился на  $0,01^{\circ}\text{C}/10$  лет и составил  $0,19^{\circ}\text{C}/10$  лет. Абсолютное значение среднегодового тренда температуры в нижней стратосфере уменьшилось по сравнению с предыдущим годом на  $0,01^{\circ}\text{C}/10$  и составило  $-0,39^{\circ}\text{C}/10$  лет.