

## 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 2021 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 2021 года (зимний сезон включал декабрь 2020 г и январь-февраль 2021 г), а также для 2021 года в целом.

### **Особенности температурного режима в свободной атмосфере в 2021 г.**

В таблице 11.1 приведены значения аномалий температуры за 2021 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 2021 году преобладали положительные аномалии температуры. Небольшие отрицательные аномалии, не превышающие  $-0,11^{\circ}\text{C}$  по абсолютному значению, наблюдались только в январе на высотах 500 и 300 гПа, а также в феврале на высоте 100 гПа. Наибольшие аномалии температуры наблюдались в июне и июле, а также в феврале в верхних слоях тропосферы. Аномалии в эти месяцы превышали  $0,80^{\circ}\text{C}$  и достигали  $1,37^{\circ}\text{C}$ . Также в декабре на высоте 850 гПа аномалия температуры достигла  $1,24^{\circ}\text{C}$ . Наименьшие положительные аномалии в умеренных широтах Северного полушария, также как и в 2020 году, наблюдались в апреле. Во всем слое тропосферы они не превышали  $0,25^{\circ}\text{C}$ , а на высоте 850 гПа составляли всего  $0,07^{\circ}\text{C}$ . В феврале, апреле, мае аномалии температуры в тропосфере росли с увеличением высоты. В июле и октябре аномалии практически не менялись на всем протяжении тропосферы. В нижней стратосфере положительная аномалия наблюдалась только в ноябре и составила  $0,30^{\circ}\text{C}$ . В мае наблюдалась нулевая аномалия температуры. Наибольшие аномалии в нижней стратосфере умеренных широт наблюдались в январе и марте и составили  $-1,73$  и  $-1,39^{\circ}\text{C}$  соответственно. Наибольшее изменение аномалий температуры с высотой наблюдалось в марте: разность аномалий на поверхностях 850 и 100 гПа составила  $2,19^{\circ}\text{C}$ .

В высоких широтах в тропосфере Северного полушария в 2021 году наблюдалось много отрицательных аномалий температуры. В январе аномалия температуры на высоте 850 гПа составила  $-0,51^{\circ}\text{C}$ . В феврале –  $-1,53$  и  $-0,11^{\circ}\text{C}$  на высотах 850 и 500 гПа соответственно. В апреле, мае, сентябре и октябре наблюдались отрицательные аномалии температуры на высоте 300 гПа. В апреле они достигли  $-1,01^{\circ}\text{C}$ . В марте и ноябре отрицательные аномалии наблюдались во всем протяжении тропосферы, и в марте они достигали  $-1,31^{\circ}\text{C}$ . В декабре отрицательные аномалии наблюдались на высотах 850 и 500 гПа и достигали  $-1,22^{\circ}\text{C}$  в нижнем слое тропосферы. Наибольшие положительные аномалии температуры в тропосфере высоких широт наблюдались с июня по август. В августе на высоте 300 гПа они достигли  $1,92^{\circ}\text{C}$ . Также высокая аномалия наблюдалась в октябре на высоте 850 гПа и составила  $1,38^{\circ}\text{C}$ . В нижней стратосфере высоких широт в январе и феврале наблюдались большие положительные аномалии температуры. Они превышали  $2,15^{\circ}\text{C}$ . Март и апрель стали самыми холодными месяцами в нижней стратосфере высоких широт. Аномалии температуры в апреле достигали  $-2,92^{\circ}\text{C}$ .

**Таблица 11.1** - Аномалии температуры за 2021 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	0,16	-0,11	-0,09	-1,73	-0,51	0,09	0,40	2,15
Февраль	-0,04	1,02	1,19	-0,21	-1,53	-0,11	0,73	2,63
Март	0,80	0,67	0,40	-1,39	-1,31	-1,23	-0,69	-1,97
Апрель	0,07	0,13	0,25	-0,12	0,68	0,13	-0,89	-2,92
Май	0,13	0,21	0,30	-0,00	0,95	0,20	-1,01	-0,98
Июнь	1,37	1,12	0,80	-0,52	1,21	1,05	0,76	-0,33
Июль	1,27	1,23	1,20	-0,39	0,74	1,33	1,22	-0,45

<b>Август</b>	0.97	0.75	0.82	-0.20	1.49	1.92	1.45	-0.86
<b>Сентябрь</b>	0.56	0.71	0.55	-0.37	0.63	0.50	-0.04	-0.87
<b>Октябрь</b>	0.68	0.68	0.65	-0.16	1.38	0.38	-0.36	-0.25
<b>Ноябрь</b>	0.97	0.61	-0.03	0.30	-0.01	-0.68	-0.21	-0.18
<b>Декабрь</b>	1.24	0.74	0.75	-0.21	-1.22	-0.15	0.05	-1.24

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 2021 года (зимний сезон включает период декабрь 2020-февраль 2021 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 2021 год вошел в десятку самых теплых лет во всех сезонах. Самым теплым сезоном стала зима с аномалией температуры 0,69°C и 4 местом в ряду самых теплых лет. Лето 2021 года стало рекордно теплым в умеренных и высоких широтах, а также в целом по Северному полушарию. В высоких широтах аномалия температуры достигла 1,35°C, а в целом по Северному полушарию – 0,88°C, что на 0,07°C больше предыдущего рекорда 2010 года. Осень 2021 года стала 4 самой теплой осенью с начала инструментальных наблюдений в умеренных широтах и в целом по Северному полушарию (0,66 и 0,58°C соответственно). Зимой и весной в высоких широтах наблюдались отрицательные аномалии температуры, достигавшие весной -0,29°C. В среднем за год 2021 год стал пятым в ряду самых теплых лет во всех широтных зонах, за исключением высоких широт, а аномалия температуры по всему Северному полушарию составила 0,57°C.

В нижней стратосфере в 2021 году зимой в высоких широтах, осенью в низких широтах и в целом по Северному полушарию наблюдались положительные аномалии температуры. Зимой они достигали 1,32°C, осенью – 0,23°C в низких широтах и 0,02°C в целом по Северному полушарию. В низких широтах в десятку самых холодных лет вошла зима 2021 года. В умеренных широтах – зима и весна. В высоких широтах в десятку самых холодных лет вошли весна, лето и осень. Причем весна стала второй в ряду самых холодных лет с аномалией температуры -2,26°C. В целом по Северному полушарию в десятку самых холодных лет вошли зима и весна с аномалиями температуры -0,91 и -0,89 °C соответственно. В среднем за год аномалии температуры во всех широтных зонах были близки друг к другу и составили около -0,57°C.

Более детально вертикально-широтная структура для годовых аномалий температуры в 2021 г показана на рис. 11.1, а для аномалий температуры отдельных сезонов 2021 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 2021 г.

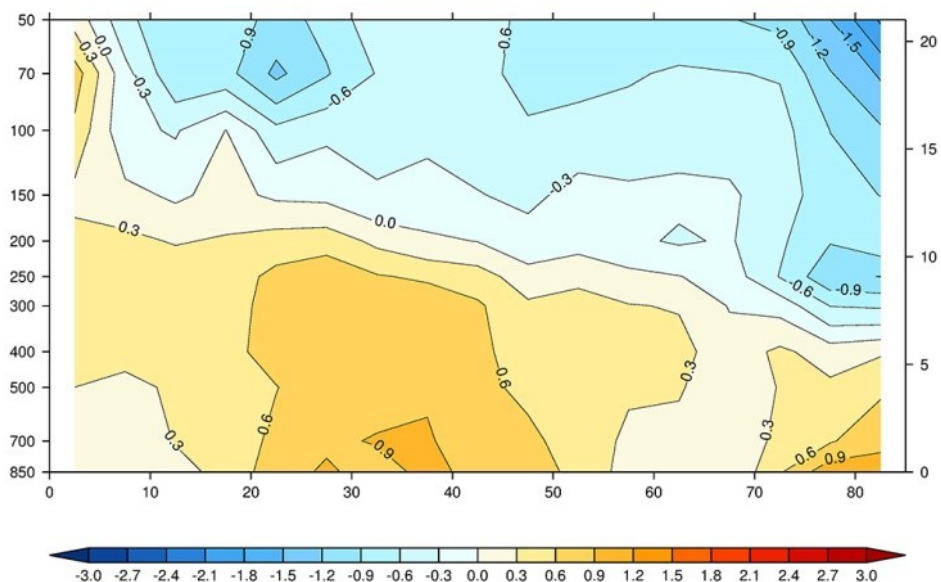
**Таблица 11.2** – Аномалии температуры в тропосфере и нижней стратосфере от норм 1981-2010 гг.

$\Delta T_{2021}$  - величина аномалии в градусах Цельсия

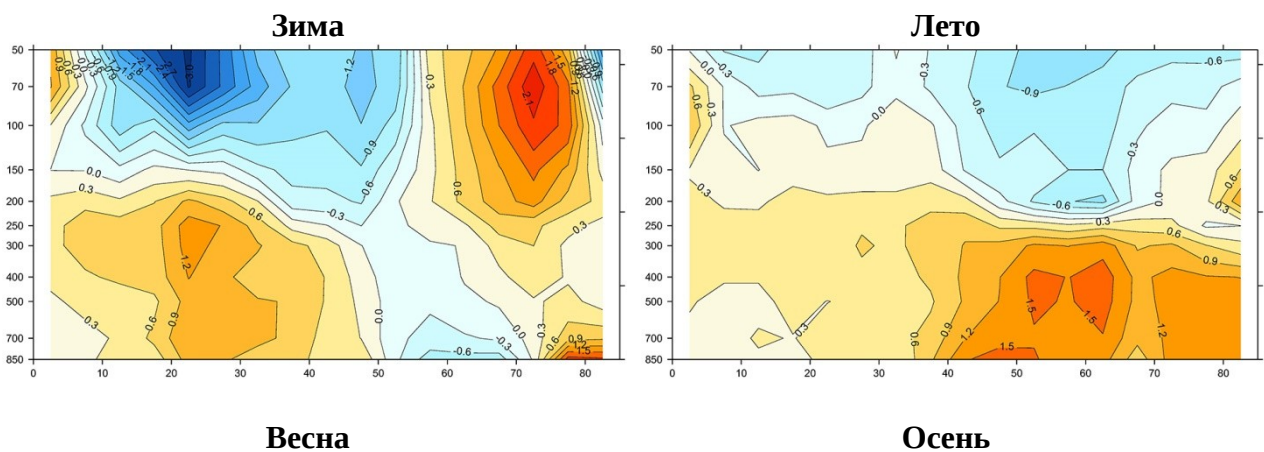
$R$  (- $R$ ) – ранг (обратный ранг) в рядах, упорядоченных по возрастанию значений соответствующих аномалий за период 1958-2021 гг.

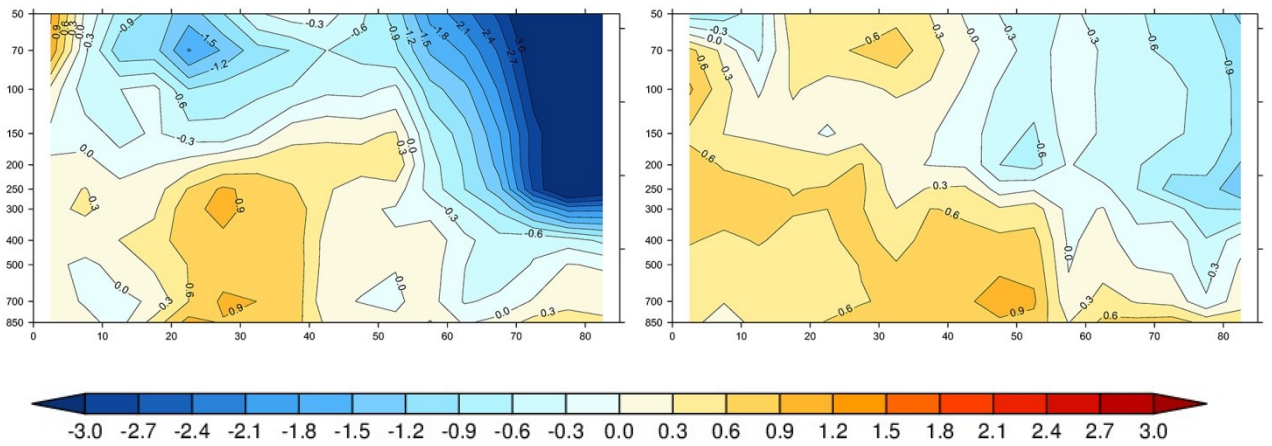
СЕЗОН	0-30 С.Ш.	30-60 С.Ш.	60-90 С.Ш.	Северное полушарие
-------	-----------	------------	------------	--------------------

ТРОПОСФЕРА, 850-300 гПа								
	$\Delta T_{2021}$	-R	$\Delta T_{2021}$	-R	$\Delta T_{2021}$	-R	$\Delta T_{2021}$	-R
<b>ЗИМА</b>	0,69	4	0,32	15	-0,08	42	0,41	9
<b>ВЕСНА</b>	0,40	8	0,34	13	-0,29	44	0,30	13
<b>ЛЕТО</b>	0,36	6	1,09	1	1,35	1	0,88	1
<b>ОСЕНЬ</b>	0,53	7	0,66	4	0,20	28	0,58	4
<b>ГОД</b>	0,51	5	0,64	5	0,24	20	0,57	5
НИЖНЯЯ СТРАТОСФЕРА, 100–50 гПа								
	$\Delta T_{2021}$	R	$\Delta T_{2021}$	R	$\Delta T_{2021}$	R	$\Delta T_{2021}$	R
<b>ЗИМА</b>	-1,33	8	-0,99	9	1,32	43	-0,91	10
<b>ВЕСНА</b>	-0,77	11	-0,76	9	-2,26	2	-0,89	7
<b>ЛЕТО</b>	-0,18	24	-0,55	13	-0,67	4	-0,46	15
<b>ОСЕНЬ</b>	0,23	35	-0,01	25	-0,46	7	0,02	29
<b>ГОД</b>	-0,54	19	-0,58	10	-0,58	10	-0,57	11

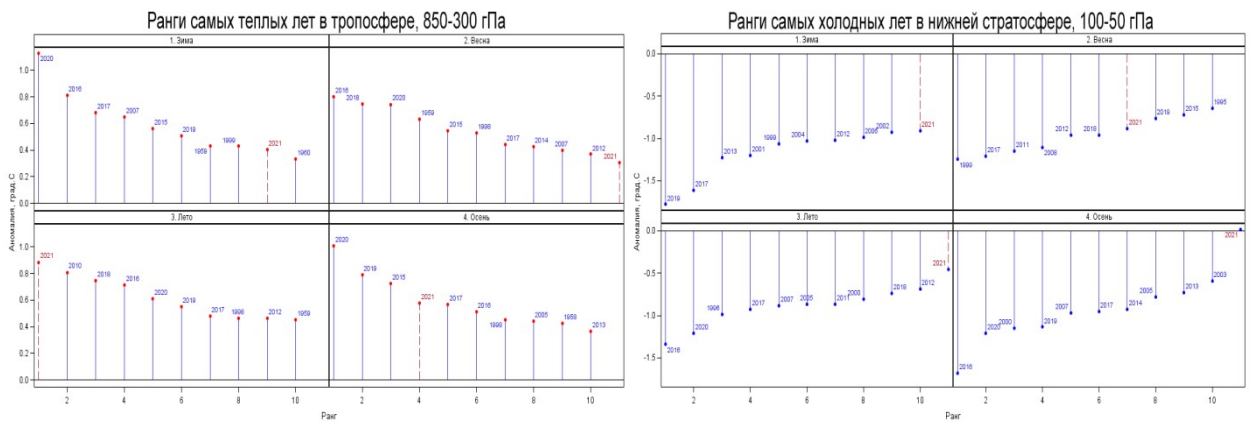


**Рисунок 11.1** - Вертикально-широтная структура годовых аномалий температуры свободной атмосферы в 2021 году. Горизонтальная ось – широты, левая вертикальная ось – давление на стандартных изобарических поверхностях, правая вертикальная ось – высоты над уровнем моря в км.





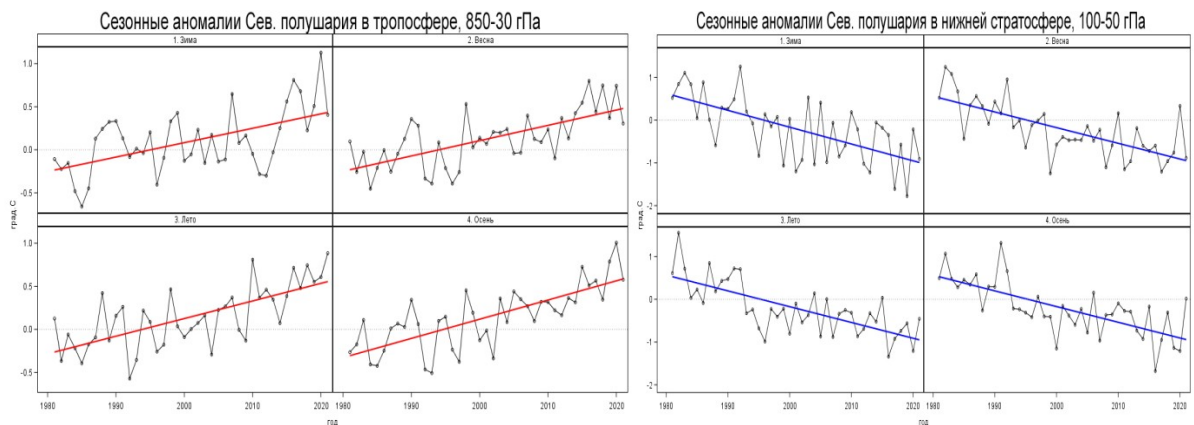
**Рисунок 11.2** - То же, что на рис 11.1, но для отдельных сезонов (зима 2020-2021 гг., весна, лето и осень 2021 года)



**Рисунок 11.3** - Ранги самых значительных сезонных аномалий температуры в свободной атмосфере Северного полушария за период 1958-2021 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, 2021 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 1981-2021 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 1981-2021 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 2020 годом тренды температуры в летний и осенний сезоны во всех широтных зонах и в целом по северному полушарию увеличились. Наибольшее увеличение тренда температуры (на 0,03°C/10 лет) произошло летом в верхних широтах. Зимние и весенние тренды в верхних и, в меньшей степени, в умеренных широтах уменьшились по сравнению с 2020 годом. В среднем по Северному полушарию значения трендов температуры принимали значения от 0,17°C/10 лет зимой до 0,21°C/10 лет осенью. Годовой тренд по сравнению с 2020 годом не изменился и составил 0,19°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. В низких широтах абсолютные значения трендов уменьшились во всех сезонах, за исключением осени. Летом наблюдалось наибольшее уменьшение значений трендов с -0,54°C/10 лет до -0,50°C/10 лет. В умеренных широтах уменьшился летний тренд по абсолютному значению, осенний – увеличился. В верхних широтах абсолютные значения трендов всех сезонов за исключением зимнего увеличились. Весенний тренд изменился с -0,34°C/10 лет до -0,39°C/10 лет. В среднем по Северному полушарию увеличилось абсолютное значение осеннего тренда, а также уменьшились значения зимнего и летнего трендов. Годовой тренд уменьшился с -0,39°C/10 лет до -0,37°C/10 лет.

**Таблица 11.3** – Оценки линейного тренда температуры в тропосфере и нижней стратосфере (1981-2021 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>41</b>	<b>0,15</b>	<b>13</b>	<b>0,14</b>	<b>20</b>	<b>0,17</b>	<b>47</b>
<b>ВЕСНА</b>	<b>0,12</b>	<b>19</b>	<b>0,21</b>	<b>41</b>	<b>0,14</b>	<b>14</b>	<b>0,18</b>	<b>53</b>
<b>ЛЕТО</b>	<b>0,10</b>	<b>21</b>	<b>0,25</b>	<b>47</b>	<b>0,26</b>	<b>39</b>	<b>0,20</b>	<b>45</b>
<b>ОСЕНЬ</b>	<b>0,15</b>	<b>26</b>	<b>0,24</b>	<b>47</b>	<b>0,26</b>	<b>39</b>	<b>0,21</b>	<b>57</b>
<b>ГОД</b>	<b>0,15</b>	<b>37</b>	<b>0,22</b>	<b>57</b>	<b>0,19</b>	<b>43</b>	<b>0,19</b>	<b>57</b>
<b>НИЖНЯЯ СТРАТОСФЕРА, 100–50 гПа</b>								
<b>ЗИМА</b>	<b>-0,64</b>	<b>50</b>	<b>-0,32</b>	<b>21</b>	<b>-0,01</b>	<b>0</b>	<b>-0,39</b>	<b>41</b>
<b>ВЕСНА</b>	<b>-0,49</b>	<b>53</b>	<b>-0,30</b>	<b>29</b>	<b>-0,39</b>	<b>17</b>	<b>-0,37</b>	<b>49</b>
<b>ЛЕТО</b>	<b>-0,50</b>	<b>49</b>	<b>-0,33</b>	<b>43</b>	<b>-0,22</b>	<b>33</b>	<b>-0,37</b>	<b>51</b>
<b>ОСЕНЬ</b>	<b>-0,59</b>	<b>49</b>	<b>-0,34</b>	<b>50</b>	<b>-0,22</b>	<b>39</b>	<b>-0,40</b>	<b>58</b>
<b>ГОД</b>	<b>-0,54</b>	<b>64</b>	<b>-0,31</b>	<b>55</b>	<b>-0,22</b>	<b>20</b>	<b>-0,37</b>	<b>65</b>

## **Выводы**

В тропосфере Северного полушария лето 2021 года было рекордно теплым летом с 1958 года. Среднегодовая аномалия температуры составила  $0,88^{\circ}\text{C}$ , что на  $0,07^{\circ}\text{C}$  больше предыдущего рекорда 2010 года. Осень 2021 года стала четвертой в ряду самых теплых лет с аномалией температуры  $0,58^{\circ}\text{C}$ . В низких широтах все сезоны попали в десятку самых теплых лет. А в высоких широтах наблюдались холодные зима и весна с отрицательными аномалиями температуры и относительно холодная осень. В целом 2021 год стал пятым в ряду самых теплых лет. Таким образом, 2015-2021 гг. являются семью самыми теплыми годами с начала инструментальных наблюдений в тропосфере северного полушария.

В нижней стратосфере температурных рекордов в 2021 году не наблюдалось, но в высоких широтах весна, лето и осень вошли в десятку самых холодных лет, причем весна была второй в соответствующем ряду с температурной аномалией  $-2,26^{\circ}\text{C}$ . Зимой в высоких широтах наблюдалась большая положительная аномалия  $1,32^{\circ}\text{C}$ . Осенью положительная аномалия температуры  $0,23^{\circ}\text{C}$  наблюдалась в низких широтах, а в средних широтах и в целом по Северному полушарию осенние аномалии температуры были близки к 0. В среднем за год аномалии температуры во всех широтных зонах были близки друг к другу и составили около  $-0,57^{\circ}\text{C}$ , а 2021 год не попал в десятку самых холодных лет.

Структура климатических трендов температуры, исследованных за период с 1981 года по 2021 год, подтверждает тенденции потепления в тропосфере и тенденции значительного похолодания в нижней стратосфере. Добавление оценок аномалий за 2021 год к соответствующим рядам, ранее исследованным за период до 2020 года включительно, привело к увеличению абсолютных значений летнего и осеннего трендов в тропосфере, а также осеннего тренда в нижней стратосфере. Абсолютные значения зимнего и летнего трендов в нижней стратосфере уменьшились по сравнению с предыдущим годом. Среднегодовой тренд температуры в тропосфере не изменился и составил  $0,19^{\circ}\text{C}/10$  лет. Абсолютное значение среднегодового тренда температуры в нижней стратосфере уменьшилось по сравнению с предыдущим годом на  $0,02^{\circ}\text{C}/10$  и составило  $-0,37^{\circ}\text{C}/10$  лет.