

УДК 551.524(470)(091)+551.577(470)(091)

Термодинамические процессы в атмосфере до 80 км высоты в период 1979–2019 гг.

Ю. П. Переведенцев (Yuri.Perevedentsev@ksu.ru), К. М. Шанталинский
В. В. Гурьянов, Н. В. Исмагилов, А. А. Николаев, А. К. Сунгатуллин

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

Аннотация. Рассмотрена вертикальная структура распределения температуры воздуха (ТВ) в атмосфере Северного полушария (СП) до высоты 80 км в период 1979–2019 гг. по данным реанализа ERA5. Выявлена сезонная скорость потепления климата в тропосфере и похолодания в стратосфере. С помощью корреляционного анализа выявлена взаимосвязь между колебаниями температуры соседних изобарических поверхностей Северного полушария. Результаты картированы. Для оценки влияния атмосферной циркуляции на термический режим рассчитывались коэффициенты корреляции между ТВ различных уровней и индексом арктической осцилляции (АО). Определены типы и даты весенних перестроек стратосферной циркуляции (СЦ) в рассматриваемый период на изобарической поверхности 10 гПа и обнаружена связь поздних перестроек СЦ с сильными внезапными стратосферными потеплениями (ВСП) и солнечной активностью.

Ключевые слова: температура воздуха, тропосфера, стратосфера, линейный тренд, корреляция, перестройки циркуляции.

Введение

Сложным термодинамическим процессам, происходящим в земной атмосфере до больших высот в последние годы посвящен ряд работ [1; 3; 4; 8], в которых рассматриваются вопросы изменения температуры и химического состава воздуха на различных уровнях тропосферы, стратосферы и мезосферы, динамическое взаимодействие между тропосферой и стратосферой, статистические характеристики внезапных стратосферных потеплений, макроциркуляционные процессы и сезонные перестройки стратосферной циркуляции и др. В настоящее время изучению указанных процессов, их математическому моделированию [4] способствует развитие современных информационно-вычислительных технологий, доступность базы «Больших данных», совершенствование реанализов. Так, в работе [3] с использованием данных реанализов, наземных спектрометрических и спутниковых наблюдений обстоятельно анализируются последствия сильного ВСП в январе 2013 г. В более ранней работе авторов настоящей статьи [8] рассмотрены характеристики пространственно-временной изменчивости температуры воздуха и массовой доли озона на 26 изобарических поверхностях до высоты 64 км с использованием данных реанализа ERA-Interim за 1979–2016 гг.

Целью данной работы является описание изменений ТВ от уровня Земли до высоты 80 км, взаимосвязей между слоями атмосферы и характера весенних перестроек стратосферной циркуляции с привлечением данных более совершенного реанализа ERA5 в период 1979–2019 гг. В этом реанализе данные о ТВ и геопотенциале в рассматриваемом слое представлены на 51 изобарической поверхности с разрешением $1 \times 1^\circ$.

Данные и методика

Были рассчитаны средние значения ТВ, средние квадратические отклонения (СКО), коэффициенты наклона линейного тренда (КНЛТ), коэффициенты детерминации линейного тренда как для всего Северного полушария в целом, так и его трех зон: полярной (65–90° с. ш.), умеренной (30–65° с. ш.), тропической (0–30° с. ш.). Для оценки степени взаимосвязанности процессов по вертикали рассчитывались коэффициенты корреляции между ТВ на различных уровнях, оценивалось также влияние арктической осцилляции на колебания ТВ. Определение дат весенних перестроек стратосферной циркуляции (смена западных потоков восточными) производилось с использованием рассчитанных на изобарической поверхности 10 гПа (31 км) в широтной зоне 30–90° с. ш. индексов зональной циркуляции А. Л. Каца.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим распределение ТВ, СКО, величины коэффициента наклонного тренда на 51 изобарической поверхности осредненных по всему Северному полушарию для года, зимы и лета (табл. 1). Как видно из табл. 1, в тропосфере ТВ с высотой понижается, в стратосфере наблюдается её инверсия и в мезосфере она вновь понижается, что соответствует физическим представлениям, изложенным в [5]. На всех уровнях отмечается годовая амплитуда колебаний ТВ и если в тропосфере происходит рост температуры (КНЛТ > 0), то в стратосфере наблюдается похолодание (КНЛТ < 0). Наибольшая межгодовая изменчивость, согласно распределению СКО, наблюдается в мезосфере, где летние температуры ниже зимних. Так, на уровне 0,01 гПа (80 км) летом ТВ ≈ -92 °С, а зимой – 75 °С. Тенденция похолодания на стратосферных уровнях лучше выражена летом, чем зимой, когда в атмосфере динамические процессы протекают более активно (возникновение ВСП, волновое взаимодействие между слоями и т. д.).

При этом, как следует из рис. 1, где представлены вертикальные профили КНЛТ ТВ для полярной и умеренной зон, в полярной зоне наблюдаются существенные различия между январским, июльским и годовым распределением, а в умеренной зоне эти расхождения заметны лишь с уровня 40 км.

Анализ рассчитанных коэффициентов корреляции (r) между температурой различных изобарических поверхностей показывает, что связи наиболее тесные в тропосфере, они ослабевают и меняют знак при переходе через тропопаузу.

При этом в стратосферной полярной зоне связи между соседними уровнями более тесные в январе, чем в июле, а в тропической зоне сезонные различия не столь выражены. Это особенно заметно при анализе карты распределения r в слое 20–10 гПа. Выше уровня 10 гПа особенно в январе вертикальные связи усиливаются.

Таблица 1

Средние многолетние значения температуры $A_v(^{\circ}C)$ и величины коэффициентов наклона линейных трендов $A(^{\circ}C/год)$ на 51 изобарической поверхности на период 1979–2019 гг.

P , (гПа)	H , км	Год (I–XII)			Лето (VI–VIII)			Зима (XII–II)					
		A_v	R_{rms}	A	R^2L	A	R_{rms}	A	R^2L	A_v	R_{rms}	A	R^2L
1000	0,1	16,17	0,32	0,0255	82	21,69	0,28	0,0212	77	10,52	0,36	0,0258	66
975	0,3	14,65	0,32	0,0248	81	20,19	0,27	0,0201	74	9,04	0,36	0,0256	66
950	0,5	13,38	0,30	0,0232	79	18,97	0,26	0,0185	68	7,83	0,35	0,0244	65
925	0,7	12,31	0,29	0,0222	77	17,92	0,26	0,0185	66	6,83	0,33	0,0233	64
900	1,0	11,27	0,28	0,0216	76	16,87	0,26	0,0188	66	5,89	0,32	0,0225	64
875	1,2	10,25	0,28	0,0213	75	15,78	0,27	0,0189	65	5,00	0,31	0,0221	64
850	1,5	9,22	0,28	0,0210	74	14,62	0,27	0,0186	64	4,13	0,31	0,0220	64
825	1,7	8,12	0,28	0,0206	72	13,37	0,26	0,0181	60	3,23	0,32	0,0220	62
800	1,9	6,93	0,27	0,0201	70	12,04	0,26	0,0178	58	2,24	0,32	0,0218	60
775	2,2	5,65	0,27	0,0198	68	10,63	0,27	0,0177	56	1,12	0,32	0,0213	57
750	2,5	4,29	0,27	0,0194	65	9,16	0,27	0,0176	54	-0,10	0,32	0,0208	54
700	3,0	1,30	0,27	0,0185	60	5,97	0,28	0,0172	49	-2,84	0,32	0,0195	47
650	3,6	-2,07	0,27	0,0177	54	2,43	0,28	0,0168	44	-6,01	0,31	0,0182	42
600	4,2	-5,76	0,26	0,0167	50	-1,38	0,28	0,0160	41	-9,58	0,30	0,0171	39
550	4,9	-9,70	0,26	0,0158	47	-5,35	0,28	0,0152	37	-13,52	0,29	0,0163	38
500	5,6	-14,14	0,27	0,0162	46	-9,74	0,29	0,0157	37	-18,00	0,29	0,0165	39
450	6,4	-19,22	0,28	0,0171	47	-14,74	0,31	0,0170	38	-23,09	0,31	0,0175	40
400	7,2	-25,09	0,30	0,0185	48	-20,63	0,33	0,0189	40	-28,88	0,33	0,0192	43
350	8,1	-31,82	0,31	0,0194	48	-27,56	0,35	0,0197	39	-35,36	0,34	0,0202	44
300	9,2	-39,29	0,30	0,0179	44	-35,53	0,34	0,0182	35	-42,36	0,34	0,0190	39
250	10,4	-46,94	0,28	0,0149	35	-44,07	0,31	0,0152	28	-49,27	0,34	0,0166	28
225	11,1	-50,55	0,26	0,0128	28	-48,17	0,31	0,0138	23	-52,42	0,36	0,0143	17
200	11,8	-53,96	0,25	0,0094	15	-52,08	0,30	0,0106	12	-55,34	0,39	0,0109	6
175	12,7	-57,41	0,24	0,0070	6	-56,10	0,31	0,0068	2	-58,28	0,40	0,0099	3
150	13,6	-61,18	0,26	0,0066	4	-60,43	0,32	0,0047	-2	-61,65	0,40	0,0136	11
125	14,8	-65,05	0,29	0,0007	-5	-64,51	0,37	-0,0034	-4	-65,46	0,38	0,0128	10

Окончание табл. 1

P , (гПа)	H , км	Год (I–XII)			Лето (VI–VIII)			Зима (XII–II)					
		A_v	Rms	R^2L	A	Rms	R^2L	A_v	Rms	A	R^2L		
100	16,2	-67,90	0,35	-0,0153	22	-66,62	0,46	-0,0232	30	-69,06	0,31	-0,0012	-5
70	18,5	-65,96	0,64	-0,0412	54	-63,11	0,76	-0,0433	41	-68,66	0,65	-0,0379	43
50	20,6	-61,38	0,72	-0,0482	58	-58,33	0,84	-0,0502	45	-64,19	0,76	-0,0441	42
30	23,9	-55,83	0,75	-0,0531	65	-52,37	0,86	-0,0525	47	-59,01	0,78	-0,0478	48
20	26,6	-51,48	0,75	-0,0547	70	-47,53	0,81	-0,0498	47	-55,14	0,80	-0,0537	58
10	31,2	-44,21	0,47	-0,0200	20	-39,82	0,69	-0,0145	1	-48,33	0,63	-0,0176	6
7	33,6	-39,57	0,59	0,0035	-5	-35,16	0,90	0,0240	5	-43,62	0,81	-0,0087	-4
5	36,0	-32,96	0,92	-0,0494	35	-28,38	0,99	-0,0214	1	-36,98	1,26	-0,0804	52
3	39,7	-21,13	2,19	-0,1680	78	-15,64	2,33	-0,1741	73	-25,79	2,56	-0,1953	76
2	42,7	-14,03	2,04	-0,1534	74	-8,38	2,30	-0,1744	75	-19,22	2,23	-0,1622	69
1	48,2	-11,75	1,62	-0,0869	35	-7,55	1,73	-0,1119	53	-16,79	1,51	-0,0474	9
0,97	48,4	-11,88	1,62	-0,0858	34	-7,75	1,73	-0,1105	52	-16,88	1,52	-0,0449	7
0,78	50,2	-14,27	1,64	-0,0822	30	-10,82	1,70	-0,1017	45	-18,88	1,55	-0,0353	2
0,62	52,0	-17,93	1,69	-0,0757	23	-15,27	1,70	-0,0854	30	-21,98	1,66	-0,0295	-1
0,49	53,9	-22,60	1,77	-0,0647	14	-20,85	1,71	-0,0604	12	-25,80	1,88	-0,0245	-3
0,38	55,9	-28,02	1,89	-0,0430	2	-27,39	1,80	-0,0247	-3	-30,07	2,19	-0,0123	-5
0,29	57,9	-34,02	2,08	-0,0156	-4	-34,72	2,03	0,0146	-5	-34,56	2,43	0,0031	-5
0,22	60,1	-40,31	2,34	0,0193	-4	-42,62	2,43	0,0592	3	-39,08	2,59	0,0238	-4
0,16	62,3	-46,81	2,72	0,0609	2	-50,85	3,00	0,1107	14	-43,71	2,81	0,0495	-1
0,12	64,5	-53,23	3,22	0,1064	10	-59,07	3,76	0,1670	22	-48,36	3,19	0,0790	3
0,08	66,9	-59,27	3,71	0,1449	16	-66,91	4,56	0,2145	26	-52,84	3,53	0,1036	7
0,06	69,4	-64,73	3,98	0,1619	18	-74,00	5,05	0,2357	25	-57,05	3,68	0,1118	8
0,04	71,9	-69,74	4,07	0,1703	19	-80,30	5,23	0,2505	27	-61,30	3,70	0,1160	9
0,03	74,6	-74,68	3,98	0,1734	21	-85,67	5,29	0,2707	31	-66,24	3,59	0,1184	10
0,01	80,3	-82,59	3,43	0,1494	21	-91,82	4,48	0,2339	33	-75,21	3,23	0,1121	12

A_v – среднее значение ($^{\circ}C$), Rms – среднее квадратическое отклонение ($^{\circ}C$), A – КНЛП ($^{\circ}C/год$), R^2L – коэффициент детерминации линейного тренда (%).

Влияние атмосферной циркуляции на температурный режим тропосферы оценивался с помощью рассчитанных коэффициентов корреляции между колебаниями ТВ и индексом арктической осцилляции. Как известно, арктическая осцилляция в значительной степени является результатом взаимодействия тропосферы и стратосферы. Наиболее высокая корреляция обнаруживается зимой для полярной зоны на уровне 10 км ($r = -0,60$), в летний период связь ослабевает и на высотах 10–12 км значение $r = 0,32$. Действительно, в период положительной фазы арктической осцилляции усиливается зимний циркумполярный вихрь, что приводит к охлаждению стратосферы. Этим и объясняется отрицательный знак коэффициенты корреляции в зимнее время. В случае разрушения полярного вихря АО ослабевает, а ТВ растет, что также приводит к отрицательной связи между ними.

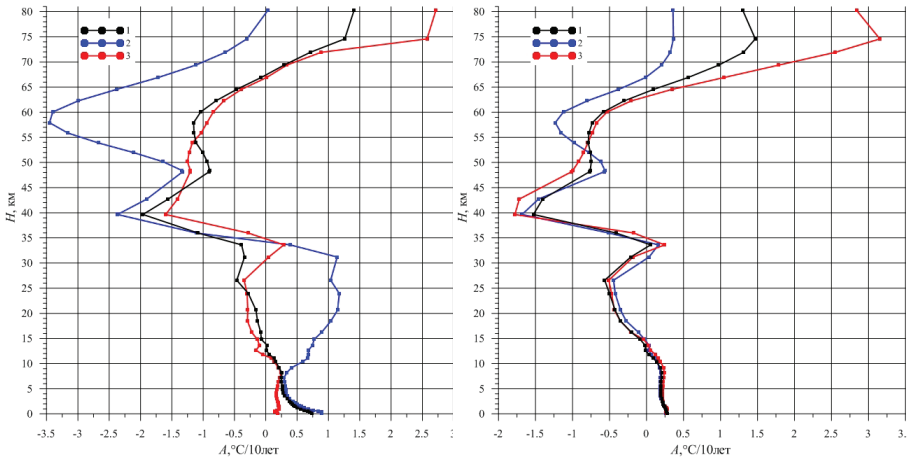


Рис. 1. Вертикальное распределение КНЛТ ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) температуры полярной (слева) и умеренной (справа) зон Северного полушария. 1 – год, 2 – январь, 3 – июль

Как известно, в зимний период благодаря возникновению циркумполярного циклона в стратосфере господствует западно-восточный перенос, летом в условиях циркумполярного антициклона потоки меняют свое направление на противоположное. Представляет научный и прогностический интерес оценка сроков весенней перестройки циркуляции в стратосфере, которые согласно [6] имеют значительную межгодовую изменчивость. В работе [2] исследован процесс весенних перестроек стратосферной циркуляции (СЦ) на изобарической поверхности 10 гПа (31 км) в период 1958–2000-х гг. и установлена их связь с крупномасштабными процессами циркуляции в тропосфере. В этой статье все даты весенних перестроек были отнесены к 3 типам: дата 5 апреля разделяет ранние и средние перестройки, а 26 апреля – средние и поздние.

Как правило, весенняя перестройка начинается в полярной зоне в слое 30–45 км в связи с интенсивным поглощением ультрафиолетовой радиации озоном [9]. Для определения сроков весенних перестроек СЦ были рассчитаны по полю геопотенциала на уровне 10 гПа индексы зональной циркуляции Каца в широтной зоне 30–90° с. ш. в период 1979–2019 гг. Дата устойчивого перехода зонального индекса от положительных значений к отрицательным рассматривалась в качестве даты перестройки СЦ. На рис. 2 представлен многолетний ход дат весенних перестроек циркуляции (в днях от начала года) сглаженный с помощью фильтра Поттера (с периодом более 10 лет). Как видно из рис. 2, разброс дат весенних перестроек СЦ велик (от 67 дней (07.03.2016) до 134 дней (04.05.2021)). В табл. 2 представлены типы и даты весенних перестроек СЦ. Сравнение данных табл. 2 с результатами работы [2] по совпадающему периоду 1979–2000-х гг. вполне удовлетворительное.

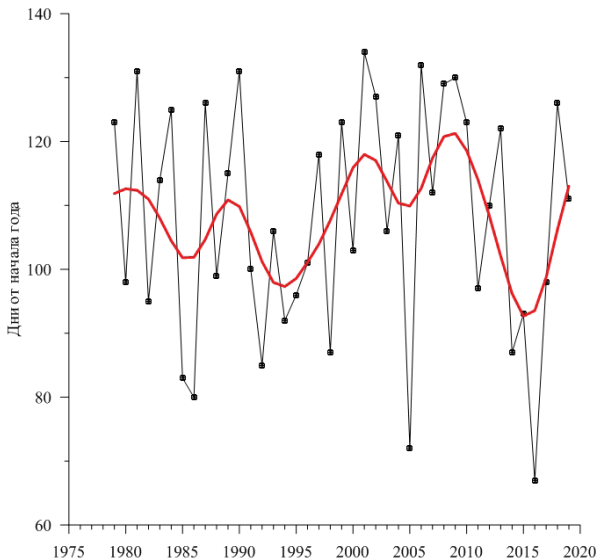


Рис. 2. Даты (дни от начала года) весенних перестроек циркуляции (исходный ряд и НЧКс периодом более 7 лет) в стратосфере на уровне 10 гПа в широтной зоне 90–30° с. ш.

Уставлена положительная корреляция ($r = 0,70$) между датами перестроек СЦ и солнечной активностью (числами Вольфа) для периода 1979–2004 гг. Выявляется также зависимость дат поздних перестроек СЦ от возникновения в зимней стратосфере сильных ВСП. В работе [1] приводятся сведения о больших ВСП. Сравнение данных о поздних перестройках (табл. 2) с данными [1] показывает, что поздние перестройки происходят в годы с большими ВСП. Кроме того, в полярной зоне (70–90° с. ш.) в период 1986–2002 гг. наблюдалась тенденция запаздывания дат весенних перестроек

СЦ со скоростью ~ 27 дней/10 лет, а в более поздний период (2002–2019 гг.), наоборот, весенние перестройки стали происходить раньше со скоростью – 18 дней/10 лет.

Таблица 2

Типы и даты весенних перестроек стратосферной циркуляции на изобарической поверхности 10 гПа в 1979–2019 гг.

Тип перестройки					
Ранняя		Средняя		Поздняя	
Год	Дата	Год	Дата	Год	Дата
1982	5 апреля	1980	7 апреля	1979	3 мая
1985	24 марта	1983	24 апреля	1981	11 мая
1986	21 марта	1988	8 апреля	1984	4 мая
1992	25 марта	1989	25 апреля	1987	6 мая
1994	2 апреля	1991	10 апреля	1990	11 мая
1998	28 марта	1993	16 апреля	1997	28 апреля
2005	13 марта	1995	6 апреля	1999	3 мая
2014	28 марта	1996	10 апреля	2001	14 мая
2015	3 апреля	2000	12 апреля	2002	7 мая
2016	7 марта	2003	16 апреля	2004	30 апреля
		2007	22 апреля	2006	12 мая
		2011	7 апреля	2008	8 мая
		2012	19 апреля	2009	10 мая
		2017	8 апреля	2010	3 мая
		2019	21 апреля	2013	2 мая
				2018	6 мая

Заключение

1. В среднем по СЦ зимой и летом КНЛТ температуры воздуха положительны в тропосфере, в стратосфере с изобарической поверхности 100 гПа до поверхности 0,5 гПа наблюдается ее выхолаживание особенно интенсивное в слое 35–45 км (КНЛТ < 0). В мезосфере вновь начинается потепление.

2. Коэффициенты корреляции, рассчитанные между ТВ на различных изобарических поверхностях, при переходе через тропопаузу становятся отрицательными. В зимний период на пространственную структуру распределения τ в стратосфере оказывает влияние волновой механизм взаимодействия между тропосферой и стратосферой.

3. Наблюдается большой временной разброс (68 сут.) в датах весенней перестройки стратосферной циркуляции от 7 марта до 14 мая. Обнаружена зависимость дат весенних перестроек СЦ от солнечной активности и возникновения внезапных стратосферных потеплений (после больших ВСП наблюдаются, как правило, поздние перестройки).

В работе использована информация Copernicus Climate Change Service (2019). Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 20-55-00014).

Литература

1. Внезапные стратосферные потепления: статические характеристики и влияние на общее содержание NO_2 и O_3 / В. Ю. Агеева, А. Н. Груздев, А. С. Елохов, И. И. Мохов, Н. Е. Зуева // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53, № 5. С. 545–555.
2. Бакулина Е. А.; Дунаева Е. А., Угрюмов А. И. Связь весенних перестроек циркуляции в стратосфере с характером процессов в тропосфере в марте – июне // Метеорология и гидрология. 2009. № 2. С. 29–37.
3. Варгин П. Н., Медведева И. В. Исследование температурного и динамического режимов внетропической атмосферы Северного полушария в период внезапного стратосферного потепления зимой 2012–2013 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51, № 1. С. 20–38.
4. Варгин П. Н., Володин Е. М. Анализ воспроизведения динамических процессов в стратосфере климатической моделью ИВМ РАН // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 152, № 1. С. 3–18.
5. Моханакумар К. Взаимодействие стратосферы и тропосферы. М. : Физматлит, 2011. 452 с.
6. Педь Д. А. Смена типов циркуляции циркумполярного вихря в стратосфере // Труды Гидрометцентра СССР. 1973. № 15. С. 26–35.
7. Переведенцев Ю. П., Исмагилов Н. В., Шанталинский К. М. Сезонные перестройки циркуляции в средней стратосфере // Метеорология и гидрология. 1999. № 6. С. 18–27.
8. Термический режим в тропосфере, стратосфере и нижней мезосфере Северного полушария в 1979–2016 гг. / Ю. П. Переведенцев, К. М. Шанталинский, А. А. Васильев, В. В. Гурьянов // Метеорология и гидрология. 2019. № 8. С. 5–20.
9. Тарасенко Д. А. Структура и циркуляция стратосферы и мезосферы Северного полушария. Л. : Гидрометеониздат, 1988. 287 с.