

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 551.524.7

doi: 10.26907/2542-064X.2021.4.626-642

## ТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ В ТРОПОСФЕРЕ, СТРАТОСФЕРЕ И МЕЗОСФЕРЕ СЕВЕРНОЙ ПОЛЯРНОЙ ЗОНЫ В 1979–2019 гг.

*Ю.П. Переведенцев, К.М. Шанталинский, Н.В. Исмагилов,  
В.В. Гурьянов, А.А. Николаев, Т.Р. Аухадеев*

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия*

### Аннотация

В статье рассмотрены изменения термического режима в тропосфере, стратосфере и мезосфере северной полярной зоны (68–90° с. ш.) в период 1979–2019 гг. на базе данных о температуре воздуха и геопотенциале. Оценивались средние значения температуры воздуха, средние квадратические отклонения, нормированные аномалии и линейные тренды температуры, низкочастотные компоненты до высоты 80 км. Анализ полученных статистических характеристик позволил оценить интенсивность потепления климата в арктической тропосфере и похолодания в стратосфере и мезосфере, выявить корреляционные связи между соседними уровнями. Рассмотрены особенности весенних перестроек циркуляции стратосферы в зависимости от солнечной активности и внезапных стратосферных потеплений в условиях полярной ночи. Показано, что Арктическая осцилляция наиболее эффективно воздействует на температуру воздуха нижней стратосферы в зимний период.

**Ключевые слова:** температура воздуха, линейный тренд, корреляционная зависимость, северная полярная зона, Арктика, весенняя перестройка циркуляции

### Введение

Современное глобальное потепление, начавшееся в середине 70-х годов XX в., продолжается и будет, согласно климатическим прогнозам [1], продолжаться в будущем. Наиболее интенсивно процесс потепления происходит в Арктике – в 2–3 раза быстрее, чем в целом на планете, что дало основание назвать это явление «арктическим усилением» [2]. Климатические изменения оказывают значительное воздействие на окружающую среду (состояние ледового покрова Северного Ледовитого океана, прибрежной территории и др.) и экономику региона. Все это вызывает повышенное внимание к происходящим в Арктике процессам как среди научного сообщества, так и среди специалистов в области политики, экономики, энергетики и экологии северных стран. Ведется постоянный мониторинг физического состояния атмосферы, циркуляции атмосферы и океана, ледовой обстановки. Так, в работе [3] показано, что зимой в нижней тропосфере тепловые потоки достигают Северного полюса.

Как отмечается в работе [4], атмосферные явные и «скрытые» потоки тепла из низких широт могут обеспечивать до 50% зимнего потепления над акваторией Северного Ледовитого океана.

Авторами [5] с помощью композитного анализа приповерхностной температуры и индексов атмосферной циркуляции за январь 1950–2014 гг. показано, что под влиянием Арктической осцилляции (АО) наблюдается сильный прогрев Евразии и Российского арктического побережья и охлаждение Арктики, примыкающей к Северной Америке, а при воздействии индекса циркуляции SCAND, наоборот, на территории Евразии отмечается похолодание, а на большей части Северного Ледовитого океана – потепление. В работах [6–9] проанализированы климатические изменения полей основных метеорологических величин в тропосфере Северного полушария (СП) в XX – XXI вв.

Благодаря повышенному вниманию к Арктическому бассейну получен ряд научных и практических результатов, что позволило оценить вклад различных механизмов в его быстрое потепление. Однако эти результаты в основном относятся к нижнему слою атмосферы. Представляет интерес изучение состояния атмосферы и на вышележащих уровнях. Нами в более ранней работе [7] по данным реанализа ERA-Interim с пространственным разрешением  $2.5 \times 2.5^\circ$  за 1979–2016 гг. были проанализированы пространственно-временная изменчивость характеристик температуры воздуха (ТВ) и массовая доля озона до нижней мезосферы для трех широтных поясов: полярного, умеренного и тропического. В настоящей статье основное внимание уделено лишь одной полярной зоне ( $68\text{--}90^\circ$  с. ш.) до высоты 80 км.

### Материал и методы

Исходным материалом послужили данные реанализа ERA5 (<https://climate.scpnrcnics.eu/climate-reanalysis>) о температуре воздуха и геопотенциальной высоте с разрешением  $1^\circ \times 1^\circ$  на 51-й изобарической поверхности за 1979–2019 гг.

С использованием среднемесячных значений температуры воздуха  $T$  в узлах сетки на указанных изобарических поверхностях рассчитывались средние значения  $\bar{T}$  (нормы), средние квадратические отклонения  $\sigma$  (СКО), нормированные аномалии температуры ( $\Delta T/\sigma$ ), коэффициенты наклона линейного тренда (КНЛТ), коэффициенты детерминации линейного тренда. Среднемесячные значения ТВ были подвергнуты тренд-анализу и низкочастотной фильтрации фильтром Поттера с периодом более 7 лет. Для оценки взаимосвязей между изменениями температуры соседних уровней рассчитывались коэффициенты корреляции. Время весенних перестроек циркуляции в стратосфере (переход от западных потоков к восточным) определялось с использованием рассчитанных на изобарической поверхности 10 гПа в широтной зоне  $90\text{--}30^\circ$  с. ш. в период 1979–2019 гг. (41 год) индексов зональной циркуляции А.Л. Каца. Кроме того, находились корреляционные связи между индексами Арктической осцилляции и ТВ различных уровней.

### Результаты и их обсуждение

Анализ вертикального распределения по месяцам года средних многолетних значений температуры воздуха, осредненных по всей территории северной полярной зоны, показал следующее. Зимой, согласно данным табл. 1, в пограничном слое полярной атмосферы наблюдается инверсия температуры. Как видно из рис. 1,

Табл. 1

Характеристики температуры полярной зоны Северного полушария (ERA5 1979–2019 гг.)

P, гПа	H, км	Год (I–XII)						Январь						Июль					
		Av		Rms		R <sup>2</sup> L		Av		Rms		R <sup>2</sup> L		Av		Rms		R <sup>2</sup> L	
		°C	%	°C	%	°C	%	°C	%	°C	%	°C	%	°C	%	°C	%	°C	%
1000	0.1	-8.9	1.0	0.732	75	-20.0	1.7	0.90	37	5.0	0.4	0.19	24						
925	0.7	-9.8	0.8	0.611	70	-19.1	1.6	0.75	30	4.0	0.7	0.18	4						
850	1.5	-11.2	0.7	0.470	64	-19.4	1.4	0.57	20	1.7	0.7	0.21	9						
800	1.9	-12.8	0.6	0.426	63	-20.6	1.3	0.50	17	-0.4	0.6	0.20	10						
700	3.0	-17.4	0.5	0.341	56	-24.8	1.2	0.38	11	-5.5	0.6	0.18	10						
600	4.2	-23.6	0.5	0.279	48	-30.8	1.1	0.32	8	-11.9	0.6	0.17	8						
500	5.6	-31.8	0.4	0.262	46	-38.7	1.1	0.31	8	-20.4	0.6	0.19	10						
400	7.2	-42.2	0.4	0.247	43	-48.5	1.0	0.29	8	-31.8	0.6	0.22	15						
300	9.2	-52.8	0.5	0.214	20	-58.5	1.4	0.41	7	-45.3	0.5	0.20	19						
250	10.4	-54.4	0.8	0.161	0	-61.0	2.5	0.59	3	-48.5	0.6	0.14	1						
200	11.8	-52.3	1.0	0.058	0	-60.9	3.4	0.68	1	-45.1	0.8	-0.05	-5						
175	12.7	-51.7	1.0	0.008	0	-60.8	3.6	0.68	0	-44.0	0.6	-0.16	4						
150	13.6	-52.1	1.0	0.023	0	-61.3	3.8	0.74	0	-44.3	0.5	-0.10	0						
125	14.8	-52.6	1.0	-0.071	0	-62.3	4.2	0.77	0	-44.8	0.6	-0.14	3						
100	16.2	-53.5	1.0	-0.081	0	-63.9	4.7	0.89	0	-44.9	0.6	-0.22	15						
50	20.6	-55.5	0.9	-0.156	0	-67.7	6.0	1.15	0	-44.1	0.5	-0.29	44						
30	23.9	-55.9	0.9	-0.279	8	-67.8	6.8	1.17	0	-43.1	0.5	-0.30	44						
20	26.6	-54.6	1.1	-0.463	20	-65.8	7.2	1.04	0	-40.2	0.6	-0.35	49						
10	31.2	-49.6	1.4	-0.340	4	-59.1	7.9	1.14	0	-32.0	0.5	0.05	-4						
7	33.6	-45.4	1.6	-0.386	3	-53.3	7.9	0.39	0	-26.3	0.7	0.29	21						
5	36.0	-39.3	2.3	-1.082	28	-46.1	8.0	-1.11	0	-18.6	0.9	-0.28	9						
3	39.7	-28.6	3.2	-1.962	49	-36.4	9.2	-2.37	5	-3.8	2.3	-1.60	66						
2	42.7	-21.2	2.9	-1.560	38	-31.7	10.2	-1.90	0	5.6	2.0	-1.41	71						
1	48.2	-14.0	2.2	-0.905	20	-26.8	10.8	-1.33	0	7.9	1.8	-1.21	59						
0.49	53.9	-19.0	2.1	-1.113	37	-26.9	9.2	-2.67	7	-9.7	2.2	-1.17	38						
0.22	60.1	-34.2	2.4	-1.039	22	-33.1	8.5	-3.40	18	-39.4	2.0	-0.84	22						
0.12	64.5	-46.7	2.6	-0.466	0	-39.4	8.3	-2.38	7	-61.6	2.0	-0.39	0						
0.06	69.4	-59.2	3.1	0.291	0	-46.6	7.6	-1.12	0	-83.3	2.6	0.33	-3						
0.03	74.6	-73.8	4.1	1.260	9	-57.6	6.4	-0.30	0	-107.3	6.1	2.57	21						
0.01	80.3	-84.0	4.0	1.410	13	-69.5	5.6	0.03	0	-111.7	5.4	2.72	32						

Av – среднее значение, °C, Rms – среднее квадратическое отклонение, °C, A – КНЛТ, °C/10 лет, R<sup>2</sup>L – коэффициент детерминации линейного тренда, %.

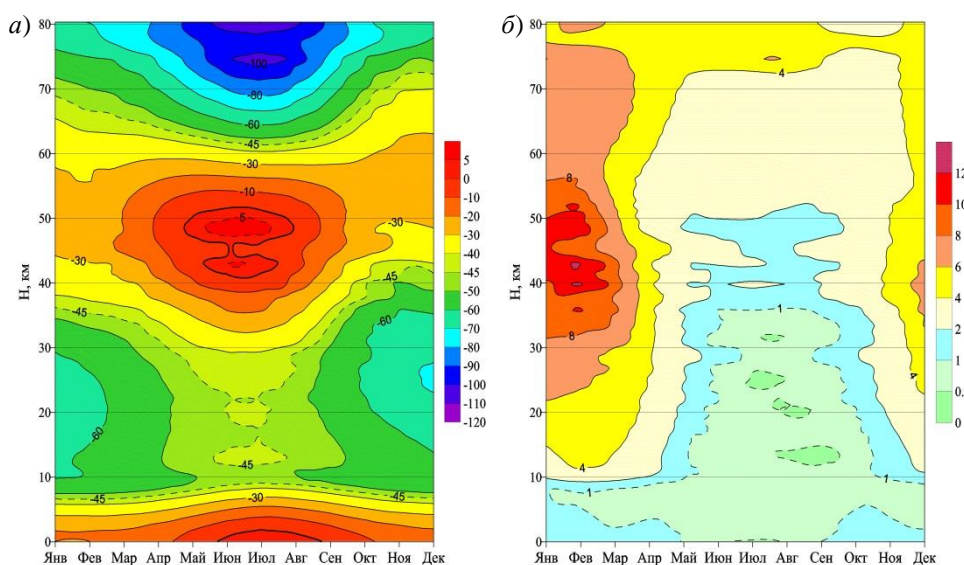


Рис. 1. Нормы (а) и средние квадратические отклонения (б) температуры воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ ) по данным ERA5 (1979–2019 гг.)

во все сезоны года наблюдается понижение ТВ с высотой в тропосфере (тропосфера нагревается снизу), затем ее повышение в стратосфере, преимущественно в весенне-летний период, и понижение в мезосфере. При этом летняя мезосфера намного холоднее зимней, что объясняется характером вертикальных движений. Согласно [10], в летнем полушарии в слое 30–90 км возникают восходящие движения, а в зимнем – нисходящие. Меридиональный дрейф направлен от летнего полушария к зимнему, в результате чего летняя полярная мезосфера холоднее зимней. Так, в январе (табл. 1) ТВ на уровне 30 гПа (24 км) понижается до  $-67.8^{\circ}\text{C}$ , затем растет в слое стратосферной инверсии до  $-26.1^{\circ}\text{C}$  (0.62 гПа, 50 км) и понижается вновь в мезосфере до  $-69.4^{\circ}\text{C}$  (0.01 гПа, 80 км). В июле данный процесс заметно отличается от зимнего, поскольку в стратосфере озон поглощает ультрафиолетовую радиацию и приводит к ее сильному нагреванию. Наблюдается следующее вертикальное распределение ТВ: внизу на уровне 1000 гПа она равна  $5.0^{\circ}\text{C}$ , наверху в районе тропопаузы  $T = -48.5^{\circ}\text{C}$  (уровень 250 гПа), в области озоносферы на уровне (1 гПа) она достигает вновь положительного значения  $7.9^{\circ}\text{C}$  и затем происходит ее сильное понижение в мезосфере до величины  $-111.7^{\circ}\text{C}$  на уровне 0.01 гПа (80.3 км). Таким образом, наблюдается значительный годовой ход ТВ: у земли он равен  $\sim 25^{\circ}\text{C}$ , в нижней стратосфере на уровне 50 гПа ( $\sim 21$  км) перепад температур достигает  $\sim 23.6^{\circ}\text{C}$ , в районе стратопаузы эта величина увеличивается до  $34^{\circ}\text{C}$  и становится максимальной в мезосфере  $\sim 42.2^{\circ}\text{C}$  (уровень 0.01 гПа, 80 км).

Из рис. 1 видно, что межгодовая изменчивость ТВ во всей толще атмосферы характеризуется хорошо выраженным годовым ходом (максимум отмечается в холодное время года). При этом значения СКО температуры, осредненной по всей полярной зоне, достигают экстремальных величин  $\sim 9^{\circ}\text{C}$  в слое 30–55 км в период январь – март. Отмечается хорошо выраженное возрастание СКО от уровня Земли

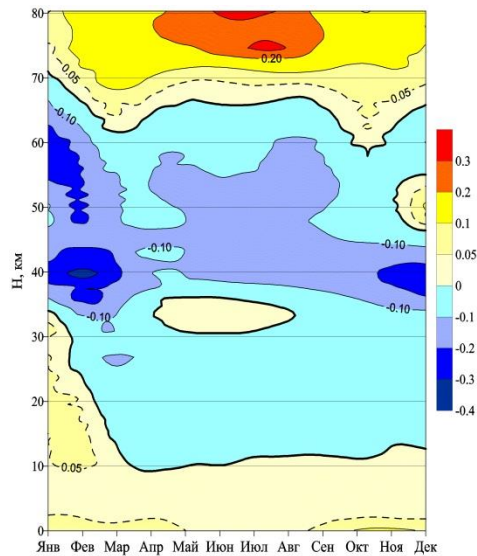


Рис. 2. Годовой ход значений КНЛТ температуры воздуха в полярной зоне ( $^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ) по данным ERA5 (1979–2019 гг.)

до стратоспаузы. Как известно, в полярной стратосфере ежегодно происходят внезапные стратосферные потепления, при которых температура за несколько дней повышается на десятки градусов, что и приводит к значительным величинам СКО. В летний период, наоборот, даже в средней стратосфере СКО имеет прядок  $2^{\circ}\text{C}$ , что свидетельствует о затухании волновой активности и стабильном радиационном режиме в условиях циркумполярного антициклона.

На рис. 2 представлен вертикальный разрез коэффициентов наклона линейного тренда, рассчитанных для всех месяцев года и осредненных за 41-летний период и по всей полярной зоне на 51-м уровне. Как видно из рисунка, отмечаются три главных особенности: в тропосфере воздух прогревается ( $\text{КНЛТ} > 0$ ), в стратосфере, преимущественно в зимнее время, выхолаживается ( $\text{КНЛТ} < 0$ ) и в мезосфере, преимущественно в летний период, температура повышается. Полученная картина высотного распределения КНЛТ соответствует основным положениям парниковой теории потепления, согласно которой рост концентрации углекислого газа приводит к потеплению тропосферы и похолоданию стратосферы. В последнем случае процессу похолодания способствует уменьшение концентрации озона в зимней стратосфере [11].

Рассмотрим тенденцию межгодовых изменений ТВ в январе и июле. Как следует из табл. 1, в январе КНЛТ существенно больше июльских значений практически во всей толще атмосферы. Так, на нижнем уровне (1000 гПа) в январе  $\text{КНЛТ} = 0.90$ , а в июле  $0.19^{\circ}\text{C}/10$  лет, что свидетельствует о более значительном потеплении тропосферы зимой, чем летом. В стратосфере в январе переход КНЛТ в отрицательную область происходит на уровне 5 гПа (36 км), а в июле этот процесс наступает значительно ниже, с поверхности (200 гПа,  $\approx 12$  км), то есть в летний период стратосфера начинает охлаждаться на значительно более низких уровнях. При этом скорости понижения ТВ зимой наиболее велики в слое 5 – 0.06 гПа, а летом в слое 3 – 0.16 гПа. В январе в нижней мезосфере

КНЛТ имеет величину  $-3.45$  °C/10 лет на уровне 0.29 гПа (57.9 км), в июле наибольшая скорость охлаждения достигается на уровне 3 гПа (39.7 км), где КНЛТ =  $-1.60$  °C/10 лет, а в мезосфере, наоборот, ТВ повышается с большой скоростью (КНЛТ =  $2.72$  °C/10 лет на высоте 80 км).

Построенные линейные тренды для нормированных аномалий температур воздуха (среднегодовой, среднеянварской и среднеиюльской) позволяют не только видеть временную тенденцию изменения ТВ на различных уровнях, но и выделять области с крупными ( $\Delta T/\sigma > 1$ ) и очень крупными ( $\Delta T/\sigma > 2$ ) аномалиями. Так, в 2016 г. очень крупная положительная аномалия среднегодовой температуры проявилась во всей толще тропосферы от уровня земли до 300 гПа.

Интересно также отметить, что после извержений вулканов Эль-Чичон (1982 г.) и Пинатубо (1991 г.) в тропосфере обнаруживается похолодание, а в стратосфере – потепление. Этот эффект лучше выражен в низких широтах, чем в высоких. Так, в тропической зоне в период 1982–1983 гг. в стратосфере сформировался очаг тепла для среднегодовой температуры ( $\Delta T/\sigma > 2$ ).

Рассматривалось также распределение крупных ( $\Delta T/\sigma > 1$ ) и очень крупных ( $\Delta T/\sigma > 2$ ) нормированных аномалий температуры воздуха на различных изобарических поверхностях в январе и июле в течение 41 года (1979–2019 гг.). Выявились следующие особенности: число крупных отрицательных аномалий незначительно превышает число положительных как в январе, так и в июле во всей толще рассматриваемого слоя (0–80 км), в июле, преимущественно в стратосфере, чаще встречаются очень крупные положительные аномалии ТВ. В слоях 100–30 гПа (нижняя стратосфера) и 3–0.22 гПа (верхняя стратосфера) в рассматриваемый период крупных отрицательных аномалий не было. В средней стратосфере (10 гПа) выделяется холодный период в июле 1985–1999 гг. (14 лет), в 1997 г. здесь отмечена очень крупная аномалия ( $\Delta T/\sigma > -2.4$ ). Природу такого резкого похолодания объяснить сложно.

Построенный разрез нормированных аномалий среднегодовой температуры воздуха полярной зоны СП (рис. 3) показывает, что начиная с 2002 г. в тропосфере происходит потепление, особенно значительное с 2015 г. ( $\Delta T/\sigma = 2$ ), а в средней стратосфере – похолодание, особенно сильное в последние годы (2015–2019 гг.) в верхней стратосфере. Более резкие контрасты в поведении температуры воздуха обнаруживаются в мезосфере, где после существенного похолодания в период 1995–2005 гг. произошло значительное потепление ( $\Delta T/\sigma > 2$ ). Следует отметить, что в мезосфере термодинамические процессы протекают более ярко, что сказывается на формировании крупных температурных аномалий различного знака.

Были построены также карты распределения КНЛТ среднегодовой, зимней и летней приземной температуры воздуха (°C/год) в полярной зоне СП. Анализ этих карт показал, что среднегодовые температуры в рассматриваемый период времени (1979–2019 гг.) на всей территории полярной зоны (68–90° с. ш.) возрастали (значения КНЛТ повсеместно положительные). При этом потепление в восточном секторе Арктики было более интенсивным, чем в западном. В зимний период на карте выделяются три области: в районе о. Новая Земля фиксируется очаг повышенных положительных значений КНЛТ, где происходит наибольшее арктическое потепление со скоростью  $\approx 0.7$  °C/10 лет, в северной части Тихого океана наблюдается похолодание (КНЛТ  $< 0$ ) и локальный очаг понижения

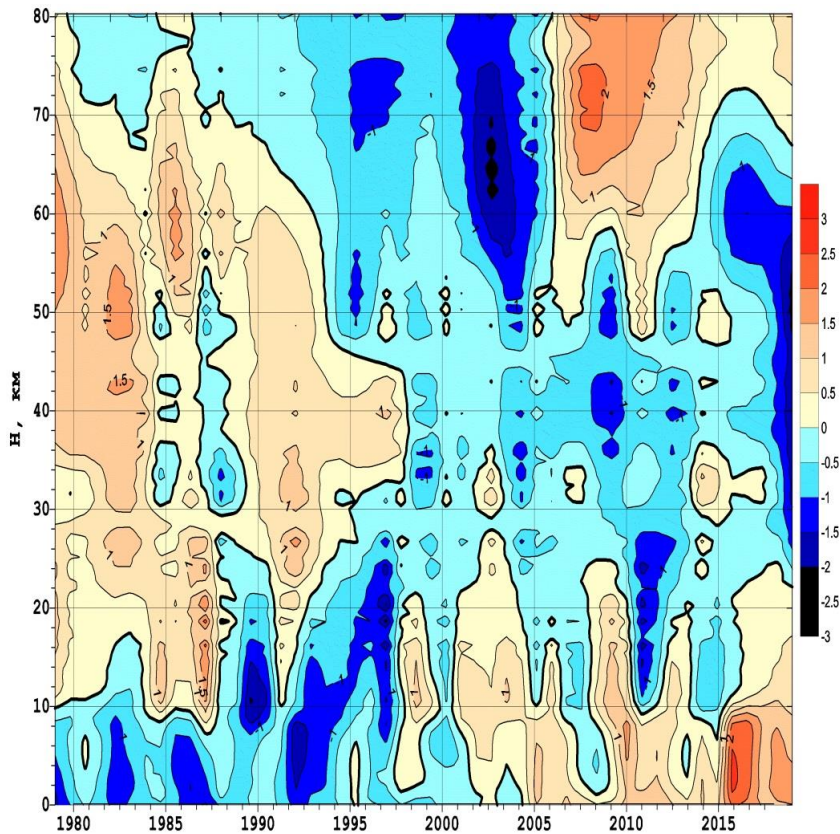


Рис. 3. Нормированные на СКО аномалии среднегодовой температуры воздуха полярной зоны Северного полушария

зимней температуры обнаруживается в северной Канаде. В целом на большей части территории северной полярной зоны происходит потепление, которое отмечается и в летний сезон. Таким образом, распределение КНЛТ приземной температуры воздуха свидетельствует о продолжающемся процессе потепления в целом всего Арктического региона и особенно северной части Европы.

С целью выявления пространственно-временных структур в распределении температуры воздуха в слое от уровня земли до 80 км были рассчитаны первые разности низкочастотных компонент (НЧК) с периодом более 7 лет температуры воздуха ( $^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ) полярной зоны для среднегодовых, зимних, летних, январских и июльских значений. Следует отметить, что наиболее яркие особенности многолетней динамики ТВ обнаруживаются для январской и июльской температур (рис. 4) (сезонные разрезы им созвучны).

Так, в январе наибольшие контрасты в поле ТВ возникают в стратосфере и мезосфере. В тропосфере в последние десятилетия преобладает тенденция к потеплению. В стратосфере и мезосфере в январе происходит чередование периодов похолодания и повышения ТВ. Безусловно, очаги с понижением температуры более интенсивные, чем с повышением, в толще атмосферы 30–70 км наблюдается ярко выраженная цикличность ( $\approx 8$  лет). При этом выделяется период роста температуры от уровня земли до 80 км в 2000–2010 гг. В июльской мезосфере

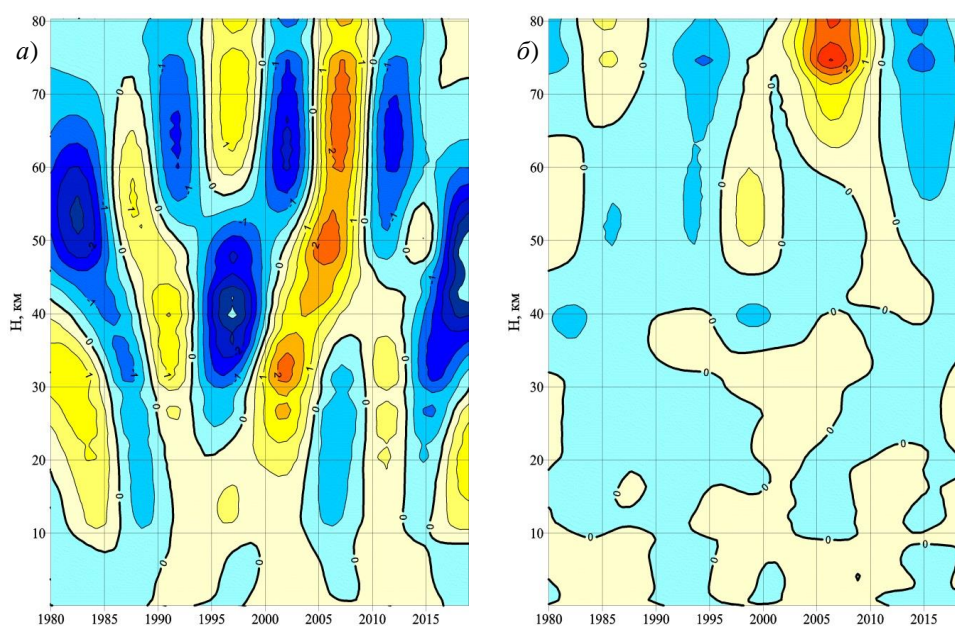


Рис. 4. Межгодовой ход первых разностей НЧК с периодом более 7 лет температуры воздуха ( $^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ) полярной зоны Северного полушария: январь (а); июль (б)

также происходит заметное повышение температуры в начале XXI в. Вертикальный разрез многолетнего хода среднегодовой температуры воздуха в целом соответствует представлениям о характере изменения температуры – потеплении тропосферы и похолодании стратосферы. При этом, как и на ранее рассмотренных разрезах, в мезосфере с 2005 по 2010 г. выделяется очаг повышения ТВ.

Сравнение вертикальных профилей КНЛТ температуры воздуха, построенных для полярной и умеренной зон СП, показало, что в полярной зоне наблюдаются существенные различия между январским, июльским и годовым распределением начиная с поверхности земли (рис. 5). В то же время в умеренной зоне до высоты 40 км вертикальные профили КНЛТ в указанных временных промежутках идентичны и лишь в верхней стратосфере и мезосфере наблюдается их расхождение. Таким образом, в полярных широтах годовой ход в скорости изменения температуры хорошо прослеживается начиная с нижней тропосферы. В январе до высоты 35 км значения КНЛТ  $> 0$ , на более высоких уровнях они достигают значительных отрицательных значений (КНЛТ =  $-3.45^{\circ}\text{C}/10$  лет на высоте 60 км). В июле как в тропосфере, так и в стратосфере процессы потепления и похолодания протекают с заметно меньшей скоростью.

В последние годы особое внимание уделяется проблеме стратосферно-тропосферного взаимодействия [12–14]. В частности, в работе [15] показано, что после внезапного стратосферного потепления (ВСП), приводящего к изменениям стратосферного полярного вихря, формируются условия для проникновения возмущений циркуляции стратосферы полярной зоны в нижние слои. В перечисленных выше работах отмечается, что в зимней полярной зоне в условиях полярной ночи активизируются волновые процессы, способствующие росту взаимосвязей между соседними слоями.



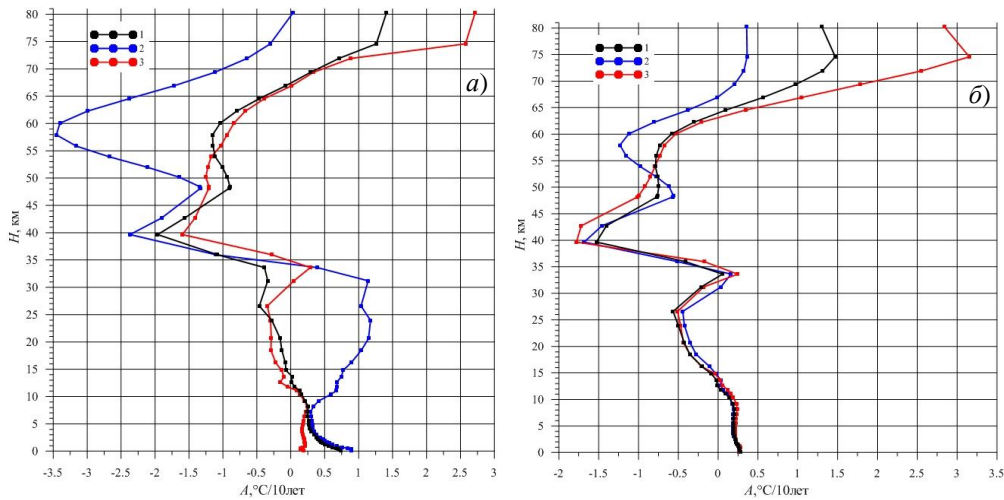


Рис. 5. Вертикальное распределение КНЛТ ( $^{\circ}\text{C}/10$  лет) температуры полярной (а) и умеренной (б) зон Северного полушария: 1 – год; 2 – январь; 3 – июль

Расчеты коэффициентов корреляции ( $r$ ) между ТВ соседних уровней для зимних и летних условий показали их заметное различие. Теснота вертикальных связей между соседними уровнями зимой выше, чем летом. Так, зимой в стратосфере коэффициент корреляции уменьшается лишь до 0.7, а летом до 0.4. В течение всего года тропосферные уровни характеризуются тесными связями. В летней стратосфере выделяется слой 20-1 гПа (26–48 км), где значения  $r$  варьируют от 0.1 до 0.4. Безусловно, в этот период главную роль в стратосфере играют радиационные и фотохимические процессы, приводящие к расслоенности среды, что сказывается на поведении величины  $r$ . В зимний период в полярной зоне активизируются термодинамические процессы, отмечается повышенная волновая активность, смещение полярного вихря и ежегодно возникают стратосферные потепления.

Ежегодно весной в различные даты в стратосфере происходят весенние перестройки циркуляции, при которых зимняя западная циклоническая циркуляция переходит в летнюю антициклоническую. Как правило, перестройка начинается в околополюсном районе средней и верхней стратосферы (30–45 км), что обусловлено весенним разогреванием этого слоя за счет поглощения радиации озоном.

В настоящей работе даты весенних перестроек стратосферной циркуляции (СЦ) определялись по ежедневным значениям индексов зональной циркуляции А.Л. Каца на изобарической поверхности 10 гПа в широтной зоне  $90\text{--}30^{\circ}$  с. ш. в период 1979–2019 гг. следующим образом:

$$I_3 = \frac{H_1 - H_2}{\varphi_1 - \varphi_2},$$

где  $H_1$  и  $H_2$  – значения абсолютного геопотенциала, осредненные вдоль граничных широт  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  рассматриваемых зон.

Время устойчивого перехода зонального индекса от положительных значений к отрицательным принималось за дату перестройки СЦ. Получен многолетний

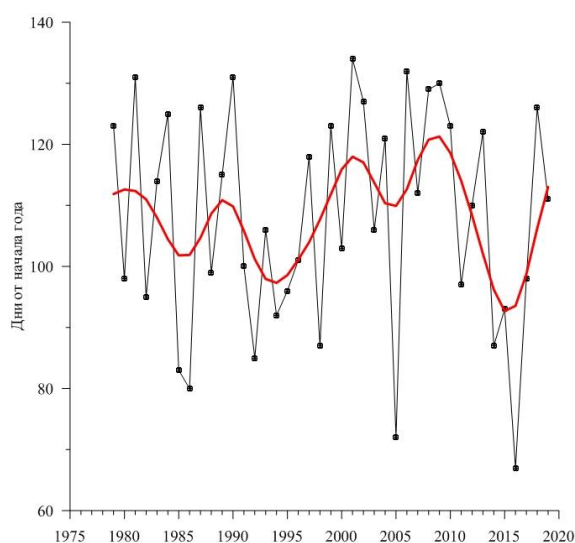


Рис. 6. Даты (дни от начала года) весенних перестроек циркуляции (исходный ряд и НЧК с периодом более 7 лет) в стратосфере на уровне 10 гПа в широтной зоне 90–30° с. ш.

ход дат весенних перестроек СЦ (в днях от начала года), в котором с помощью фильтра Поттера была выделена низкочастотная компонента с продолжительностью периода более 10 лет (рис. 6). Наблюдается большой разброс дат весенних перестроек СЦ от 67-го дня с начала 2016 г. (7. 03) до 134-го дня – с начала 2001 г. (4. 05). При этом в период 1979–2004 гг. обнаруживается положительная связь  $r$  между датами перестроек СЦ и солнечной активностью, представленной числами Вольфа ( $r = 0.70$ ). Обнаружены также следующие закономерности: чем больше интенсивность стратосферной зональной циркуляции 15 февраля, тем в более ранние сроки происходит весенняя перестройка ( $r = -0.54$ ), при наличии интенсивных зимних стратосферных потеплений весенние перестройки происходят позднее ( $r = 0.65$ ).

В целях поиска дальних связей между процессами в стратосфере и вблизи земной поверхности в узлах географической сетки  $1 \times 1^\circ$  СП рассчитывались коэффициенты корреляции  $r$  между датами весенних перестроек и среднемесячными значениями приповерхностной температуры воздуха (для объема выборки в 41 год при доверительной вероятности 95% величина  $r$  значима при  $r = 0.31$ ). Наиболее тесные положительные связи для января – марта (в предшествующие перестройкам месяцы) обнаруживаются в центральной части Тихого океана, а отрицательные – на западе. Физически это означает, что повышение температуры поверхности океана (ТПО) способствует более поздним перестройкам СЦ, а похолодание океана – более ранним. Поскольку благодаря тихоокеанскому десятилетнему колебанию (ТДК) происходят колебания ТПО, возможно, это сказывается и на колебаниях дат весенних перестроек стратосферной циркуляции в широтной зоне 90–30° в рассматриваемый период. В [14] обнаружена квазидесятилетняя изменчивость волновой активности в стратосфере, соответствующая различным фазам ТДК. Действительно, поскольку в случае положительной фазы ТДК на западе Тихого океана происходит понижение ТПО, а на востоке, наоборот, повышение, это способствует генерации длинных

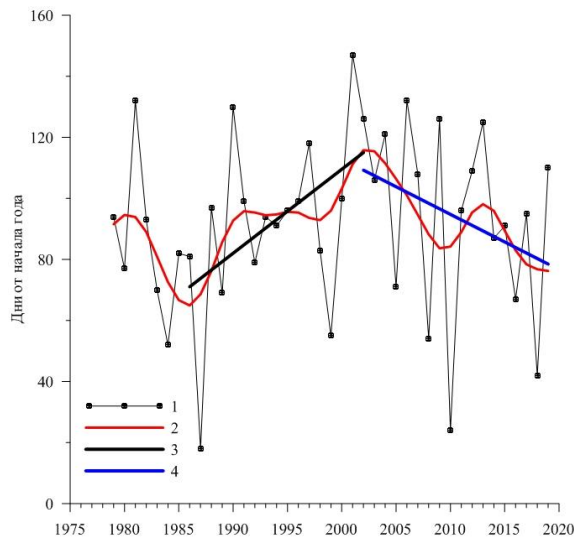


Рис. 7. Даты (дни от начала года) весенних перестроек циркуляции в стратосфере на уровне 10 гПа в широтной зоне  $90-70^{\circ}$  с. ш.: 1 – исходный ряд; 2 – НЧК с периодом более 7 лет; 3 и 4 – линейные тренды за периоды 1986–2002 и 2002–2019 гг. соответственно

атмосферных волн, способных в зимнее время проникать в стратосферу и, следовательно, влиять на поведение арктического полярного вихря. Как известно, внезапные стратосферные потепления в зимний период в полярной зоне обусловлены волновой активностью.

Учитывая, что наиболее активные термодинамические и циркуляционные процессы в стратосфере происходят в северной полярной зоне, даты весенних перестроек СЦ рассматривались также и для широтной зоны  $90-70^{\circ}$  с. ш. (рис. 7).

Как следует из рис. 7, в период 1986–2002 гг. (17 лет) наблюдалась тенденция запаздывания дат весенних перестроек СЦ со скоростью 27.5 дней/10 лет, а начиная с 2002 г. в течение 18 лет (2002–2019 гг.) весенние перестройки СЦ, наоборот, стали происходить в более ранние сроки. При этом коэффициент наклона линейного тренда принимает отрицательные значения (–18.1 дней/10 лет). Статистическая значимость трендов составляет соответственно 94% и 79%. Из рисунка видно, что в 2002 г. произошла самая поздняя весенняя перестройка циркуляции за весь период исследования – на 145-й день от начала года, а в 2010 г. – на 30-й день, разница составляет более трех месяцев. Самая ранняя весенняя перестройка СЦ в исследуемый период 1979–2019 гг. произошла в 1987 г. на 19-й день от начала года. Согласно [16], ранние перестройки сопровождаются усилением волновой активности в стратосфере, более поздние обусловлены сезонным нагревом средней атмосферы, а поскольку в последние годы выявилась тенденция смещения весенних перестроек СЦ на более ранние сроки, можно высказать предположение об усилении взаимодействия между тропосферой и стратосферой в зимний период в полярной зоне, что в целом согласуется с результатами [17].

В изменениях термического режима атмосферы важная роль принадлежит атмосферной циркуляции, особенно в холодный период года [18]. Была рассмотрена корреляционная связь между колебаниями температуры в полярной

зоне и АО, которая характеризует взаимодействие между тропосферой и стратосферой. При этом начиная с 70-х годов XX в. АО преимущественно остается в положительной фазе, когда имеет место усиление циркумполярного вихря [19]. Установлено, что наиболее высокая корреляция ТВ полярной зоны с АО (зимой  $r = -0.60$ , летом  $r = 0.32$ ) характерна для нижней стратосферы. Известно, что зимние стратосферные потепления возникают в случае проникновения планетарных волн Россби из тропосферы в стратосферу. Это приводит к разрушению циркумполярного циклона, к ослаблению западного потока и повышению температуры, что объясняет отрицательные значения коэффициентов корреляции для нижней стратосферы.

В период положительной фазы АО наибольшее развитие получают длинные волны  $E$ , перемещающиеся с запада на восток, усиливается зональная циркуляция и стратосфера становится более холодной. При отрицательной фазе АО зональная циркуляция ослабевает, развиваются волны  $W$  (распространяющиеся на запад) и  $S$  (стационарные), которые способствуют переносу волновой энергии в стратосферу и благоприятствуют развитию стратосферных потеплений [20]. Кроме того, в последние годы рассматривается проблема стратосферно-тропосферного взаимодействия в различные фазы ТДК. В [14] выявлена изменчивость стратосферного полярного вихря в зависимости от фазы ТДК.

### Заключение

Анализ полученных результатов выявил значительную неоднородность в пространственно-временном распределении основных климатических показателей термического режима в полярной зоне Северного полушария в 1979–2019 гг. Так, в январе в нижнем двухкилометровом слое тропосферы обнаруживается инверсия температуры воздуха (прирост составляет порядка  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ); в июле в верхней стратосфере под стратопаузой формируется область тепла, где температура достигает  $+7.86\text{ }^{\circ}\text{C}$  (в январе на этой высоте температура опускается до  $-26.82\text{ }^{\circ}\text{C}$ ); летняя мезосфера оказалась значительно холоднее зимней: если в январе на высоте 80 км температура воздуха понижается до  $-69.48\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то в июле уже до  $-111.74\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что объясняется характером вертикальных движений в полярной области.

В январе в тропосфере и нижней стратосфере (до высоты 33 км) в рассматриваемый период происходил активный процесс потепления, величина КНЛТ достигала значений  $0.90\text{ }^{\circ}\text{C}/10$  лет у земли и  $1.14\text{ }^{\circ}\text{C}/10$  лет на высоте 31 км. В июле в тропосфере также происходило потепление, но с меньшей скоростью ( $0.19\text{ }^{\circ}\text{C}/10$  лет у поверхности земли). В стратосфере в рассматриваемый период происходило охлаждение воздуха, при этом январские значения КНЛТ по модулю, как и в тропосфере, превышали июльские. Данные результаты согласуются с основными положениями парниковой теории потепления климата: тропосфера нагревается, стратосфера охлаждается.

Выполненный анализ динамики дат весенних перестроек циркуляции в средней стратосфере (изобарическая поверхность 10 гПа) в период 1979–2019 гг. в широтной зоне  $90\text{--}30^{\circ}$  с. ш. показал, что полярный стратосферный вихрь разрушается в значительном временном диапазоне. Окончательный переход от зимней западной циркуляции к летней восточной может происходить как в ранние

сроки (7 марта в 2006 г.), так и в поздние (14 мая в 2001 г.) – разброс в датах составил 68 сут (чуть более 2 месяцев). Обнаружена зависимость рассматриваемого явления от уровня солнечной активности, внезапных зимних стратосферных потеплений. Показано, что в полярной широтной зоне с 2002 г. наблюдается тенденция более ранних весенних перестроек СЦ, что свидетельствует об усилении волнового взаимодействия между тропосферой и стратосферой в последние годы.

**Благодарности.** В работе использована информация Copernicus Climate Change Service (2019).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 18-05-00721, 18-45-160006 и 20-55-00014).

### Литература

1. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (Eds.). – Cambridge; N. Y.: Cambridge Univ. Press, 2013. – 1535 p.
2. Serreze M.C., Barrett A.P., Cassano J.J. Circulation and surface controls on the lower tropospheric air temperature field of the Arctic // *J. Geophys. Res.: Atmos.* – 2011. – V. 116, No D7. – Art. D07104, P. 1–20. – doi: 10.1029/2010JD015127.
3. Alekseev G., Kuzmina S., Bobylev L., Urazgildeeva A., Gnatiuk N. Impact of atmospheric heat and moisture transport on the Arctic warming // *Int. J. Climatol.* – 2019. – V. 39, No 8. – P. 3582–3592. – doi: 10.1002/joc.6040.
4. Cullather R.I., Lim Y.K., Boisvert L.N., Brucker L., Lee J.N., Nowicki S.M. Analysis of the warmest Arctic winter, 2015–2016 // *Geophys. Res. Lett.* – 2016. – V. 43, No 20. – P. 10808–10816. – doi: 10.1002/2016GL071228.
5. Переведенцев Ю.П., Гурьянов В.В., Шанталинский К.М., Аухадеев Т.Р. Динамика тропосферы и стратосферы в умеренных широтах Северного полушария и современные изменения климата в Приволжском федеральном округе. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2017. – 186 с.
6. Переведенцев Ю.П., Васильев А.А., Шанталинский К.М., Гурьянов В.В. Климатические изменения приземных полей атмосферного давления и температуры воздуха в умеренных широтах Северного полушария // *Метеорология и гидрология.* – 2017. – № 7. – С. 81–93.
7. Переведенцев Ю.П., Шанталинский К.М., Васильев А.А., Гурьянов В.В. Термический режим в тропосфере, стратосфере и нижней мезосфере Северного полушария в 1979–2016 гг. // *Метеорология и гидрология.* – 2019. – № 8. – С. 5–20.
8. Верещагин М.А., Переведенцев Ю.П., Шанталинский К.М., Тудрий В.Д. Факторный анализ многолетней динамики глобального термического режима приземного слоя воздуха. // *Изв. РАН. Сер. геогр.* – 2004. – № 5. – С. 34–41.
9. Ермолаев О.П., Котляков В.М., Переведенцев Ю.П., Селивановская С.Ю. Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: новые методы и технологии исследований // *Изв. РАН. Сер. геогр.* – 2009. – № 6. – С. 119–122.
10. Mohanakumar K. Stratosphere-Troposphere Interactions. – N. Y.: Springer, 2008. – 416 p.
11. Варгин П.Н., Юшков В.А., Хайкин С.М., Цветкова Н.Д., Кострыкин С.В., Володин Е.М. Изменение климата и средняя атмосфера – вопросов все больше // *Вестн. РАН.* – 2010. – Т. 80, № 2. – С. 114–124.

12. Варгин П.Н., Володин Е.М., Карпенко А.Ю., Погорельцев А.И. О стратосферно-тропосферных взаимодействиях // Вестн. РАН. – 2015. – Т. 85, № 1. – С. 39–46. – doi: 10.7868/S0869587315010181.
13. Зюляева Ю.А., Жадин Е.А. Анализ трехмерных потоков Элиассена – Пальма в нижней стратосфере // Метеорология и гидрология. – 2009. – № 8. – С. 5–14.
14. Jadin E.A., Wei K., Zyulyaeva Yu.A., Chen W., Wang L. Stratospheric wave activity and the Pacific Decadal Oscillation // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. – 2010. – V. 72, No 16. – P. 1163–1170. – doi: 10.1016/j.jastp.2010.07.009.
15. Варгин П.Н., Володин Е.М. Анализ воспроизведения динамических процессов в стратосфере климатической моделью ИВМ РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 52, № 1. – С. 3–18. – doi: 10.7868/S0002351515060139.
16. Savenkova E.N., Kanukhina A.Yu., Pogoreltsev A.I., Merzlyakov E.G. Variability of the springtime transition date and planetary waves in the stratosphere // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. – 2012. – V. 90–91. – P. 1–8. – doi: 10.1016/j.jastp.2011.11.001.
17. Варгин П.Н., Кострыкин С.В., Ракушина Е.В., Володин Е.М., Погорельцев А.И. Исследование изменчивости дат весенних перестроек циркуляции стратосферы и параметров стратосферного полярного вихря в Арктике по данным моделирования и реанализа // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2020. – Т. 56, № 5. – С. 526–539. – doi: 10.31857/S0002351520050119.
18. Переведенцев Ю.П., Шанталинский К.М., Аухадеев Т.Р., Исмагилов Н.В., Занди Р. О влиянии макроциркуляционных систем на термобарический режим Приволжского федерального округа // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2014. – Т. 156, кн. 2. – С. 156–169.
19. Zhou S., Miller A.J., Wang J., Angell J.K. Trends of NAO and AO and their associations with stratospheric processes // Geophys. Res. Lett. – 2001. – V. 28. – P. 4107–4110. – doi: 10.1029/2001GL013660.
20. Guryanov V.V., Eliseev A.V., Mokhov I.I., Perevedentsev Yu.P. Wave activity and its changes in the troposphere and stratosphere of the Northern Hemisphere in winters of 1979–2016 // Izv., Atmos. Oceanic Phys. – 2018. – V. 54, No 2. – P. 114–126. – doi: 10.1134/S0001433818020093.

Поступила в редакцию  
19.01.2021

---

**Переведенцев Юрий Петрович**, доктор географических наук, заведующий кафедрой метеорологии, климатологии и экологии атмосферы

Казанский (Приволжский) федеральный университет  
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия  
E-mail: [Yuri.Perevedentsev@kpfu.ru](mailto:Yuri.Perevedentsev@kpfu.ru)

**Шанталинский Константин Михайлович**, кандидат географических наук, доцент кафедры метеорологии, климатологии и экологии атмосферы

Казанский (Приволжский) федеральный университет  
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия  
E-mail: [kshantal@kpfu.ru](mailto:kshantal@kpfu.ru)

**Исмагилов Наиль Вагизович**, кандидат географических наук, доцент кафедры метеорологии, климатологии и экологии атмосферы

Казанский (Приволжский) федеральный университет  
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия  
E-mail: [NVIsmagilov@kpfu.ru](mailto:NVIsmagilov@kpfu.ru)

**Гурьянов Владимир Владимирович**, кандидат географических наук, доцент кафедры метеорологии, климатологии и экологии атмосферы

Казанский (Приволжский) федеральный университет  
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия  
E-mail: *Vladimir.Guryanov@kpfu.ru*

**Николаев Александр Анатольевич**, кандидат географических наук, доцент кафедры метеорологии, климатологии и экологии атмосферы

Казанский (Приволжский) федеральный университет  
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия  
E-mail: *Aleksandr.Nikolaev@kpfu.ru*

**Аухадеев Тимур Ринатович**, кандидат географических наук, доцент кафедры метеорологии, климатологии и экологии атмосферы

Казанский (Приволжский) федеральный университет  
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия  
E-mail: *TRAuhadeev@kpfu.ru*

ISSN 2542-064X (Print)  
ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI  
(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2021, vol. 163, no. 4, pp. 626–642

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2542-064X.2021.4.626-642

**Thermal Regime in the Troposphere, Stratosphere,  
and Mesosphere of the Northern Polar Zone in 1979–2019**

*Yu.P. Perevedentsev*<sup>\*</sup>, *K.M. Shantalinsky*<sup>\*\*</sup>, *N.V. Ismagilov*<sup>\*\*\*</sup>, *V.V. Guryanov*<sup>\*\*\*\*</sup>,  
*A.A. Nikolaev*<sup>\*\*\*\*\*</sup>, *T.R. Auhadeev*<sup>\*\*\*\*\*</sup>

*Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia*

E-mail: <sup>\*</sup>*Yuri.Perevedentsev@kpfu.ru*, <sup>\*\*</sup>*kshantal@kpfu.ru*, <sup>\*\*\*</sup>*NVIsmagilov@kpfu.ru*,  
<sup>\*\*\*\*</sup>*Vladimir.Guryanov@kpfu.ru*, <sup>\*\*\*\*\*</sup>*Aleksandr.Nikolaev@kpfu.ru*, <sup>\*\*\*\*\*</sup>*TRAuhadeev@kpfu.ru*

Received January 19, 2021

**Abstract**

Changes of the thermal regime in the troposphere, stratosphere, and mesosphere of the northern polar zone (68–90° N) during 1979–2019 were studied using the data on average monthly air temperatures at the nodes of a regular geographical grid of 1° × 1° on 51 isobaric surfaces (ERA5 reanalysis). The mean and standard deviations, normalized anomalies and linear temperature trends, low-frequency components up to an altitude of 80 km were calculated. The obtained statistical characteristics were analyzed to assess the intensity of climate warming in the Arctic troposphere and cooling in the stratosphere and mesosphere, as well as to reveal correlations between the neighboring levels. The features of spring rearrangements of the stratospheric circulation were considered in relation to solar activity and sudden stratospheric warmings under polar night conditions. It was shown that the Arctic oscillation most effectively influences the air temperature of the lower stratosphere in winter.

**Keywords:** air temperature, linear trend, correlation dependence, northern polar zone, Arctic, spring restructuring of circulation

**Acknowledgements.** This study used data from the Copernicus Climate Change Service (2019).

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects nos. 18-05-00721, 18-45-160006, and 20-55-00014).

### Figure Captions

- Fig. 1. Norms (*a*) and standard deviations (*b*) of the air temperature (°C) based on the ERA5 data (1979–2019).
- Fig. 2. Annual variations of the linear trend slopes of the air temperature in the polar zone (°C/year) based on the ERA5 data (1979–2019).
- Fig. 3. Anomalies of the average monthly air temperature in the polar zone of the Northern Hemisphere normalized to the standard deviation.
- Fig. 4. Interannual variations of the first differences of the low-frequency components with a period of more than 7 years of the air temperature (°C/year) in the polar zone of the Northern Hemisphere: January (*a*); July (*b*).
- Fig. 5. Vertical distribution of the linear trend slopes (°C/10 years) of the air temperature in the polar (*a*) and temperate (*b*) zones of the Northern Hemisphere: 1 – year; 2 – January; 3 – July.
- Fig. 6. Dates (days from the beginning of the year) of the spring rearrangements of the stratospheric circulation (baseline series and low-frequency components with a period of more than 7 years) at 10 hPa in the latitude zone of 90–30° N.
- Fig. 7. Dates (days from the beginning of the year) of the spring rearrangements of the stratospheric circulation at 10 hPa in the latitude zone of 90–30° N: 1 – baseline series; 2 – low-frequency components with a period of more than 7 years; 3 and 4 – linear trends for the periods of 1986–2002 and 2002–2019, respectively.

### References

1. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. (Eds.). Cambridge, New York, Cambridge Univ. Press, 2013. 1535 p.
2. Serreze M.C., Barrett A.P., Cassano J.J. Circulation and surface controls on the lower tropospheric air temperature field of the Arctic. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 2011, vol. 116, no. D7, art. D07104, pp. 1–20. doi: 10.1029/2010 JD015127.
3. Alekseev G., Kuzmina S., Bobylev L., Urazgildeeva A., Gnatiuk N. Impact of atmospheric heat and moisture transport on the Arctic warming. *Int. J. Climatol.*, 2019, vol. 39, no. 8, pp. 3582–3592. doi: 10.1002/joc.6040.
4. Cullather R.I., Lim Y.K., Boisvert L.N., Brucker L., Lee J.N., Nowicki S.M. Analysis of the warmest Arctic winter, 2015–2016. *Geophys. Res. Lett.*, 2016, vol. 43, no. 20, pp. 10808–10816. doi: 10.1002/2016 GL 071228.
5. Perevedentsev Yu.P., Guryanov V.V., Shantalinsky K.M., Auhadeev T.R. *Dinamika troposfery i stratosfery v umerennykh shirotakh Severnogo polushariya i sovremennye izmeneniya klimata v Privolzhskom federal'nom okruge* [Dynamics of the Troposphere and Stratosphere in the Temperate Latitudes of the Northern Hemisphere and Current Climate Change in the Volga Federal District]. Kazan, Izd. Kazan. Univ., 2017. 186 p. (In Russian)
6. Perevedentsev Yu.P., Vasil'ev A.A., Shantalinskii K.M., Gur'yanov V.V. Long-term variations in surface air pressure and surface air temperature in the Northern Hemisphere mid-latitudes. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2017, vol. 42, no. 7, pp. 461–470. doi: 10.3103/S1068373917070056.
7. Perevedentsev Yu.P., Shantalinskii K.M., Vasil'ev A.A., Gur'yanov V.V. Thermal regime in the troposphere, stratosphere and lower mesosphere of the Northern Hemisphere in 1979–2016. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2019, vol. 44, no. 8, pp. 501–512. doi: 10.3103/S1068373919080016.
8. Vereshchagin M.A., Perevedentsev Yu.P., Shantalinskii K.M., Tudrii V.D. Factor analysis of the long-term dynamics of the global thermal regime of the surface air layer. *Izv. Ross. Akad. Nauk. Ser. Geogr.*, 2004, no. 5, pp. 34–41. (In Russian)
9. Ermolaev O.P., Kotlyakov V.M., Perevedentsev Yu.P., Selivanovskaya S.Yu. The environment and sustainable development of regions: New methods and technologies of research. *Izv. Ross. Akad. Nauk. Ser. Geogr.*, 2009, no. 6, pp. 119–122. (In Russian)
10. Mohanakumar K. *Stratosphere-Troposphere Interactions*. New York, Springer, 2008. 416 p.



11. Vargin P.N., Yushkov V.A., Khaikin S.M., Tsvetkova N.D., Kostykin S.V., Volodin E.M. Climate change and the middle atmosphere: Increasingly more questions. *Herald Rus. Acad. Sci.*, 2010, vol. 80, no. 2, pp. 47–56. doi: 10.1134/S1019331610010065.
12. Vargin P.N., Volodin E.M., Karpenko A.Yu., Pogoreltsev A.I. Stratosphere–troposphere interactions. *Herald Rus. Acad. Sci.*, 2015, vol. 85, no. 1, pp. 56–63.
13. Zyulyaeva Yu.A., Zhadin E.A. Analysis of three-dimensional Eliassen–Palm fluxes in the lower stratosphere. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2009, vol. 34, no. 8, pp. 483–490. doi: 10.3103/S1068373909080019.
14. Jadin E.A., Wei K., Zyulyaeva Yu.A., Chen W., Wang L. Stratospheric wave activity and the Pacific Decadal Oscillation. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 2010, vol. 72, no. 16, pp. 1163–1170. doi: 10.1016/j.jastp.2010.07.009.
15. Vargin P.N., Volodin E.M. Analysis of the reproduction of dynamic processes in the stratosphere using the climate model of the Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.*, 2016, vol. 52, no. 1, pp. 1–15. doi: 10.1134/S0001433815060134.
16. Savenkova E.N., Kanukhina A.Yu., Pogoreltsev A.I., Merzlyakov E.G. Variability of the springtime transition date and planetary waves in the stratosphere. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 2012, vols. 90–91, pp. 1–8. doi: 10.1016/j.jastp.2011.11.001.
17. Vargin P.N., Kostykin S.V., Rakushina E.V., Volodin E.M., Pogoreltsev A.I. Study of the variability of spring breakup dates and Arctic stratospheric polar vortex parameters from simulation and reanalysis data. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.*, 2020, vol. 56, no. 5, pp. 458–469. doi: 10.1134/S0001433820050114.
18. Perevedentsev Yu.P., Shantalinskii K.M., Aukhadееv T.R., Ismagilov, N.V., Zandi R. Effect of macrocirculation systems on the thermobaric conditions of the Volga Federal District. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2014, vol. 156, no. 2, pp. 156–169. (In Russian)
19. Zhou S., Miller A.J., Wang J., Angell J.K. Trends of NAO and AO and their associations with stratospheric processes. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, vol. 28, pp. 4107–4110. doi: 10.1029/2001GL013660.
20. Guryanov V.V., Eliseev A.V., Mokhov I.I., Perevedentsev Yu.P. Wave activity and its changes in the troposphere and stratosphere of the Northern Hemisphere in winters of 1979–2016. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.*, 2018, vol. 54, no. 2, pp. 114–126. doi: 10.1134/S0001433818020093.

**Для цитирования:** Переведенцев Ю.П., Шанталинский К.М., Исмагилов Н.В., Гурьянов В.В., Николаев А.А., Аухадеев Т.Р. Термический режим в тропосфере, стратосфере и мезосфере северной полярной зоны в 1979–2019 гг. // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2021. – Т. 163, кн. 4. – С. 626–642. – doi: 10.26907/2542-064X.2021.4.626-642.

**For citation:** Perevedentsev Yu.P., Shantalinsky K.M., Ismagilov N.V., Guryanov V.V., Nikolaev A.A., Aukhadееv T.R. Thermal regime in the troposphere, stratosphere, and mesosphere of the northern polar zone in 1979–2019. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2021, vol. 163, no. 4, pp. 626–642. doi: 10.26907/2542-064X.2021.4.626-642. (In Russian)