

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-3-32-48>

УДК 551.510.528

## Характеристики внетропической тропопаузы в Южном полушарии по данным аэрологического зондирования

*У.О. Соколова, А.Р. Иванова, Е.Н. Скриптунова*

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва, Россия  
ivanova@mecom.ru*

Исследована сезонная и межгодовая изменчивость высоты и температуры тропопаузы на основании информации 41 станции аэрологического зондирования, расположенной южнее 30° ю. ш., в период 2015–2024 гг. Получены средние значения характеристик тропопаузы и их распределение, обсуждается влияние антарктического континента на положение тропопаузы. Проведен поиск трендов высоты тропопаузы в Южном полушарии за прошедшее десятилетие.

*Ключевые слова:* тропопауза, Южное полушарие, аэрологическое зондирование

## Extratropical tropopause features in Southern Hemisphere based on the upper-air sounding data

*U.O. Sokolova, A.R. Ivanova, E.N. Skriptunova*

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia  
ivanova@mecom.ru*

The seasonal and interannual variability of the tropopause height and temperature was studied using the information from 41 upper-air sounding stations located south of 30° during 2015–2024. Average values and the distribution of the tropopause characteristics were obtained, and the influence of the Antarctic continent on the tropopause location was discussed. A search for trends in the tropopause height in the Southern Hemisphere over the past decade was carried out.

*Keywords:* tropopause, Southern Hemisphere, upper-air sounding

### Введение

Изучение динамики тропопаузы связано с необходимостью метеорологического обеспечения авиации. Информация о высоте границы между тропосферой и стратосферой является составной частью карт особых явлений для авиации (SigWX). До 2022 г. лаборатория зональных прогнозов Гидрометцентра России выпускала подобные карты исключительно для территории Северного полушария. В настоящее время в связи с созданием Российского центра зональных прогнозов требуется подготовка такой информации для всего глобуса. Однако, как было указано в [2], в Южном полушарии существуют особенности циркуляции, оказывающие влияние

в том числе на структуру и динамику тропопаузы. По этой причине важно иметь представление об изменчивости характеристик тропопаузы в этом регионе.

Одним из самых надежных источников для определения положения тропопаузы является аэрологическая информация. По данным об измеряемой датчиком радиозонда температуре производится поиск уровня, соответствующего классическому определению тропопаузы, сформулированному в документах Всемирной метеорологической организации [12]. Кроме того, по значениям представленной в материалах зондирования потенциальной температуры может быть определено положение тропопаузы согласно [11]. В данной работе анализируются значения высоты и температуры тропопаузы [12] на основании информации радиозондирования на станциях Южного полушария за период 2015–2024 гг. Зона южнее  $30^\circ$  ю. ш. выбрана из-за максимальной изменчивости характеристик тропопаузы во внетропической области [3].

### Используемые данные

Поскольку тропопауза является поверхностью раздела между двумя частями земной атмосферы – тропосферы и стратосферы – с совершенно разными свойствами, существует множество способов определения ее положения [3]. Тропопауза может быть установлена по различию в свойствах, таких как распределение с высотой температуры (обычной или потенциальной), содержание химических элементов (озона, водяного пара), значение потенциального вихря Эртеля и пр. В настоящей работе тропопауза определялась по классическому определению Всемирной метеорологической организации – это «минимальная высота, на которой вертикальный градиент температуры падает до  $0,2^\circ\text{C}/100$  м (или ниже) и среднее значение этого параметра в вышележащем слое толщиной 2 км не превышает  $2^\circ\text{C}/\text{км}$ » [12]. Вертикальный профиль температуры по данным значений на уровнях аппроксимировался гладкой кривой с помощью сплайна третьего порядка с условиями равенства нулю второй производной на верхней и нижней границах. Далее снизу с шагом 1 м производился поиск уровня, на котором выполнялось условие [12]. Этот уровень назначался высотой тропопаузы, а соответствующая ему температура на профиле – температурой тропопаузы.

Для анализа были использованы материалы 41 станции аэрологического зондирования (рис. 1), расположенной на территории Австралии, Новой Зеландии, Африки, Южной Америки и Антарктиды за 10 лет (с 2015 по 2024 год). Общее количество зондов, пригодных для обработки, составило 166509 (первоначальное количество – около 180 тысяч) [[https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding\\_legacy.html](https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding_legacy.html)].

Сведения о характеристиках тропопаузы извлекались из информации только тех зондов, которые выпускались в стандартные сроки 00 и 12 ч ВСВ. Исключение составляли данные на станциях Новой Зеландии, где,

очевидно, в силу расположения территории страны в различных часовых поясах (от UTC-11 до UTC+13), особенно много запусков происходило в нестандартные сроки (03, 06, 09, 15, 18, 21 ч ВСВ).



**Рис. 1.** Аэрологические станции Южного полушария (к югу от 30° ю. ш.).

**Fig. 1.** Upper-air sounding stations in Southern Hemisphere (south 30 S).

Была произведена процедура фильтрации данных с целью исключения неподходящей для обработки информации. К такому «браку» относились данные, содержащие положительные значения температуры на высотах более 6 км, данные ракетных запусков, начинающиеся с высоты 17–18 км, случаи повторной записи на одном и том же уровне или случаи снижения радиозонда в полете, когда построение сплайна технически оказывалось невозможным. В ходе проведенного анализа было выявлено, что информация от 7.3 % общего числа зондов непригодна для определения положения тропопаузы. Наибольшее количество таких зондов было отмечено в Новой Зеландии – 16,9 % от общего числа на данной территории. В Африке этот показатель составил 14.5 %, в Южной Америке – 7.6 %, Антарктиде – 6.4 %. Наименьшее число зондов, содержащих тот или иной вид ошибок, было зафиксировано в Австралии – 2.3 %. Было установлено, что количество непригодных для расчетов зондов уменьшалось в течение рассматриваемого десятилетнего периода. Так, с 2015 по 2019 год их число варьировалось от 1298 до 2278 (суммарно в год для всех территорий), тогда как в период с 2020 по 2024 год оно не превышало 1 тыс. (от 676 до 912 ежегодно).

Поскольку Южное полушарие преимущественно океаническое, станций, расположенных южнее  $30^\circ$  ю. ш., оказалось не так много: 14 – в Австралии, по 11 – в Южной Америке и Антарктиде, 3 – в Новой Зеландии, 2 – на африканском континенте. При этом далеко не везде запуск зондов производился регулярно: на некоторых станциях отсутствует информация за несколько месяцев или даже за несколько лет. Максимальные пропуски в данных отмечены на российской станции Новолазаревская (полностью 2019–2020 гг.) в Антарктиде и на станциях 87715 (2015–2016 гг.) и 87576 (2023–2024 гг.) в Южной Америке. В окончательной выборке количество зондов меняется от 625 на Base Magambio в Антарктиде до 7049 на станции 94672 YPAD, расположенной вблизи аэропорта Мельбурн в Австралии (табл. 1).

**Таблица 1.** Характеристики станций аэрологического зондирования и количество зондов, используемых для обработки

**Table 1.** Position of upper-air sounding station and number of soundings under consideration

Индекс станции	Широта, град.	Долгота, град.	Высота над уровнем моря, м	Кол-во зондов за 2015-2024 гг.
<b>Австралия</b>				
94610 YPPH	-31.93	115.96	20	6996
94637 YPKG	-30.78	121.45	370	1993
94638	-33.83	121.88	27	1798
94659 YPWR	-31.15	136.81	167	3415
94672 YPAD	-34.95	138.53	4	7028
94975 YMHB	-42.83	147.50	27	1635
94711	-31.48	145.83	264	3092
94776 YSWM	-32.80	151.83	8	1986
94802 YPAL	-34.93	117.80	68	1115
94821 YMMG	-37.73	140.78	69	7049
94866 YMML	-37.66	144.85	119	1919
94910 YSWG	-35.16	147.45	212	6803
94995 Lord Howe	-31.53	159.06	7	3198
94998 YMMQ	-54.50	158.95	8	6868
<b>Новая Зеландия</b>				
93112 NZWP	-36.78	174.63	27	6598
93417 NZPP	-40.90	174.98	12	6672
93844 NZNV	-46.41	168.31	4	6900
<b>Африка</b>				
68816 Cape Town	-33.96	18.60	42	4967
68842 FAPE	-33.98	25.61	61	4831

Индекс станции	Широта, град.	Долгота, град.	Высота над уровнем моря, м	Кол-во зондов за 2015-2024 гг.
<b>Южная Америка</b>				
83971 SBPA	-30.00	-51.18	3	5362
85586 SCSN	-33.65	-71.61	75	6022
85799 SCTE	-41.43	-73.10	79	3327
85934 SCCI	-53.00	-70.85	33	2618
87344 SACO	-31.30	-64.21	494	3467
87418 SAME	-32.83	-68.78	704	3199
87576 SAEZ	-34.81	-58.53	20	3057
87623 SAZR	-36.56	-64.26	191	3119
87715 SAZN	-38.95	-68.13	271	1782
87860 SAVC	-45.78	-67.50	46	2232
88889 EGYPT	-51.81	-58.45	73	3625
<b>Антарктида</b>				
89002 Neumayer	-70.66	-8.25	50	2859
89055 Base Marambio	-64.23	-56.71	198	625
89062 Rothera	-67.57	-68.13	16	2374
89512 Novolazarevskaja	-70.76	11.83	119	2460
89532 Syowa	-69.00	39.58	21	6860
89571 Davis	-68.57	77.97	22	3325
89564 Mawson	-67.60	62.88	16	6370
89592 Mirnyj	-66.55	93.01	40	3034
89611 Casey	-66.28	110.52	42	6409
89664 McMurdo	-77.85	166.66	24	5260
89009 Amundsen-Scott	-90.00	0.00	2835	4260

### Диапазон изменения среднегодовых характеристик тропопаузы в период 2015–2024 гг.

При поиске положения тропопаузы на температурном профиле проверка на соответствие условию [12] начиналась с уровня 3 км (за исключением антарктической станции Amundsen-Scott, расположенной на высоте 2835 м, здесь отсчет производился от 4,5 км), так как информация о тропопаузе важна для полетов на верхних и средних уровнях – в слое атмосферы, начинающемся с высоты FL100 (~3000 м). Отметим, что с ноября 2025 г. карта особых явлений для авиации, содержащая среди прочего данные о высоте тропопаузы, будет выпускаться центрами Всемирной системы зональных прогнозов для единого слоя FL100-FL600 [5].

В табл. 2 представлены средние значения высоты и температуры тропопаузы за период 2015–2024 гг. для каждой станции. Самая высокая тропопауза в данный период времени была отмечена на станции 83971 SBPA

в Южной Америке и составила 14206 м. Самая низкая тропопауза в среднем за указанное десятилетие была установлена на антарктической станции 89664 McMurdo – 8681 м. При этом наиболее низкая температура на высоте тропопаузы соответствует самой южной точке – антарктической станции 89009 Amundsen-Scott и составляет  $-66,5^{\circ}\text{C}$  (при средней высоте 9308 м), а наиболее высокая температура ( $-56,5^{\circ}\text{C}$ ) – станции 94998 YMMQ в Австралии (высота 10569 м).

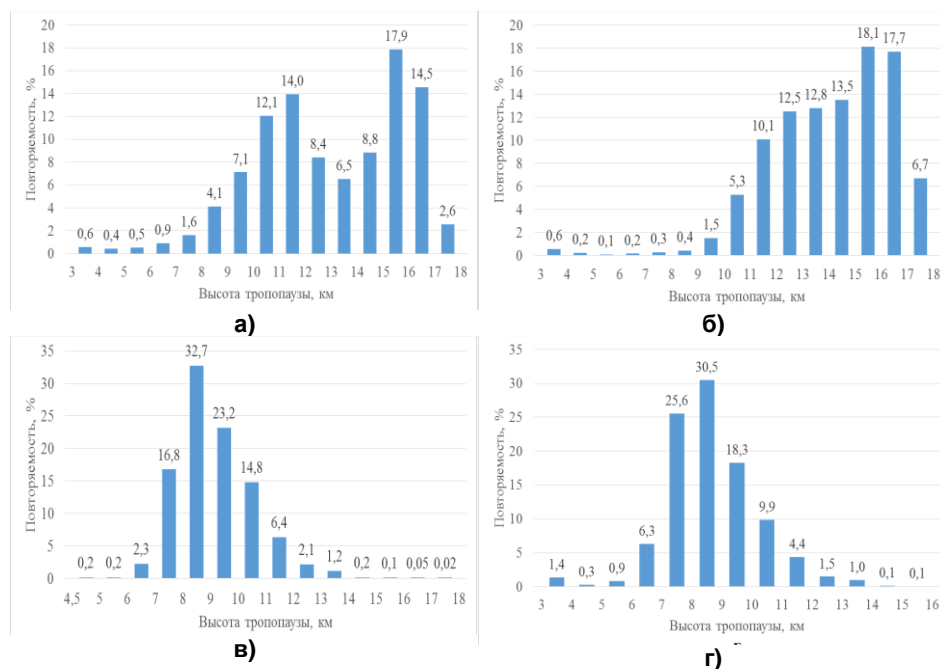
**Таблица 2.** Значения высоты тропопаузы (Н) и температуры (Т) по данным зондирования в среднем за период в среднем за период 2015–2024 гг.

**Table 2.** Tropopause height (H) and temperature (T) averaged over period 2015–2014

Станция	Среднее		Станция	Среднее	
	Н	Т		Н	Т
<b>Австралия</b>			<b>Южная Америка</b>		
94610	12980	-60,0	83971	14206	-66,1
94637	13352	-61,4	85586	12361	-59,3
94638	12507	-59,1	85799	10868	-57,2
94659	13136	-60,8	85934	9920	-58,3
94672	11943	-57,7	87344	13287	-62,1
94711	12827	-59,5	87418	12672	-59,8
94776	12233	-57,8	87576	12451	-60,1
94802	11970	-57,6	87623	11820	-58,4
94821	11401	-57,2	87715	11281	-57,6
94866	11362	-56,9	87860	10498	-57,9
94910	11689	-56,9	88889	9895	-57,6
94975	10800	-57,2	<b>Антарктида</b>		
94995	12647	-59,0	89002	9345	-63,1
94998	9713	-56,5	89055	9524	-61,9
<b>Новая Зеландия</b>			89062	9316	-61,5
93112	11402	-56,7	89512	9523	-65,3
93417	10951	-57,0	89532	9443	-63,9
93844	10569	-57,4	89564	9116	-61,8
<b>Африка</b>			89571	9124	-62,1
68816	12686	-60,2	89592	9161	-61,6
			89611	8863	-59,6
68842	12570	-60,0	89664	8681	-61,7
			89009	9308	-66,5

В среднем за период 2015–2024 гг. для станций австралийского континента (количество зондов 54895) высота тропопаузы и температура на этом уровне составили 12040 м и  $-58,4$  °С соответственно, в Новой Зеландии (20170 зондов) – 10974 м и  $-57,0$  °С, в Африке (9798 зондов) – 12628 м и  $-60,1$  °С, в Южной Америке (37810 зондов) – 11751 м и  $-59,5$  °С, в Антарктиде (43836 зондов) – 9219 м и  $-62,6$  °С.

Отметим, что существует значительная изменчивость характеристик тропопаузы для каждой станции. Приведем примеры повторяемости значений высоты тропопаузы в различных градациях для нескольких станций, две из которых расположены на северной границе рассматриваемой области (ближе всего к экватору), две – на территории Антарктиды (рис. 2).



**Рис. 2.** Повторяемость (%) значений высоты тропопаузы на станциях: 94610 YPPH (а); 83971 SBPA (б); 89009 Amundsen-Scott (в); 89664 McMurdo (г).

**Fig. 2.** Occurrence frequency of tropopause height values at stations: 94610 YPPH (а); 83971 SBPA (б); 89009 Amundsen-Scott (в); 89664 McMurdo (г).

Для австралийской станции 94610 YPPH ( $31.93^\circ$  ю. ш.,  $115.96^\circ$  в. д.) на рис. 2а, как оказалось, повторяемость имеет бимодальное распределение с двумя максимумами в слое 11–12 км (14,5 %) и 15–16 км (17,9 %). Первый вполне соответствует высоте тропопаузы умеренных широт, второй – высоте тропической тропопаузы. В то же время примерно в 4 % случаев уровень, соответствующий определению тропопаузы [12], согласно расчетам по данным зондирования, устанавливался на высоте ниже 8 км (в 0,6 % – в слое 3–4 км).

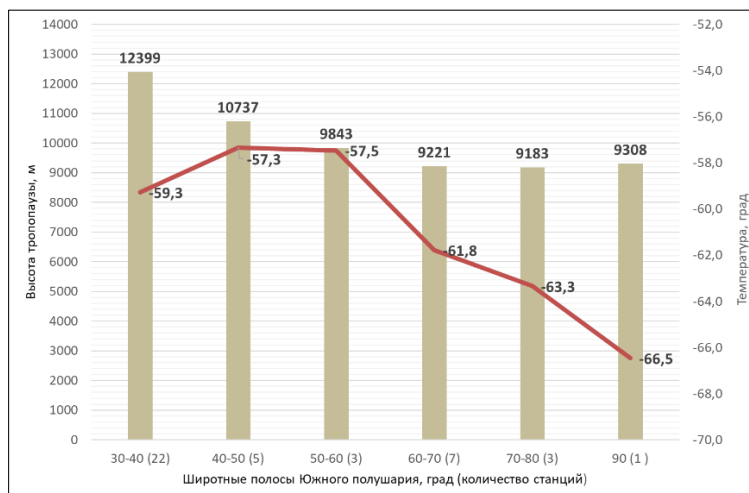
Для южноамериканской станции 83971 SBPA (30.00° ю. ш., 51.18° з. д.) такая низкая тропопауза была получена по данным всего 1,4 % зондов. Максимум повторяемости высоты тропопаузы пришелся на слой 15–17 км (35,8 %), а в 6,7 % высота расчетной тропопаузы превысила 17 км (рис. 2б).

Для антарктических станций 89009 Amundsen-Scott (90.00° ю. ш., 0.00) и 89664 McMurdo (77.85° ю. ш., 166.66° в. д.) распределение повторяемости одномодальное, максимум расположен в слое 8–9 км и составляет 32,7 % и 30,5 % соответственно (рис. 2в и 2г). Вообще в подавляющем большинстве случаев 87,5 % и 84,2 % соответственно) высота тропопаузы на этих станциях регистрируется в слое 7–11 км. Тем не менее, над Антарктидой иногда формируется инверсионный слой, соответствующий определению тропопаузы, на очень больших высотах, характерных для тропиков. А порой отмечаются условия, когда тропопауза, напротив, идентифицируется на нижней границе рассматриваемого слоя. Такой процесс, который может наблюдаться в период полярной ночи, был охарактеризован в [6] как «исчезновение тропопаузы во время антарктической зимы».

### **Изменение характеристик тропопаузы в зависимости от широты**

Поскольку пункты аэрологического зондирования расположены, как правило, на материках, а Южное полушарие на 90 % океаническое, обеспеченность данными весьма отличается в разных широтных поясах. Больше всего станций, чьи данные анализировались, расположено в полосе 30–40° ю. ш. – 22 станции (что превышает половину всего количества), в то время как в области 50–60° ю. ш. доступны данные всего лишь одной островной австралийской и двух материковых южноамериканских станций.

Отметим, что высота тропопаузы монотонно уменьшается с широтой вплоть до 80-го градуса. Однако над Южным полюсом ее значения оказываются выше, чем в предыдущем широтном поясе. Очевидно, это как раз связано с влиянием «ледяной горы», хотя следует иметь в виду, что наличие данных всего одной станции нельзя считать достаточно репрезентативным для окончательных выводов. Тем не менее, работа [11] также подтверждает некий подъем тропопаузы над Южным полюсом. Что касается температуры на уровне тропопаузы, то самой теплой она оказалась в широтной полосе 40–50° ю. ш. Очевидно, из-за частых адвекций тропической воздушной массы, в полосе, ближней к экватору, тропопауза значительно выше и на 2 градуса холоднее. По направлению к полюсу уменьшаются значения не только высоты, но и температуры тропопаузы. Хотя в среднем более низкой тропопаузе полагается быть более теплой, здесь, из-за влияния покрытого льдом континента, над Южным полюсом зафиксирована самая холодная тропопауза на всем полушарии (рис. 3).



**Рис. 3.** Значения высоты и температуры тропопазузы в различных широтных зонах Южного полушария.

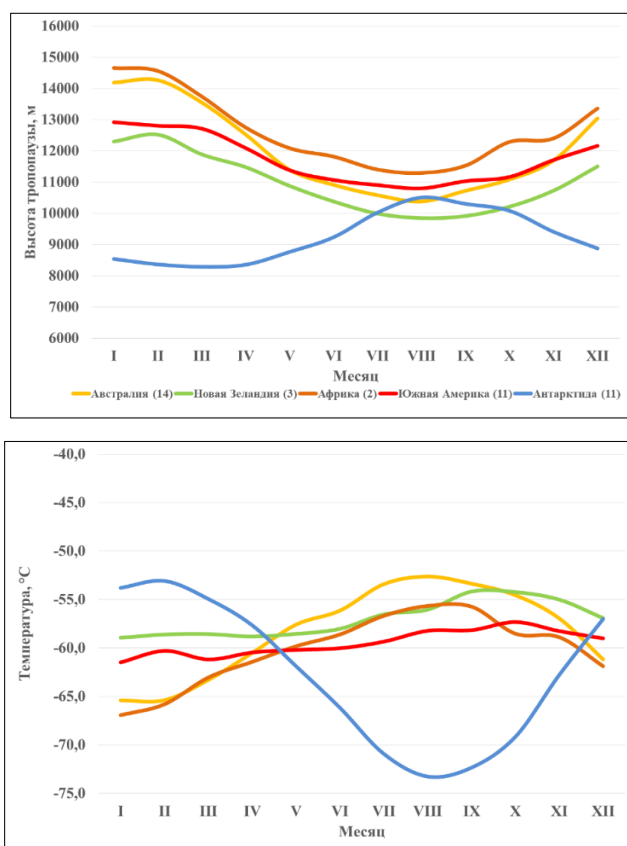
**Fig. 3.** Tropopause height and temperature values in different latitude bands of Southern Hemisphere.

Анализ сезонных характеристик тропопазузы (рис. 4) позволил установить, что для всех рассматриваемых регионов (кроме Антарктиды) наиболее высокой тропопазуза оказывается в период лета Южного полушария или так называемого «австралийского лета» («australian summer»).

Максимальные значения ее высоты приходятся на январь для Африки и Южной Америки (14658 и 12922 м соответственно) и на февраль для Австралии и Новой Зеландии (14267 и 12522 м соответственно). В Антарктиде самая высокая тропопазуза в среднем за десятилетие регистрировалась зимой (10511 м в августе). Этот факт требует дополнительного изучения вне рамок данной работы, однако он подтвержден и другими источниками информации, один из которых представлен на рис. 5 [11]. Из-за сильного радиационного выхолаживания поверхности ледяного континента, к тому же представляющего собой орографическую возвышенность (в среднем высота материка над уровнем моря превышает 2000 м [4]), слой температурных градиентов, соответствующий определению классической тропопазузы [12], полярной ночью может обнаруживаться на значительных высотах, превышающих порой 16 км.

Наиболее низкой тропопазуза на антарктических станциях оказывается в конце лета – начале осени Южного полушария (минимум в марте – 8290 м). Случаи высокой тропопазузы здесь могут быть связаны с вытеснением полярных масс и вторжением более теплого воздуха в результате процессов блокирования в средних широтах. Подобная синоптическая ситуация описана в [14], когда в январе 2017 года, при анализе данных станций за Южным полярным кругом, над одной из них была обнаружена воздушная масса с необычно высокой тропопазузой. Причиной оказался

блокирующий антициклон в средних широтах, который обусловил образование высотного гребня, ограниченного двумя высотными циклонами отсечения. Сопровождающий этот гребень язык теплого и влажного воздуха проник во внутренние районы антарктического плато, увеличив приземную температуру примерно на 10 градусов и приведя к подъему тропопаузы с 8 до 10 км в данном районе. При этом полярная воздушная масса была вытеснена из Антарктиды и распространилась в виде холодного течения до юга Новой Зеландии, повлияв на погоду там (понижение температуры и опускание тропопаузы).

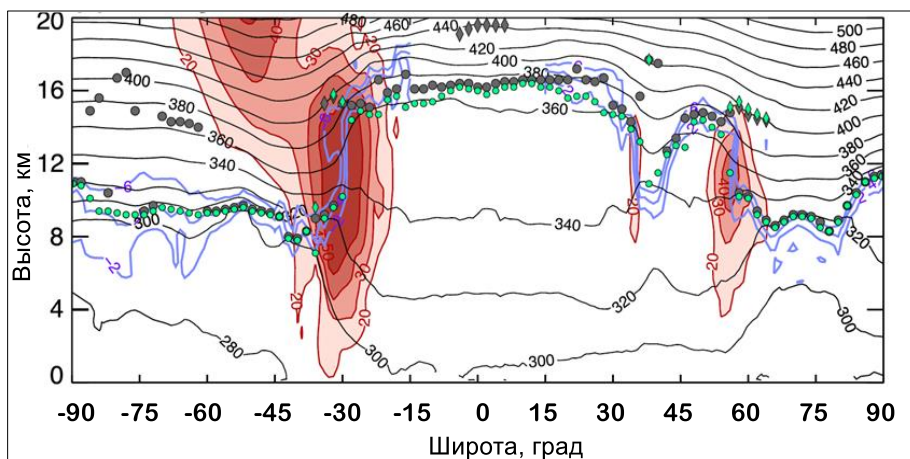


**Рис. 4.** Сезонная изменчивость высоты (вверху) и температуры (внизу) тропопаузы.

**Fig. 4.** Seasonal variability of tropopause height (top) and temperature (bottom).

Для всех остальных территорий, исключая Антарктиду, самая низкая тропопауза наблюдается в августе (в конце зимы): 11297, 10803, 10383, 9851 м для Африки, Южной Америки, Австралии и Новой Зеландии соответственно.

Годовой ход температуры на уровне тропопаузы имеет существенно различающуюся амплитуду на разных континентах. Особенно велика она в Антарктиде (около  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), где максимум отмечается в конце австралийского лета (феврале), а минимум – в конце зимы Южного полушария (августе). Для остальных территорий годовая амплитуда существенно меньше (минимум на станциях Южной Америки составляет около  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Самая теплая тропопауза фиксируется в августе (Австралия и Африка), сентябре (Новая Зеландия) и октябре (Южная Америка), самая холодная – в январе.



**Рис. 5.** Широтно-вертикальный разрез через  $320^{\circ}$  з. д. из [11], где серыми кружками обозначено положение термической тропопаузы, серыми изолиниями – изэнтропы (K), сиреневыми изолиниями – изэртелические поверхности (pvu) 15 июля 2020 г.

**Fig. 5.** Pole-to-pole vertical cross-section through  $320^{\circ}$  W for data 15 July 2020. Grey circles denote WMO tropopause, black contours – potential temperature (K), purple contours – Ertel's potential vorticity (PVU) [11].

### Временные тенденции изменения характеристик тропопаузы

На фоне глобального потепления и восстановления озонового слоя исследователи чаще всего констатируют подъем тропопаузы в течение последних десятилетий [10].

Поскольку исследуемый период достаточно короткий, делать уверенный вывод о каких-либо возможных временных тенденциях в изменении характеристик тропопаузы представляется не вполне правомерным. Тем не менее, учитывая, что ранее подобные работы проводились для 13–15-летних рядов [7, 9], была сделана попытка рассчитать значение линейного «тренда» среднегодовых значений высоты и температуры тропопаузы в период 2015–2024 годов.

Для оценки возможной тенденции изменений характеристик тропопаузы были отобраны только те станции, на которых в течение всех 10 лет производилось зондирование в устойчивом режиме, без значительных перерывов (табл. 3). После тщательного контроля осталась примерно

половина станций от их исходного количества (21 из 41). К сожалению, была исключена одна из двух африканских станций и 8 из 11 южноамериканских. Для Австралии было отбраковано 6 станций из 14, для Антарктиды – из 11 пришлось исключить 5. В число последних вошли обе российский станции – Новолазаревская, где зондирование не проводилось с августа 2018 по апрель 2022 г., и Мирный, где зонды не запускались с июля 2020 по апрель 2021 г. Для Новой Зеландии, где, как было указано ранее, измерения по местным соображениям часто проводятся в нестандартные сроки, пришлось (помимо запусков в 00 и 12 ч) использовать информацию зондирования в 03, 06, 09, 15, 18, 21 ч ВСВ.

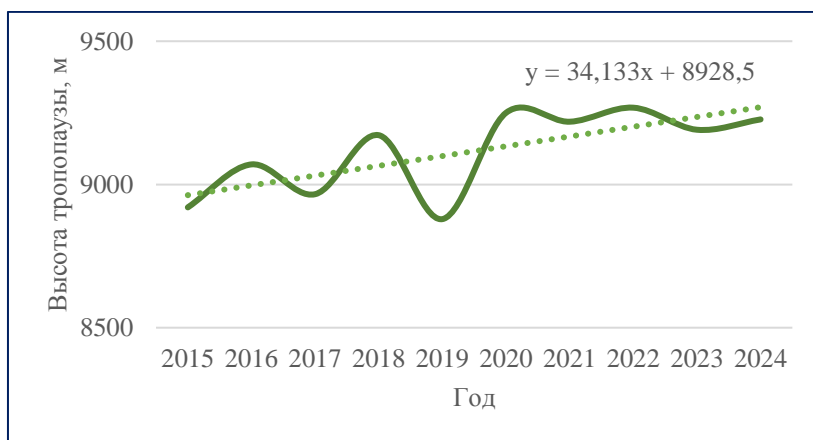
**Таблица 3.** Ежегодно выпускаемое количество зондов на станциях, выбранных для оценки трендов характеристик тропопаузы в период 2015–2024 гг.  
**Table 3.** Number of sondes annually launched at selected stations for trend estimation of tropopause height in 2015–2024.

№	Станция	Год									
		2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
<b>Австралия</b>											
1	94610	701	633	691	690	716	708	706	718	717	716
2	94659	359	349	347	347	327	324	339	338	340	345
3	94672	705	700	706	703	704	711	712	706	685	696
4	94776	349	296	326	326	288	323	339	313	297	235
5	94866	723	604	711	713	708	706	717	722	723	722
6	94975	689	701	699	705	707	707	706	703	714	472
7	94995	328	341	341	330	348	305	283	305	296	321
8	94998	709	692	704	702	680	700	649	674	673	685
<b>Новая Зеландия</b>											
9	93112	545	673	859	779	750	613	539	536	633	671
10	93417	562	662	809	806	745	630	548	597	665	648
11	93844	655	696	712	844	795	647	529	638	691	693
<b>Африка</b>											
12	68816	322	377	252	471	524	629	609	602	601	580
<b>Южная Америка</b>											
13	85586	671	672	656	550	621	381	632	549	606	684
14	85799	326	314	301	295	325	358	358	358	352	340
15	88889	364	354	343	333	366	381	360	382	368	374
<b>Антарктида</b>											
16	89062	202	102	203	256	260	244	245	302	289	271
17	89532	569	690	691	702	711	695	704	720	693	685
18	89564	357	282	335	341	330	334	355	315	330	346
19	89571	423	441	690	678	703	688	698	699	632	718
20	89664	494	672	509	492	504	491	518	538	515	527
21	89009	465	462	407	374	472	389	417	408	434	432

Существуют различные подходы к определению возможных трендов, однако, как было упомянуто ранее, при коротких рядах наблюдений их применение может быть затруднительно.

Для оценки изменения высоты тропопаузы был использован линейный тренд, который описывает тенденцию в данных, увеличивающуюся или уменьшающуюся с постоянной скоростью. Для каждого случая также рассчитывалась величина достоверности аппроксимации, представляющая собой статистический показатель, который количественно оценивает, насколько точно построенная математическая модель описывает исходные данные. В контексте регрессионного анализа этот параметр часто называют коэффициентом детерминации ( $R^2$ ) [1]. Коэффициент детерминации может принимать значения от 0 до 1, где 0 означает, что модель совершенно не объясняет вариации данных, а при значении 1 можно сделать вывод, что модель идеально предсказывает зависимости. Производился поиск ситуаций, в которых значение  $R^2$  превышало хотя бы 0.5. Эта величина является значимым, хотя и не вполне успешным показателем, подтверждающим справедливость наличия тренда всего в половине случаев [1].

При оценке изменчивости высоты тропопаузы по среднегодовым значениям значимый тренд удалось выявить только на антарктической станции 89564 Mawson – повышение тропопаузы в среднем составило 34 м в год ( $R^2 = 0,5$ ) (рис. 6).

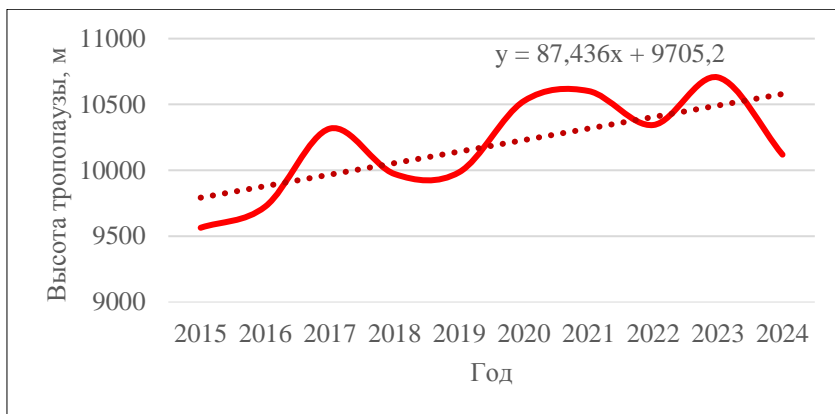


**Рис. 6.** Линейный тренд среднегодовых значений высоты тропопаузы за период 2015–2024 гг. на станции 89564 Mawson.

**Fig. 6.** Linear trend of annual average values of tropopause height for the period 2015–2024 at station 89564 Mawson.

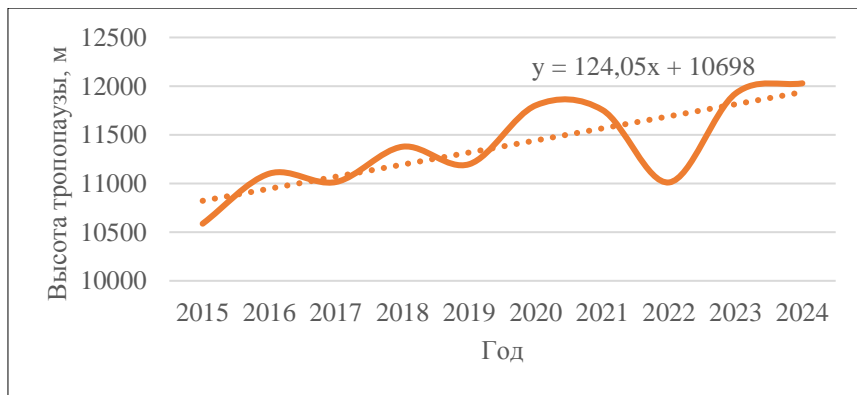
Дополнительно был проведен анализ по выявлению возможных трендов для центральных месяцев сезонов – январь, апрель, июль, октябрь. На станции 89532 Syowa высота «зимней» тропопаузы (в июле) в течение десятилетнего периода увеличивалась в среднем на 87 м в год (рис. 7),

$R^2 = 0,5$ . В октябре (весной Южного полушария) также был выявлен положительный тренд на одной станции Южной Америки 85586 SCSN – 124 м в год (рис. 8),  $R^2 = 0,6$ . В остальные месяцы значимые тренды не были выявлены ни на одной из станций.



**Рис. 7.** Линейный тренд средних за июль значений высоты тропопаузы на станции 89532 Syowa в период 2015–2024 гг.

**Fig. 7.** Linear trend of average July tropopause height values for the period 2015–2024 at station 89532 Syowa.



**Рис. 8.** Линейный тренд средних за октябрь значений высоты тропопаузы за период 2015–2024 гг. на станции 85586 SCSN.

**Fig. 8.** Linear trend of average October tropopause height values for the period 2015–2024 at station 85586 SCSN.

Для подтверждения гипотезы о наличии тренда был также проведен анализ с использованием теста Манна – Кендалла, который представляет собой непараметрический метод, используемый для выявления тенденций во временных рядах данных без предположения о каком-либо конкретном распределении данных [8, 13]. Данный метод часто применяется к наборам

экологических и климатических данных, где целью является выявление монотонных тенденций (возрастающих или убывающих) с течением времени. Результатом теста является подтверждение одной из выдвигаемых гипотез: нулевой гипотезы ( $H_0$ ), указывающей на то, что в данных нет тренда (данные случайно упорядочены во времени), или альтернативной гипотезы ( $H_1$ ) – в данных существует монотонная тенденция (увеличивается или уменьшается). Результат теста также включает р-значение – меру значимости тренда. Низкое р-значение (менее 0,05) указывает на статистически значимую тенденцию.

В каждом из приведенных выше случаев, представленных на рис. 5–7 тест Манна – Кендалла подтвердил наличие положительного тренда при уровне значимости  $p < 0,05$ , что является показателем достоверности полученных результатов, которые с вероятностью более 95 % являются следствием заданных условий.

Что касается температуры на уровне тропопаузы, для этой характеристики не удалось обнаружить сколь-нибудь значимых результатов, подтверждающих наличие монотонных изменений, ни для одной станции.

### Выводы

В ходе проведенной работы по данным 41 станции аэрологического зондирования, расположенной во внетропической области Южного полушария, были выявлены основные закономерности изменения характеристик тропопаузы (по определению ВМО [12]) в зависимости от местоположения станции, а также сезона года для периода 2015–2024 гг. Самая высокая (14206 м) в среднем за год тропопауза отмечалась на южноамериканской станции 83971 SPBA, расположенной на северной границе рассматриваемой области, самая низкая – на антарктической станции 89664 McMurdo (8681 м). Тропопауза на полюсе оказалась в среднем существенно выше (9308 м), что может быть обусловлено особенностями циркуляции атмосферы над Антарктидой, как это ранее обсуждалось в [2].

Годовой ход высоты тропопаузы обнаружил принципиальное отличие этой характеристики на антарктических станциях в сравнении с остальными. Над Антарктидой самая высокая и при этом самая холодная тропопауза регистрируется зимой Южного полушария (в августе), в то время как для других территорий на это время приходится минимум высоты тропопаузы и максимум (иногда сдвинутый на начало весны) температуры на этом уровне.

Подробный анализ значений высоты тропопаузы, определенной по значению градиента температуры, обнаружил, что соответствующий уровень может быть зарегистрирован на любой станции в слое от 3 до 18 км. Это свидетельствует, с одной стороны, об эпизодах глубокой адвекции воздушных масс из других широт, а с другой – о том, что критерий ВМО 1957 года не всегда позволяет четко определить границу раздела между

тропосферой и стратосферой. По этой причине современные исследователи ищут другие подходы для идентификации тропопаузы по данным радиозондирования [11].

Попытка выявить монотонные тенденции в изменениях характеристик тропопаузы за прошедшее десятилетие не обнаружила таковых, за исключением станции 89564 Mawson в Антарктиде, где тропопауза повышалась примерно на 34 м в год. Этот подъем вполне согласуется с повсеместной тенденцией повышения уровня тропопаузы на фоне глобального потепления и восстановления озонового слоя.

### Список литературы

1. Друзинин В.С., Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации: Учебное пособие. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2001. 174 с.
2. Иванова А.Р. Некоторые особенности циркуляции в свободной атмосфере Южного полушария, влияющие на полеты воздушных судов // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2025. № 2 (396). С. 8-27. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-2-8-27>
3. Иванова А.Р. Тропопауза: многообразие определений и современные подходы к идентификации // Метеорология и гидрология. 2013. № 12. С. 23-36.
4. Котляков В.М. Антарктида // Большая российская энциклопедия. М.: БРЭ, 2004-2017.
5. Правила аэронавигационного обслуживания. Метеорология (PANS-MET, Doc10157). Международная организация гражданской авиации, 2025.
6. Court A. Tropopause disappearance during Antarctic winter // Bull. Amer. Met. Soc. 1942. Vol. 23. P. 220-238.
7. Hu D., Tian W., Guan Z. et al. Longitudinal asymmetric trends of tropical cold-point tropopause temperature and their link to strengthened walker circulation // J. Climate. 2016. Vol. 29 (21). P. 7755-7771. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0851.1.
8. Onoz B., Bayazit M. The power of statistical tests for trend detection // Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences. 2003. Vol. 27. P. 247-251.
9. RavindraBabu S., Akhil Raj S. T., Basha G. et al. Recent trends in the UTLS temperature and tropical tropopause parameters over tropical South Indian region // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2020. Vol.197. P. 105164. DOI: 10.1016/j.jastp.2019.105164.
10. Son S.-W., Polvani L. M., Waugh D. W. et al. The impact of stratospheric ozone recovery on tropopause height trends // J. Climate. 2009. Vol. 22. P. 429-445.
11. Tinney E.N., Homeyer C.R., Elizalde L. et al. A modern approach to a stability-based definition of the tropopause // Monthly Weather Review. 2022. No. 12. P. 3151-3174. DOI: 10.1175/MWR-D-22-0174.1.
12. WMO: Definition of the Tropopause // WMO Bull. 1957. No. 6. 136 p.
13. Yue S., Wang C. The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series // Water Resources Management. 2004. Vol. 18 (3). P. 201-218. DOI: 0.1023/B:WARM.0000043140.61082.60.
14. Zhu J.H., Zhou L.B., Zou H. et al. Atmospheric structure observed over the Antarctic Plateau and its response to a prominent blocking high event // J. Meteor. Res. 2021. Vol. 35 (6). P. 1091-1103. DOI: 10.1007/s13351-021-1079-x.

### References

1. Druzhinin V.S., Sikan A.V. Metody statisticheskoy obrabotki gidrometeorologicheskoy informatsii: Uchebnoe posobie. Saint Petersburg, RGGMU publ., 2001, 174 p. [in Russ.].
2. Ivanova A.R. Some features of the Southern Hemisphere circulation in the free atmosphere affecting aircraft flights. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydro-meteorological Research and Forecasting]*, 2025, vol. 396, no. 2, pp. 8-27. DOI: 10.37162/2618-9631-2025-2-8-27 [in Russ.].

3. Ivanova A.R. The tropopause: Variety of definitions and modern approaches to identification. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2013, vol. 38, no. 12, pp. 808-817. DOI: 10.3103/S1068373913120029.
4. Kotlyakov V.M. Antarktida. *Bol'shaya russiyskaya entsiklopediya [The Great Russian Encyclopedia]*. Moscow, BRE, 2004-2017 [in Russ.].
5. Pravila aeronavigatsionnogo obsluzhivaniya. Meteorologiya (PANS-MET, Doc10157). Mezhdunarodnaya organizatsiya grazhdanskoj aviatsii, 2025 [in Russ.].
6. Court A. Tropopause disappearance during Antarctic winter. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 1942, vol. 23, pp. 220-238.
7. Hu D., Tian W., Guan Z. et al. Longitudinal asymmetric trends of tropical cold-point tropopause temperature and their link to strengthened walker circulation. *J. Climate*, 2016, vol. 29 (21), pp. 7755-7771. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0851.1.
8. Onoz B., Bayazit M. The power of statistical tests for trend detection. *Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences*, 2003, vol. 27, pp. 247-251.
9. RavindraBabu S., Akhil Raj S. T., Basha G. et al. Recent trends in the UTLS temperature and tropical tropopause parameters over tropical South Indian region. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2020, vol.197, pp. 105164. DOI: 10.1016/j.jastp.2019.105164.
10. Son S.-W., Polvani L. M., Waugh D. W. et al. The impact of stratospheric ozone recovery on tropopause height trends. *J. Climate*, 2009, vol. 22, pp. 429-445.
11. Tinney E.N., Homeyer C.R., Elizalde L. et al. A modern approach to a stability-based definition of the tropopause. *Monthly Weather Review*, 2022, no. 12, pp. 3151-3174. DOI: 10.1175/MWR-D-22-0174.1.
12. WMO: Definition of the Tropopause. *WMO Bull.*, 1957, no. 6, 136 p.
13. Yue S., Wang C. The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series. *Water Resources Management*, 2004, vol. 18 (3), pp. 201-218. DOI: 0.1023/B:WARM.0000043140.61082.60.
14. Zhu J.H., Zhou L.B., Zou H. et al. Atmospheric structure observed over the Antarctic Plateau and its response to a prominent blocking high event. *J. Meteor. Res.*, 2021, vol. 35 (6), pp. 1091-1103. DOI: 10.1007/s13351-021-1079-x.

Поступила 15.08.2025; одобрена после рецензирования 01.10.2025;  
принята в печать 15.10.2025.

Submitted 15.08.2025; approved after reviewing 01.10.2025;  
accepted for publication 15.10.2025.