

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2026-1-6-29>

УДК 551.510.528

Концепция глобального прогноза тропопаузы в Российском центре зональных прогнозов

***А.Р. Иванова, У.О. Соколова, Н.И. Комасько,
Е.Н. Скриптунова, Н.П. Шакина, А.А. Завьялова***

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

В статье рассматриваются различные подходы к определению тропопаузы (ВМО, PTGT, динамическая) для оперативного метеобеспечения авиации этой информацией, рассчитанной на основе выходных данных глобальной модели численного прогноза погоды. Обсуждаются ограничения каждого подхода, представлено обоснование смены знака потенциального вихря Эртеля при переходе через экватор. Приводится аргументация выбора изэртелической поверхности, отождествляющей тропопаузу во внетропической зоне, и изэнтропической поверхности – для прогноза тропопаузы в тропиках. Представлен пример прогноза характеристик тропопаузы на базе комбинирования двух концепций для всего земного шара.

Ключевые слова: Российский центр зональных прогнозов, тропопауза, глобальная модель ЧПП, радиозондирование атмосферы, потенциальный вихрь Эртеля, изэнтропическая поверхность

A concept of global tropopause prediction in the Russian Area Forecast Center

***A.R. Ivanova, U.O. Sokolova, N.I. Komasko,
E.N. Skriptunova, N.P. Shakina, A.A. Zavialova***

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

The paper examines various tropopause definitions (WMO, PTGT, and dynamic) for operational weather information support for aviation based on the output of a global numerical weather prediction model. The limitations of each approach are discussed, and a rationale for a change in the sign of the Ertel's potential vorticity upon crossing the equator is presented. The validity for choosing an isertelic surface identifying the extratropical tropopause and an isentropic surface for forecasting the tropical tropopause is presented. An example of a forecast of tropopause characteristics based on a combination of two concepts for the entire globe is given.

Keywords: Russian Area Forecast Center, tropopause, global NWP model, radiosonde observations, Ertel's potential vorticity, isentropic surface

Введение

Российский центр зональных прогнозов был создан Приказом Руководителя Росгидромета от 31.10.2023 для решения задач импортозамещения продукции Всемирной системы зональных прогнозов, прекратившей поставлять с 11 марта 2022 г. прогнозы для метеообеспечения отечественной авиации, в том числе глобальные поля особых явлений (SigWX). Эта информация, помимо прочего, включает прогнозы характеристик тропопаузы (значения высоты и температуры) [5].

В отделе авиационной метеорологии Гидрометцентра России существует опыт оперативного прогнозирования компонентов карт SigWX на базе моделей численного прогноза погоды (ЧПП) по Северному полушарию. Это позволило для решения задачи импортозамещения сразу определиться с концепцией прогноза глобальной тропопаузы. Вне тропиков этот прогноз может быть основан на использовании идеи «динамической» тропопаузы [9], аппроксимируемой поверхностью равных значений вертикальной составляющей потенциального вихря Эртеля (ПВЭ). Однако, поскольку параметр Кориолиса, используемый при расчете ПВЭ, меняет знак при переходе через экватор, потребовалась тщательная и кропотливая работа по калибровке значений высоты тропопаузы с привлечением данных сети радиозондирования в Южном полушарии. Затем было выполнено сопоставление результатов с откалиброванной подобным образом информацией над территорией Северного полушария. Для прогноза характеристик тропопаузы вблизи экватора по данным радиозондирования была определена изэнтропическая поверхность, высота которой соответствует высоте тропопаузы.

В данной статье описываются используемые материалы, различные концепции тропопаузы, на базе которых производились расчеты ее характеристик, оценен вклад составляющих потенциального вихря Эртеля при расчете высоты динамической тропопаузы, сформулирован подход прогнозирования глобального поля тропопаузы на основе комбинации двух концепций с обоснованно выбранными пороговыми значениями критериев.

Некоторые подходы к определению тропопаузы, используемые в оперативной практике

Хотя тропопауза была открыта еще в начале прошлого века Тейсереном де Бором, представившим в 1904 г. в Санкт-Петербурге на конференции по метеорологии доклад «О характеристике температуры в свободной атмосфере выше 10 км», в настоящее время, как подчёркивалось в [18], определение положения тропопаузы остается по-прежнему в фокусе внимания наук об атмосфере. Идентификация границы между тропосферой и стратосферой может быть проведена на основании различий характеристик

этих «сфер» с точки зрения динамического и термического режимов, а также химического состава [3]. Именно эти различия позволили сформулировать ряд предположений для определения тропопаузы, которую аппроксимируют, в зависимости от задач, либо поверхностью, либо слоем определенной толщины. Однако не все подобные подходы пригодны для решения задачи оперативного метеообеспечения авиации, где требуется однозначность в определении положения тропопаузы. Приведем краткое описание некоторых вариантов, которые могут быть использованы для целей ее оперативного прогнозирования на базе моделей ЧПП с высоким вертикальным разрешением.

Классическое определение тропопаузы (определение ВМО)

Классическое определение тропопаузы было сформулировано в 1957 г. Всемирной метеорологической организацией (ВМО) [19]: «это минимальная высота, на которой вертикальный градиент температуры падает до $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ (или ниже) и среднее значение этого параметра в вышележащем слое толщиной 2 км не превышает $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$. В некоторых случаях наблюдается вторая тропопауза, если вертикальный градиент над первой тропопаузой превышает $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ ». Такая тропопауза обычно определяется по данным радиозондирования, и сведения о ней входят в сводки ТАЭ, передаваемые по коду КН-03 [1, 7], а успешный прогноз ее возможен при использовании моделей ЧПП с достаточным количеством вертикальных уровней в верхней тропосфере и нижней стратосфере. Недостатки этого определения были обозначены уже через пару лет после его опубликования, в том числе это касалось идентификации тропопаузы в полярных районах [7]. Анализ характеристик тропопаузы в Южном полушарии по данным радиозондирования был проведен ранее в [4, 6]. Были обнаружены некоторые специфические черты тропопаузы над Антарктидой, связанные с особенностями циркуляции над этим ледовым континентом и приводящие к некой асимметрии распределения значений её высоты на глобальном масштабе.

Определение тропопаузы по градиенту потенциальной температуры

Проблема недостаточно изученной до сих пор тропопаузы в Южном полушарии, особенно над Антарктидой в период полярной ночи, внесла свои коррективы в использование данных радиозондирования. Еще в 1942 г. по данным американской метеорологической экспедиции в Антарктиду была опубликована работа «Исчезновение тропопаузы антарктической зимой», где подтверждалась невозможность по профилю температуры определить в это время уровень радиационного равновесия, которым является тропопауза [11]. Анализ экстремумов высоты «классической» тропопаузы, выполненный в [6], показал, что минимальные значения на любой станции могут находиться вблизи нижнего уровня отсчета градиента

температуры, а максимальные – превышать 16–17 км даже над Южным полюсом. По этой причине, наряду с данными радиозонда об обычной температуре, было предложено использовать информацию о потенциальной температуре, а положение тропопаузы устанавливалось согласно [18], где сформулирована концепция PTGT (potential temperature gradient at tropopause, градиент потенциальной температуры на тропопаузе):

«Первая тропопауза — это самый низкий уровень, при котором градиент потенциальной температуры увеличивается до 10 К/км, при условии, что градиент потенциальной температуры между этим уровнем и всеми более высокими уровнями в пределах 2 км не опускается ниже 10 К/км; и если выше первой тропопаузы градиент потенциальной температуры между любым уровнем и всеми более высокими уровнями в пределах 1 км опускается ниже 10 К/км, то вторая тропопауза может быть определена аналогично первой, но с использованием порогового значения градиента потенциальной температуры 15 К/км». Авторы [18] проводили подробные исследования, привлекая для определения положения тропопаузы, помимо радиозондовых данных, информацию со спутников и озонзондов. Оказалось, что нижняя («первая») тропопауза весьма близка по своему положению к озонопаузе и находится чаще всего под тропопаузой, определенной по критерию ВМО.

Динамическая тропопауза

Эта концепция наиболее пригодна для целей оперативного обеспечения авиации, где требуется однозначное определение тропопаузы с указанием высоты и температуры, в отличие от определений, представленных выше. Проблема «множественности» и «разрывов» тропопаузы в этом случае исключается. Динамическая тропопауза отождествляется квазиматериальной поверхностью, которая претерпевает не разрывы, а деформацию с образованием областей понижений («воронки», «стримеры») или подъемов («купола») [2, 14].

Динамическая тропопауза использует в качестве критерия определенную пороговую величину потенциального вихря Эртеля, q (чаще всего, его вертикальной составляющей), значения которого в стратосфере на порядок выше, чем в тропосфере:

$$q = -g(\zeta + f) \partial \theta / \partial p.$$

Здесь g – ускорение свободного падения; ζ – относительная завихренность; f – параметр Кориолиса; θ – потенциальная температура; p – давление. Единицей измерения является 1 pvu (potential vorticity unit) = $10^{-6} \text{ К} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{кг}^{-1}$. Следует отметить, что в приэкваториальной зоне, где параметр Кориолиса стремится к нулю, этот подход не используется. Динамическую тропопаузу во внетропических широтах обычно аппроксимируют изэртелической поверхностью в диапазоне 1–4 pvu. Это зависит как от поставленной задачи, так и от свойств модели ЧПП, по которой дается

прогноз. Многочисленные исследования доказали, что поверхность 2 рvи в Северном полушарии практически совпадает с озонопаузой, а поверхность, соответствующая определению ВМО, лежит несколько выше – в области 3–4 рvи [3]. Для того, чтобы «откалибровать» динамическую тропопаузу в Южном полушарии и найти изэртлическую поверхность, максимально приближенную к тропопаузе ВМО, требуется провести сравнение температурных профилей, полученных путем аэрологического зондирования, с вертикальными профилями ПВЭ в узлах сетки по данным модели ЧПП или реанализа.

Используемые материалы

Данные радиозондирования

Для выполнения работы авторами были использованы данные станций радиозондирования Всемирной службы погоды, расположенных в Северном и Южном полушариях (по 2 станции в 10-градусной широтной полосе) за период с 2015 по 2024 год (рис. 1). Выбор станций был обусловлен их репрезентативностью, регулярностью проведения зондирования, качеством и полнотой данных. Контроль информации обнаружил, что в тропической зоне не всегда можно выбрать хотя бы одну такую станцию в Западном или Восточном полушарии (рис. 1).

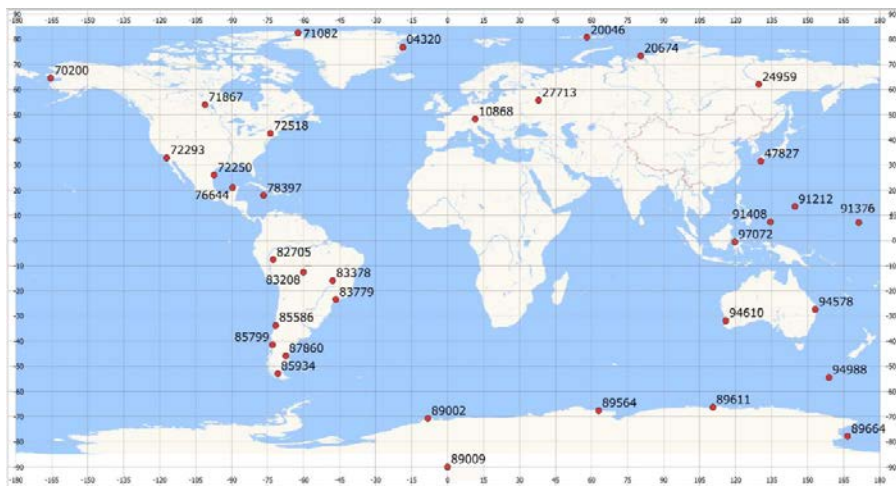


Рис. 1. Расположение станций радиозондирования.

Fig. 1. Position of upper-air sounding stations under consideration.

Координаты пунктов наблюдений представлены в табл. 1. Область вокруг полюсов (80–90° широты) оказалась обеспечена данными в нужном объеме только в Северном полушарии. В Антарктиде этой территории соответствует единственная станция, расположенная на Южном полюсе (Амундсен-Скотт).

Таблица 1. Координаты станций радиозондирования, данные которых использованы в работе**Table 1.** Location of upper-air sounding stations under consideration

Широтная зона, град	Южное полушарие	Северное полушарие
0–10	97072 WAML Palu (0.68° ю. ш., 119.73° в. д.)	91376 PKMJ Majuro (7.07° с. ш., 171.29° в. д.)
	82705 Cruzeiro Do Sul (7.62° ю. ш., 72.67° з. д.)	91408 PTRO Babeldaob (7.37° с. ш., 134.54° в. д.)
10–20	83208 SBVH Vilhena (Aeroporto) (12.70° ю. ш., 60.10° з. д.)	91212 PGUM Guam Intl Arpt (13.48° с. ш., 144.79° в. д.)
	83378 SBBR Brasilia (Aeroporto) (15.86° ю. ш., 47.93° з. д.)	78397 MKJP Kingston (17.93° с. ш., 76.78° з. д.)
20–30	83779 SBMT Marte Civ (23.52° ю. ш., 46.63° з. д.)	76644 MMMD Aerop.Internacional Yuc (20.98° с. ш., 89.65° з. д.)
	94578 YBBN Brisbane Airport (27.38° ю. ш., 153.13° в. д.)	72250 Brownsville Intl, TX (BRO) (25.91° с. ш., 97.41° з. д.)
30–40	94610 YPPH (31.93° ю. ш., 115.96° в. д.)	47827 Kagoshima (31.55° с. ш., 130.55° в. д.)
	85586 SCSN (33.65° ю. ш., 71.61° з. д.)	72293 NKX San Diego (32.85° с. ш., 117.12° з. д.)
40–50	85799 SCTE (41.43° ю. ш., 73.10° з. д.)	72518 ALB Albany (42.69° с. ш., 73.83° з. д.)
	87860 SAVC (45.78° ю. ш., 67.50° з. д.)	10868 Muenchen-Oberschleissheim (48.25° с. ш., 11.55° в. д.)
50–60	85934 SCCI (53.00° ю. ш., 70.85° з. д.)	71867 YQD The Pas Observations (53.97° с. ш., 101.09° з. д.)
	94998 YMMQ (54.50° ю. ш., 158.95° в. д.)	27713 Dolgoprudny (55.75° с. ш., 37.95° в. д.)
60–70	89611 Casey (66.28° ю. ш., 110.52° в. д.)	24959 UEEE Yakutsk (62.01° с. ш., 129.71° в. д.)
	89564 Mawson (67.60° ю. ш., 62.88° в. д.)	70200 PAOM Nome (64.50° с. ш., 165.43° з. д.)
70–80	89002 Neumayer (70.66° ю. ш., 8.25° з. д.)	20674 Ostrov Dikson (73.50° с. ш., 80.40° в. д.)
	89664 McMurdo (77.85° ю. ш., 166.66° в. д.)	04320 BGDH Danmarkshavn (76.76° с. ш., 18.66° з. д.)
80–90	89009 Amundsen-Scott (90.00° ю. ш., 0.00 д.)	20046 Polargmo Im. Krenkelja, DK (80.61° с. ш., 58.05° в. д.)
		71082 Alert, NT (WLT) (82.50° с. ш., 62.35° з. д.)

Начальные и выходные данные глобальной полулагранжевой модели ЧПП

Модель численного прогноза погоды ПЛАВ (ПолуЛагранжева, основанная на уравнении Абсолютной завихренности) в настоящее время используется преимущественно для прогнозирования на средние сроки, однако исторически, с момента появления ее первой версии, на основе выходной продукции полулагранжевой модели оперативно производились расчеты компонентов для карты SigWX по Северному полушарию.

Глобальная модель ПЛАВ10 была создана в Институте вычислительной математики РАН и Гидрометцентре России [8] и является развитием предыдущих версий. Шаг горизонтальной сетки варьируется в зависимости от широты и составляет около 10–13 км в средних широтах. Для решения авиационных задач начальные и выходные данные модели были переинтерполированы на сетку с шагом 0.25 градуса, как того требует регламент ИКАО [5]. Размерность сетки модели, таким образом, составила 1440×361 узлов. Отсчет долготы идет от Гринвичского меридиана, отсчет широты – от Южного полюса. Модель имеет 104 вертикальных уровня с верхней границей на 0.05 гПа. В слое наиболее вероятного положения тропопauses (100–400 гПа) находятся 6 расчетных уровней модели.

Для расчета характеристик тропопauses использовались следующие начальные и выходные поля модели на стандартных изобарических поверхностях 1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70 гПа:

- температура,
- геопотенциальная высота,
- зональная и меридиональная составляющие скорости ветра.

Поля реанализа ERA5

Поскольку поля объективного анализа Гидрометцентра России, используемые для создания начальных полей модели ПЛАВ, с 2022 г. формируются на основе ограниченной информации, их качество (следовательно, и качество выходной продукции) не всегда является удовлетворительным. По этой причине дополнительно использовался «эталонный» реанализ ERA5. Это реанализ пятого поколения глобальных атмосферных наблюдений, созданный Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды. Были использованы данные на сетке 0.25 градуса на стандартных изобарических поверхностях – таких же, как и в модели ПЛАВ, за исключением последнего уровня (вместо отсутствующей в реанализе изобарической поверхности 70 гПа использовались данные на поверхности 50 гПа).

Количественные характеристики тропопauses, определенной по температурному градиенту

Поиск условий, соответствующих положению тропопauses, производился пошагово на профиле температуры (потенциальной температуры), полученном путем сплайн-аппроксимации данных радиозондирования, начиная с высоты 3 км (на Южном полюсе – с 4.5 км [6]). Оказалось, что в среднем практически всегда тропопause, определенная по градиенту потенциальной температуры, располагается ниже классической тропопauses ВМО (табл. 2). Это закономерно, поскольку при разработке концепции РТGT тропопause калибровалась по данным измерений озонозондов, а озонопause, как указывалось ранее, расположена ниже тропопauses ВМО.

Таблица 2. Средние значения высоты (м) тропопаузы ВМО и РТГТ за 2015–2024 гг.**Table 2.** Average WMO tropopause and PTGT tropopause heights, m (2015–2024)

Широтная зона, град	Станция	Южное полушарие			Станция	Северное полушарие		
		ВМО	РТГТ	Разница		ВМО	РТГТ	Разница
0–10	97072	16403	15591	811	91376	16197	15625	572
	82705	16308	15445	863	91408	16222	15610	612
10–20	83208	15932	15125	806	91212	16164	15570	594
	83378	15395	14856	539	78397	15877	14943	934
20–30	83779	15317	14088	1229	76644	15836	14624	1211
	94578	14276	13004	1273	72250	14742	13694	1048
30–40	94610	12980	11811	1169	47827	13898	12947	951
	85586	12361	11311	1050	72293	13012	12228	784
40–50	85799	10868	10350	518	72518	11142	10746	397
	87860	10498	10020	478	10868	10960	10474	487
50–60	85934	9920	9477	444	71867	9892	9505	387
	94998	9713	9293	420	27713	10305	9835	471
60–70	89611	8863	8400	463	24959	9183	8779	404
	89564	9116	8565	551	70200	9158	8853	306
70–80	89002	9345	8653	692	20674	9054	8611	443
	89664	8681	8105	576	04320	9135	8700	435
80–90	89009	9308	8566	742	20046	8818	8391	427
					71082	8559	8158	401

В обоих полушариях можно наблюдать понижение двух типов тропопаузы от экватора к полюсам. Исключение составляет Южный полюс, для которого характерно некоторое повышение тропопаузы, что связано с особенностями циркуляции в этом районе, о чем упоминалось ранее в [6]. Разница высот тропопауз ВМО и РТГТ по анализируемым станционным данным в Северном полушарии оказалась меньше, чем в Южном (в среднем примерно 600 и 740 м соответственно). Максимальное различие высот в обоих полушариях имеет место в широтной полосе 20–30°, в области среднего положения мощного субтропического струйного течения. Детали этого обстоятельства требуют дополнительного исследования.

Как и следовало ожидать, разность значений температуры в Северном полушарии между двумя типами тропопаузы также меньше, чем в Южном (в среднем 3.5 и 3.8 °С соответственно), и достигает максимальных значений на станциях, расположенных в полосе 20–30° широты (табл. 3). Однако с изменением температуры на уровне тропопаузы от экватора к полюсам оказалось не все однозначно. Самые высокие значения температуры (выделено желтым цветом) на уровне тропопаузы ВМО зафиксированы на станциях в широтной полосе 50–60°, а на уровне тропопаузы РТГТ в Северном полушарии – в полосе 60–70°.

Таблица 3. Средние значения температуры на уровне тропопаузы ВМО и тропопаузы РТГТ (°С)**Table 3.** Average temperature values at WMO tropopause and at PTGT tropopause (°C)

Широтная зона, град	Станция	Южное полушарие			Станция	Северное полушарие		
		ВМО	РТГТ	Разница		ВМО	РТГТ	Разница
0–10	97072	-82.5	-77.3	-5.2	91376	-81.2	-77.2	-4.0
	82705	-80.5	-75.6	-4.9	91408	-81.1	-77.0	-4.1
10–20	83208	-77.6	-73.5	-4.1	91212	-80.6	-76.6	-4.0
	83378	-72.9	-71.0	-1.9	78397	-75.5	-70.8	-4.7
20–30	83779	-71.5	-66.0	-5.5	76644	-75.2	-69.1	-6.1
	94578	-64.8	-59.1	-5.7	72250	-69.6	-64.1	-5.5
30–40	94610	-60.0	-54.7	-5.3	47827	-63.7	-59.2	-4.6
	85586	-59.3	-54.1	-5.2	72293	-62.1	-58.0	-4.1
40–50	85799	-57.2	-54.0	-3.2	72518	-56.7	-54.1	-2.6
	87860	-57.9	-54.7	-3.2	10868	-58.4	-55.3	-3.1
50–60	85934	-58.3	-55.4	-2.9	71867	-55.2	-52.6	-2.6
	94998	-56.5	-53.7	-2.8	27713	-57.3	-54.4	-2.9
60–70	89611	-59.6	-57.0	-2.6	24959	-57.8	-55.4	-2.4
	89564	-61.8	-59.1	-2.7	70200	-54.3	-52.1	-2.2
70–80	89002	-63.1	-60.7	-2.4	20674	-57.2	-54.5	-2.7
	89664	-61.7	-59.0	-2.8	04320	-56.8	-54.1	-2.8
80–90	89009	-66.5	-63.1	-3.4	20046	-56.6	-54.0	-2.6
					71082	-55.3	-53.0	-2.4

Вклад параметра Кориолиса и относительной завихренности в формирование значений потенциального вихря Эртеля

Проблема с подбором единого алгоритма для прогноза динамической тропопаузы по всему глобусу заключается в смене знака параметра Кориолиса f при переходе через экватор: в Северном полушарии его значения положительны, в Южном – отрицательны. При этом знак относительной завихренности ζ , участвующей в определении потенциального вихря Эртеля, не зависит от полушария: горизонтальная ось x при расчете производных компонент скорости ветра направлена от Южного полюса к Северному, а ось y – с запада на восток в обоих полушариях. Была поставлена задача оценить, какой вклад в величину абсолютного вихря вносят его составляющие f и ζ . Оценка проводилась по данным реанализа ERA5 за 2024 год в центральные месяцы сезонов – январь, апрель, июль и октябрь – в начале для опорных (референсных) меридианов – 0, 90, 180, 270° долготы (рисунки не приводятся). Оказалось, что значения параметра Кориолиса везде, за исключением узкой полосы в приэкваториальной зоне, существенно превышают относительную завихренность. Особенно велики эти различия в умеренных широтах Северного полушария (хорошо заметно на меридиане 90°), а также в нижней стратосфере приполюсных зон,

где f оказывается на порядок больше завихренности. Что касается слоя 400–200 гПа, где чаще всего вне тропиков фиксируется тропопауза, в среднем за год диапазон значений $|f/\xi|$ составляет от 2 до 4 единиц. Этим и объясняется тот факт, что в Южном полушарии ПВЭ практически везде меняет знак на отрицательный. Но из-за того, что направление осей x и y не зависит от полушария, можно предположить некоторую асимметрию относительно экватора при выборе изэртелической поверхности, соответствующей тропопаузе.

Что касается области вблизи экватора, то здесь концепция динамической тропопаузы может не сработать, поскольку из-за стремящегося к нулю параметра Кориолиса значения завихренности тоже малы и вычисление ПВЭ может оказаться некорректным из-за операций с малыми величинами.

Идея осреднения результатов по всему меридиональному диапазону была вначале отброшена во избежание получения «смазанной» картины. Однако, поскольку ситуации для отдельных меридианов все же значительно различались и необходимость глобального прогноза требовала унификации, такие расчеты были проведены: на рис. 2 представлено изображение глобально осредненных разрезов для центральных месяцев сезонов. Хорошо заметно увеличение отношения $|f/\xi|$ над полюсом в стратосфере в летний сезон соответствующего полушария. В промежуточные сезоны это соотношение в стратосфере больше над Северным полюсом, чем над Южным.

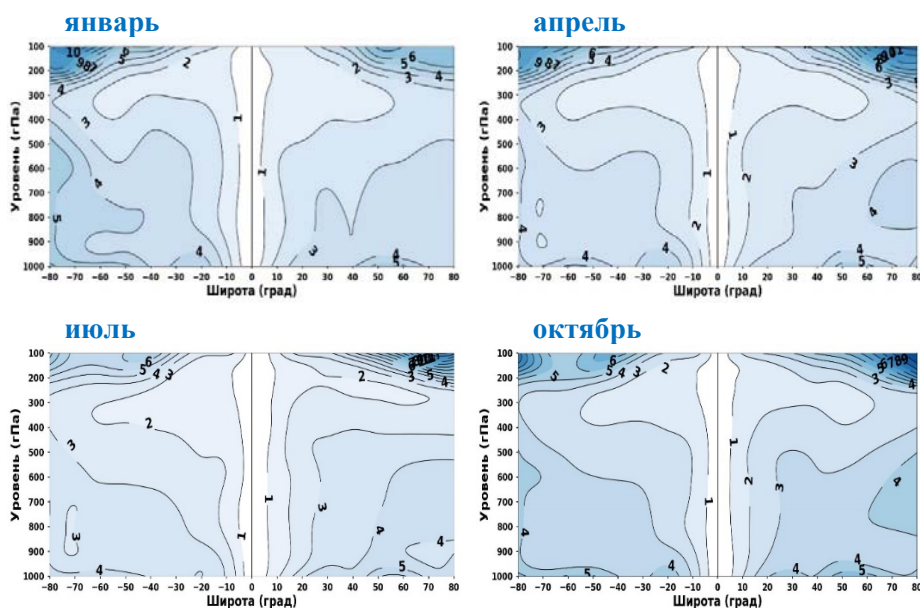


Рис. 2. Вертикальный разрез $|f/\xi|$ по данным ERA5 за 2024 г.

Fig. 2. Pole-to-pole cross-section of $|f/\xi|$ values based on ERA5 data, 2024.

Поиск оптимальной изэртелической поверхности, соответствующей тропопаузе. Калибровка динамической тропопаузы на основе данных радиозондирования

Для того, чтобы определить, какой изэртелической поверхностью можно аппроксимировать тропопаузу, прежде всего хотелось бы получить представление о среднем распределении высот таких поверхностей в обоих полушариях. Для этого были использованы данные реанализа ERA5. На рис. 3 изображены высоты поверхностей 1, 2, 3, 3.5, 4, 5, 6 pvu в Северном и Южном полушариях (учащенный диапазон в интервале 3–4 pvu связан с тем, что, как правило, именно в этом промежутке обнаруживается совпадение с классической тропопаузой ВМО). Анализ показал, что в январе в Северном полушарии имеет место более крутой наклон поверхностей ПВЭ примерно до 40° широты.

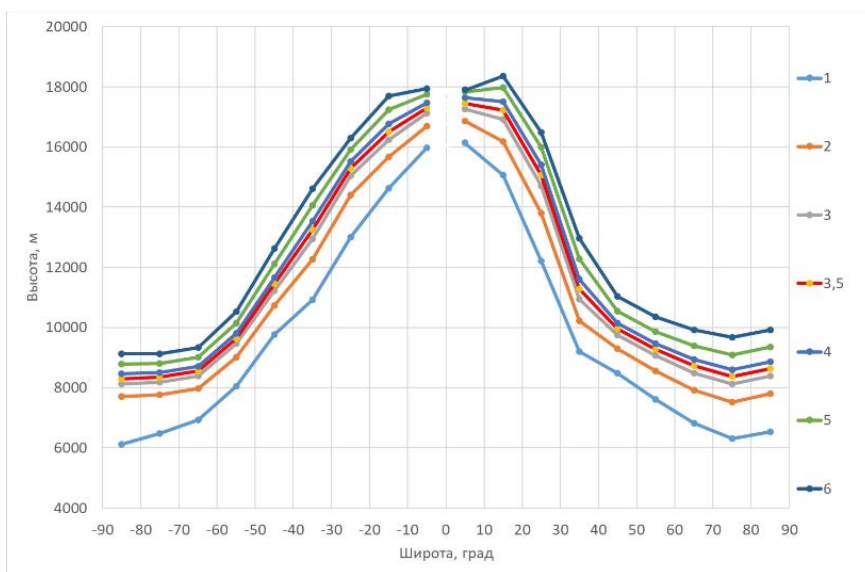


Рис. 3. Вертикальный разрез высот изэртелических поверхностей от 1 до 6 pvu (по модулю) по данным ERA5 за январь 2024 г.

Fig. 3. Pole-to-pole cross-section of 1-6 pvu isertelic surfaces (in modulo) based on the ERA5 data, January 2024.

Сравнение двух типов тропопауз (ВМО и динамической) производилось на основе расчетов по аэрологическим данным и по данным реанализа в узлах, максимально приближенных по координатам к станциям радиозондирования. Сопоставление высоты динамической тропопаузы с «термической» версией, определенной по градиенту температуры, оказалось весьма неоднозначным. В табл. 4 приведена повторяемость тропопаузы ВМО вблизи различных изэртелических поверхностей в области $20\text{--}80^\circ$

широты для обеих полушарий. Оказалось, что чаще всего она лежит гораздо выше 6 рvu (-6 рvu в Южном полушарии), хотя иногда оказывается вблизи поверхности 1(-1) рvu. Такое нехарактерное распределение можно объяснить множественностью тропопауз ВМО и довольно грубым алгоритмом для определения температурного градиента. В [6] было показано, что диапазон высоты тропопаузы ВМО на любой станции радиозондирования составляет от 3 до 17–18 км.

Таблица 4. Повторяемость, P (%), высоты тропопаузы ВМО вблизи изэртельческих поверхностей над станциями в 2024 г.

Table 4. Occurrence frequency, P (%), of WMO tropopause height near isertelic surfaces above upper-air sounding stations in 2024

Широты	Номер станции	Модуль значения потенциального вихря Эртеля, рvu											P _{max} / ПВЭ
		1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	
20–30° с. ш.	72250	16.3	10.4	11.2	10.9	8.7	8.6	8.0	7.2	5.4	3.3	10.0	16.3/1
	76644	10.5	8.3	8.7	9.3	10.5	11.0	8.8	6.1	7.5	4.1	15.1	15.1/6
20–30° ю. ш.	83779	17.1	5.9	9.2	8.3	9.1	9.4	7.6	6.5	6.3	3.1	17.6	17.6/6
	94578	7.3	5.6	6.6	6.8	6.6	6.5	6.3	6.6	5.1	6.3	36.2	36.2/6
30–40° с. ш.	47827	11.3	6.0	7.9	8.5	7.0	7.2	7.0	8.4	8.2	6.2	22.2	22.2/6
	72293	10.2	6.5	9.5	10.1	11.2	10.8	8.4	9.1	6.5	4.3	13.2	13.2/6
30–40° ю. ш.	85586	11.8	11.1	10.8	12.0	8.8	10.4	7.9	5.4	4.5	4.4	12.9	12.9/6
	94610	5.3	5.9	10.2	9.2	7.5	9.5	7.4	7.1	5.9	5.6	26.4	26.4/6
40–50° с. ш.	10868	12.8	7.0	7.8	11.3	9.5	10.7	10.0	6.6	6.3	5.6	12.4	12.8/1
	72518	12.0	8.0	8.3	11.7	9.5	9.9	9.6	7.6	5.0	4.2	14.3	14.3/6
40–50° ю. ш.	87860	11.3	10.7	11.3	15.8	12.8	11.6	6.9	6.3	2.7	5.1	5.4	15.8/2.5
	85799	9.4	10.3	9.1	15.3	12.4	10.0	8.2	8.2	5.9	2.9	8.2	15.3/2.5
50–60° с. ш.	27713	9.8	5.3	6.7	9.8	10.1	11.1	11.9	9.9	7.3	4.5	13.8	13.8/6
	71867	11.5	9.1	7.6	10.4	9.8	11.3	10.2	7.3	6.2	6.2	10.5	11.5/1
50–60° ю. ш.	85934	10.2	9.9	13.1	11.1	14.2	9.1	10.2	8.2	3.7	2.6	7.7	14.2/3
	94998	7.9	7.3	8.5	13.4	14.9	11.1	9.8	10.4	5.3	4.4	7.2	14.9/3
60–70° с. ш.	24959	9.9	6.6	11.2	11.4	14.5	11.8	8.2	8.1	5.2	4.2	8.8	14.5/3
	70200	12.1	9.6	9.8	14.2	12.1	9.3	7.4	5.3	6.8	3.1	10.4	14.2/2.5
60–70° ю. ш.	89564	5.8	2.9	6.4	11.3	10.1	13.0	11.3	8.1	11.0	3.8	16.5	16.5/6
	89611	4.6	4.6	7.5	11.8	12.8	13.5	12.8	10.1	8.4	4.3	9.5	13.5/3.5
70–80° с. ш.	04320	4.4	6.1	9.3	9.1	10.4	11.4	9.7	9.1	8.5	5.9	16.1	16.1/6
	20674	3.4	3.0	4.9	9.3	14.4	13.8	10.8	8.8	9.0	6.7	15.9	15.9/6
70–80° ю. ш.	89512	1.6	2.0	4.3	7.2	13.4	14.4	13.4	12.8	8.5	5.9	16.4	16.4/6
	89664	4.2	4.4	6.8	8.7	14.0	13.1	11.6	11.6	9.5	5.9	10.2	14.0/3

По этой причине была реализована другая стратегия выбора подходящей изэртелической поверхности для идентификации тропопаузы. Она заключалась в поиске минимума абсолютного значения разности высот между тропопаузой ВМО и поверхностью равных значений ПВЭ. В табл. 5 представлен пример таких минимумов, обозначенных желтой заливкой, для одной из станций Южного полушария – 87860 SAVC (45.78° ю. ш., 67.50° з. д.). Очевидно, что в течение года динамическая тропопауза, наиболее близко расположенная к тропопаузе ВМО, лежит в диапазоне от -2 до -4 рву, но чаще всего ее можно отождествить с изэртелической поверхностью -3.5 рву.

Таблица 5. Среднее значение модуля разности (м) между значениями высоты тропопаузы ВМО на станции 87860 и высоты изэртелических поверхностей в узле, ближайшем к координатам станции, за 2024 г.

Table 5. Mean absolute difference (m) between WMO tropopause height at 87860 upper-air sounding station and isertelic surface height values (in the reanalysis grid point nearest to station) in 2024

Месяц	Поверхности ПВЭ, рву										
	-1	-1.5	-2	-2.5	-3	-3.5	-4	-4.5	-5	-5.5	-6
1	2148	1564	995	870	795	576	482	670	822	971	1143
2	1277	974	805	702	629	614	653	712	801	910	1060
3	1737	1388	846	678	620	567	541	606	711	964	1096
4	1369	1106	897	769	680	594	496	559	573	736	867
5	1057	827	554	458	462	475	543	652	826	929	1147
6	1089	867	612	511	369	352	376	464	598	776	1020
7	1696	1144	862	728	649	645	666	788	882	993	1195
8	1351	765	589	655	603	596	661	748	842	1002	1495
9	1140	758	489	397	369	390	464	572	727	998	1505
10	1241	1137	831	722	651	596	699	864	1146	1373	1719
11	1510	1018	760	613	505	490	497	538	736	1040	1408
12	1546	1135	878	656	600	587	636	686	871	1115	1407
Год	1391	1028	745	632	564	537	563	654	793	986	1264

Опираясь на значения минимальных различий по высоте между тропопаузой, рассчитанной по термическому градиенту, и поверхностью ПВЭ, мы провели подобное сравнение на данных реанализа, а также на начальных и выходных данных модели ПЛАВ. В табл. 6 и 7 представлены результаты для 2024 года.

В табл. 6 приведено обобщение подобных данных для внетропических 12 станций в Южном и 12 станций в Северном полушарии (приполюсные станции решено было не учитывать из-за возможного искажения при расчетах горизонтального градиента скорости ветра в формуле ПВЭ).

Оказалось, что диапазон средних ПВЭ на станциях для тропопауз ВМО и PTGT составляет, соответственно, от -3 до -5 рvu и от -2 до -3.5 рvu в Южном полушарии. Севернее экватора эти диапазоны составляют, соответственно, от 3.5 до 4 рvu и от 2 до 3 рvu, то есть можно говорить о большей «устойчивости» концепции динамической тропопаузы во внетропических широтах Северного полушария. При этом разброс значений ПВЭ в течение года может быть довольно велик: например, от 2 до 6 рvu при сравнении с тропопаузой ВМО для станции 47827 в Северном полушарии или от -2 до -6 для станции 94578 в Южном. Отметим также, что среднее значение ПВЭ не всегда самое часто повторяющееся, при большой изменчивости значений оно может реально наблюдаться всего пару месяцев в году (например, для станции 72518 в табл. 6).

Таблица 6. Среднее значение ПВЭ, рассчитанное по данным ERA5 и соответствующее высоте тропопаузы ВМО/PTGT за 2024 г., и диапазон изменения значений в течение года (рvu)

Table 6. Average value of Ertel's potential vorticity (EPV) according ERA5 data for 2024 and corresponding WMO/PTGT tropopause height and based ERA5 data the range of EPV values (pvu)

Номер станции	Широта	Средний ПВЭ для тропопаузы ВМО/PTGT	Диапазон ПВЭ (месяц) на тропопаузе ВМО/PTGT
Южное полушарие			
83779	20-30	-3.5/-2.5	-2.5(8)...-6 (1)/-1.5(5,6,12)...-3(2,3)
94578	20-30	-4.5/-3	-3(7)...-6(1-4,12)/-2(8,10,11)...-4.5(2)
85586	30-40	-3.5/-2	-2(8)...-5(2)/-1.5(3,7)...-2.5(2,5,9,12)
94610	30-40	-4/-3	-3(5-8,10)...-6(1-3,12)/-1.5(5,9)...-4.5(12)
87860	40-50	-3.5/-2.5	-2(8)...-4(1,3,4)/-1.5(2)...-3.5(4)
85799	40-50	-3.5/-2.5	-2.5(9)...-4(2,5-7,12)/-2(8-11)...-3(3,4,6,7)
85934	50-60	-3.5/-2.5	-2.5(10)...-4.5(6,7,12)/-1.5(11)...-3(2,6)
94998	50-60	-4/-2.5	-3(6,9,10)...-4.5(2,3)/-2(5,6)...-3.5(12)
89564	60-70	-4.5/-3.5	-4(1,4,5,11,12)...-6(9)/-2.5(6,12)...-4.5(9)
89611	60-70	-4/-3.5	-4(5,6,8,10-12)...-5(3)/-2.5(10,11)...-4(3)
89512	70-80	-5/-3.5	-3.5(5)...-6(10)/-2.5(5,12)...-4(3,8,11)
89664	70-80	-4/-3	-3.5(5,6)...-5(3,8)/-2.5(5)...-3.5(3,4,7-10)
Северное полушарие			
72250	20-30	3.5/2	2(2,5)...5.5(8)/1.5(2,5)...3.5(8,10)
76644	20-30	4/2	2.5(1,12)...5.5(9,10)/1(12)...3(7,9-11)
47827	30-40	3.5/2.5	2(12)...6(8-10)/2(4,6,11,12)...4.5(8,9)
72293	30-40	4/3	2(12)...5.5(9)/1(2)...3.5(9)
10868	40-50	3.5/2.5	3(7,8,10)...5(5)/2(4,8,12)...3.5(5)
72518	40-50	4/2.5	3.5(1,2,4-6,10,12)...4.5(9)/2(6)...3.5(2,9)
27713	50-60	4/2.5	3.5(4)...4.5(2,3,8,11,12)/2(8,9)...3.5(2)
71867	50-60	3.5/3	2.5(10)...5(6,8)/2(4)...4(6)
24959	60-70	3.5/2.5	3(2)...5(7,8)/2(2)...3.5(7)
70200	60-70	3.5/3	2.5(3)...5(8,9)/2.5(2-4,6,9,12)...3.5(10,11)
04320	70-80	4/2.5	3(3)...6(7-9)/2(3)...3.5(9)
20674	70-80	4/3	3.5(3)...6(8)/2.5(5,9,10)...3.5(1)

Разброс значений определяется циркуляцией, чаще всего он увеличивается в ситуациях, когда вертикальные градиенты ПВЭ велики, то есть изэртелические поверхности расположены довольно близко.

Сравнение тропопауз по данным радиозондирования (ВМО и РТГТ) с рассчитанной «динамической» по ERA5 показало, что в среднем для всех представленных в таблице станций Южного и Северного полушария значение ПВЭ для тропопаузы ВМО составляют -3.96 и 3.75 рву соответственно, то есть ближе всего тропопауза находится к поверхности, на которой модуль значения ПВЭ равен 4 рву (но некоторая полушарная «асимметрия», которая упоминалась выше, все же прослеживается). Для тропопаузы РТГТ эти значения равны, соответственно, -2.83 и 2.58 рву, то есть в Южном полушарии она ближе к поверхности -3 рву, а в Северном – к 2.5 рву.

Разность между средними значениями высоты классической тропопаузы ВМО и тропопаузы РТГТ по шкале ПВЭ изменяется от 1 до 2 рву (чаще всего 1.5 рву) и в среднем примерно одинакова в Северном и Южном полушариях. Границы диапазона ПВЭ демонстрируют, что месяцы, в которые отмечаются экстремальные значения ПВЭ, чаще всего не совпадают для двух типов тропопаузы, то есть топография соседних изэртелических поверхностей различна.

Что касается расчетов по данным модели ПЛАВ10 (табл. 7), то в сравнении с данными реанализа положение тропопаузы определяется более низкой изэртелической поверхностью в анализе и тем более – в прогнозе. Однако разница между высотой модельной тропопаузы в начальный момент времени и спрогнозированной за 24 ч в целом невелика и составляет всего 0.08 рву для станций Северного и 0.17 рву для станций Южного полушария. В среднем положение тропопаузы ближе к поверхности 3.5 рву к югу от экватора и 3 рву – к северу.

Стоит отметить, что полученные результаты могут измениться, поскольку в настоящее время разработчики модели ПЛАВ проводят работы по внедрению новой параметризации есRAD в радиационный блок модели. Это почти гарантировано приведет к изменению вертикального профиля температуры и, таким образом, повлияет на воспроизведение тропопаузы.

Аппроксимация тропопаузы изэнтропической поверхностью вблизи экватора

Как указывалось ранее, использование «динамической» концепции вблизи экватора нежелательно. Часто при переходе от умеренных широт к тропикам применяют понятие «слой тропической тропопаузы» [12, 13], который, в свою очередь, может подразделяться на подслои – нижний, средний и верхний. Границы этих подслоев представлены, соответственно, диапазонами изэнтроп 350–360, 360–380, 380–420 К [17].

Аппроксимация тропопаузы не слоем, а именно поверхностью, более целесообразна с точки зрения обеспечения этой информацией авиации,

которая требует однозначного определения положения границы между тропосферой и стратосферой. Выбор исследователями наиболее подходящей изэнтропической поверхности чаще всего склоняется к 380 К [3, 10, 15]. Однако анализ данных радиозондирования, проведенный ранее [16], позволил заключить, что такая поверхность располагается немного ниже, примерно на высоте изэнтропы 370 К.

Таблица 7. Среднее значение ПВЭ, рассчитанное по начальным (А) и прогностическим (П) с заблаговременностью 24 ч полям модели ПЛАВ10 и соответствующее высоте тропопаузы ВМО за 2024 г., и диапазон изменения значений (рву)

Table 7. Average value of Ertel's potential vorticity (EPV) corresponding WMO tropopause height and based on the initial (A) and output data (П) of PLAV10 model and the range of EPV in 2024 (pvu)

Номер станции	Широта	Средний ПВЭ (А/П)	Диапазон ПВЭ (месяц) (А/П)
Южное полушарие			
83779	20-30	-3/-3.5	-2.5(5-8)...-4.5(1)/-2.5(5,8)...-5(1,2)
94578	20-30	-4.5/-4	-3(10)...-6(3,12)/-3(7,10)...-6(4,5,12)
85586	30-40	-3/-3	-2(6-8)...-4.5(2)/-2.5(4,6,8)...-5(2)
94610	30-40	-4/-3.5	-2.5(5,8)...-6(1,3,12)/-2(5)...-6(1,3,12)
87860	40-50	-3/-3	-2(9)...-3.5(1,11)/-2.5(2,5,6,8,9)...-3.5(1,11)
85799	40-50	-3/-3	-2.5(3,8,9,11)...-3.5(1,4,5,10,12)/ -2(3,6,9)...-3.5(2,4)
85934	50-60	-3/-3	-2.5(4,5,7,10)...-4(6)/-2(10)...-4(6)
94998	50-60	-3.5/-3	-3(1,5,6,9,10)...-4.5(3)/-2.5(4,5,10)...-4(2)
89564	60-70	-4/-4	-3(1)...-6(9)/-3(1,12)...-5.5(9)
89611	60-70	-4/-3.5	-3(2)...-4.5(4)/-3(10,12)...-4(1,3,4,7,9)
89512	70-80	-4.5/-4	-3.5(5,12)...-5.5(9)/-3(12)...-6(10)
89664	70-80	-4/-4	-3(6)...-5(8)/-3(6)...-4.5(7-9)
Среднее по полушарию		-3.63/-3.46	
Северное полушарие			
72250	20-30	3/3	2(2,5)...5(8)/2(2,3,12)...4.5(8)
76644	20-30	3/3	2(12)...4.5(9)/1.5(12)...5(9)
47827	30-40	3/3	1.5(12)...6(8)/1(12)...5.5(8)
72293	30-40	3.5/3	1.5(2)...4.5(8,9)/1.5(2)...5(10)
10868	40-50	3/3	2.5(8)...4(5)/2.5(8)...3.5(2,5,6,9,10)
72518	40-50	3.5/3.5	3(1-4,10,12)...4(7,8,11)/2.5(10)...4(8,9,11)
27713	50-60	3.5/3.5	3(10)...4(2,3)/3(8)...4(2,6,9)
71867	50-60	3.5/3	2.5(2,9-11)...4(6-8)/2(2,9)...4.5(7)
24959	60-70	3/3	2.5(1)...4.5(8)/ 3(1-3,5,9,11,12)...3.5(4,6-8,10)
70200	60-70	3/3	2(3)...4(6,7,9)/2(3)...4(6,8,10)
04320	70-80	3.5/3.5	2.5(3)...6(8)/2.5(3)...5(8)
20674	70-80	3.5/3.5	3(3)...5.5(8)/3(3)...5(9)
Среднее по полушарию:		3.25/3.17	

Изучение распределения потенциальной температуры на уровне тропопаузы ВМО в тропической зоне (табл. 8) позволило сделать следующее заключение. В целом как для Северного, так и для Южного полушария положение тропопаузы ВМО примерно соответствует положению изэнтропы 365 К. Сезонный ход показывает минимум потенциальной температуры на тропопаузе в обоих полушариях, как правило, в период с июня по сентябрь (за исключением станции 97072 с минимумом в декабре). При удалении от экватора увеличивается диапазон изменения потенциальной температуры на тропопаузе. Проведенные эксперименты с различными границами перехода от изэртелической (динамической) тропопаузы к изэнтропической показали целесообразность смены концепции в прогнозе вблизи 15° широты.

Таблица 8. Сезонный ход потенциальной температуры (К) на уровне тропопаузы ВМО в тропической зоне по данным радиозондирования за период 2015–2024 гг.

Table 8. Seasonal variation of potential temperature (K) at WMO tropopause level according to radiosonde data for 2015–2024

Станция	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	ср	Δ
Северное полушарие														
91376	366	364	364	364	363	361	360	359	360	361	364	365	363	6
91408	364	363	364	366	367	362	360	361	361	363	364	364	363	6
91212	365	363	364	365	366	362	359	358	359	363	366	366	363	8
78397	374	375	375	371	368	361	363	367	364	364	367	374	368	14
Южное полушарие														
97072	364	365	365	368	368	365	363	364	363	364	363	362	364	6
82705	368	367	367	367	368	363	364	366	366	366	366	369	366	6
83208	367	365	366	367	367	364	364	364	364	365	366	366	365	3
83378	370	368	368	369	366	358	358	359	364	366	367	369	365	12

На рис. 4–7 представлены глобальные поля высоты и температуры тропопаузы, рассчитанные путем комбинации двух подходов для всего глобуса по начальным и прогностическим данным модели ПЛАВ10. Высота тропопаузы, согласно требованиям ИКАО, представлена в гектофутах. Очевидно, что переход от изэртелической поверхности к изэнтропической не приводит к формированию склонов или разрывов. В тропической зоне поле получается довольно гладким, а его значения в этой области вполне соответствуют данным радиозондовых измерений.

Заключение

Глобальный прогноз характеристик тропопаузы для метеообеспечения авиации в Российском центре зональных прогнозов целесообразно давать на базе выходных данных глобальной модели численного прогноза погоды. В настоящее время в Гидрометцентре России эксплуатируются две такие модели – модель ICON-Ru и модель ПЛАВ.

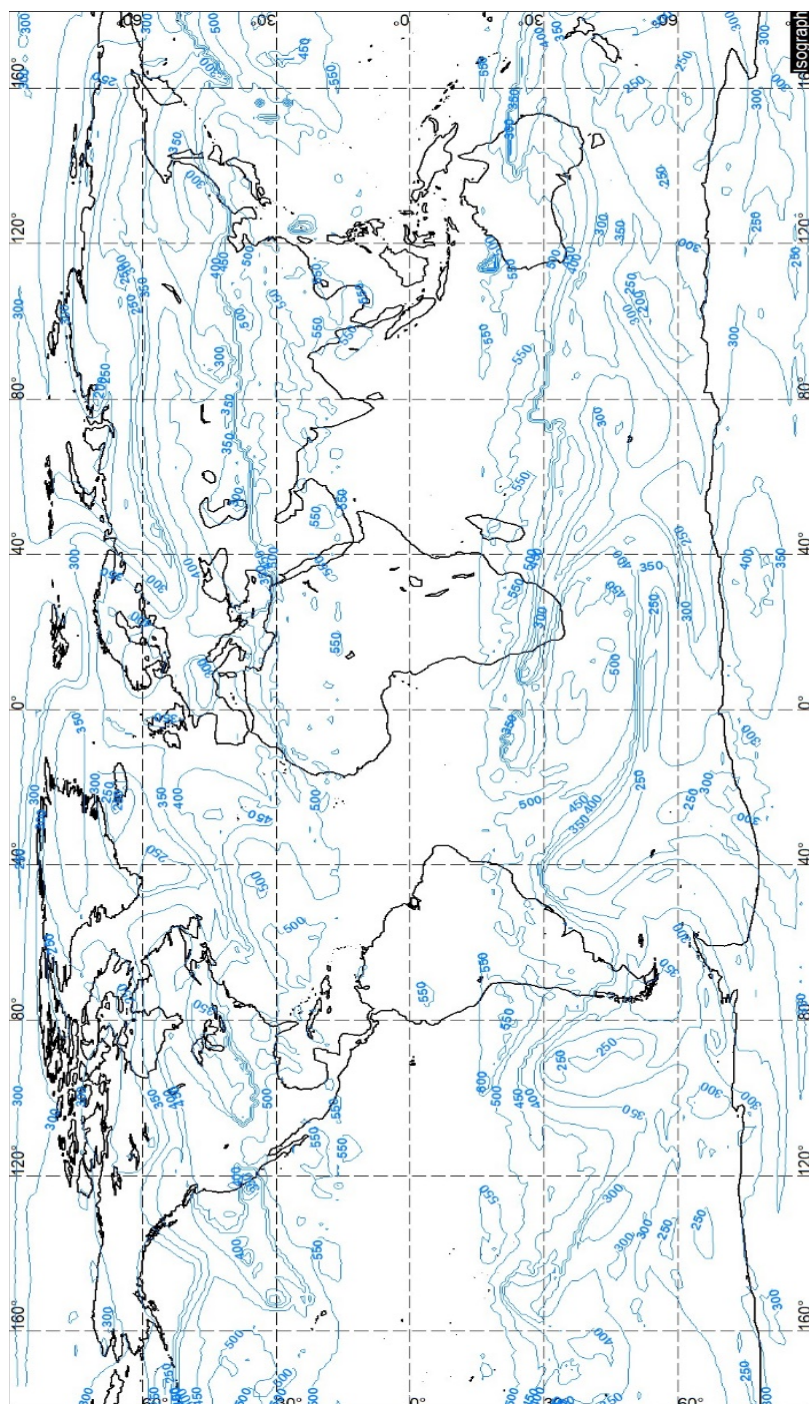


Рис. 4. Глобальное поле высоты тропопазы (в гектофутах), рассчитанное по начальным данным модели ПЛАВ10 25.09.2025 00 ч ВСВ.

Fig. 4. Global tropopause height (in hft) calculated using the initial PLAV10 data on 25/09/2025 00 UTC.

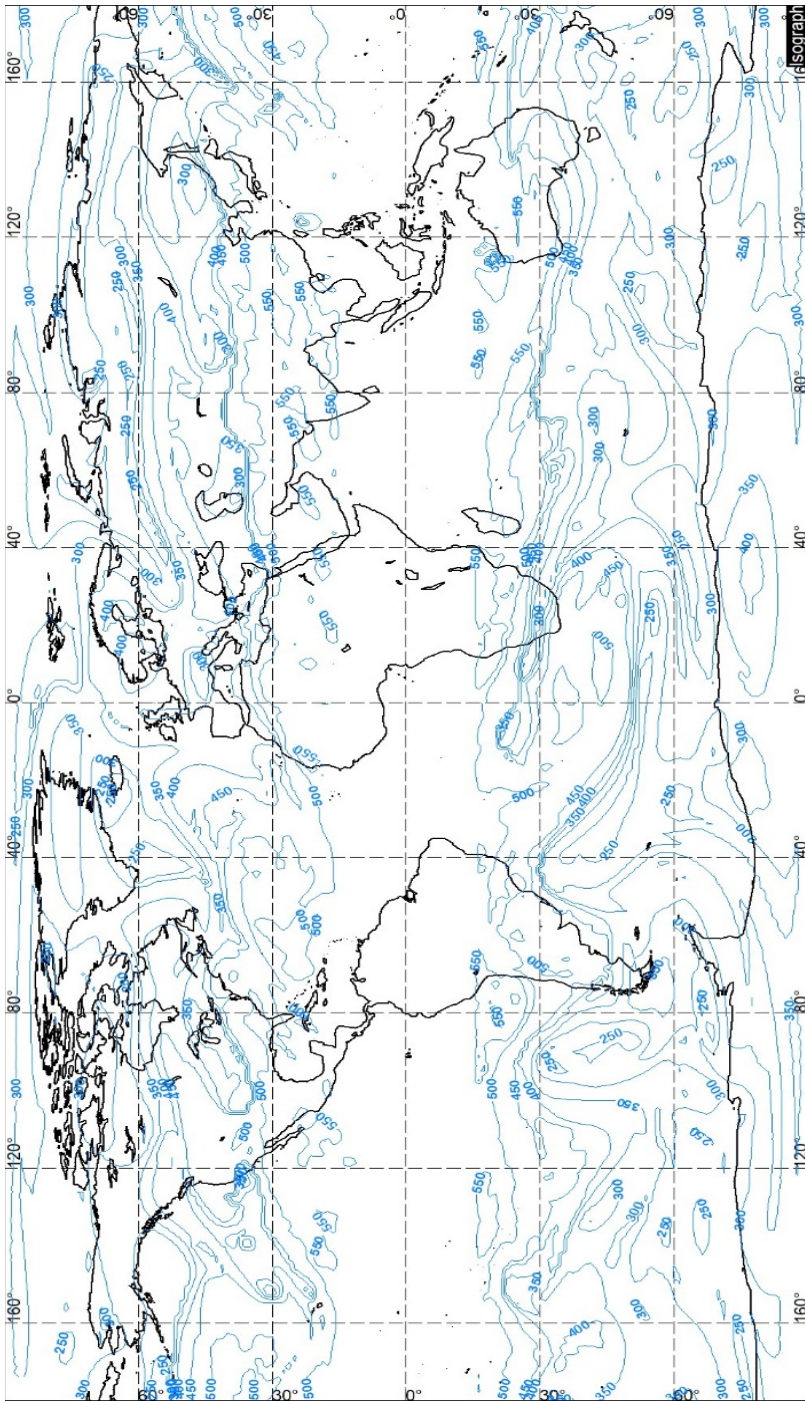


Рис. 5. Глобальное поле высоты тропопаузы (в гектофутах), рассчитанное по выходным (заблаговременность 24 ч) данным модели ПЛАВ10 25.09.2025 00 ч ВСВ.

Fig. 5. Global tropopause height (in hft) calculated using the output (24-hour projection) PLAV10 data on 25/09/2025 00 UTC.

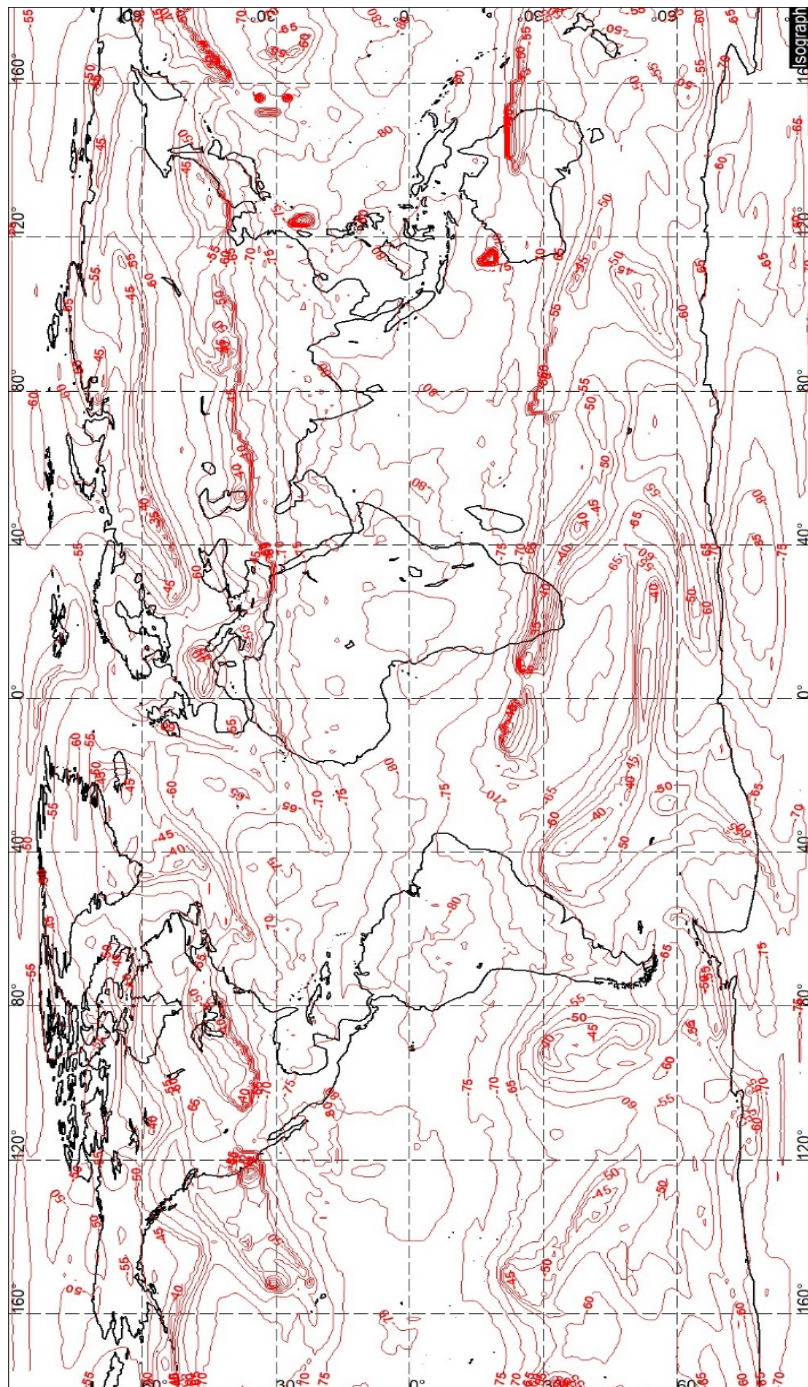


Рис. 6. Глобальное поле температуры тропопазы (в °C), рассчитанное по начальным данным модели ПЛАВ10 25.09.2025 00 ч ВСВ.

Fig. 6. Global tropopause temperature (in °C) calculated using the initial PLAV10 data on 25/09/2025 00 UTC.

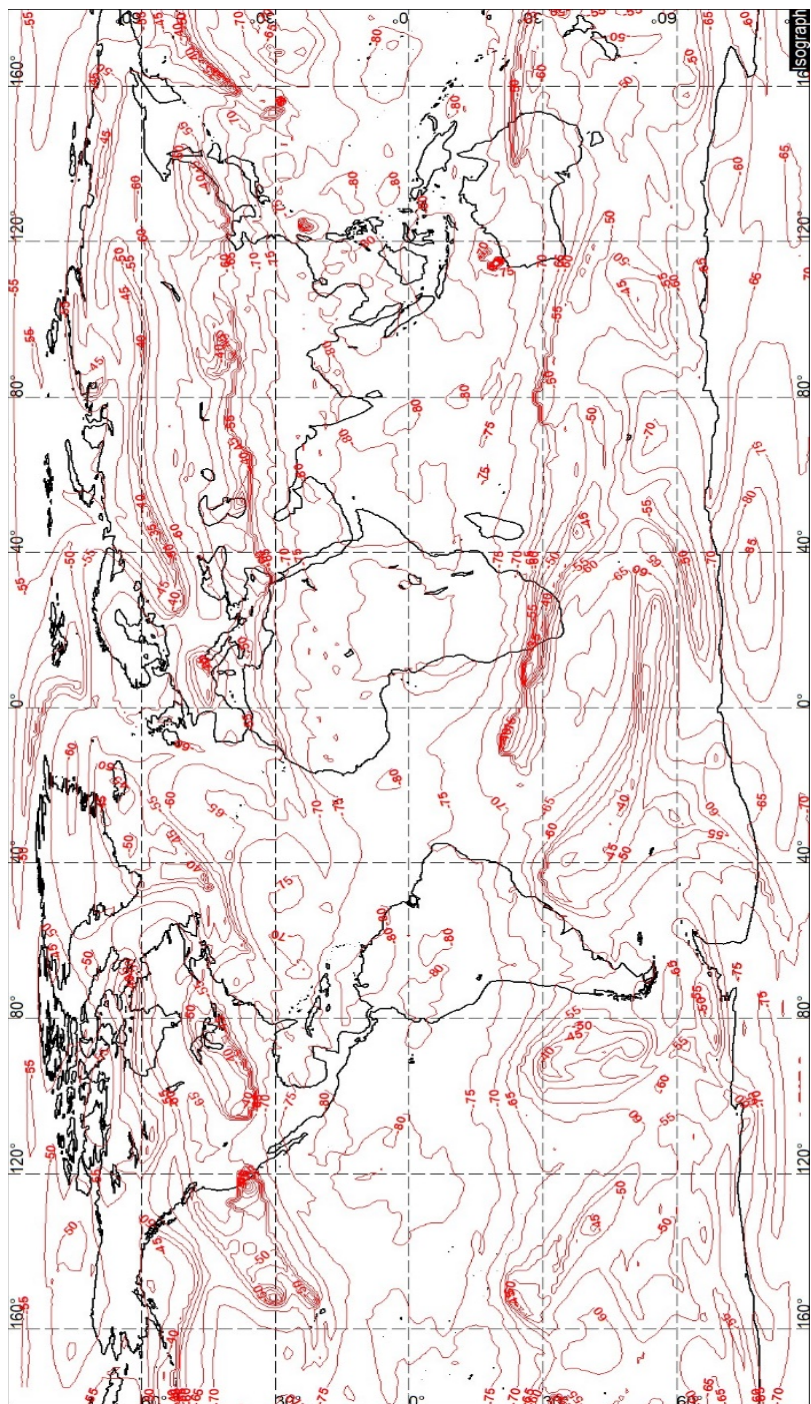


Рис. 7. Глобальное поле температуры тропопаузы (в °С), рассчитанное по выходным (заблаговременность 24 ч) данным модели ПЛАВ10 25.09.2025 00 ч ВСВ.

Fig. 7. Global tropopause temperature (in °C) calculated using the output (24-hour projection) PLAV10 data on 25/09/2025 00 UTC.

На сегодняшний день выбор в качестве основы для расчетов модели ПЛАВ10 обусловлен ее «экономичностью» по отношению к задействованным вычислительным ресурсам в сравнении с моделью ICON-Ru.

Однако полулагранжевая модель, широко используемая в оперативной практике для среднесрочных прогнозов погоды, уже несколько лет не показывает существенного прогресса в развитии с точки зрения авиационного постпроцессинга. Ожидается, что предстоящая модификация радиационного блока с заменой параметризаций радиационных потоков будет способствовать улучшению прогноза температуры на всех уровнях и, как следствие, повышению качества прогноза тропопаузы. Возможно, выбранная для интерпретации тропопаузы изэртелическая поверхность 3.5 рvci (по модулю), рассчитанная по модельным данным, после этого будет заменена другой, более близкой к той, что получена по данным реанализа ERA5 (4 рvci).

Прогноз тропопаузы в тропиках, как показал анализ данных радиозондирования, целесообразно реализовывать через модельный прогноз изэнтропической поверхности 365 К, принадлежащей средней части слоя тропической тропопаузы. Это несколько ниже, чем широко известные приближения 380 и 370 К, однако, как показали эксперименты, находится в соответствии с откалиброванными по данным радиозондирования результатами расчета тропопаузы с использованием выходных данных полулагранжевой модели.

Список литературы

1. Восканян К.Л., Екатериничева Н.К., Кузнецов А.Д., Саенко А.Г., Сероухова О.С., Симакина Т.Е. Практикум по аэрологическим методам зондирования окружающей среды. СПб.: РГТМУ, 2020. 268 с.
2. Иванова А.Р. Наклон тропопаузы как характеристика ее деформации // Метеорология и гидрология. 2011. № 2. С. 17-28.
3. Иванова А.Р. Тропопауза: многообразие определений и современные подходы к идентификации // Метеорология и гидрология. 2013. № 12. С. 23-36.
4. 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>
5. Метеорологическое обеспечение международной авионавигации. Приложение 3 к Конвенции о международной гражданской авиации. Международная организация гражданской авиации. Издание двадцатое. Июль 2018.
6. Соколова У.О., Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н. Характеристики внетропической тропопаузы в Южном полушарии по данным аэрологического зондирования // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2025. № 3 (397). С. 32-48. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-3-32-48>
7. Тарасенко Д.А. О критериях определения уровня и характера тропопаузы, рекомендованных ВМО // Труды ЦАО. 1964. Вып. 59. С. 40-51.
8. Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Гойман Г.С., Зарипов Р.Б., Мизяк В.Г., Розутов В.С., Алипова К.А., Бирючева Е.О. Глобальная модель ПЛАВ10 для среднесрочного прогноза погоды // Метеорология и гидрология. 2025. № 6. С. 56-66. DOI: [10.52002/0130-2906-2025-6-56-66](https://doi.org/10.52002/0130-2906-2025-6-56-66)

9. Шакина Н.П., Борисова В.В. Опыт применения потенциального вихря для расчета высоты и температуры тропопаузы // *Метеорология и гидрология*. 1992. № 9. С. 57-65.
10. Corti T., Luo B.P., Vomel H., Peter T. The impact of cirrus clouds on tropical troposphere-to-stratosphere transport // *Atmos. Chem. Phys.* 2006. Vol. 6. P. 2539-2547.
11. Court A. Tropopause disappearance during Antarctic winter // *Bull. Amer. Met. Soc.* 1942. Vol. 23. P. 220-238.
12. Dacie S., Kluft L., Schmidt H., Stevens B., Buehler S.A., Dietmuller S., Nowack P.J., Abraham N.L., Birner T. A 1D RCE Study of Factors Affecting the Tropical Tropopause Layer and Surface Climate // *J. Clim.* 2019. Vol. 32, is. 20. P. 6769-6782. DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0778.1
13. Fueglistaler S., Dessler A.E., Dunkerton E.J., Folkins I., Fu Q., Mote P.W. Tropical tropopause layer // *Review of Geophysics*. 2009. Vol. 47, is. 1. P. 1-31. <https://doi.org/10.1029%2F2008RG000267>
14. Kohma M., Mizukoshi M., Sato K. Dynamical Analysis of Tropopause Folding Events in the Coastal Region of Antarctica // *J. Clim.* 2022. Vol. 35.P. 4687-4700.
15. Liu C., Zipser E.J. Global distribution of convection penetrating the tropical tropopause // *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110. P. D23104. DOI:10.1029/2005JD006063
16. Reid G.C., Gage K.S. On the annual variation in height of the tropical tropopause // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1981. Vol. 38. P. 1928-1938.
17. Sunikumar S.V., Muhsin M., Venkat Ratman M., Parameswaran K., Krishna Murthi B.V., Emmanuel M. Boundaries of tropical tropopause layer (TTL): A new perspective based on thermal and stability profiles // *Geophys. Res. Atmos.* 2016. Vol. 122. P. 741-754. DOI: 10.1002/2016JD025217.
18. Tinney E.N., Homeyer C.R., Elizalde L., Hurst D.F., Thompson A.M., Stauffer R.M., Vomel H., Selkirk H.B. A Modern Approach to a Stability-Based Definition of the Tropopause // *Monthly Weather Review*. 2022. Vol. 12. P. 3151-3174. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-22-0174.1>
19. WMO. Definition of the tropopause // *WMO Bull.* 1957. Vol. 6. 136 p.

References

1. Voskanjan K.L., Ekaterinicheva N.K., Kuznecov A.D., Saenko A.G., Serouhova O.S., Simakina T.E. Praktikum po ajerologicheskim metodam zondirovaniya okružhajushhej sredy. Saint Petersburg: RGGMU Publ., 2020. 268 p. [in Russ.].
2. Ivanova A.R. The tropopause slope as a characteristic of its deformation. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2011, vol. 36, no. 2, pp. 82-90.
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.
4. Ivanova A.R. Some features of the Southern Hemisphere circulation in the free atmosphere affecting aircraft flights. *Gidrometeorologičeskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2025, vol. 396, no. 2, pp. 8-27. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-2-8-27> [in Russ.].
5. *Meteorologičeskoe obespečenie mezhdunarodnoj ajeronavigacii*. Prilozhenie 3 k Konvencii o mezhdunarodnoj grazhdanskoj aviacii. Mezhdunarodnaja organizacija grazhdanskoj aviacii. Izdanie dvadcatoe. Ijul' 2018.
6. Sokolova U.O., Ivanova A.R., Skriptunova E.N. Extratropical tropopause features in the Southern Hemisphere based on the upper-air sounding data. *Gidrometeorologičeskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2025, vol. 397, no. 3, pp. 32-48. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-3-32-48> [in Russ.].
7. Tarasenko D.A. O kriterijah opredelenija urovnja i haraktera tropopauzy, rekomendovannyh VMO. *Trudy CAO*, 1964, vyp. 59, pp. 40-51.
8. Tolstykh M.A., Fadeev R.Yu., Shashkin V.V., Goyman G.S., Zaripov R.B., Mizyak V.G., Rogutov V.S., Alipova K.A., Biryucheva E.O. Global SLAV10 Model for Medium-range Weather Prediction. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2025, vol. 50, no. 6, pp. 473-481. DOI: 10.3103/S1068373925060032

9. *Shakina N.P., Borisova V.V.* Opyt primenenija potencial'nogo vihrja dlja rascheta vysoty i temperature tropopauzy. *Meteorologija i gidrologija [Meteorology and Hydrology]*, 1992, no. 9, pp. 57-65 [in Russ.].
10. *Corti T., Luo B.P., Vomel H., Peter T.* The impact of cirrus clouds on tropical troposphere-to-stratosphere transport. *Atmos. Chem. Phys.*, 2006, vol. 6, pp. 2539-2547.
11. *Court A.* Tropopause disappearance during Antarctic winter. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 1942, vol. 23, pp. 220-238.
12. *Dacie S., Kluft L., Schmidt H., Stevens B., Buehler S.A., Dietmuller S., Nowack P.J., Abraham N.L., Birner T.* A 1D RCE Study of Factors Affecting the Tropical Tropopause Layer and Surface Climate. *J. Clim.*, 2019, vol. 32, is. 20, pp. 6769-6782. DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0778.1
13. *Fueglistaler S., Dessler A.E., Dunkerton E.J., Folkins I., Fu Q., Mote P.W.* Tropical tropopause layer. *Review of Geophysics*, 2009, vol. 47, is. 1, pp. 1-31. <https://doi.org/10.1029%2F2008RG000267>.
14. *Kohma M., Mizukoshi M., Sato K.* Dynamical Analysis of Tropopause Folding Events in the Coastal Region of Antarctica. *J. Clim.*, 2022, vol. 35, pp. 4687-4700.
15. *Liu C., Zipser E.J.* Global distribution of convection penetrating the tropical tropopause. *J. Geophys. Res.*, 2005, vol. 110, pp. D23104. DOI: 10.1029/2005JD006063
16. *Reid G.C., Gage K.S.* On the annual variation in height of the tropical tropopause. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1981, vol. 38, pp. 1928-1938.
17. *Sunikumar S.V., Muhsin M., Venkat Ratman M., Parameswaran K., Krishna Murthi B.V., Emmanuel M.* Boundaries of tropical tropopause layer (TTL): A new perspective based on thermal and stability profiles. *Geophys. Res. Atmos.*, 2016, vol. 122, pp. 741-754. DOI: 10.1002/2016JD025217.
18. *Tinney E.N., Homeyer C.R., Elizalde L., Hurst D.F., Thompson A.M., Stauffer R.M., Vomel H., Selkirk H.B.* A Modern Approach to a Stability-Based Definition of the Tropopause. *Monthly Weather Review*, 2022, vol. 12, pp. 3151-3174. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-22-0174.1>
19. WMO. Definition of the tropopause. *WMO Bull.*, 1957, vol. 6, 136 p.

Поступила 23.10.2025; принята в печать 17.03.2026.
Submitted 23.10.2025; accepted for publication 17.03.2026.