

**ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТРОПОПАУЗЫ,
ОПРЕДЕЛЕННОЙ ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗА НА
ИЗОЭНТРОПИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ 3,5 PVU, ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЙ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА**

Б.А. Бикбулатов

*Российский Государственный Гидрометеорологический Университет,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,
e-mail: bogdan.bikbulatov1@gmail.com*

Произведен корреляционный анализ между значениями давления на уровне динамической и термической тропопауз по данным радиозондирования и реанализа MERRA-2 с целью оценки применимости динамической тропопаузы, определенной по данным реанализа, для исследования климата. В качестве динамической тропопаузы использовалась изоэнтропическая поверхность 3,5 pvu. В результате работы получены коэффициенты корреляции между значениями давления на уровне термической и динамической тропопаузами при уровне значимости 5 %.

Ключевые слова: динамическая тропопауза; термическая тропопауза; реанализ MERRA-2; корреляционный анализ

**ASSESSMENT OF THE APPLICABILITY OF THE DYNAMIC
TROPOPAUSE, DETERMINED BY THE DATA OF REANALYSIS ON
THE ISENTROPIC SURFACE OF 3.5 PVU, FOR CLIMATE CHANGE
STUDIES**

B.A. Bikbulatov

*Russian State Hydrometeorological University,
Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: bogdan.bikbulatov1@gmail.com*

A correlation analysis was performed between the pressure values at the level of dynamic and thermal tropopause according to the data of radiosonding and MERRA-2 reanalysis in order to assess the applicability of the dynamic tropopause determined according to the reanalysis data for climate research. An isentropic surface of 3.5 pvu was used as a dynamic tropopause. As a result of the work, correlation coefficients were obtained between the pressure values at the level of thermal and dynamic tropopause at a significance level of 5%.

Keywords: dynamic tropopause; thermal tropopause; MERRA-2 reanalysis; correlation analysis

Тропопауза является важной составляющей земной атмосферы. Она отделяет устойчиво стратифицированную стратосферу от тропосферы, отличающейся низкой статической устойчивостью [1], которые взаимодействуют друг с другом посредством обмена массой, импульсом и энергией

[2]. Между ними, через тропопаузу, происходит обмен атмосферных газообразных веществ, что непременно влияет на тропосферный и приземный климат [3]. В работе [6] была изучена роль антропогенных воздействий и естественных факторов на высоту глобальной тропопаузы, вызывающих изменение ее высоты. В результате работы было получено, что в период с 1979 года по 2000 год произошло уменьшение давления на уровне тропопаузы на 2,16 гПа, что по расчетам авторов работы соответствует увеличению высоты тропопаузы на 200 метров. Поэтому точное определение временной и пространственной структуры тропопаузы необходимо для изучения обмена массой, водой и химическими составляющими между тропосферой и стратосферой, а также для оценки климата.

В данном исследовании оценивается высота динамической тропопаузы для периода с 01.09.2021 по 24.12.2021 в трех городах Черский, Санкт-Петербург и Топика. Высота динамической тропопаузы определялась по данным реанализа MERRA-2 на изоэнтропической поверхности 3,5 rvu. Использование динамической тропопаузы при оценке изменчивости климата зачастую удобнее. В качестве “эталона”, с которым сравнивались полученные значения высоты динамической тропопаузы, выступает термическая тропопауза.

Многие понимают, что представляет собой термическая тропопауза, однако могут возникнуть вопросы к сущности динамической тропопаузы. Динамическая тропопауза основана на потенциальной завихренности (PV) вихря Эртеля:

$$q = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta}{\partial p} \quad (1)$$

где ζ – относительная завихренность, f – параметр Кориолиса, θ – потенциальная температура, p – давление, g – ускорение свободного падения.

Потенциальный вихрь Эртеля принято измерять в единицах rvu (potential vorticity unit), которые имеют размерность:

$$pvu = 10^{-6} \frac{m^2 K}{kg \cdot c} \quad (2)$$

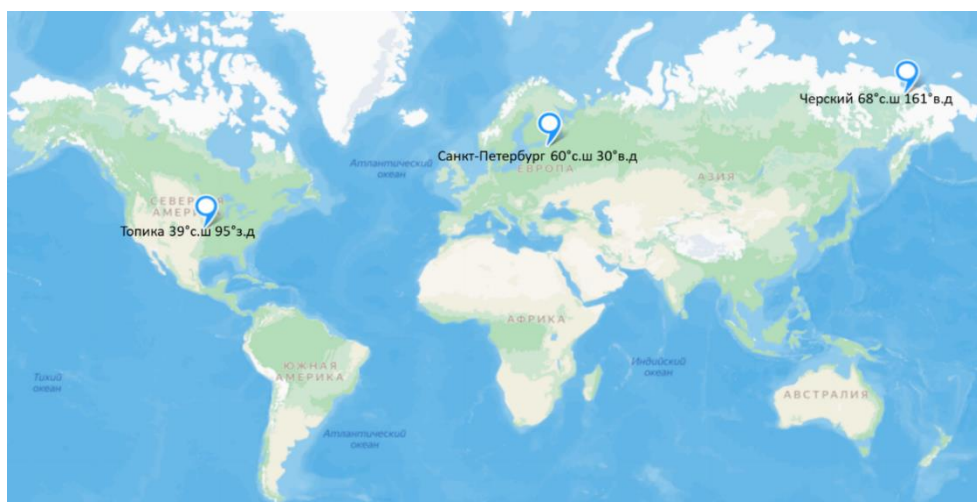


Рис. 1. Расположение станций, над которыми проводился анализ высоты тропопаузы

Для выполнения данной работы были выбраны три метеорологические станции в городах Тофика ($39^{\circ}02'$ с. ш. $95^{\circ}41'$ з. д.), Санкт-Петербург ($59^{\circ}57'$ с. ш. $30^{\circ}19'$ в. д.) и Черский ($68^{\circ}45'$ с. ш. $161^{\circ}19'$ в. д.), соответственно относящиеся к субтропическому, умеренному и полярному климатическим поясам. Географическое положение станций показано на рис. 1.

Для сравнения динамической тропопаузы, полученной по данным реанализа, с термической тропопаузой, между ними был произведен корреляционный анализ. Для каждой станции в период с 1 сентября по 24 декабря 2021 года загружались данные радиозондирования в виде таблиц зондирования и телеграмм кода КН-04 за срок 00ч UTC. В телеграммах уже указывается положение термической тропопаузы, рассчитанное автоматически по вертикальному градиенту температуры, но только один раз, что в случае множественных тропопауз может привести к ошибке ее идентификации. Поэтому для определения термической тропопаузы также был произведен непосредственный расчет вертикального градиента температуры между каждыми соседними изобарическими поверхностями из таблицы зондирования. Точка, выше которой вертикальный градиент температуры начинал удовлетворять требованиям [8], считалась нижней границей тропопаузы. Кроме этого, для исследуемых станций за каждый день и тот же период в срок 00ч из набора данных реанализа MERRA-2 были извлечены значения потенциальной завихренности со стандартных уровней давления. На рис. 2 изображен пример выходных данных значений потенциальной завихренности по реанализу для Санкт-Петербурга.

	500гПа	450гПа	400гПа	350гПа	300гПа	250гПа	200гПа	150гПа	100гПа
Сроки через каждые 3 часа	0.598	0.650	0.722	0.767	0.635	0.798	1.550	2.304	9.209
	0.609	0.609	0.524	0.466	0.508	0.760	0.760	2.189	9.446
	0.546	0.381	0.433	0.306	0.341	0.493	0.662	1.490	8.829
	0.360	0.277	0.434	0.373	0.381	0.439	0.220	0.508	8.711
	0.323	0.442	0.547	0.344	1.146	2.376	1.067	0.473	8.078
	0.475	0.487	0.332	0.440	0.864	0.651	0.992	0.895	6.952
	0.459	0.301	0.195	0.235	0.875	1.789	1.210	1.224	7.098
	0.236	0.115	-0.092	-0.208	-0.180	1.032	1.690	1.197	7.608
	0.231	0.283	0.126	0.030	0.388	1.174	1.505	1.330	9.043
	0.304	0.381	0.361	0.365	0.182	0.225	0.048	0.078	9.398
	0.329	0.485	0.408	0.293	0.361	0.306	0.020	0.536	10.669
	0.345	0.381	0.512	0.257	0.135	-0.042	-0.560	0.988	11.275
	0.265	0.257	0.415	0.073	0.324	0.463	0.014	4.495	10.775
	0.339	0.138	0.205	0.273	0.385	0.104	0.067	2.558	11.225
	0.467	0.308	0.640	0.977	0.279	0.061	0.361	1.818	11.171
	0.128	0.279	0.744	1.726	1.593	0.201	0.579	2.014	9.255
	0.037	0.135	0.065	0.159	0.226	0.338	0.853	2.197	9.940
	0.349	0.442	0.255	0.342	0.537	0.848	0.711	1.473	10.885
	0.794	0.659	0.697	0.605	0.645	0.810	0.490	0.967	11.427
	2.102	1.868	1.330	0.771	0.025	0.005	0.222	0.825	11.182
	0.090	0.605	1.221	0.758	0.414	0.378	0.544	0.754	11.823
	0.899	1.111	1.319	0.555	0.223	0.221	0.416	0.721	10.808
	0.951	1.214	1.075	0.735	0.223	0.231	0.338	0.761	9.900
	0.997	0.601	0.465	0.489	0.160	0.261	0.321	0.643	11.026
	1.226	0.709	0.479	0.406	0.090	0.218	0.121	0.148	11.372

Рис. 2. Значения потенциальной завихренности из набора данных реанализа MERRA-2

Из рис. 2 можно увидеть, что зачастую разница в потенциальной завихренности между уровнями давления велика, поэтому интерполяция производилась достаточно грубо.

Диапазон от 500 до 100 гПа был выбран из-за того, что ниже 500 гПа могут обнаруживаться большие значения потенциальной завихренности, связанные с взаимодействием атмосферы с подстилающей поверхностью. Как правило, во внетропических широтах тропопауза редко поднимается выше уровня 100 гПа, этим и обусловлена верхняя граница исследования. При этом значения давления, на которых находилась изоэнтропическая поверхность 3,5 рвч, не были известны. Для того, чтобы определить эти уровни, производилась линейная интерполяция.

На рис. 3, 4 и 5 представлены графики временного хода давления на уровне тропопаузы по данным реанализа и радиозондирования для выбранных пунктов за исследуемый период в срок 00ч. Из них видно, что интерполированная по данным реанализа динамическая тропопауза достаточно хорошо, для последующей климатической оценки, описывает термическую тропопаузу, определенную как по вертикальному градиенту температуры, так и по телеграммам кода КН-04. Единственным исключением является станция Топика. В субтропических широтах, из-за сложной стратификации, определение тропопаузы затруднено, и для определения положения термической тропопаузы на этой станции наилучшим вариантом являются

данные из телеграмм. Важно учесть, что динамическая тропопауза в общем случае не совпадает с термической и никогда не может точно ее описать. При анализе климатических изменений высоты тропопаузы, небольшие отклонения не должны существенно влиять на оценку климата, так как из-за осреднения по времени они будут сглаживаться. Большую роль должны играть сезонные колебания тропопаузы и изменчивость ее высоты в зависимости от синоптической ситуации. Результаты корреляционного анализа представлены в таблице.

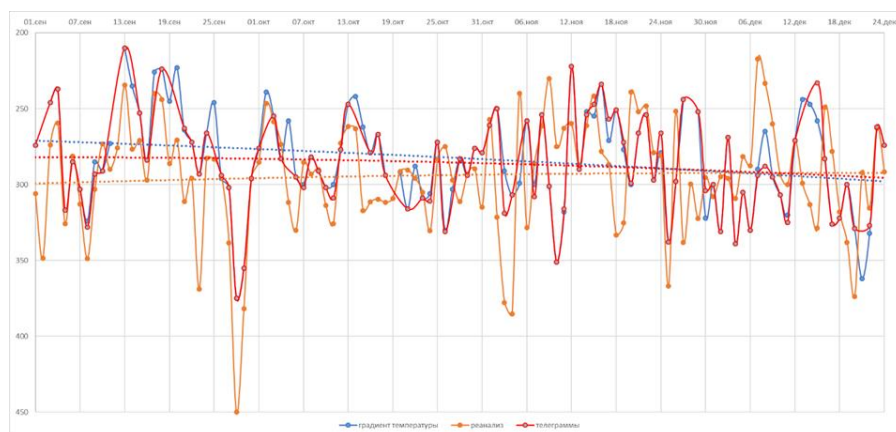


Рис. 3. Временной ход давления на уровне тропопаузы в Черском

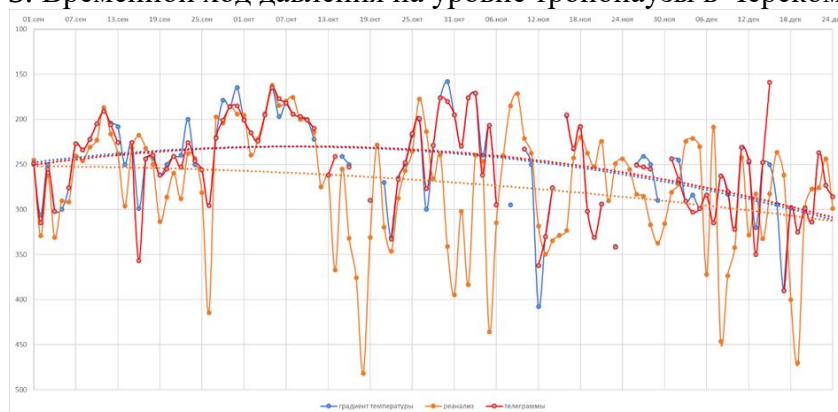


Рис. 4. Временной ход давления на уровне тропопаузы в Санкт-Петербурге

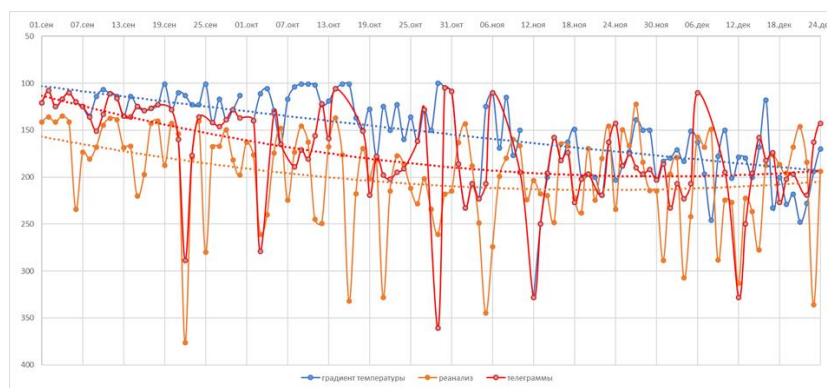


Рис. 5. Временной ход давления на уровне тропопаузы в Топике

Результаты корреляционного анализа

Черский				
	Коэф.корреляции	При уровне значимости 5%	Критические значения	
град.темп-телеграммы	0,98	51,83	1,67	значим
град.темп-реанализ	0,46	4,93	1,67	значим
реанализ-телеграммы	0,45	4,89	1,67	значим
Санкт-Петербург				
	Коэф.корреляции	При уровне значимости 5%	Критические значения	
град.темп-телеграммы	0,96	31,61	1,67	значим
град.темп-реанализ	0,39	4,11	1,67	значим
реанализ-телеграммы	0,37	3,87	1,67	значим
Тописка				
	Коэф.корреляции	При уровне значимости 5%	Критические значения	
град.темп-телеграммы	0,49	6,00	1,66	значим
град.темп-реанализ	0,03	0,37	1,66	не значим
реанализ-телеграммы	0,39	4,49	1,66	значим

Из таблицы видно, что динамическая тропопауза, построенная на основе данных реанализа, в случае Санкт-Петербурга и Черского проявляет умеренную корреляцию с термической тропопаузой, построенной как по расчету вертикального градиента температуры, так и по указанным в телеграммах значениям. Исключением является Тописка, где корреляция даже между определенными разными способами термическими тропопаузами составляет 0,49. В Тописке предпочтительнее опираться на связь между реанализом и термической тропопаузой, построенной по телеграммам. Наибольшая корреляция между тропопаузами наблюдается на станции Черский.

Важно отметить, что, несмотря на умеренную, а не высокую корреляцию для всех станций, оценка ее значимости говорит о том, что связь между динамической и термической тропопаузами основана не на пустом

месте, а на определенных закономерностях и имеет физическое обоснование. Поэтому использование динамической тропопаузы на изоэнтропической поверхности 3,5 рvи по данным реанализа пригодно для климатической оценки высоты тропопаузы. Кроме того, относительно небольшая корреляция может быть связана с использованием линейной интерполяции при том, что имело место быть наличие большой разницы между значениями потенциальной завихренности между уровнями давления, на которых интерполировалась изоэнтропическая поверхность 3,5 рvи. Вероятно, использование более точных методов интерполяции, таких как кубические сплайны, может увеличить корреляцию.

Библиографические ссылки

1. Zängl, G., and K. P. Hoinka, 2001: The tropopause in the Polar Regions, *J. Climate*, 73, 1383-1399, DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<3117:TTITPR>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<3117:TTITPR>2.0.CO;2).
2. Stohl, A., Wernli, H., James, P., Bourqui, M., Forster, C., Liniger, M. A., Seibert, P., and Sprenger, M.: A new perspective of stratosphere-troposphere exchange, *B. Am. Meteorol. Soc.*, 84, 11, doi:10.1175/BAMS-84-11-565, 2003.
3. Thouret, V., Marengo, A., Ned'elec, P., and Grouhel, C.: Ozone climatologies at 9–12 km altitude as seen by the MOZAIC airborne program between September 1994 and August 1996, *J. Geophys. Res.*, 103, 25 653–25 679, 1998a.
4. Santer, B. D. and Coauthors, 2003: Behavior of tropopause height and atmospheric temperature in models, reanalyses, and observations: Decadal changes. *J. Geophys. Res.*, 108, 1–2
5. WMO, 1957: Definition of the tropopause. *WMO Bull.*, 6, 136.