



УДК 551.51

Изменчивость характеристик тропопазы в Арктике по данным радиозондирования атмосферы

М. Ю. Червяков, С. А. Шаркова

Червяков Максим Юрьевич, доцент кафедры метеорологии и климатологии, кандидат географических наук, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, chervyakovmu@mail.ru

Шаркова Светлана Алексеевна, студент кафедры метеорологии и климатологии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, kafmeteo@mail.ru

В статье приводятся результаты исследования тропопазы в арктическом регионе в летний сезон за период с 2012 по 2017 г. Анализируются изменчивость высоты нижней границы тропопазы и температуры на этом уровне по данным трех арктических станций радиозондирования, расположенных в различных физико-географических условиях.

Ключевые слова: свободная атмосфера, радиозондирование, тропопауза, Арктика.

Variability of Tropopause Characteristics in the Arctic According to the Data of Atmosphere Radiosounding

M. Yu. Cherviakov, S. A. Sharkova

Maksim Yu. Cherviakov, <https://orcid.org/0000-0002-7641-3392>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya Str., Saratov 410012, Russia, chervyakovmu@mail.ru

Svetlana A. Sharkova, <https://orcid.org/0000-0001-7978-2890>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya Str., Saratov 410012, Russia, kafmeteo@mail.ru

The article presents the results of the polar tropopause study in the Arctic during summer seasons for the period from 2012 to 2017. The variability of tropopause height and temperature at this level are analyzed using data from three Arctic aerological stations.

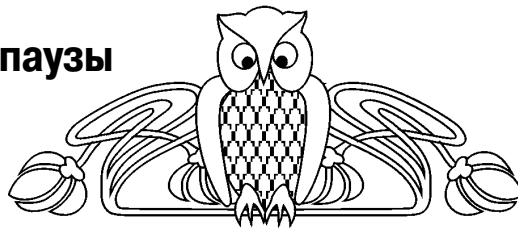
Keywords: free atmosphere, radiosounding, tropopause, Arctic.

DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2019-19-1-42-48>

Введение

Тропопауза является переходным слоем между тропосферой и стратосферой. Процессы и явления, происходящие вблизи её поверхности, оказывают существенное воздействие на метеорологическое и геофизическое состояние атмосферы в целом.

Изменение характеристик тропопазы косвенно зависит от потоков тепла в тропосфере и нижней стратосфере, а также от условий динамических и радиационных связей между ними [1–4].



Информация об изменении структуры тропопазы имеет большое значение в условиях меняющегося климата, в особенности для арктического региона. Динамика высоты тропопазы и колебания температуры на ее уровне могут служить критериями изменчивости земной климатической системы [5].

При решении конкретных задач используют различные подходы для определения понятия тропопазы и высоты ее нижней границы [6,7]. В данной работе под тропопазой понимается переходный слой между тропосферой и стратосферой, нижний уровень которого соответствует убыванию вертикального градиента температуры до $0,2^{\circ}\text{C} / 100 \text{ м}$ или менее, который остается таким, по крайней мере, в вышележащем слое 2 км. В некоторых случаях наблюдается вторая или даже третья тропопауза, которая определяется как уровень с теми же признаками, отделенный от нижележащей тропопазы слоем с градиентом не менее $0,3^{\circ}/100 \text{ м}$ и толщиной не менее 1 км [2].

В настоящей работе исследуется изменчивость характеристик тропопазы в летние периоды 2012–2017 гг. по данным радиозондирования на станциях, расположенных в разных физико-географических условиях севернее полярного круга. Для трех арктических станций были изучены временные вариации высоты нижней границы тропопазы и температуры на этом уровне. В случае если наблюдалось более одной тропопазы, то для анализа выбиралась самая нижняя. Для каждой станции была выявлена зависимость температуры от высоты тропопазы и оценена взаимосвязь этих характеристик методом определения коэффициентов линейной корреляции.

Мониторинг свободной атмосферы методом радиозондирования

Для изучения характеристик свободной атмосферы, в том числе и температурного режима, используются методы микроволнового профилирования, ракетного и спутникового зондирования. Несмотря на большое разнообразие средств измерения температуры, пожалуй, самым распространенным и системным видом получения метеорологической информации в верхних слоях атмосферы является метод аэрологического радиозондирования [8–11]. Наблюдения с помощью свободнолетающих радиозондов проводятся в стандартные сроки: 00 часов и 12 часов по Грин-



вичу, в результате которых получают данные о вертикальном распределении температуры, влажности, геопотенциальной высоте, направлении и скорости ветра, а также о давлении воздуха.

Информация включает значения метеорологических величин на каждом стандартном изобарическом уровне и на каждой стандартной высоте над поверхностью земли, уровне тропопауз и максимальной скорости ветра, а также на уровне особых точек (резких изменений в вертикальном распределении) температуры, влажности, скорости и направления ветра.

Стандартными изобарическими поверхностями считаются уровни 1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20 и 10 гПа. Критерий выбора особых точек заключен в возможности восстановления вертикального профиля температуры с точностью до 1°C в тропосфере и до 2°C в стратосфере, а также профиля относительной влажности с точностью до 15% [12–14].

Измерение температуры и влажности происходит с помощью чувствительных элементов (датчиков), а скорость и направление ветра на разной высоте определяют по координатам радиозонда с помощью сопровождения его радиолокатором. Результаты о вертикальной стратификации измеряемых метеорологических величин передаются радиозондом с помощью сигналов на наземную станцию слежения, откуда закодированная информация передается в оперативные центры посредством аэрологических телеграмм.

В настоящее время на территории России для передачи аэрологических сообщений (телеграмм) используется специальный код КН-04. Он имеет кодовую форму, подразделяющуюся на четыре части: А, В, С, D – и десять разделов. В частях А и С сообщаются данные на стандартных изобарических поверхностях, в частях В и D – данные на каждом уровне особых точек в профилях температуры, влажности и ветра [15–18]. При этом части А и В должны содержать данные до уровня 100 гПа включительно, а части С и D – выше этого уровня.

Результаты аэрологических наблюдений за разные периоды времени находятся в пополняющихся архивах КАРДС и «Аэростаб», а также в массиве «Аэростас», который является продолжением последнего и создается по автоматизированной технологии на основе данных, поступающих по каналам связи из Глобальной системы телесвязи гидрометеорологических служб. Оба массива вместе включают данные радиозондирования с 1978 г. по настоящее время

для российских станций и с 1984 г. по настоящее время – для зарубежных. Массивы организованы в виде файлов, содержанием которых являются срочные аэрологические данные по всем станциям земного шара за один месяц. В процессе создания архивных файлов аэрологические данные проходят процедуру комплексного контроля качества [9, 14].

С точки зрения оперативности поступления аэрологической информации и доступности данных стоит выделить достаточно большой архив результатов радиозондирования, который размещен на интернет-портале Университета Вайоминга, США (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>) [19].

Архив Университета Вайоминга удобен еще и тем, что вся его информация доступна для любого пользователя и не требует дополнительной регистрации или навыков работы со сложными программными комплексами и нестандартными форматами хранения информации. Результаты аэрологического зондирования представлены как в табличной форме (распределение метеорологических параметров по высоте), так и в виде комплектов телеграмм, сформированных по правилам кода КН-04. База данных в виде аэрологических телеграмм позволила существенно облегчить процесс поиска и идентификации нижнего уровня тропопаузы, так как информация о ней кодируется отдельным блоком и легко считывается. Возможность визуализировать график изменения температуры с высотой позволила оперативно оценить наличие тропопаузы с экстремальными или сомнительными значениями как высоты ее нижней границы, так и значений температуры на ее уровне.

Таким образом, на основе данных радиозондирования Университета Вайоминга было проведено исследование изменчивости высоты нижней границы тропопаузы и температуры воздуха на этом уровне для трех станций с различными климатическими условиями арктического региона: «Greenland Environmental Observatory at Summit (GEOSummit)», аэрологических станций «Черский» и «Нарьян-Мар». Перечень рассматриваемых станций, их международные индексы, а также географические координаты и высота станции над уровнем моря приведен в табл. 1.

В ходе работы были проанализированы данные радиозондирования в летний период (июнь–август) с 2012 по 2017 г., что в целом составило 2860 подъемов радиозондов. Оценивались вертикальные профили температуры как

Таблица 1

Аэрологические станции, используемые для анализа тропопаузы

Индекс станции	Название станции	Широта, град	Долгота, град	Высота над у.м., м
23205	«Нарьян-Мар»	67.63 с.ш	53.03 в.д.	12
25123	«Черский»	68.75 с.ш.	161.28 в.д.	28
04417	«GEOSummit», Гренландия	72.57 с.ш.	38.45 в.д.	3255



в ночное (срок 00:00), так и дневное (срок 12:00) время. В некоторые сроки данных не было в связи с отсутствием наблюдений или ограничением в следствии малой высоты подъема радиозонда. При построении графиков временных вариаций характеристик тропопаузы для дней, когда данные отсутствовали, производилась временная интерполяция.

Для получения профиля вертикального распределения температуры и влажности в рассматриваемый период для станции «GEOSummit» в Гренландии использовались стандартные радиозонды Vaisala, а на станциях «Нарьян-Мар» и «Черский» – радиозонды типа МРЗ. Информация о том, каким видом радиозонда производились измерения в конкретный день, в зашифрованном виде передается в телеграмме и при необходимости может быть учтена в анализе данных радиозондирования.

Зависимость высоты нижней границы тропопаузы и температуры на уровне тропопаузы

На основе архивов радиозондирования трех арктических станций была составлена база данных о характеристиках тропопауз в летний период времени с 2012 по 2017 г. Информация комплектовалась для каждого дня месяца, срока наблюдения и включала высоту и температуру на уровне тропопаузы. На основе сформированного массива данных были исследованы временные вариации высоты тропопаузы и температуры для каждой станции. В качестве примера на рис. 1 представлены графики изменения этих характеристик в летний период 2012 г. для станций «GEOSummit» (см. рис. 1, а), «Нарьян-Мар» (см. рис. 1, б) и «Черский» (см. рис. 1, в), а в табл. 2–3 даны значения максимального, минимального и среднего значения высоты нижней границы тропопаузы и температуры для всех летних периодов 2012–2017 гг.

Высота тропопаузы испытывает большие колебания в зависимости от расположения стан-

ции, конкретного года и дня месяца, что видно из рис. 1 и табл. 2.

Для станции «GEOSummit», которая располагается в Гренландии, максимальная высота отмечалась в разные месяцы и колебалась в пределах 11,3–13,3 км. Наиболее высокая тропопауза наблюдалась в июле 2012 года и составила 13317 м с температурой $-66,5^{\circ}\text{C}$. Минимальная высота тропопауз для данной станции варьировала в пределах 6,3–7,9 км, а самая низкая тропопауза была зафиксирована в августе 2013 г. на высоте 6385 м с температурой $-42,7^{\circ}\text{C}$. В среднем за рассматриваемый период высота тропопаузы колебалась от года к году в пределах 9,8–10,3 км.

Для станции «Черский», которая располагается на севере Восточной Сибири, максимальная высота варьировала в пределах 11,9–15,7 км, что существенно выше, чем в Гренландии. Наибольшая высота тропопаузы наблюдалась в июле 2016 г. и составила 15666 м с температурой $-51,9^{\circ}\text{C}$. Минимальная высота тропопауз для данной станции варьировала в пределах 5,6–7,5 км, а самая низкая тропопауза была зафиксирована в июне 2014 г. на высоте 5573 м, с температурой $-36,5^{\circ}\text{C}$. В среднем за рассматриваемый период высота тропопаузы колебалась от года к году в пределах 10–11,2 км.

Для станции «Нарьян-Мар», которая находится недалеко от устья реки Печоры, максимальная высота варьировала в пределах 12,4–13,5 км. Наибольшая высота тропопаузы наблюдалась в июле 2014 г. и составила 13447 м с температурой $-53,5^{\circ}\text{C}$. Минимальная высота тропопауз для данной станции варьировала в пределах 6,7–8,4 км, а самая низкая тропопауза была зафиксирована в июне 2017 г. на высоте 6655 м с температурой $-41,3^{\circ}\text{C}$. В среднем за рассматриваемый период высота тропопаузы колебалась от года к году в пределах 10–10,8 км.

Таким образом, можно заметить, что высота тропопаузы, ее максимальное и минимальное значение в летний период существенно зависят от географического положения аэрологической

Таблица 2

Высота тропопаузы в летний период 2012–2017 гг.

Станция	Высота, м	Год					
		2012	2013	2014	2015	2016	2017
«GEOSummit»	Максимальная	13317	11370	11725	12062	11630	12093
	Минимальная	7076	6385	6803	7701	7964	6987
	Средняя	10382	9747	10153	10040	10294	10125
«Черский»	Максимальная	13612	11882	13710	11865	15666	12146
	Минимальная	5618	7537	5573	6676	7419	6486
	Средняя	10025	10757	11197	10399	10430	9951
«Нарьян-Мар»	Максимальная	12430	12429	13447	12390	12915	12821
	Минимальная	8061	7039	8349	7274	7361	6655
	Средняя	10415	10619	10597	9968	10687	10768

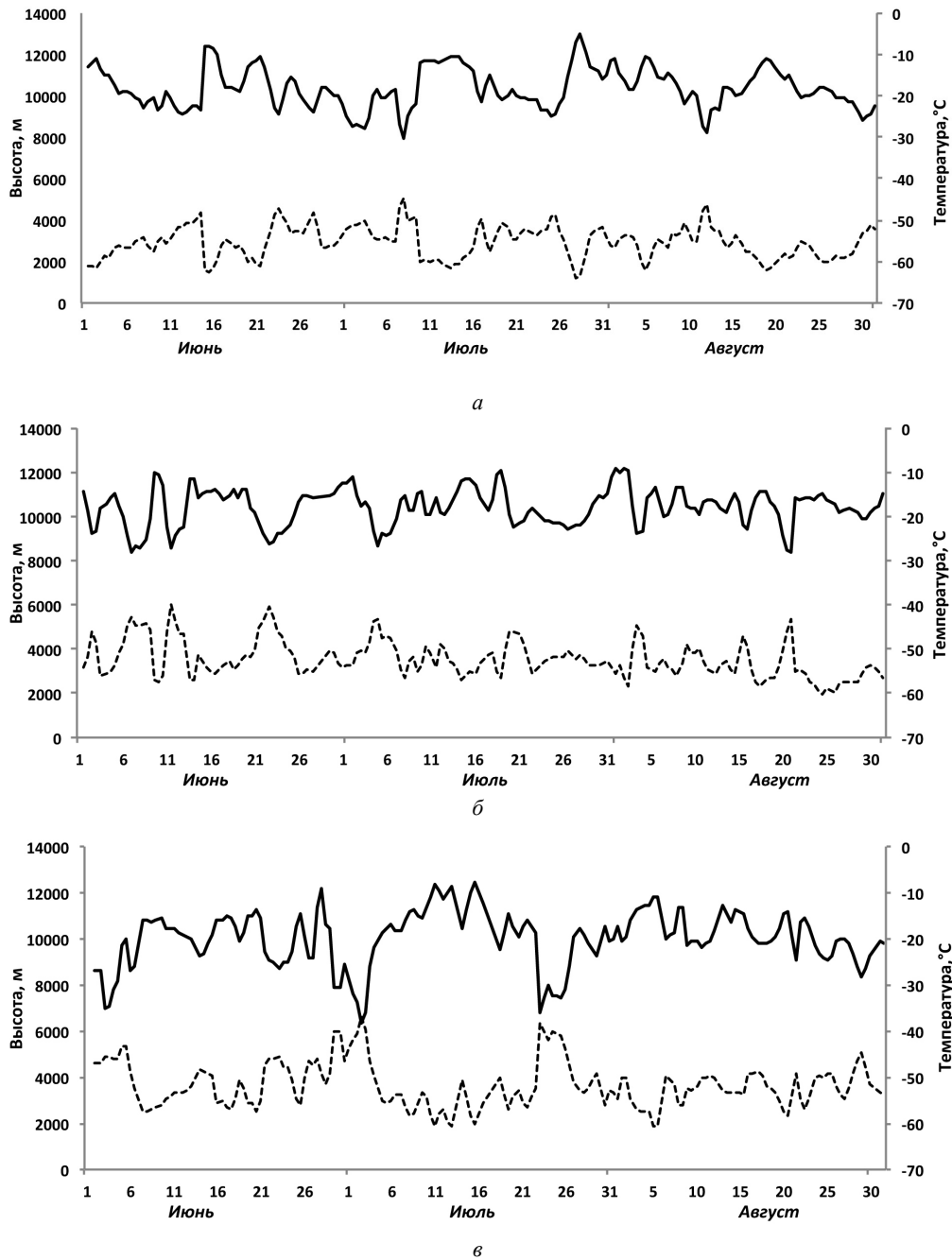


Рис. 1. Временная изменчивость высоты тропопаузы (сплошная линия) и температуры (пунктирная линия) на ее уровне в летний период 2012 г. для станции: а – «GEOSummit», б – «Нарьян-Мар», в – «Черский»

станции и рассматриваемого периода времени. В летний период амплитуда колебаний высоты тропопаузы может достигать 7 км и более. Увеличение или уменьшение толщины тропосферы и высоты тропопаузы летом в Арктике, возможно, зависят от интенсивного вертикального обмена, который, в свою очередь, связан с притоком солнечной радиации к земной поверхности, увеличивая турбулентный обмен до больших высот. При оценке изменения высоты тропопаузы необходимо учитывать и другие факторы. К примеру,

повышение тропопаузы может быть вызвано похолоданием в нижней стратосфере.

Стоит отметить, что изменчивость температуры в течение летнего периода существенно зависит не только от физико-географических условий станции, но и от высоты нижнего уровня тропопаузы (см. рис. 1, 2 и табл. 3).

Для тропопауз, наблюдаемых на станции «GEOSummit», максимальное значение температуры варьировало в пределах от $-46,5$ до $-36,7$. Минимальное – от $-66,5$ до $-60,1$ °C. Изменение

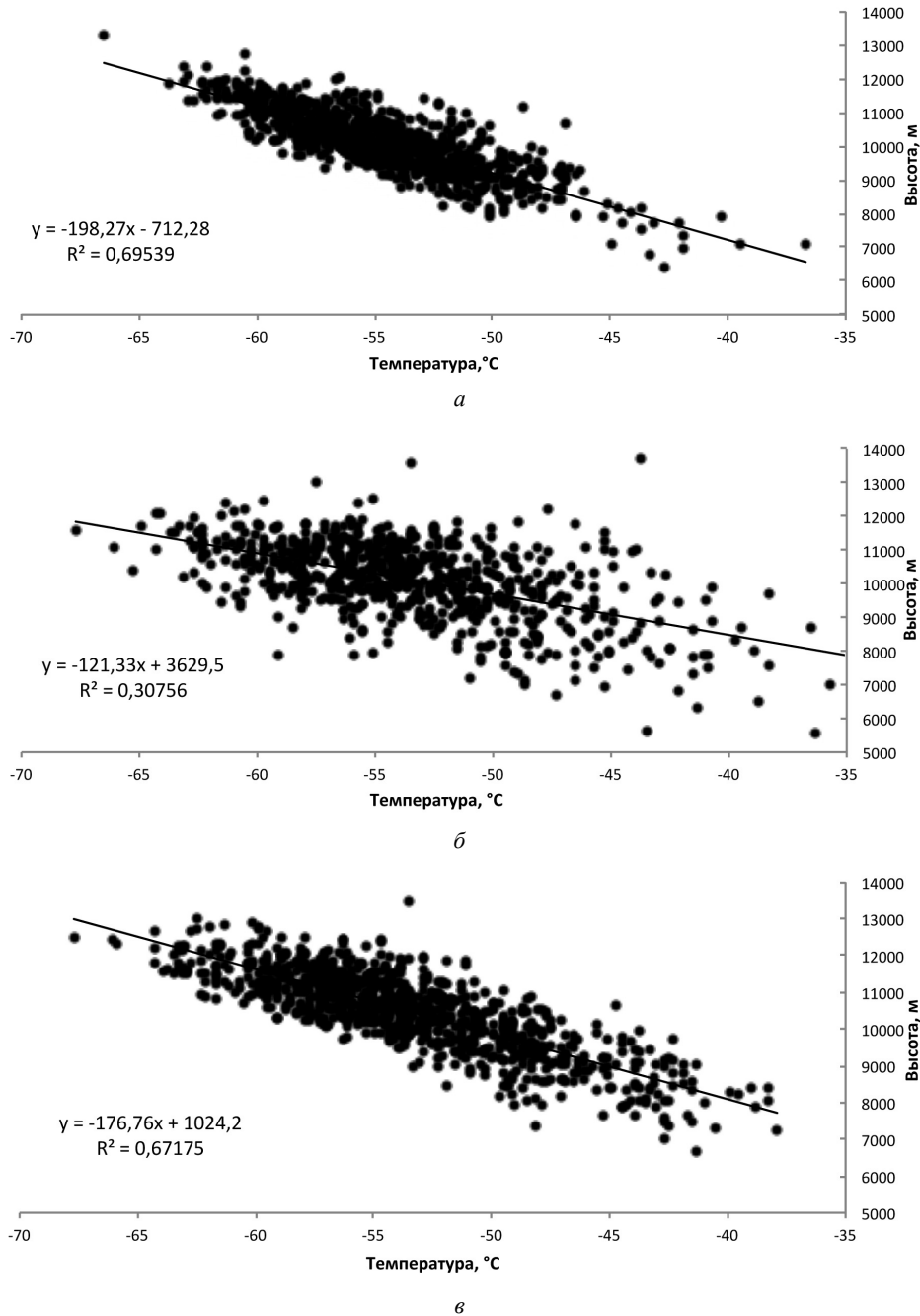


Рис. 2. Связь высоты тропопаузы и температуры на ее уровне, 2012–2017 г. (июнь–август) для станции: а – «GEOSummit» $y = -198,27x - 712,28$, б – «Черский» $y = -121,33x + 3629,5$, в – «Нарьян-Мар» $y = -176,76x + 1024,2$

среднего значения температуры колебалось от $-55,5$ до $-53,7^{\circ}\text{C}$.

Для аэрологической станции «Черский» максимальное значение температуры варьировало в пределах от $-42,5$ до $-34,3^{\circ}\text{C}$. Минимальное – от $-67,7$ до $-60,6^{\circ}\text{C}$. Среднее значение температуры изменялось от $-56,0$ до $-51,6^{\circ}\text{C}$.

Для тропопауз, наблюдаемых на станции «Нарьян-Мар», максимальное значение температуры варьировало в пределах от $-37,9$ до

$-42,3^{\circ}\text{C}$. Минимальное – от $-67,7$ до $-60,9^{\circ}\text{C}$. Изменение среднего значения температуры колебалось от $-56,7$ до $-50,9^{\circ}\text{C}$.

Анализ температуры на нижней границе тропопаузы для рассматриваемых станций показал существенные временные вариации температуры, амплитуда которых может за сезон достигать 30 градусов и более.

Очевидно, что между температурой на нижней границе тропопаузы и ее высотой существует



Таблица 3

Температура на уровне тропопаузы в летний период 2012–2017 гг.

Станция	Температура, °С	Год					
		2012	2013	2014	2015	2016	2017
«GEOSummit»	Максимальная	–39,5	–42,7	–36,7	–43,1	–46,5	–41,9
	Минимальная	–66,5	–60,1	–61,7	–60,9	–62,3	–63,7
	Средняя	–55,4	–53,7	–54,2	–54,2	–54,9	–55,5
«Черский»	Максимальная	–35,7	–34,3	–36,3	–42,5	–40,7	–38,3
	Минимальная	–60,7	–60,6	–63,1	–61,7	–66,1	–67,7
	Средняя	–51,6	–52,7	–53,1	–53,0	–56,0	–54,5
«Нарьян-Мар»	Максимальная	–38,3	–42,3	–41,5	–37,9	–38,8	–41,3
	Минимальная	–60,9	–61,5	–64,3	–62,3	–62,7	–67,7
	Средняя	–52,7	–53,1	–54,2	–50,9	–54,3	–56,7

связь, причем она будет стремиться быть линейной при неизменности вертикального градиента температуры в тропосфере и отсутствии инверсионных и изотермических слоев. Тем не менее эта взаимосвязь будет зависеть также от других факторов: времени года, условий распределения температуры с высотой, температуры у поверхности земли, адвективных потоков у поверхности земли и на высоте.

В данной работе была оценена взаимосвязь температуры воздуха на уровне тропопаузы и ее высоты в летний сезон. Для сопоставления этих характеристик были использованы все имеющиеся попарные (высота-температура) данные для всех тропопауз. Для станции «Нарьян-Мар» выбрано 987 случаев, для станции «Черский» – 860 и для обсерватории «GEOSummit» в Гренландии – 1013 случаев. Всего в анализе было оценено 2860 случаев, для которых была зафиксирована тропопауза.

На основе сопоставления характеристик тропопаузы для каждой станции были построены корреляционные диаграммы взаимосвязи температуры и высоты тропопаузы (рис. 2). По оси абсцисс отложено значение температуры, а по оси ординат – высота нижних границ тропопауз.

Как видно из рис. 2, рассеяние точек на корреляционных диаграммах довольно велико, особенно для станции «Черский». Следует отметить, что это рассеяние отражает все возможные факторы, о которых говорилось выше.

Тем не менее коэффициенты линейной корреляции взаимосвязи температуры и высоты тропопаузы достаточно высоки. Для станции «Нарьян-Мар» он равен –0,82, для обсерватории «GEOSummit» –0,83 и для станции «Черский» –0,72. Знак минус перед коэффициентом корреляции указывает на то, что с ростом высоты температура тропопаузы понижается.

Выводы

В ходе анализа данных радиозондирования для рассматриваемых арктических станций найдены эмпирические уравнения взаимосвязи, средние для летнего сезона 2012–2017 гг., которые имеют вид:

$t = -0,005h - 3,6$ для обсерватории «GEOSummit».

$t = -0,0082h + 29,9$ для станции «Черский».

$t = -0,0056h + 5,8$ для станции «Нарьян-Мар».

Здесь t – температура воздуха на уровне нижней границе тропопаузы, °С, h – высота нижней границы тропопаузы, м.

В зависимости от особенностей распределения температуры в тропосфере, вертикального градиента температуры и значений высоты нижней границы тропопаузы температура на ее уровне может сильно варьировать. Чем выше располагается тропопауза, тем ниже значения температуры на ее уровне [20, 21].

Библиографический список

1. Минина Л. С., Маклаков И. А. Колебания нижней границы тропопаузы в связи с изменением температуры // Труды / ЦИП. 1964. Вып. 137. С. 41–47.
2. Бедрицкий А. И. Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь : в 3 т. СПб. ; М. : Летний сад, 2009. Т. 3. 216 с.
3. Червяков М. Ю. Межгодовая изменчивость поглощенной солнечной радиации и альbedo в арктическом регионе // Молодежь. Наука. Инновации : сб. докл. 64-й междунар. молодеж. науч.-техн. конф. : в 2 т. Владивосток : Морской государственный университет, 2016. Т. 1. С. 524–528.
4. Holton J. R., Haynes P. H., McIntyre M. E., Douglass A. R., Rood R. B., Pfister L. Stratosphere troposphere exchange // Review of Geophysics. 1995. Vol. 33, № 4. P. 403–439.
5. Козлова Л. Ф., Стерин А. М. Исследование многолет-



- ней изменчивости параметров тропопаузы над территорией РФ по радиозондовым данным // Труды / ВНИИГМИ-МЦД. 2014. Вып. 178. С. 47–60.
6. *Иванова А. Р.* Тропопауза – многообразие определений и современные подходы к идентификации // *Метеорология и гидрология*. 2013. № 12. С. 23–36.
7. *Anel J. A., Antuna J. C., Torre L., Nieto R., Gimeno L.* Global statistics of multiple tropopauses from the IGRA database // *Geophys. Res. Lett.* 2007. Vol. 34. P. 1–5.
8. *Лавров А. С., Хохлова А. В., Стерин А. М.* Мониторинг климатических параметров температуры и ветра в свободной атмосфере : технологические аспекты // Труды / Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации. 2017. Вып. 366. С. 97–111.
9. *Алдухов О. А., Черных И. В.* Методы анализа и интерпретации данных радиозондирования атмосферы. Контроль качества и обработка данных : в 3 т. Обнинск : ВНИИГМИ-МЦД, 2013. Т. 1. 216 с.
10. *Алдухов О. А., Черных И. В.* Методы анализа и интерпретации данных радиозондирования атмосферы. Восстановленные облачные слои : в 3 т. Обнинск : ВНИИГМИ-МЦД, 2013. Т. 2. 151 с.
11. *Алдухов О. А., Черных И. В.* Методы анализа и интерпретации данных радиозондирования атмосферы. Влажность и температура в атмосфере : статистические характеристики : в 3 т. Обнинск : ВНИИГМИ-МЦД, 2015. Т. 3. 494 с.
12. *Мохов И. И.* Вертикальный температурный градиент в тропосфере и его связь с приповерхностной температурой по эмпирическим данным // *Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1983. Т. 19, № 9. С. 913–917.
13. *Мохов И. И., Акперов М. Г.* Вертикальный температурный градиент в тропосфере и его связь с приповерхностной температурой по данным реанализа // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2006. Т. 42, № 4. С. 467–475.
14. *Кравцова Л. М.* О методике климатической обработки характеристик полярной и тропической тропопауз // Труды / НИИАК. 1965. Вып. 34. С. 48–51.
15. *Anel J. A., Gimeno L., Torre L., Nieto R.* Changes in tropopause height for the Eurasian region determined from CARDS radiosonde data // *Naturwissenschaften*. 2006. Vol. 93. P. 603–609.
16. *Bell S. W., Geller M. A.* Tropopause inversion layer : Seasonal and latitudinal variations and representation in standard radiosonde data and global models // *Journal Geophys. Res.* 2008. Vol. 113. P. 1–7.
17. *Иванова А. Р., Богаевская Н. И.* Динамика арктической тропопаузы и ее связь с фронтогенезом в период 1990–2017 гг. // Труды / Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации. 2012. Вып. 347. С. 5–23.
18. *Mokhov I. I., Akperov M. G.* Tropospheric lapse rate and its relation to surface temperature from reanalysis data // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2006. Vol. 42, № 4. P. 430–438.
19. University of Wyoming College of Engineering [Электронный ресурс]. URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (дата обращения: 10.02.2019).
20. *Шаркова С. А., Червяков М. Ю.* Изменение характеристик полярной тропопаузы в летний период по данным радиозондирования // ЛОМОНОСОВ-2018 : материалы Междунар. молодеж. науч. форума. М. : МАКС Пресс, 2018. С. 1–2.
21. *Шаркова С. А., Червяков М. Ю.* Исследование изменчивости характеристик тропопаузы в арктической зоне по данным радиозондирования // Труды / 61-я Всерос. науч. конф. МФТИ. Фундаментальная и прикладная физика. 2018. С. 21–22.

Образец для цитирования:

Червяков М. Ю., Шаркова С. А. Изменчивость характеристик тропопаузы в Арктике по данным радиозондирования атмосферы // *Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле*. 2019. Т. 19, вып. 1. С. 42–48. DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2019-19-1-42-48>

Cite this article as:

Cherviakov M. Yu., Sharkova S. A. Variability of Tropopause Characteristics in the Arctic According to the Data of Atmosphere Radiosounding. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Earth Sciences*, 2019, vol. 19, iss. 1, pp. 42–48 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2019-19-1-42-48>