ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2020, том 494, № 2, с. 48–52

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ

УДК 551.5:519.6

ВЕРТИКАЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРНАЯ СТРАТИФИКАЦИЯ АТМОСФЕРЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ГОДОВОГО ЦИКЛА ИНСОЛЯЦИИ ПО РАСЧЕТАМ С КЛИМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛЬЮ ОБЩЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ

© 2020 г. Академик РАН И. И. Мохов[1,2,*], А. В. Тимажев[1]

Поступило 22.07.2020 г.
После доработки 04.08.2020 г.
Принято к публикации 05.08.2020 г.

Проведены численные расчеты с климатической моделью общей циркуляции при разной продолжительности годового цикла. Полученные модельные результаты подтверждают сделанный ранее на основе анализа климатических данных с использованием специального метода амплитудно-фазовых характеристик вывод о соответствии толщины тропосферы (высоты тропопаузы) высоте температурного скин-слоя для атмосферы при циклическом прогреве от поверхности в связи с годовым ходом инсоляции. В частности, в модельных расчетах высота тропопаузы при вдвое меньшей продолжительности годового цикла получена в $\sqrt{2}$ меньше, чем при современной продолжительности годового цикла.

Ключевые слова: температурная стратификация атмосферы, высота тропопаузы, продолжительность годового цикла, климатическая модель общей циркуляции

DOI: 10.31857/S2686739720100072

ВВЕДЕНИЕ

Земная атмосфера имеет слоистую структуру. В том числе в распределении температуры в атмосфере с высотой выделяются характерные слои – тропосфера, стратосфера, мезосфера, термосфера, а также внешняя оболочка – экзосфера. В пределах тропосферы – слоя земной атмосферы от поверхности до высоты 8–9 км в полярных и до 15–17 км в экваториальных широтах – выделяется также пограничный и приземный слои [1–4]. Для тропосферы характерно близкое к линейному падение температуры с высотой – в среднем около 6 К/км [5–7]. В [8, 9] на основе анализа данных для температурных вариаций в годовом ходе на разных уровнях в атмосфере и в разных широтных зонах Северного и Южного полушарий с использованием предложенного метода амплитудно-фазовых характеристик дано количественное обоснование того, что толщина слоя атмосферы, прогреваемого в годовом ходе от поверхности Земли, соответствует толщине тропосферы – высоте тропопаузы. При этом высота тропопаузы соответствует высоте температурного скин-слоя в атмосфере для годового цикла инсоляции, а приземный слой – соответствующему скин-слою для суточного цикла.

Ключевые особенности годового хода температуры атмосферы в зависимости от широты и высоты, выявленные в [8, 9], можно качественно описать на основе использованной в [10] сканер-модели с вертикальной теплопроводностью в атмосфере и с горизонтально перемещающимся (сканирующим) тепловым источником (см. также [3]). Учитывался также связанный с озоном прогрев в более высоких слоях атмосферы – в стратосфере. При анализе результатов расчетов с достаточно детальной моделью общей циркуляции атмосферы [11] были воспроизведены общие особенности изменения температурного режима атмосферы в годовом ходе, выявленные в [8, 9] по данным наблюдений. Результаты анализа модельных расчетов в целом подтверждали соответствие толщины тропосферы характерной высоте температурного скин-слоя для современной продолжительности годового хода.

Цель данной работы – анализ изменений температурного поля атмосферы, в том числе изменения высоты тропопаузы, при изменении про-

[1] *Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Москва, Россия*
[2] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
**e-mail: mokhov@ifaran.ru*

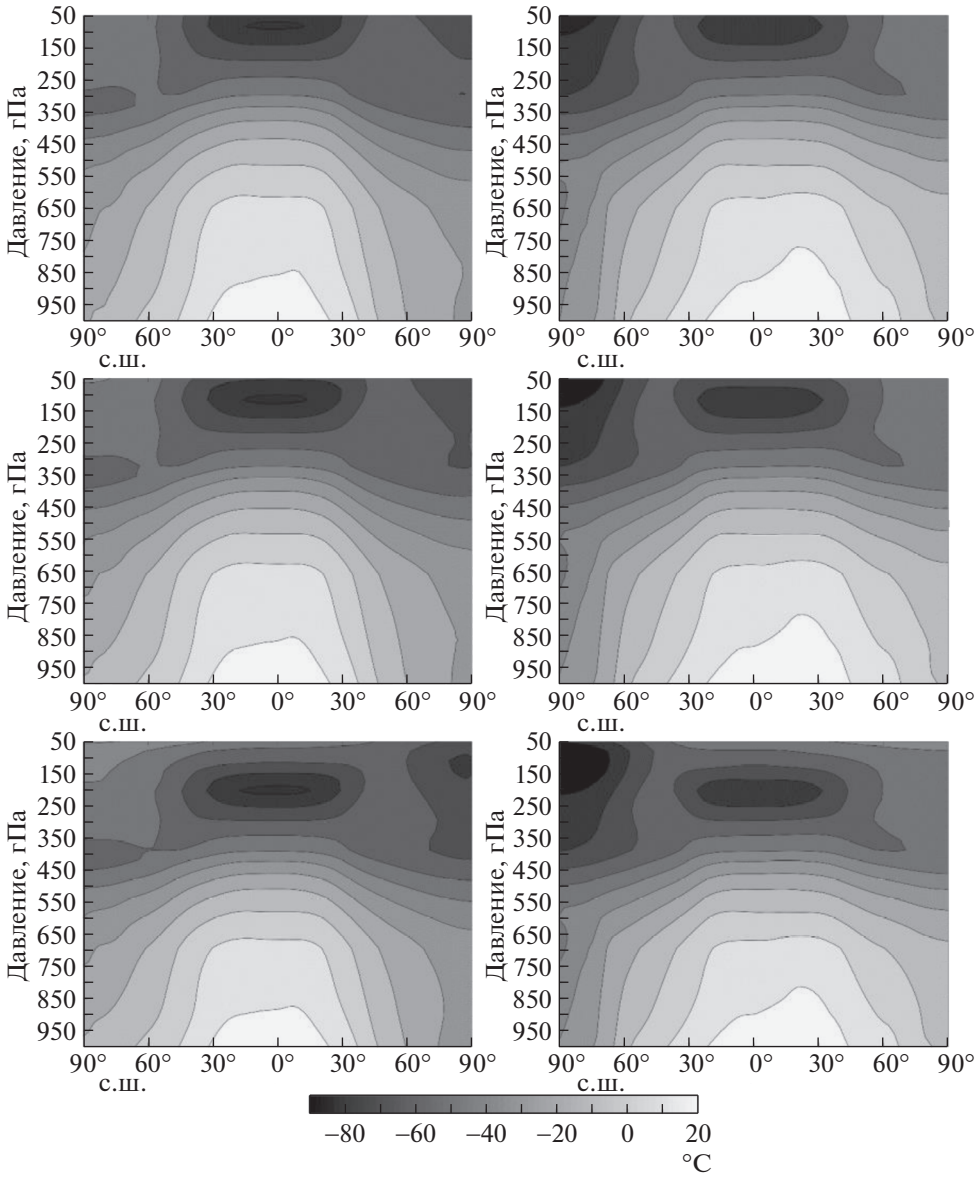

Рис. 1. Сезонные широтно-высотные распределения температуры в тропосфере и нижней стратосфере декабре-феврале (слева) и в июне-августе (справа) по данным реанализа ERA-Interim (верхний ряд) и по модельным расчетам при современной продолжительности годового цикла (средний ряд) и вдвое меньшей продолжительности (нижний ряд).

должительности годового хода по расчетам с климатической моделью общей циркуляции.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МОДЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ И ДАННЫЕ РЕАНАЛИЗА

Для анализа использовалась версия климатической модели общей циркуляции атмосферы и океана, предложенной в ИФА РАН (далее КМОЦ ИФА РАН), первые результаты анализа климатической динамики с которой представлены в [12]. В [12], в частности, проведен анализ результатов контрольного моделирования для 150-летнего периода. В предложенной в [12] версии КМОЦ используется блок общей циркуляции атмосферы ECHAM5 [13] и блок общей циркуляции океана MOM5 [14]. Атмосферный (T31L39) и океанический (с разрешением 1.125° × 1.125°) блоки объединены с использованием системы связи OASIS [15].

При анализе использовались результаты расчетов с КМОЦ ИФА РАН для 30-летних периодов в конце 100-летних численных расчетов для современного климата и соответствующие результаты расчетов при вдвое меньшей продолжительности годового хода. Результаты моделирования с этой версией КМОЦ ИФА РАН свидетельствуют об адекватном воспроизведении основных особенностей современных распределений для клю-

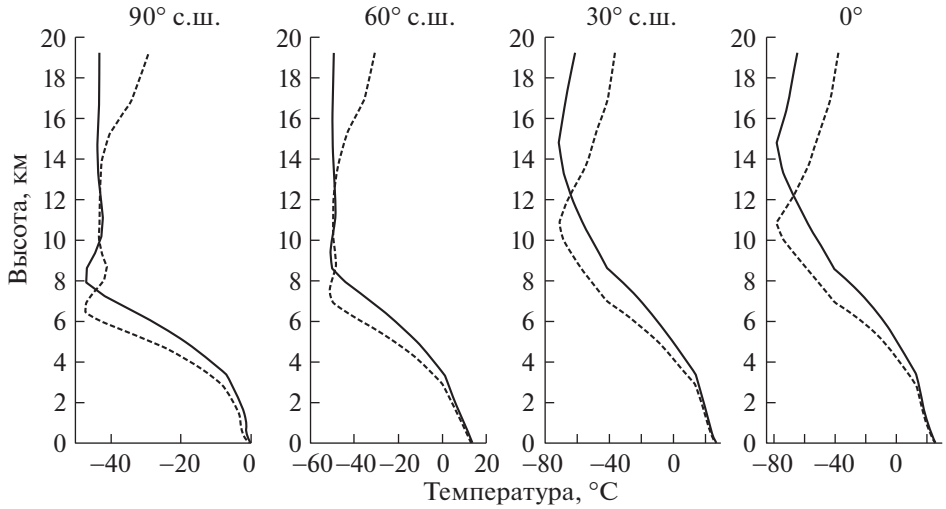

Рис. 2. Вертикальные температурные профили в атмосфере разных широт летом по модельным расчетам при современном периоде годового цикла (365 суток, сплошная линия) и при вдвое меньшем (182.5 суток, пунктир).

чевых характеристик климата (включая приповерхностную температуру, давление на уровне моря и др.). По результатам моделирования отмечено также адекватное воспроизведение ключевых особенностей квазициклических процессов Эль-Ниньо, с которыми связаны сильнейшая межгодовая изменчивость глобальной приповерхностной температуры. В том числе модель способна воспроизводить особенности повторяемости фазовых переходов для процессов Эль-Ниньо [12].

Результаты модельных расчетов сравнивались с данными реанализа.

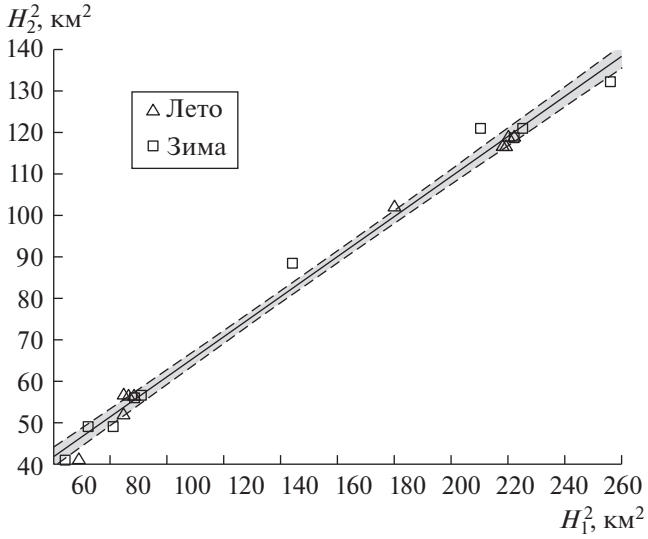

Рис. 3. Зимние и летние значения квадратов высоты тропопаузы в разных широтах Северного и Южного полушарий по модельным расчетам при уменьшенной (вдвое) продолжительности годового цикла в зависимости от соответствующих значений квадратов высоты тропопаузы при современной продолжительности годового цикла и результат соответствующей линейной регрессии – прямая линия. Пунктиром отмечены границы доверительного (на уровне 0.95) интервала.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 представлены сезонные широтно-высотные распределения температуры в тропосфере и нижней стратосфере декабре-феврале (слева) и в июне-августе (справа) по данным реанализа ERA-Interim для периода 1979–2018 гг. (верхний ряд) и по модельным расчетам при современной продолжительности годового цикла (средний ряд) и вдвое меньшей продолжительности (нижний ряд). Согласно рис. 1, в КМОЦ ИФА РАН достаточно адекватно описываются современные широтно-высотные сезонные особенности температурного поля тропосферы и стратосферы в сопоставлении с данными реанализа, в том числе в области тропопаузы и полярных широтах.

Согласно рис. 1, как летом, так и зимой, при вдвое меньшей продолжительности годового цикла высота соответствующих температурных изохрон на всех широтах понижается. В частности, это четко проявляется для тропической тропопаузы.

На рис. 2 приведены вертикальные температурные профили в атмосфере разных широт летом по расчетам с КМОЦ ИФА РАН при современной продолжительности годового цикла $T_{1\omega}$ и при вдвое меньшей $T_{2\omega}$. Аналогичные профили получены для других широт Северного и Южного

полушарий для летнего и зимнего сезонов. Согласно рис. 2, значения высоты тропопаузы, характеризуемой изломом температурного профиля, изменяются по модельным расчетам при современном периоде годового цикла от примерно 15 км около экватора до примерно 8 км в приполярных широтах. При этом значения вертикального градиента температуры в тропосфере также уменьшаются от экватора к полюсу. По современным данным средние значения вертикального градиента температуры в тропосфере изменяются в диапазоне от 6.5 К/км в тропических широтах до 4.5 К/км в полярных широтах [7]. При вдвое меньшей продолжительности годового цикла значения высоты тропопаузы, как видно из рис. 1, понижаются примерно до 11 км около экватора и примерно до 6–7 км в приполярных широтах.

На рис. 3 представлены зимние и летние значения квадратов высоты тропопаузы на разных широтах Северного и Южного полушарий по расчетам с КМОЦ ИФА РАН при вдвое меньшем, чем реальный, периоде годового хода $T_{2\omega}$ в зависимости от соответствующих квадратов значений высоты тропопаузы $H^2_{1\omega}$ при современном периоде годового цикла $T_{1\omega}$. В том числе представлены результаты модельных расчетов для экватора, субтропических (30°), средних (45° и 50°) и субполярных (60°) обоих полушарий, а также для обоих полюсов (90°). Угол наклона прямой, соответствующей линейной регрессии $H^2_{2\omega}$ на $H^2_{1\omega}$ получен равным 0.5. Это соответствует корневой зависимости высоты тропопаузы от продолжительности годового цикла $H \sim T^{1/2}$ (или $H \sim \omega^{-1/2}$) аналогично зависимости для соответствующего температурного скин-слоя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты численных расчетов с КМОЦ ИФА РАН подтверждают сделанный в [8, 9] вывод на основе анализа современных данных с использованием специального метода амплитудно-фазовых характеристик о соответствии толщины тропосферы высоте температурного скин-слоя для атмосферы, прогреваемой от поверхности за счет периодического радиационного форсинга – годового цикла инсоляции и поглощения коротковолновой солнечной радиации. Это свидетельствует о значимости соответствующего механизма формирования тропопаузы с учетом влияния стратосферного прогрева за счет поглощения солнечной радиации озоновым слоем.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Данная работа выполнена в рамках проекта РНФ (19-05-00240).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Хргиан А.Х.* Физика атмосферы. Т. 1. Л.: Гидрометеоиздат. 1978. 247 с.
2. *Маховер З.М.* Климатология тропопаузы. Л.: Гидрометеоиздат. 1983. 256 с.
3. *Мохов И.И.* Диагностика структуры климатической системы. СПб.: Гидрометеоиздат. 1993. 271 с.
4. *Хромов С.П., Петросянц М.А.* Метеорология и климатология. М.: Изд-во МГУ. 2004. 582 с.
5. *Stone P.H., Carlson J.H.* Atmospheric Lapse Rate Regimes and Their Parameterization // J. Atmos. Sci. 1979. V. 36. P. 415–423.
6. *Мохов И.И.* Вертикальный температурный градиент в тропосфере и его связь с приповерхностной температурой по эмпирическим данным // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1983. Т. 19. № 9. С. 913–919.
7. *Мохов И.И., Акперов М.Г.* Вертикальный температурный градиент в тропосфере и его связь с приповерхностной температурой по данным реанализа // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 4. С. 467–475.
8. *Мохов И.И.* Метод амплитудно-фазовых характеристик для анализа динамики климата // Метеорология и гидрология. 1985а. № 5. С. 80–89.
9. *Мохов И.И.* Анализ годового хода характеристик климата // Метеорология и гидрология. 1985б. № 9. С. 38–45.
10. *Мохов И.И.* Диагноз особенностей годового хода климатических полей в атмосфере / В: Исследование вихревой динамики и энергетики атмосферы и проблема климата. Л.: Гидрометеоиздат. 1990. С. 288–311.
11. *Мохов И.И.* Диагностика особенностей годового хода температурного режима атмосферы в модели общей циркуляции // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1989. Т. 25. № 2. С. 143–150.
12. *Mokhov I.I., Timazhev A.V.* Summer Climate Anomalies in the Northern Eurasia During Intra-annual Transitions from El Niño to La Niña / Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. E. Astakhova (ed.). 2016. WCRP Rep. No 15/2016. S. 6. P. 7–8.
13. *Roeckner E. et al.* The Atmospheric General Circulation Model ECHAM5. Part I: Model Description. MPI Report 349, Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, Germany, 2003. 90 p.
14. *Griffies S.M.* Elements of the Modular Ocean Model (MOM). NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory. 2012. GFDL Ocean Group Techn. Rep. No 7. 632 p.
15. *Valcke S.* The OASIS3 Coupler: A European Climate Modelling Community Software // Geosci. Model Dev. 2013. V. 6. P. 373–388.

VERTICAL TEMPERATURE STRATIFICATION OF THE ATMOSPHERE DEPENDING ON THE LENGTH OF THE ANNUAL INSOLATION CYCLE FROM SIMULATIONS WITH THE COUPLED GENERAL CIRCULATION MODEL

Academician of the RAS I. I. Mokhov[a,b,#] and A. V. Timazhev[a]

[a] *A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[b] *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

[#]*e-mail: mokhov@ifaran.ru*

Numerical simulations were carried out with a coupled general circulation model for different lengths of the annual cycle. The obtained model results confirm the conclusion made earlier from the analysis of climatic data that the depth of the troposphere (tropopause height) corresponds to the height of the temperature skin layer for the atmosphere periodically heated from the surface due to the annual cycle of insolation. In particular, according to model simulations, the tropopause height for half the length of the annual cycle is $\sqrt{2}$ less than for the current length of the annual cycle.

Keywords: temperature stratification of the atmosphere, tropopause height, annual cycle length, coupled general circulation model