

Л.И. Несмелова, О.Б. Родимова, С.Д. Творогов

## Тренды высотного хода температуры в последние десятилетия

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 16.09.2004 г.

На основе расчетов, выполненных в рамках предложенной авторами одномерной радиационной модели с явной зависимостью от температуры, и их сравнения с расчетами по моделям общей циркуляции показано, что наблюдающиеся в последние десятилетия тренды температуры в стратосфере и мезосфере в основном имеют радиационную природу и могут являться следствием изменения в атмосфере концентраций углекислого газа и озона. Сравнение вычисленных температурных трендов с экспериментальными значениями показывает их качественное согласие на высотах стратосферы и мезосферы.

### Введение

Температура — одна из важнейших климатических характеристик. Ее изменения являются отражением процессов, происходящих в климатической системе. Адекватное описание этих изменений в рамках климатических моделей свидетельствует о понимании относительной роли различных процессов в формировании климата и предоставляет возможность сравнения результатов расчета с экспериментом.

К настоящему времени ряды наблюдений высотного профиля температуры являются достаточно длительными для того, чтобы выделить температурные тренды. В литературе появились данные об эволюции высотного хода температуры за последние десятилетия, полученные в результате обработки лидарных наблюдений, измерений с помощью метеорологических ракет и радиозондов. Анализу этих данных посвящены работы [1–10].

На высотах стратосферы и мезосферы обнаружен отрицательный тренд температуры, который, в общем, сменяется потеплением на больших высотах. Экспериментальные данные [1–4] об изменении температуры стратосферы и мезосферы в диапазоне высот 25–75 км за достаточно длительные промежутки времени (1964–1988 гг.) были получены с помощью метеорологических ракет. Для средней и верхней мезосферы оценки отрицательного тренда температуры достигали 10 К в декаду. Об охлаждении мезосферы (ниже 80 км) свидетельствовали и измерения высоты отражения радиоволн в области D ионосферы, проводившиеся в 1959–1986 гг. [5, 6], причем скорость охлаждения составляла около 2 К в декаду.

В [7, 8] изменчивость температуры средней атмосферы и ее долговременные тенденции изучались с помощью базы данных, полученной на французском рэлеевском лидаре на 44° с.ш. с 1979 г. и на натриевом лидаре в Колорадо. Тенденции изменения температуры, полученные в этих двух группах

работ, примерно совпадают. Интервал исследуемых высот — 35–80 км, максимальное похолодание отмечено на высотах 60–70 км и составляет около 4,5 К в декаду. Температурные тренды в тропосфере на основе базового аэрологического массива CARDS [9] изучались с помощью реанализа в [10].

В литературе также имеются модельные расчеты с учетом изменения содержания поглощающих веществ, результаты которых можно сравнивать с экспериментальными трендами температуры. Охлаждение стратосферы и потепление тропосферы обнаруживаются в ряде расчетов при увеличении содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере, например в [11, 12], с помощью трехмерной модели общей циркуляции с удвоением CO<sub>2</sub>. Однако численные значения трендов довольно сильно отличаются в разных работах и, как правило, недостаточны, чтобы объяснить количественно наблюдавшееся похолодание.

Потепление же мезосферы обнаруживается лишь в немногих расчетных работах. Так, в [7] потепление объясняется наличием аэрозоля после извержения Пинатубо. В [11] небольшое потепление вблизи северной стратопазы появляется при удвоении CO<sub>2</sub>. Уменьшение концентрации озона также может вызвать похолодание стратосферы и мезосферы. В [11] использовали упрощенную модель общей циркуляции с высотой до 90 км и с уменьшением концентрации озона 5% в декаду получили максимальное похолодание на высоте около 60 км величиной около 3 К в декаду. В [13] считается, что тренды в концентрациях парниковых газов являются не единственной (и, вероятно, не главной) причиной наблюдаемого выхолаживания в мезосфере и нижней термосфере и для объяснения величин температурных трендов следует учитывать эффект гравитационных волн.

В работе Володина [14] проведены расчеты по модели общей циркуляции атмосферы (МОЦА) ИВМ РАН тенденций изменения температуры до высот 90 км при увеличении CO<sub>2</sub> на 5% в декаду

и уменьшении озона на 5% в декаду. Аэрозоли извержения не учитывались. Модельные данные зонально осреднены и сравниваются с данными, полученными с помощью французского лидара [7]. Полученное похолодание в стратосфере и потепление в мезосфере количественно согласуются с экспериментальными значениями. Значения температурных трендов в большей степени обусловлены изменением  $O_3$ , чем  $CO_2$ , хотя имеют одинаковые тенденции.

Модели общей циркуляции сложны, включают многие процессы, и в их рамках трудно сказать, в какой мере изменение температуры является следствием динамики, радиации или других причин. Если мы хотим узнать, какой физический процесс является преобладающим в формировании того или иного климатического отклика, логично прибегнуть к специально выбранным простым моделям. Ранее нами была сформулирована простая одномерная радиационная модель высотного хода температуры для качественного исследования влияния вариаций поглощающих веществ на высотный ход температуры. В данной работе мы использовали ее для исследования температурных трендов.

### Выбор модели

Используемая модель имеет вид, традиционный для одномерных радиационных моделей для плоскопараллельной безоблачной атмосферы:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = -\frac{d}{dH}(F_T + F_S), \quad (1)$$

где  $T$  — температура атмосферы;  $F_S$  — общий поток солнечной радиации;  $F_T$  — общий поток длинноволновой радиации;  $\rho$  — плотность атмосферы;  $c_p$  — теплоемкость при постоянном давлении;  $H$  — высота. Потоки излучения в радиационной модели зависят от высоты сложным образом. Для решения приведенного уравнения атмосфера разбивается на некоторое количество слоев по высоте,  $H$  (или  $p$ ) приобретает номер слоя —  $H_i(p_i)$ , и появляется система уравнений, количество которых равно числу слоев. Вообще говоря, это система дифференциальных уравнений для температур слоев, и вертикальный профиль температуры получается, таким образом, как результат решения системы уравнений для температур атмосферных слоев. Радиационные потоки традиционно выражаются через функции Планка для отдельных слоев и через соответствующие функции пропускания.

Отличительные черты нашей модели [15,16] заключаются в том, что зависимость от температуры функций Планка записывается в явном виде, благодаря чему уравнения модели становятся обыкновенными автономными дифференциальными уравнениями для температур слоев. Стационарное состояние, получающееся в результате решения системы уравнений, представляет собой высотный профиль температуры.

В качестве поглощающих веществ рассматриваются основные поглощающие газы в атмосфере —  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $O_3$ . Частотные интервалы, в которых

учитывается поглощение этими газами солнечного и теплового излучения, показаны в таблице.

Спектральные интервалы, используемые в расчетах

Солнечное излучение			
$H_2O$		$O_3$	
1000–14286 $cm^{-1}$		14286–57143 $cm^{-1}$	
10000–700 нм		700–175 нм	
Тепловое излучение			
$H_2O$	$H_2O$ cont	$CO_2$	$O_3$
0–3000 $cm^{-1}$	540–1380 $cm^{-1}$	540–800 $cm^{-1}$	980–1100 $cm^{-1}$
... – 3330 нм	18520–7250 нм	18520–12500 нм	10200–9090 нм

Потоки излучения считаются в модели по аппроксимационным формулам для функций пропускания водяного пара, углекислого газа и озона, полученным Chou с сотр. для коротковолнового и длинноволнового диапазонов [17–19]. Так как в модели не учитывается конвекция, температурный ход вблизи поверхности не рассматривается. Что касается стратосферы и мезосферы, то здесь модель, несмотря на сделанные приближения, — это, в основном, пренебрежение температурной зависимостью функций пропускания в процессе решения, — обеспечивает достаточно реалистичное поведение температуры с высотой, что следует из сравнения вычисленных скоростей выхолаживания с аналогичными данными других авторов. На рис. 1 приведены вычисленные скорости выхолаживания для атмосферных моделей субарктической зимы и тропического лета.

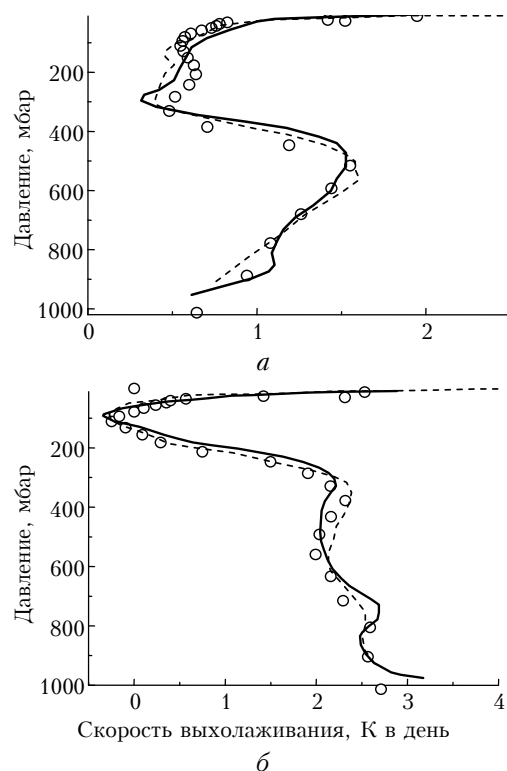


Рис. 1. Скорости ИК-выхолаживания, обусловленные поглощением  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $O_3$  и континуумом водяного пара в интервале 0–3000  $cm^{-1}$ , посчитанные для субарктической зимы (а) и для тропического лета (б): ---- расчет Галина [20]; — расчет Chou с сотр. [19]; ○ ○ ○ наш расчет

Таким образом, применяемая модель, в основном, правильно отражает известные особенности радиационного режима, обусловленные характеристиками поглощающей среды.

## Результаты расчета

Расчеты температурных трендов, проведенные с помощью нашей упрощенной одномерной радиационной модели (без динамики) с теми же вариациями  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_3$ , что и в работе Володина [14] (5%-е увеличение содержания  $\text{CO}_2$  и 5%-е уменьшение содержания  $\text{O}_3$  в стандартной атмосфере лета средних широт), дают результаты, близкие к экспериментальным данным французского лидара [7] и данным, рассчитанным по модели общей циркуляции атмосферы ИВМ РАН (рис. 2).

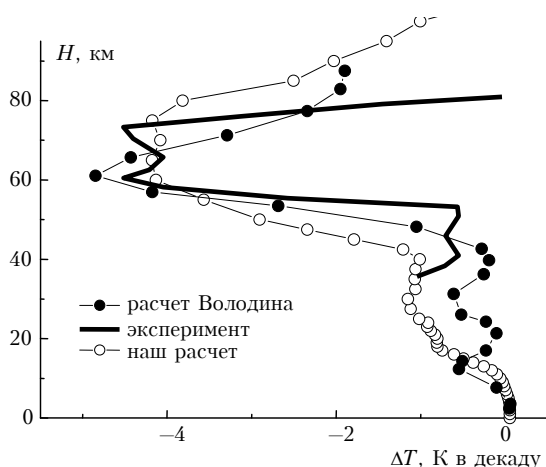


Рис. 2. Тренд температуры для высот 20–80 км по расчетам Володина [14] согласно МОЦА ИВМ с вариациями содержания  $\text{O}_3$  и  $\text{CO}_2$  (темные кружки), по расчетам согласно настоящей модели (тренд в которой есть разность температур стационарных состояний со стандартными и измененными концентрациями  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_3$ ) с теми же вариациями (светлые кружки) [16] и по данным французского лидара [7] (жирная линия)

Видно, что тенденции понижения и роста температуры и ее относительное изменение в результате изменения концентраций  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_3$  получаются те же, что и в трехмерной модели ИВМ. Близость этих результатов позволяет сделать вывод, что наблюдаемые температурные тренды обусловлены, в основном, радиационными процессами. Рассмотрим сравнение наших результатов с экспериментальными данными других работ.

В последнее время сотрудниками ЦАО опубликованы результаты анализа многолетних наблюдений высотного хода температуры с помощью метеорологических ракет [4, 21–23]. На рис. 3, б изображены их усредненные данные для четырех станций – в тропиках, в Арктике и Антарктике и в Волгограде. Сравнение этих данных с данными лидарных измерений показывает, что лидарные измерения дают значения, которые примерно вдвое ниже ракетных значений (рис. 4). К сожалению, эти данные напрямую сравнить с нашими расчетами нельзя, потому что приведенные значения ус-

реднены по сезонам, а мы ограничены в своих расчетах стандартными моделями атмосферы. Однако интересно качественное сравнение.

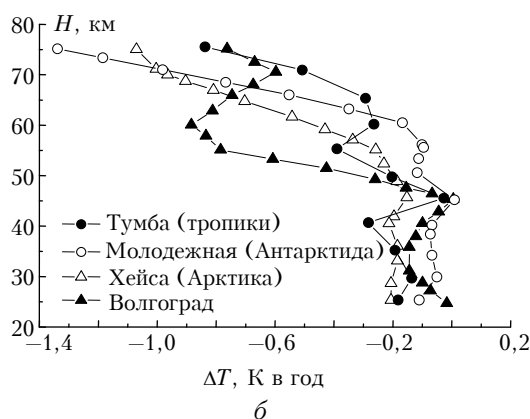
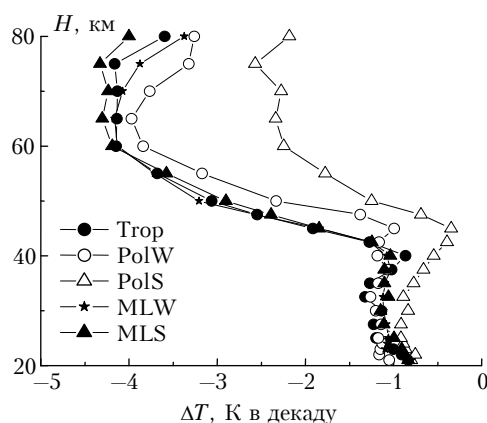


Рис. 3. Температурные тренды: а – по расчетам согласно настоящей модели для стандартных моделей атмосферы (Троп – тропики, PolW – полярная зима, PolS – полярное лето, MLW – зима средних широт, MLS – лето средних широт) с вариациями содержания  $\text{O}_3$  и  $\text{CO}_2$ ; б – данные измерений с помощью метеорологических ракет [4]

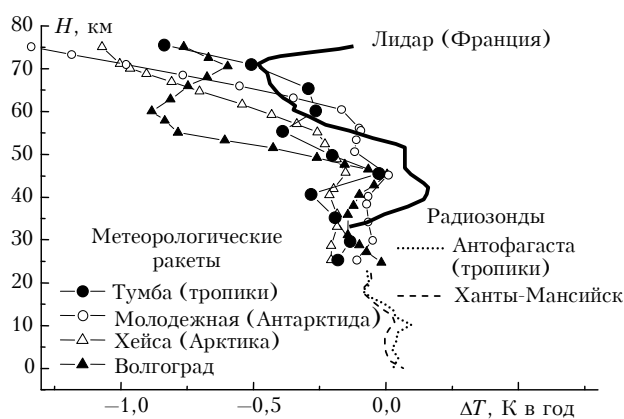


Рис. 4. Экспериментальные температурные тренды, полученные различными способами

На рис. 3, б приведены средние данные измерений с помощью метеорологических ракет и наши расчеты для стандартных моделей атмосферы (рис. 3, а). Максимум на высоте 60–70 км, характерный для лидарных данных и данных из ракет-

ных измерений в районе Волгограда, хорошо воспроизводится в модели лета средних широт. Далее, из ракетных измерений следует, что этот максимум обнаруживается на большей высоте как в тропиках, так и вблизи полюсов. Расчеты же для моделей тропического лета и арктических лета и зимы не дают такого значительного смещения максимума. Можно попытаться связать относительные различия трендов для разных стандартных моделей с количеством водяного пара в модельных атмосферах (рис. 5).

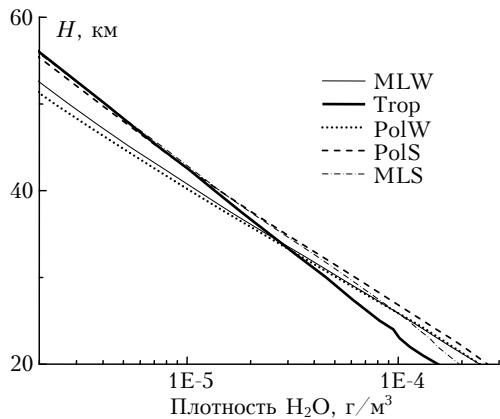


Рис. 5. Плотность водяного пара в стандартных моделях атмосферы

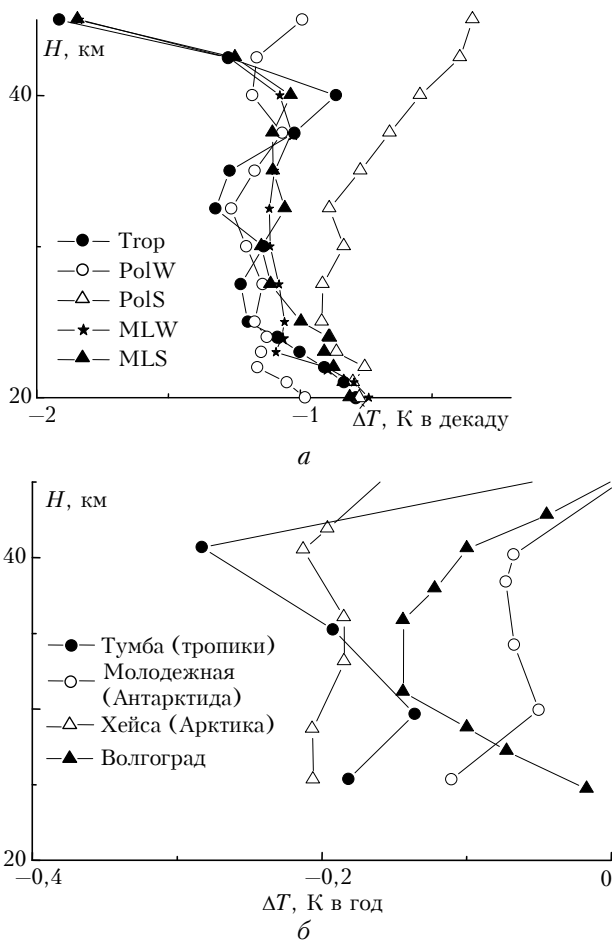


Рис. 6. Температурные тренды для высот 20–45 км (см. рис. 3)

Действительно, на высотах 50–80 км расположение кривых трендов обратно расположению кривых плотности водяного пара, где последние ведут себя регулярно. В районе 30 км и ниже кривые плотности водяного пара перепутываются, и характер поведения трендов также очень нерегулярен, хотя некоторые качественные подобиия могут быть прослежены (рис. 6).

Хотя выше уже отмечалось, что наша модель не предназначена для рассмотрения тропосферы, интересно сравнить результаты расчета с измерениями трендов температуры, полученных из аэрологических данных. Рис. 7 показывает результаты такого сравнения.

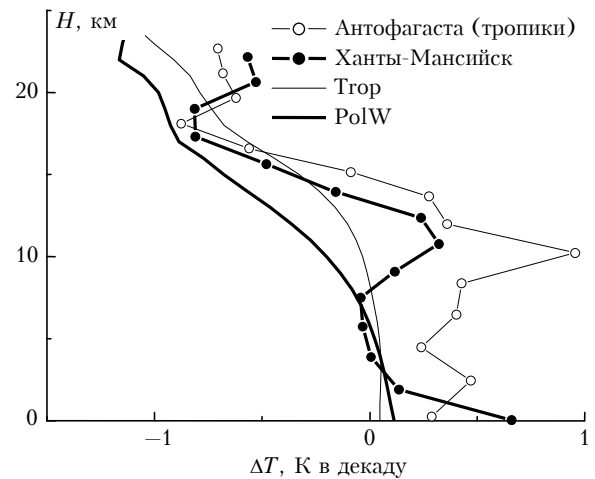


Рис. 7. Температурные тренды по расчетам согласно настоящей модели для стандартных моделей атмосферы и по данным радиозондирования [10]

### Заключение

Отметим, что от простых моделей, подобных сформулированной нами, разумеется, не следует ждать очень точного количественного согласия. Данная модель предназначена для того, чтобы иметь возможность быстрого получения высотного хода температуры для большого числа исследуемых ситуаций и тем самым — нахождения качественных особенностей поведения температуры в широкой области изменения параметров атмосферы, в качестве которых в данном случае выступают концентрации малых газовых составляющих. Согласие наших расчетных величин со значениями, полученными в трехмерных моделях общей циркуляции, говорит о том, что температурные тренды в стратосфере и нижней мезосфере имеют в основном радиационную природу и могут являться результатом изменения в атмосфере количества озона и углекислого газа.

Сравнение вычисленных на основе предложенной модели температурных трендов с экспериментальными значениями, полученными разными способами, показывает их качественное согласие на высотах стратосферы и мезосферы. Это сравнение затруднено тем обстоятельством, что в расчетах мы вынуждены пользоваться распределениями температур, давлений и концентраций для стандартных моделей атмосферы, относящихся к фиксированным

сезонам и широтам. Имеющиеся же в литературе экспериментальные данные не всегда можно соотнести с этими условиями. Дальнейшие исследования температурных трендов с помощью нашей модели, как мы надеемся, позволят выяснить более детально, какие закономерности можно связать с радиационными процессами и что явно не может быть ими объяснено.

1. Angell J.K. Rocketsonde evidence for a stratospheric temperature decrease in the Western Hemisphere during 1973–1985 // *Mon. Weather. Rev.* 1987. V. 115. P. 2569–2577.
2. Кокин Г.А., Лысенко Е.В., Розенфельд С.Х. Изменения температуры страто- и мезосферы в период 1964–1988 гг. по данным ракетного зондирования // *Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана.* 1990. Т. 26. № 7. С. 702–710.
3. Kokin G.A., Lysenko E.V. On temperature trends of the atmosphere from rocket and radiosonde data // *J. Atmos. and Terr. Phys.* 1994. V. 56. P. 1035–1040.
4. Лысенко Е.В., Нелидова Г.Г., Простова А.М. Изменения термического режима страто- и мезосферы в течение последнего 30-летия. 1. Эволюция тренда температуры // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 1997. Т. 33. № 2. С. 241–249.
5. Cossart G., Taubenheim J. Solar cycle and long-period variations of mesospheric temperatures // *J. Atmos. and Terr. Phys.* 1987. V. 49. P. 303–307.
6. Taubenheim J., von Cossart G., Entzian G. Evidence of CO<sub>2</sub>-induced progressive cooling of the middle atmosphere derived from radio observations // *Adv. Space Res.* 1990. V. 10. N 10. P. 171–174.
7. Keckhut P., Hauchecorne A., Chanin M.L. Midlatitude long-term variability of the middle atmosphere: trends and cyclic and episodic changes // *J. Geophys. Res.* D. 1995. V. 100. N 9. P. 18887–18897.
8. She C.Y., Yu J.R., Krueger D.A., Roble R., Keckhut P., Hauchecorne A., Chanin M.L. Vertical structure of the mid-latitude temperature from stratosphere to mesopause (30–105 km) // *Geophys. Res. Lett.* 1995. V. 22. P. 377–390.
9. Alduchov O.A., Eskridge R.E. Complex quality control of upper air parameters on mandatory and significant levels for the CARDS dataset // *NCDC Report.* 1996. NTISPB 97132286. 125 pp.
10. Хан В.М., Стерин А.М., Рубинштейн К.Г. Оценки трендов температуры свободной атмосферы по данным реанализа и по радиозондовым наблюдениям // *Метеорол. и гидрол.* 2003. № 12. С. 5–18.
11. Rind D., Suozzo R., Balachandran N.K., Pratcher M.J. Climate changes and the middle atmosphere. Part I: The doubled CO<sub>2</sub> climate // *J. Atmos. Sci.* 1990. V. 47. P. 475–491.
12. Bremer J., Berger U. Long term trends in meso- and lower thermosphere // *Proc. First Intern. Workshop on long-term changes and trends.* Pune. 1999.
13. Gruzdev A.N., Brasseur G.P. Simulation of long-term changes in mesospheric temperature // *Abstract of X Joint International Symposium «Atmospheric and ocean optics. Atmospheric physics».* June 24–28. 2003. Tomsk. P. 150–151.
14. Володин Е.М. Чувствительность стратосферы и мезосферы к наблюдаемому изменению концентрации озона и углекислого газа по данным модели общей циркуляции атмосферы ИВМ // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2000. Т. 36. № 5. С. 617–625.
15. Родимова О.Б. Одномерная радиационная модель с явной зависимостью от температуры // *Оптика атмосфер. и океана.* 2001. Т. 14. № 6–7. С. 485–490.
16. Несмелова Л.И., Родимова О.Б., Творогов С.Д. Изменение высотного хода температуры при вариациях концентраций поглощающих веществ // *Вычисл. технол. Спец. выпуск.* 2002. Т. 7. С. 71–77.
17. Chou M.-D., Lee K.T. Parametrizations for the absorption of solar radiation by water vapor and ozone // *J. Atmos. Sci.* 1996. V. 53. N 8. P. 1203–1208.
18. Chou M.-D. A solar radiation model for use in climate studies // *J. Atmos. Sci.* 1992. V. 49. P. 762–772.
19. Chou M.-D., Ridgway W.L., Yan M. M.-H. One-parameter scaling and exponential-sum fitting for water vapor and CO<sub>2</sub> infrared transmission functions // *J. Atmos. Sci.* 1993. V. 50. 14. P. 2294–2303.
20. Галин В.Я. Параметризация радиационных процессов в атмосферной модели ИВМ РАН // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 1998. Т. 34. № 3. С. 380–389.
21. Лысенко Е.В., Нелидова Г.Г., Простова А.М. Изменения термического режима страто- и мезосферы в течение последнего 30-летия. II. Эволюция годовых и полугодовых колебаний температуры // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 1997. Т. 33. № 2. С. 250–257.
22. Лысенко Е.В., Русина В.Я. Изменение термического режима страто- и мезосферы в течение последнего 30-летия. III. Линейные тренды среднемесячных температур // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2002. Т. 38. № 3. С. 337–346.
23. Лысенко Е.В., Русина В.Я. Изменение термического режима страто- и мезосферы в течение последнего 30-летия. IV. Тренд высоты и температуры стратопазы // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2002. Т. 38. № 3. С. 347–353.

*L.I. Nesmelova, O.B. Rodimova, S.D. Tvorogov. Trends in vertical temperature profiles in the last decades.*

A one-dimensional radiative model with the explicit temperature dependence was proposed. The comparison of our model results with the calculations by the global circulation models showed that the temperature trends observed in the past decades in the stratosphere and mesosphere are mostly of radiative nature and result from the variation of the carbon dioxide and ozone concentrations in the atmosphere. The qualitative agreement was demonstrated between the calculated temperature trends and the experimental values at the altitudes of the stratosphere and mesosphere.