

**Г.А. Жеребцов, Л.А. Васильева, В.А. Коваленко, С.И. Молодых**

## **Долговременные изменения температуры и теплосодержания тропосферы в XX в.**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск*

Поступила в редакцию 3.12.2007 г.

Представлены результаты анализа особенностей и закономерностей долговременных изменений температурного режима тропосферы в Северном и Южном полушариях, в отдельных широтных зонах и на различных изобарических поверхностях за 1948–2006 гг. Амплитуда изменений приземной температуры воздуха (ПТВ) максимальна в высокоширотных областях, как в Северном, так и в Южном полушариях и уменьшается с приближением к экватору. Потепление во второй половине XX в. началось раньше на высоких широтах в начале 60-х гг., а на низких — в середине 70-х. Для высокоширотных областей обоих полушарий потепление обусловлено, в основном, возрастанием ПТВ в холодный период. Для теплого периода на широтах выше 40° как в Северном, так и в Южном полушариях возрастания ПТВ в рассматриваемый период практически не наблюдается. В полярной области Южного полушария наблюдается падение температуры в теплый период. Для Северного полушария величина трендов с высотой уменьшается, в то время как для Южного — увеличивается. Обнаружено, что за последние 50 лет температура нижней и средней тропосферы (850–400 гПа) на средних и высоких широтах Северного полушария повышалась, в то время как верхней тропосферы (выше 400 гПа) и нижней стратосферы понижалась. Приведены результаты анализа пространственно-временных изменений теплосодержания свободной атмосферы в период 1948–2006 гг. Обсуждаются полученные результаты.

### **Введение**

В настоящее время большое внимание уделяется проблеме потепления климата на планете. Данные наблюдений показывают увеличение приземной температуры воздуха как в целом по земному шару, так и отдельно в Северном и Южном полушариях, которое характеризуется значительной пространственной неоднородностью. В ряде работ [1–4] в качестве одной из возможных причин глобального потепления рассматривается изменение уровня солнечной активности. Сравнение изменений климата и солнечной активности на больших временных масштабах показывает большое сходство в их поведении. В частности, есть основания считать, что именно с вариациями солнечной активности были связаны периоды похолоданий и потеплений, по крайней мере, в предыдущем тысячелетии. Тем не менее, несмотря на наличие достоверных, статистически значимых связей между различными индексами гелиогеофизической активности и погодно-климатическими характеристиками, вопрос: вносит ли солнечная активность значимый вклад в изменение климата, до сих пор остается дискуссионным. Поток солнечной радиации, падающей на верхнюю границу атмосферы, меняется не более чем на 0,15%, причем значительная часть изменений относится к рентгеновскому и ультрафиолетовому излучению, которые поглощаются полностью в ионосфере и стратосфере.

Таким образом, изменяющаяся часть солнечной радиации непосредственно не может обеспечить наблюдаемые изменения климата, однако может оказать влияние на параметры атмосферы, отвечающие за радиационный баланс. В соответствии с моделью влияния гелиогеофизических возмущений на параметры атмосферы, предложенной в работах [5, 6], связующим звеном между солнечной активностью и климатическими характеристиками тропосферы является атмосферное электричество. С одной стороны, параметры атмосферного электричества подвержены значительному влиянию солнечной активности в высоких широтах, с другой — оказывают значительное воздействие на распределение по высоте в тропосфере заряженных ядер конденсации и, следовательно, на формирование облачности и радиационный баланс высокоширотных областей. Изменение радиационного баланса в высоких широтах приведет к изменению меридионального градиента температуры и циркуляции в атмосфере.

Исходя из данной модели, при воздействии солнечной активности на атмосферу следует ожидать определенных особенностей в долговременных изменениях климатических характеристик:

1. Максимального отклика следует ожидать в высокоширотных областях, так как именно здесь наблюдается значительное увеличение электрического потенциала Земля–ионосфера во время гелиогеофизических возмущений.

2. Отклик будет существенно зависеть от высоты. Следует ожидать противоположность изменения температуры в нижней и верхней тропосфере.

3. Отклик должен быть наиболее выражен местной зимой, когда мал или отсутствует проходящий поток электромагнитного излучения от Солнца.

### Широтная зависимость долговременных изменений приземной температуры воздуха

На основе архива данных NCEP/NCAR Re-analysis получены поля среднесуточных значений температуры воздуха на основных изобарических поверхностях 1000, 850, 700, 500, 300, 200, 100 гПа для четырех широтных зон Северного и Южного полушарий. На этой основе проведен анализ пространственно-временных изменений температуры тропосферы за период 1948–2006 гг.

В соответствии с климатическими моделями, которые включают как естественные, так и антропогенные факторы, проявление потепления с широтой значительно различается. В частности, из глобальных климатических моделей следует, что при увеличении концентрации парниковых газов в атмосфере на начальной стадии потепления, когда в полярных областях значительная часть тепла расходуется на таяние льдов, следует ожидать наибольшего потепления в умеренных и низких широтах. В соответствии с предложенной нами моделью закономерности противоположны, т.е. в первую очередь должно наблюдаться потепление в высоких широтах с последующим распространением к низким широтам. Кроме того, максимальный рост температуры воздуха должен наблюдаться в холодный период года, когда в полярных областях мал или отсутствует проходящий коротковолновый поток солнечной радиации и появление любой облачности будет приводить к уменьшению радиационного выхолаживания ниже уровня облакообразования, т.е. к потеплению.

На рис. 1 приведены изменения приземной температуры воздуха в различных широтных зонах Северного и Южного полушарий для зимнего и летнего сезонов за период 1948–2006 гг.

Очевидно, что потепление во второй половине XX в. началось раньше на высоких широтах, а именно в начале 60-х гг., а на низких — в середине 70-х, т.е. волна потепления распространяется от высоких широт к низким, при этом рост приземной температуры воздуха в полярных широтах составил ~4–5° (для холодного периода). Амплитуда изменений ПТВ максимальна в высокоширотных областях как в Северном, так и в Южном полушариях и уменьшается с приближением к экватору. Заметим, что вариации ПТВ в полярных областях качественно соответствуют изменениям глобальной ПТВ. Если запаздывание потепления в низкоширотных областях, особенно Южного полушария, можно объяснить влиянием большой теплоемкости океана, то для средних и умеренных широт Северного полушария этот фактор проявляется незначительно.

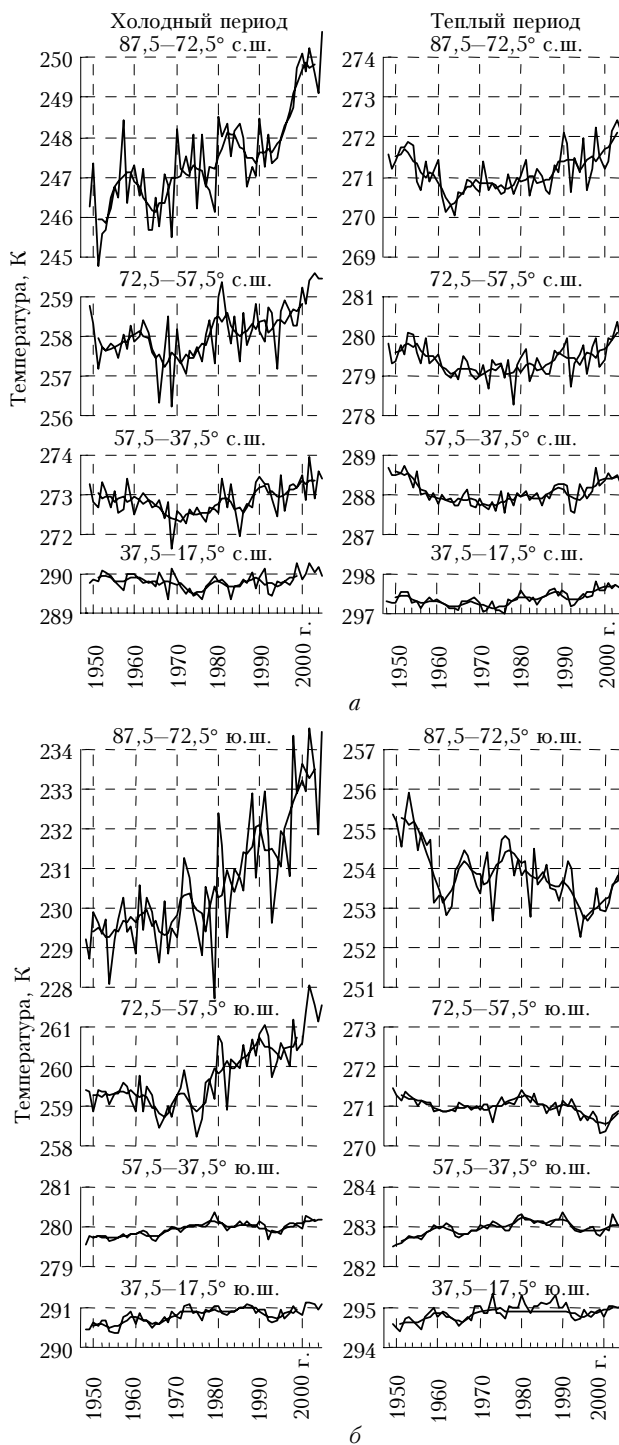


Рис. 1. Зависимость долговременных вариаций ПТВ от широты в холодный и теплый периоды: а — в Северном и б — в Южном полушариях

Очевидно, что для высокоширотных областей возрастание среднегодовой ПТВ обусловлено в основном возрастанием в холодный период. Для теплого периода на широтах выше 40° как в Северном, так и в Южном полушариях возрастания ПТВ в рассматриваемый период практически не наблюдается. Следует отметить также, что в период похолодания тропосферы Северного полушария

1950–1976 гг., наблюдавшегося на средних и низких широтах, в Южном полушарии происходило значимое возрастание температуры на низких и средних широтах.

### Особенности долговременных изменений температуры тропосферы на стандартных изобарических поверхностях

В соответствии с концепцией модели влияния солнечной активности на термобарические характеристики тропосферы [7], до высоты, на которой в высокоширотных областях формируется дополнительная облачность под влиянием солнечной и геомагнитной активности, следует ожидать положительных трендов температуры, а выше – отрицательных. В связи с этим рассмотрим закономерности высотных изменений трендов температуры воздуха в Северном и Южном полушариях.

На рис. 2 представлены вариации среднегодовой температуры и долговременные тренды на стандартных изобарических поверхностях в средних широтах Северного и Южного полушарий.

Очевидно, что, с одной стороны, наблюдается высокая степень корреляции межгодовых изменений температуры тропосферы на разных высотах,

начиная с приземного слоя (1000 гПа) до уровня 500 гПа, в то время как долговременные тренды существенно изменяются с высотой. В Северном полушарии, в период похолодания 1950–1970 гг., тренды отрицательны на всех высотах в тропосфере и уменьшаются с высотой. В период потепления (1976–2006 гг.) в полярных и средних широтах на всех изобарических поверхностях в нижней и средней тропосфере (1000–400 гПа) наблюдаются статистически значимые положительные тренды температуры, в то время как, начиная с высоты 200 гПа в Северном и с высоты 100 гПа – в Южном полушарии, тренды отрицательны. Таким образом, для рассмотренного периода в нижней и средней тропосфере в области высот от приземного слоя до 400 гПа наблюдается потепление, а в верхней тропосфере и нижней стратосфере – похолодание. В связи с этим представляет интерес рассмотреть вариации теплосодержания тропосферы.

### Зависимость долговременных изменений теплосодержания атмосферы от широты

Долговременные изменения теплосодержания тропосферы в период 1948–2006 гг. оказываются существенно различными в Северном и Южном полушариях (рис. 3).

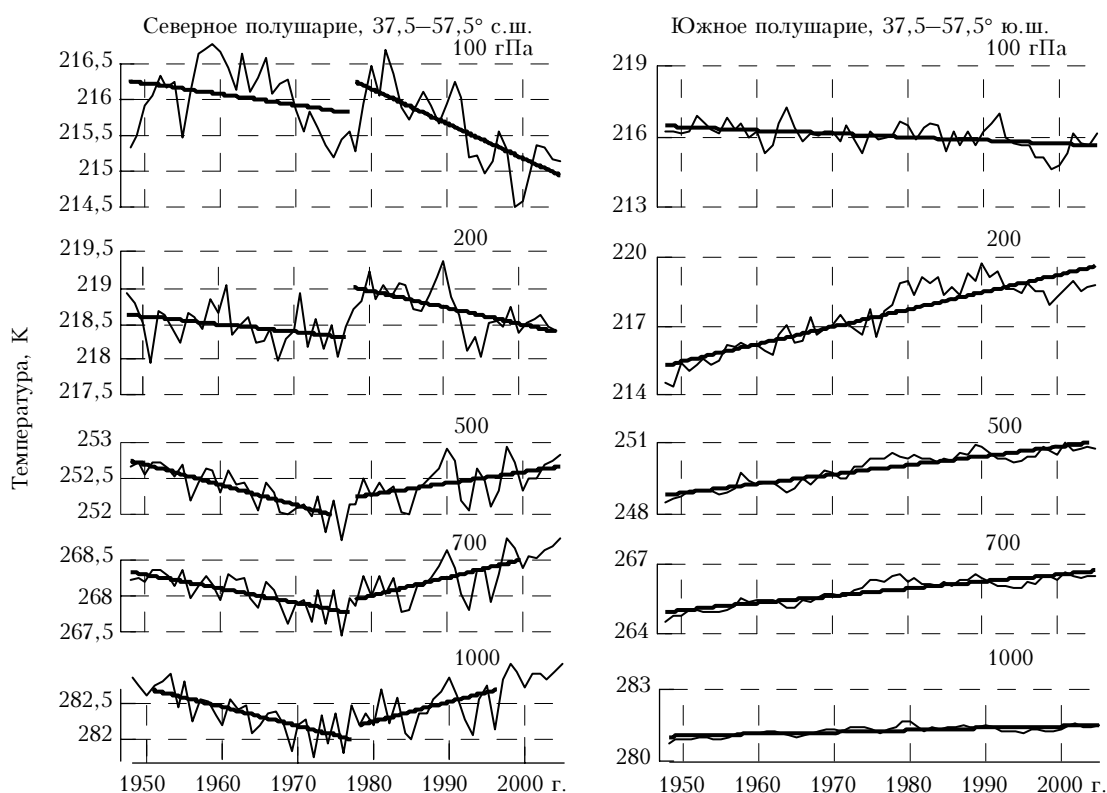


Рис. 2. Долговременные изменения температуры воздуха на стандартных изобарических поверхностях (тонкая линия) на широтах 37,5–57,5° Северного и Южного полушарий. Линейные тренды – жирные линии

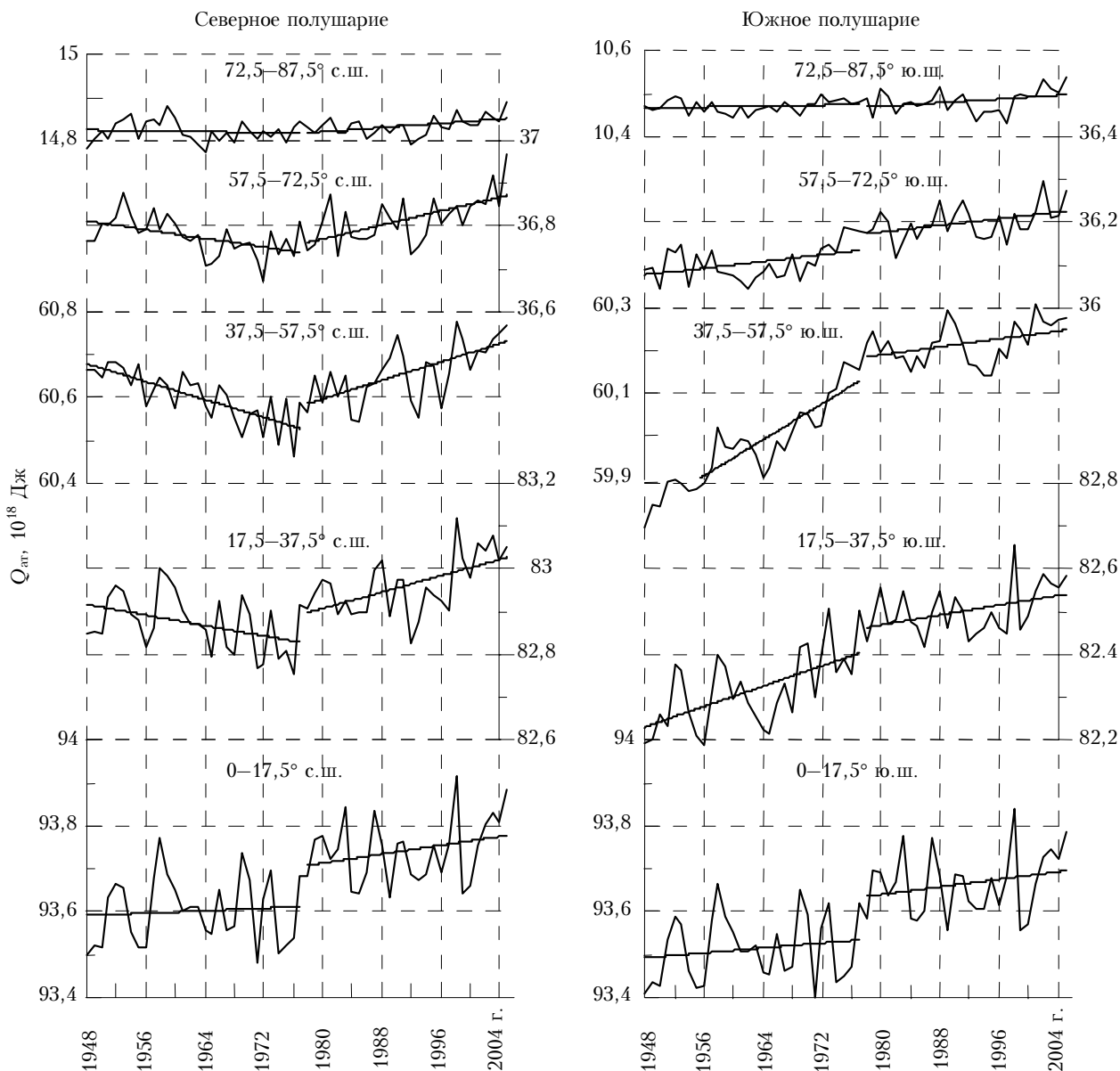


Рис. 3. Изменение теплосодержания атмосферы в слое 887–450 гПа за период 1948–2006 гг. в различных широтных зонах Северного и Южного полушарий

Теплосодержание тропосферы Северного полушария для рассматриваемого периода для всех широт оказывается больше, чем Южного. Наиболее значительные межгодовые аномалии обусловлены влиянием вулканов и явлением Эль-Ниньо – Ла-Нинья. В экваториальных областях в период 1948–1975 гг. теплосодержание тропосферы практически не изменяется. В 1976–1979 гг. наблюдается скачкообразное возрастание теплосодержания как в Северном, так и Южном полушариях с последующим небольшим увеличением вплоть до настоящего времени.

Максимальный рост температуры воздуха за последние 30 лет наблюдается в приземном слое в полярных широтах, однако изменения теплосо-

держания всего слоя тропосферы в этих областях минимальны. Максимальное увеличение теплосодержания атмосферы в слое 887–450 гПа наблюдается в низких широтах. В полярных областях значительное увеличение температуры относится в основном к нижней тропосфере, в то время как в верхней тропосфере температура понижается, т.е. происходит перераспределение тепла по высоте, без существенных изменений средней температуры и теплосодержания полярной тропосферы. В Северном полушарии в период 1948–1976 гг. на средних и высоких широтах (в период похолодания) наблюдается уменьшение теплосодержания, в то время как в Южном – возрастание, т.е. наблюдается перераспределение тепла между полушариями в этот период.

## Долговременные изменения глобального теплосодержания атмосферы

На рис. 4 представлено изменение глобального теплосодержания атмосферы в слое 850–300 гПа и среднеглобальной ПТВ за период 1948–2006 гг.

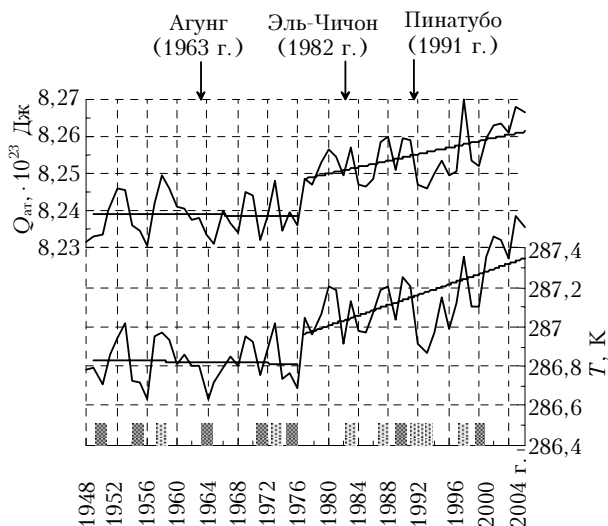


Рис. 4. Долговременные изменения теплосодержания атмосферы в слое 850–300 гПа (вверху) и приземной температуры воздуха (внизу) для всего земного шара. Стрелками указано время извержения наиболее мощных вулканов; внизу светлыми прямоугольниками – время действия Эль-Ниньо, темными – Ла-Нинья. Линии тренда проведены для периодов 1948–1977 и 1978–2006 гг.

Очевидно, что изменения теплосодержания атмосферы качественно соответствуют изменениям приземной температуры воздуха. В долговременных изменениях обеих характеристик можно выделить два промежутка времени: 1948–1976 гг., когда теплосодержание и приземная температура воздуха в целом не изменились, и после 1977 г., когда наблюдается значительный рост. В первый период теплосодержание Северного полушария уменьшалось, а Южного увеличивалось, без изменения теплосодержания тропосферы в целом. Начиная с 1977 г. и до настоящего времени происходит непрерывное увеличение теплосодержания тропосферы, которое составило  $1,4 \cdot 10^{21}$  Дж, что соответствует возрастанию средней температуры тропосферы на 0,26 К. Приземная температура воздуха увеличилась за этот период на 0,7 К. Таким образом, приземное потепление превышает тропосферное на 0,44 К.

Большое влияние на изменчивость теплосодержания тропосферы оказывают извержения вулканов, явления Эль-Ниньо, Ла-Нинья. Так, после мощных извержений вулканов Агунг в 1963 г., Эль-Чичон в 1982 г. и Пинатубо в 1991 г. теплосодержание резко уменьшилось. Максимальные значения соответствуют периодам развития явления Эль-Ниньо, минимальные – Ла-Нинья. Однако за период 1990–1995 гг., соответствующий явлению Эль-Ниньо, теплосодержание тропосферы уменьшилось, оказавшись под более сильным воздействием вулкана Пинатубо. Наибольшего значения за рассматриваемый промежуток времени теплосодержание тропосферы достигло в 1998 г., в период мощного Эль-Ниньо.

## Заключение

Амплитуда долговременных изменений приземной температуры воздуха максимальна в высокоширотных областях и уменьшается с приближением к экватору. Наибольшие возрастания ПТВ наблюдаются в зимний период года. Выявлено значительное различие долговременных трендов температуры в тропосфере и приземном слое Северного и Южного полушарий. За последние 50 лет температура нижней и средней тропосферы (850–400 гПа) повысилась, в то время как верхней тропосферы и нижней стратосферы (выше 400 гПа) понизилась. Теплосодержание тропосферы за последние 30 лет в целом не изменилось. Максимальная изменчивость и максимальные тренды теплосодержания тропосферы наблюдаются в низких и средних широтах.

Выявленные закономерности находят полное объяснение в рамках модели и механизма воздействия солнечной активности на климатические характеристики тропосферы, предложенные авторами.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 16, Программы ОНЗ РАН № 7.11.2 и проекта РФФИ № 06-05-81011-Бел\_а.

1. Мустель Э.З., Мулюкова Н.Б., Четопруд В.Е. О солнечно-тропосферном эффекте в северном и южном полушариях Земли // Научные информации. Вып. 68. Рига: Зинатне, 1990. С. 99–117.
2. Frohlich C., Lean J. The Sun's total irradiance: cycles, trends and related climate change uncertainties since 1976 // Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25. N 23. P. 4377–4380.
3. Svensmark H., Fris-Christensen E. Variations of cosmic ray flux and global cloud coverage – A missing link in solar-climate relationship // Atmos. Sol.-Terr. Phys. 1977. V. 59. N 11. P. 1225–1232.
4. Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И. Радиационный баланс атмосферы и климатические проявления солнечной переменности // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17. № 12. С. 1003–1017.
5. Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И., Рубцова О.А. Модель воздействия солнечной активности на климатические характеристики тропосферы Земли // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 12. С. 1042–1050.

6. Zhrebtsov G.A., Kovalenko V.A., Molodykh S.I. A mechanism of solar variability effect on radiative balance of the Earth atmosphere // Chin. J. Space Sci. 2005. V. 25. N 5. P. 444–454.

7. Zhrebtsov G.A., Kovalenko V.A., Molodykh S.I. The physical mechanism of the solar variability influence on electrical and climatic characteristics of the troposphere // Adv. Space Res. 2005. V. 35. N 8. P. 1472–1479.

*G.A. Zhrebtsov, L.A. Vasil'eva, V.A. Kovalenko, S.I. Molodykh.* **Long-term change of the troposphere temperature and heat content in the 20<sup>th</sup> century.**

The analysis results are presented of peculiarities and regularities of long-term changes of the troposphere temperature conditions in northern and southern hemispheres within separate longitudinal zones and at different isobaric surfaces for 1950–2006. The amplitude of the air surface temperature (ST) changes is maximal in high-latitude regions in both northern and southern hemispheres, and decreases toward the equator. The warming in the second half of the 20<sup>th</sup> century began earlier in high latitudes in the early 1960s and in the lower ones in the middle of 70s. ST positive anomaly is maximal in polar regions of both northern and southern hemispheres and has not reached its maximum yet apparently. For the high-latitude regions of both hemispheres, the warming is resulted from increasing ST in the cold period in general. In the warm period in latitudes above 40° in both northern and southern hemispheres, ST increase can hardly ever be observed. Moreover, the temperature fall is observed in the warm period in southern hemisphere polar region.

It has been found that for the last 50 years the lower and middle troposphere temperature (850–400 hPa) has increased in the middle and high latitudes of northern hemisphere, while in the upper troposphere (over 400 hPa) and in the lower stratosphere it has decreased.

The analysis results are given of space-time variations of the open atmosphere heat content for 1948–2006. The obtained results are discussed.