

# ПРОБЛЕМЫ ЭМПИРИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ СВОБОДНОЙ АТМОСФЕРЫ\*

А. М. СТЕРИН

*Всероссийский НИИ гидрометеорологической информации —  
Мировой центр данных, Обнинск, Россия*  
e-mail: [sterin@meteo.ru](mailto:sterin@meteo.ru)

Some problems of empirical and statistical analysis of the upper-air temperature climate changes are discussed. Several of the existing time series of upper-air temperature anomalies, based both on the radiosonde data and on the satellite data, are discussed and compared. The main attention is given to the study of early 21 century upper-air temperature changes' influence on the long period trends in the time series. For this study, the time series ending in 1998, are compared with those ending in 2005. Both traditional statistical parameters of the time series, and their robust analogs, are provided. The cases when the time series extension through 21 century is affecting the numerical estimates of long-period changes in the upper-air temperature, are discussed.

## Введение

Наличие данных регулярных радиозондовых наблюдений, проводящихся на глобальной сети станций уже более 50 лет, позволяет осуществлять оценку долгопериодных изменений климата атмосферы в слое до 30 км, в первую очередь температуры. Интерес к использованию для этих целей именно эмпирических данных, как радиозондовых, так и спутниковых, не ослабевает, несмотря на появление в последние годы выходных массивов реанализов [1, 2] и большого числа модельных результатов. Обнаруженные в середине 90-х годов 20 в. расхождения в значениях трендов при сравнении рядов температуры тропосферы и приземной температуры вызвали активную дискуссию о их возможных причинах (см., например, [3]). При поиске объяснений этих расхождений уделено значительное внимание способам обработки и обобщения исходных данных при получении рядов [3–6]. Предприняты попытки обнаружения и устранения неоднородностей в рядах температуры атмосферы, однако в полной мере эта задача как для рядов радиозондовых, так и для спутниковых данных не решена [7].

---

\*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 04-05-64681) и совместного проекта Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Калужской области (№ 04-05-97207).

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2006.

Как наиболее полное сопоставление рядов отметим выполненное в работе [8]. Выводы его сводятся к тому, что для оценок трендов целесообразно учитывать сразу несколько независимо полученных разными авторами и различными методами рядов. В то же время для оценок других крупномасштабных климатических сигналов в атмосфере, таких как Эль-Ниньо — Южное Колебание, квазидвухлетняя цикличность в стратосфере, стратосферные потепления после извержений вулканов, скачкообразное потепление в тропосфере в 1976–1977 гг., достаточно ограничиться одним из имеющихся рядов.

Большинство сопоставительных оценок долгопериодных изменений температуры в атмосфере получены по рядам, оканчивающимся в 90-е годы 20 столетия (не позднее 1998 г.), т. е. момент окончания рядов чаще всего приходился на период наиболее оживленных дискуссий о причинах расхождения трендов. Между тем для температуры в свободной атмосфере в условиях ограниченности длин рядов выбор начала и окончания ряда играет значительную роль [5] и добавление данных даже одного-двух лет к рядам может повлиять на оценки трендов по ним [6, 9].

В настоящий момент имеется возможность пополнять ряды температуры тропосферы и нижней стратосферы, включая данные за первую половину первого десятилетия 21 в. В этой связи необходимо учитывать следующее. Во-первых, вторая половина 90-х годов прошлого века и начало нынешнего века ознаменовались многими ставшими рекордными для климатологии приземной температуры аномалиями (например, экстремально жаркое лето 2003 г. в Западной Европе), и можно предположить, что подобные рекордные аномалии имели место в последние годы и для температуры в свободной атмосфере. Во-вторых, поскольку имеющиеся ряды температуры для свободной атмосферы существенно короче рядов для приземной температуры, можно предположить, что пополнение рядов по свободной атмосфере данными за последние годы может повлиять на их статистические свойства, в том числе на оценки трендов. Отметим, что для рядов спутниковых данных, начинающихся с 1979 г., их пополнение за период 1999–2005 гг. означает их удлинение приблизительно на треть.

В работе перечисляются некоторые важнейшие задачи эмпирико-статистического анализа рядов температуры в свободной атмосфере. Основное внимание уделено оценкам статистических свойств рядов аномалий температуры в тропосфере и в нижней стратосфере за более длительный по сравнению с ранее проводившимися исследованиями период (по сентябрь 2005 г. включительно) и сравнению со статистическими свойствами соответствующих рядов, оканчивающихся в 1998 г.

## **1. Актуальные проблемы эмпирико-статистического анализа климатических изменений температуры в свободной атмосфере**

Ниже рассмотрены некоторые наиболее актуальные в настоящее время проблемы эмпирико-статистического анализа климатических изменений температуры в свободной атмосфере. Отметим, что приводимые сведения отражают лишь взгляд автора на приоритетность проблем и пути их решения.

*Организация наблюдений и регулярное пополнение рядов данными текущего мониторинга.* Несмотря на то что радиозондовые наблюдения имеют главной целью обеспечение оперативных прогнозов погоды, их использование для климатических целей не имеет аль-

тернатив. Между тем анализ поступления оперативных данных радиозондирования с глобальной сети, направляемых в архивы и затем используемых для целей анализа климата, позволяет отметить как минимум три серьезные проблемы:

- недостаточная освещенность наблюдениями ряда территорий, в первую очередь территорий стран Африки и Латинской Америки;
- нерегулярность поступления данных и наличие значительных временных пропусков;
- недостаточная высота потолка полетов радиозондов, затрудняющая использование данных для анализа климата нижней стратосферы.

Значительные временные пропуски делают затруднительным формирование непрерывных временных рядов постанционных данных и требуют специальных компромиссных решений по обобщению данных, чтобы обеспечить в реальных условиях возможности климатологического анализа. На территории Российской Федерации значительные временные пропуски в радиозондировании имели место в 90-е годы в связи с известными экономическими трудностями. В начале 21 в. наблюдается целенаправленное улучшение ситуации с работой сети радиозондирования в РФ, восстанавливаются ранее приостановившие работу станции. К сожалению, недостаточная высота потолка полетов радиозондов для станций РФ все еще создает проблемы при использовании данных для анализа климата нижней стратосферы.

*Обнаружение и устранение неоднородностей* — одна из центральных проблем аэроклиматологии, к сожалению, еще далекая от решения. Имеется множество методов обнаружения и устранения неоднородностей в климатических рядах, однако большинство из них применимы только для рядов метеовеличин у поверхности земли и не могут быть применены к климатическим рядам для свободной атмосферы. Последние имеют специфические черты, обзор которых приведен, например, в [4]. Ряд методов, применяемых для обнаружения неоднородностей в рядах температуры свободной атмосферы, получаемых на основе радиозондовых данных, основан на совместном использовании радиозондовых и спутниковых данных. Сопоставление существующих методов, выполненное в рамках специального семинара в НЦКД США, Ашвилл, в 2000 г., дало результаты, значительно различающиеся у авторов различных методов, что, безусловно, малоутешительно [7].

Трудности в обнаружении и устранении неоднородностей в климатических рядах температуры в свободной атмосфере состоят помимо других причин в том, что используемые разными авторами процедуры сочетают как формальные (алгоритмизируемые и воспроизводимые другими исследователями этапы), так и неформальные решения, требующие вмешательства человека и не воспроизводимые другими исследователями. Тем не менее ряд методов обнаружения неоднородностей и их устранения в климатических рядах температуры в атмосфере разработан и используется для построения рядов, в частности, в Хедли Центре (Великобритания) [10], в США [11, 12]. Необходимая осторожность в использовании этих методов связана с тем, что из-за высокой естественной изменчивости температуры в свободной атмосфере и специфики процедур могут быть ошибочно интерпретированы (и устранены) как неоднородности действительно имевшие место скачкообразные изменения в рядах.

*Выбор техники статистического анализа* становится актуальной проблемой для исследований, поскольку ряды температуры в свободной атмосфере имеют короткий период и содержат значительные аномалии вблизи концов ряда, что может повлиять на оценки трендов. Наряду с традиционными методами анализа трендов (метод наименьших квадратов — МНК), целесообразно применять менее чувствительные к выбросам робастные (как это делается в данной работе) и непараметрические методы. Обзор этих методов (далеко

не полный) дан в статье Ланзанте [13], а результаты их использования применительно к рядам температуры в тропосфере содержатся в [5].

*Проблема существования долгопериодных тенденций к изменению (трендов) в характеристиках внутримесячной и внутрисезонной variability климата является одной из ключевых в климатологии, она естественно становится продолжением исследований трендов в рядах таких характеристик, как средние месячные значения метеовеличин или месячные аномалии. Эта проблема связана с вопросом о том, становится ли климат более экстремальным и более variabельным. (Вопрос об этом в качестве одного из основных ставился во Втором (1995 г.) и в Третьем (2001 г.) обзорных докладах МГЭИК.) В большей степени эта проблема решается для характеристик приземного климата, хотя ее актуальность и для параметров климата свободной атмосферы не вызывает сомнения в связи с очевидным воздействием изменений циркуляционных процессов на климатическую систему. Для свободной атмосферы существуют лишь несколько публикаций, посвященных этой проблеме (в частности, [14]). Более детальному обсуждению проблемы посвящена отдельная статья настоящего выпуска.*

## 2. Используемые данные и методы анализа

В работе рассматриваются только те ряды аномалий температуры в свободной атмосфере, которые регулярно пополняются. Выходные массивы проектов реанализа, часто используемые для климатических исследований, не принимаются во внимание, поскольку данными считаться не могут. Оценки пределов их применимости для анализа долгопериодных трендов температуры в атмосфере содержатся, например, в [2].

Для удобства вводятся следующие обозначения.

А. Ряды месячных аномалий температуры тропосферы и нижней стратосферы, полученные на основании обработки радиозондовых данных глобальной сети наблюдений, выполненной во ВНИИГМИ-МЦД, и регулярно пополняемые текущими аэрологическими данными, собираемыми с каналов связи (массив АЭРОСТАБ), в дальнейшем обозначаются так:

$RIH_T$  (XX, BBBB, EEEE) — для аномалий температуры тропосферы слоя 850... 300 гПа;

$RIH_S$  (XX, BBBB, EEEE) — для аномалий температуры нижней стратосферы слоя 100... 50 гПа.

Здесь и далее BBBB — четыре цифры означают начальный, а EEEE — соответственно конечный годы рассматриваемого ряда, XX — аббревиатура, принимающая значения: GL — ряды глобальных аномалий, NH и SH — ряды аномалий для Северного и Южного полушарий соответственно, например:  $RIH_T$  (GL, 1979, 1998) — полученный во ВНИИГМИ-МЦД ряд аномалий температуры тропосферы за период с 1979 по 1998 г. включительно для земного шара.

Рассматриваются также ряды аномалий температуры, полученные на основе данных микроволнового зондирования атмосферы с искусственного спутника Земли NOAA.

Б.  $UAH_T$  (XX, BBBB, EEEE) и  $UAH_S$  (XX, BBBB, EEEE) — ряды, полученные в Университете штата Алабама в Хантсвилле (University of Alabama, Huntsville). Ряды UAH вычисляются по методикам, предложенным Р. Спенсером и Дж. Кристи в ряде работ [15, 16]. В данной работе рассматривается последняя версия LT 5.2 для тропосферы и LS 5.2 для нижней стратосферы. Ряды UAH могут быть загружены с адресов в Интернете:

[vortex.nsstc.uah.edu/data/msu/](http://vortex.nsstc.uah.edu/data/msu/)

[www.nsstc.uah.edu/data/msu/](http://www.nsstc.uah.edu/data/msu/)

$RSS_T$  (XX, BBBB, EEEE) и  $RSS_S$  (XX, BBBB, EEEE) — ряды, полученные во ВНИИГМИ-МЦД пространственным обобщением сеточных данных месячных аномалий температуры. Сеточные данные, в свою очередь, получены в Remote Sensing Systems, Inc. (RSS), Мирсом с соавторами [17] также на основе данных микроволнового зондирования атмосферы с искусственного спутника Земли NOAA, но с использованием других схем обработки. Известно [8], что ряды RSS демонстрировали больший положительный тренд температуры в тропосфере, чем ряды УАН, что объяснялось рядом различий в методиках обобщения данных, методиках учета смен спутников и приборов, а также в весовых функциях вертикального обобщения.

Ряды RSS доступны по адресам:

<http://www.ssmi.com/msu/data/>

<ftp://ftp.ssmi.com/msu/data/>

Весовые функции для вертикального осреднения при получении рядов RSS доступны по адресу: [ftp://ftp.ssmi.com/msu/weighting\\_functions/](ftp://ftp.ssmi.com/msu/weighting_functions/). В данной работе использованы ряды аномалий температуры в узлах сетки версии 02.1.

Г. Для тропосферы представляет интерес сопоставление ее температуры с приземной температурой. В сопоставлении использованы ряды аномалий приземной температуры, полученные Ф. Джонсом с соавторами, обозначаемые  $JON_{LS}$  (XX, BBBB, EEEE), где индекс LS означает Land Surface. Эти ряды доступны в Интернет по адресам:

<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>

<ftp://ftp.cru.uea.ac.uk/cru/data/>

Для единообразия оценок там, где это необходимо, ряды при расчете аномалий приведены к единому базовому периоду 1981–2000 гг.

Среди других источников рядов температуры в свободной атмосфере, не использованных в данной работе, отметим полученные Ланзанте с соавторами [11] ряды по так называемому LKS-подмножеству станций, и ряды, полученные Торне с соавторами [10] в Метеослужбе Великобритании (HadAT-ряды).

Ограниченность длины рассматриваемых рядов и чувствительность традиционных статистических оценок к свойствам рядов вблизи их начала и окончания делают целесообразным рассмотрение робастных (устойчивых) оценок статистических свойств рядов. В качестве меры связи между рядами, наряду с традиционным коэффициентом корреляции Пирсона, используется коэффициент ранговой корреляции Спирмена. Для оценки трендов, наряду с традиционными оценками метода наименьших квадратов, стандартные ошибки которых оцениваются с учетом связности рядов, рассматриваются оценки трендов, полученные четырьмя различными методами робастного регрессионного анализа:

**М-метод** предполагает минимизацию вместо традиционного МНК функционала, минимизацию суммы менее быстро по сравнению с квадратичной функцией возрастающих функций от невязок (так называемые М-оценки Хубера [18, 19]). Используется, в частности, функция биквадрата Тьюки.

**LTS-метод** (известный в отечественной литературе как метод УНК — усеченных наименьших квадратов) предполагает, что организовывается двухэтапная процедура минимизации, а именно на первом этапе решается обычная задача нахождения МНК-регрессии, после чего  $n$  значений квадратов остатков упорядочиваются по возрастанию. На втором этапе отбираются только  $h$  точек, соответствующих  $h$  наименьшим значениям квадратов остатков, и строится обычная МНК-оценка по отобраным  $h$  точкам ряда.

**S-метод** предполагает нахождение решения, минимизирующего дисперсию специально сконструированного функционала.

**ММ-метод** сочетает достоинства перечисленных выше методов (высокий порог нечувствительности (робастности) и эффективность оценки) и состоит из нескольких шагов (итераций), предусматривающих: а) вначале получение LTS-оценки, обладающей высоким порогом чувствительности; б) нахождение оценки, минимизирующей специально сконструированный функционал; в) нахождение локально улучшенной оценки с использованием алгоритма, примененного в М-методе [20].

### 3. Результаты и их анализ

В табл. 1 содержатся результаты расчетов коэффициентов корреляции между соответствующими рядами месячных аномалий температуры тропосферы и рядами аномалий приземной температуры, а также рядами аномалий температуры нижней стратосферы за периоды 1979–1998 и 1979–2005 гг. Приводятся как корреляции Пирсона, так и менее чувствительные к выбросам ранговые корреляции Спирмэна, позволяющие оценить меру сходства упорядоченности значений аномалий в рядах.

Т а б л и ц а 1. Коэффициенты корреляции Пирсона и Спирмэна между рядами аномалий температуры тропосферы и нижней стратосферы для земного шара и приземной температуры. Выше диагонали — коэффициенты корреляции Пирсона. Ниже диагонали — коэффициенты корреляции Спирмэна

А. Тропосфера, земной шар, ряды за период январь 1979 — декабрь 1998 гг.				
Ряд наблюдений	$RIH_T$ (GL, 1979, 1998)	$JON_T$ (GL, 1979, 1998)	$UAH_T$ (GL, 1979, 1998)	$RSS_T$ (GL, 1979, 1998)
$RIH_T$ (GL, 1979, 1998)	—	0.57	0.87	0.74
$JON_T$ (GL, 1979, 1998)	0.49	—	0.73	0.81
$UAH_T$ (GL, 1979, 1998)	0.84	0.67	—	0.95
$RSS_T$ (GL, 1979, 1998)	0.74	0.78	0.92	—
Б. Тропосфера, земной шар, ряды за период январь 1979 — сентябрь 2005 гг.				
Ряд наблюдений	$RIH_T$ (GL, 1979, 2005)	$JON_T$ (GL, 1979, 2005)	$UAH_T$ (GL, 1979, 2005)	$RSS_T$ (GL, 1979, 2005)
$RIH_T$ (GL, 1979, 2005)	—	0.57	0.85	0.77
$JON_T$ (GL, 1979, 2005)	0.53	—	0.77	0.85
$UAH_T$ (GL, 1979, 2005)	0.83	0.73	—	0.95
$RSS_T$ (GL, 1979, 2005)	0.74	0.84	0.93	—
В. Нижняя стратосфера, земной шар, ряды за период январь 1979 — декабрь 1998 гг.				
Ряд наблюдений	$RIH_S$ (GL, 1979, 1998)	$UAH_S$ (GL, 1979, 1998)	$RSS_S$ (GL, 1979, 1998)	
$RIH_S$ (GL, 1979, 1998)	—	0.92	0.88	
$UAH_S$ (GL, 1979, 1998)	0.92	—	0.98	
$RSS_S$ (GL, 1979, 1998)	0.90	0.98	—	
Г. Нижняя стратосфера, земной шар, ряды за период январь 1979 — сентябрь 2005 гг.				
Ряд наблюдений	$RIH_S$ (GL, 1979, 1998)	$UAH_S$ (GL, 1979, 1998)	$RSS_S$ (GL, 1979, 1998)	
$RIH_S$ (GL, 1979, 2005)	—	0.91	0.86	
$UAH_S$ (GL, 1979, 2005)	0.91	—	0.98	
$RSS_S$ (GL, 1979, 2005)	0.86	0.96	—	

Анализ приведенных в табл. 1 данных показывает, что коэффициенты корреляции Пирсона практически во всех расчетах оказываются несколько выше, чем коэффициенты корреляции Спирмэна.

Добавление к рядам, начинающимся с 1979 г., периода с 1999 г. по сентябрь 2005 г. как для глобальной тропосферы, так и для глобальной нижней стратосферы не вносит сколько-нибудь существенных изменений в значения коэффициентов корреляции.

Для тропосферы ряды, полученные по радиозондовым данным, имеют наименьшие значения коэффициентов корреляции с рядами приземной температуры, что может быть объяснено как тем, что рассматриваются ряды физически различных характеристик, так и различиями в географическом распределении сети станций, по которым оба этих ряда получены. Ряды UAH и RSS (оба получены по спутниковым данным) имеют наиболее высокие коэффициенты корреляции (для всех вариантов расчетов превышающие 0.92). Ряды, полученные по радиозондовым данным, имеют более высокие корреляции с полученными по спутниковым данным рядами UAH, чем с рядами RSS. В то же время для рядов приземной температуры наблюдается обратная картина: они лучше коррелируют с рядами RSS, чем с рядами UAH. Ряды UAH лучше коррелируют с рядами ВНИИГМИ-МЦД, полученными по радиозондовым данным, чем с рядами приземной температуры.

Для нижней стратосферы корреляции рядов, полученных по радиозондовым данным, выше с полученными по спутниковым данным рядами UAH, чем с рядами RSS. Корреляции же между рядами UAH и RSS для нижней стратосферы близки к 1, поскольку значительных различий в методиках обработки данных канала четырехмикроволнового зонда, используемых для получения этих рядов, в методиках UAH и RSS нет.

Качественно подобная картина получена при анализе коэффициентов корреляции для соответствующих рядов по Северному и Южному полушариям (в данной работе результаты не приводятся). При этом коэффициенты корреляции рядов, полученных во ВНИИГМИ-МЦД по радиозондовым данным, с другими рядами для Северного полушария оказываются несколько выше, чем для земного шара в целом, а для Южного — несколько ниже, что может быть объяснено значительно более густой и лучше функционирующей в Северном полушарии сетью радиозондирования.

В табл. 2 приводятся коэффициенты корреляции Пирсона между рядами аномалий температуры тропосферы, начинающимися с 1958 г. (рядами ВНИИГМИ-МЦД), и рядами Ф. Джонса для приземной температуры. Во всех рассмотренных в табл. 2 случаях они оказываются выше для рядов, оканчивающихся в 2005 г., чем для рядов, оканчивающихся в 1998 г. Отметим также, что корреляции между рядами, начинающимися с 1958 г., существенно выше, чем между соответствующими рядами, начинающимися с 1979 г. К со-

Т а б л и ц а 2. Коэффициенты корреляции Пирсона между рядами аномалий температуры тропосферы, начинающимися с 1958 г. (ряды ВНИИГМИ-МЦД), и соответствующими рядами приземной температуры Джонса

Широтная зона, год окончания ряда	Коэффициент корреляции
Земной шар, 1998	0.74
Земной шар, 2005	0.76
Северное полушарие, 1998	0.70
Северное полушарие, 2005	0.73
Южное полушарие, 1998	0.64
Южное полушарие, 2005	0.66

жалению, отсутствие спутниковых наблюдений за период до 1979 г. не позволяет провести здесь более широкое сравнение.

В табл. 3 содержатся статистические характеристики (среднеквадратические отклонения, автокорреляции с лагом 1 месяц, значения трендов, полученные на основе различной статистической техники оценки трендов) для различных рядов месячных аномалий температуры земного шара, отличающихся как способами наблюдений и способами обработки данных, так и периодом. Наиболее заслуживающими внимания являются следующие из представленных в табл. 3 результатов.

Для тропосферы для начинающихся с 1979 г. рядов при рассмотрении рядов по 1998 г. включительно тренды оказываются близкими к нулю как для рядов ВНИИГМИ-МЦД, полученных по радиозондовым данным, так и для рядов УАН, полученных по спутниковым данным. На эту особенность обращалось внимание в [5, 8]. Для рядов же RSS, как отмечалось и ранее [17], тренды аномалий температуры в тропосфере ( $0.21\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ ) оказываются близкими к трендам в рядах глобальной приземной температуры ( $0.19\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ ).

Для рядов, заканчивающихся в 2005 г., тренд, вычисленный по данным УАН с применением традиционной техники МНК, незначимо отличен от нуля, как и соответствующий

Т а б л и ц а 3. Среднеквадратические отклонения ( $\sigma$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ), автокорреляции с лагом 1 месяц ( $\tau(1)$ ) и оцененные разными методами значения линейных трендов ( $^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ ) для рядов аномалий глобальной температуры тропосферы и нижней стратосферы, а также рядов аномалий приземной температуры

Ряд наблюдений	$\sigma$	$\tau(1)$	Тренд, $^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$				
			OLS	М	ММ	S	LTS
RIH <sub>T</sub> (GL, 1979, 1998)	0.13	0.72	0.03 (0.05)	-0.01	-0.02	-0.03	-0.04
JON <sub>T</sub> (GL, 1979, 1998)	0.17	0.72	0.19 (0.05)	0.17	0.17	0.16	0.16
UАН <sub>T</sub> (GL, 1979, 1998)	0.20	0.70	0.03 (0.06)	0.07	0.05	0.04	0.01
RSS <sub>T</sub> (GL, 1979, 1998)	0.22	0.79	0.21 (0.08)	0.16	0.14	0.14	0.14
RIH <sub>T</sub> (GL, 1979, 2005)	0.13	0.69	0.04 (0.03)	0.03	0.03	0.03	0.03
JON <sub>T</sub> (GL, 1979, 2005)	0.18	0.66	0.17 (0.03)	0.17	0.17	0.17	0.17
UАН <sub>T</sub> (GL, 1979, 2005)	0.20	0.69	0.05 (0.04)	0.12	0.11	0.11	0.14
RSS <sub>T</sub> (GL, 1979, 2005)	0.23	0.77	0.19 (0.05)	0.19	0.19	0.19	0.22
RIH <sub>S</sub> (GL, 1979, 1998)	0.33	0.88	-0.43 (0.10)	-0.44	-0.43	-0.43	-0.41
UАН <sub>S</sub> (GL, 1979, 1998)	0.50	0.81	-0.54 (0.17)	-0.57	-0.56	-0.55	-0.52
RSS <sub>S</sub> (GL, 1979, 1998)	0.45	0.96	-0.50 (0.19)	-0.44	-0.43	-0.43	-0.40
RIH <sub>S</sub> (GL, 1979, 2005)	0.39	0.86	-0.40 (0.06)	-0.40	-0.38	-0.37	-0.36
UАН <sub>S</sub> (GL, 1979, 2005)	0.49	0.81	-0.42 (0.10)	-0.40	-0.39	-0.38	-0.34
RSS <sub>S</sub> (GL, 1979, 2005)	0.43	0.95	-0.36 (0.11)	-0.29	-0.27	-0.26	-0.22
RIH <sub>T</sub> (GL, 1958, 1998)	0.14	0.76	0.05 (0.02)	0.05	0.05	0.04	0.03
JON <sub>T</sub> (GL, 1958, 1998)	0.20	0.78	0.10 (0.02)	0.10	0.10	0.10	0.08
RIH <sub>T</sub> (GL, 1958, 2005)	0.14	0.73	0.05 (0.01)	0.05	0.05	0.05	0.06
JON <sub>T</sub> (GL, 1958, 2005)	0.22	0.76	0.12 (0.02)	0.12	0.12	0.12	0.14
RIH <sub>S</sub> (GL, 1958, 1998)	0.33	0.86	-0.23 (0.03)	-0.24	-0.24	-0.24	-0.21
RIH <sub>S</sub> (GL, 1958, 2005)	0.41	0.86	-0.26 (0.03)	-0.26	-0.26	-0.26	-0.26

Примечание. OLS — метод наименьших квадратов (в скобках указана среднеквадратическая ошибка определения тренда), робастные методы определения тренда: М, ММ, S, LTS.

тренд за период 1979–1998 гг. Однако для этих же рядов использование различных методов робастной оценки трендов позволяет получить оценки в пределах  $0.11 \dots 0.14$  °C/10 лет, что представляется существенным в дискуссии о расхождении трендов приземной температуры и температуры тропосферы. Другой особенностью представленных в табл. 3 результатов является уменьшение скорости стратосферного похолодания за период 1979–2005 гг. по сравнению с периодом 1979–1998 гг. Так, для рядов УАН, оканчивающихся в 1998 и 2005 гг., скорости стратосферного похолодания (тренды), вычисленные методом наименьших квадратов, составляют  $-0.54$  и  $-0.42$  °C/10 лет соответственно. Для рядов RSS они составляют  $-0.50$  и  $-0.36$  °C/10 лет соответственно. При этом скорости стратосферного похолодания для рядов RSS, вычисленные с помощью робастных методов, ниже, чем при использовании МНК-оценок. Некоторое уменьшение скорости стратосферного похолодания для начинающихся с 1979 г. рядов при учете изменений за 1999–2005 гг. может предположительно быть связано с наметившейся в конце 90-х годов прошлого столетия — в начале текущего столетия тенденцией замедления разрушения озонового слоя (согласно некоторым оценкам, даже наблюдается восстановление озонового слоя). Необходимо отметить, что при анализе трендов рядов, начинающихся с 1958 г., скорость глобального потепления у земной поверхности существенно ниже, чем для рядов “эпохи спутниковых наблюдений” (с 1979 г.). Скорость же стратосферного похолодания, в свою очередь, для рядов, начинающихся с 1958 г., также ниже, чем для “эпохи спутниковых наблюдений”. Эффект значимого влияния удлинения периода рядов за счет дополнительного рассмотрения периода 1999–2005 гг. для рядов аномалий температуры тропосферы и нижней стратосферы, начинающихся с 1958 г., не наблюдается.

## Заключение

Несмотря на количественные различия, качественная картина долгопериодных тенденций изменений температуры в свободной атмосфере едина для рядов различного происхождения. Имеются эффекты влияния на тренды изменений, отмеченных в термическом режиме тропосферы и нижней стратосферы в последние годы. Однако качественную картину эти эффекты не изменяют, и даже после учета имевших место в последние годы изменений климата степень неопределенности представлений о долгопериодных тенденциях изменений в этих рядах еще весьма велика. В особой мере это относится к тенденциям изменений температуры в тропосфере.

Дальнейшие исследования должны учитывать перечисленные в обзорной части статьи проблемы. Крайне желательно вовлечение в сопоставление дополнительно рядов, полученных разными авторами на основе независимых методик. Значительным плюсом будущих сопоставлений являлся бы учет самых последних изменений, для чего необходимы улучшение методик и налаживание технологий мониторинга климата свободной атмосферы, а также кооперация специалистов различных стран.

## Список литературы

- [1] Рубинштейн К.Г., Стерин А.М. Сравнение результатов реанализа с аэрологическими данными // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38, № 3. С. 301–315.

- [2] ХАН В.М., СТЕРИН А.М., РУБИНШТЕЙН К.Г. Оценки трендов температуры в свободной атмосфере по данным NCAR/NCEP реанализа и по радиозондовым наблюдениям // Метеорология и гидрология. 2003. № 12. С. 5–18.
- [3] HURRELL J.W., TRENBERTH K.E. Difficulties in obtaining reliable temperature trends: reconciling the surface and satellite microwave sounding unit records // J. Climate. 5 May 1998. Vol. 11. P. 945–967.
- [4] GAFFEN D.I., SARGENT M.A., HABERMANN R.E., LANZANTE J.R. Sensitivity of tropospheric and stratospheric temperature trends to radiosonde data quality // J. Climate. 10 May 2000. Vol. 13. P. 1776–1796.
- [5] СТЕРИН А.М. О чувствительности оценок трендов температуры тропосферы и нижней стратосферы по радиозондовым данным. Ч. 1: Выбор массива данных, периода рядов и техники их анализа // Метеорология и гидрология. 2004. № 5. С. 21–36.
- [6] СТЕРИН А.М. О чувствительности оценок трендов температуры тропосферы и нижней стратосферы по радиозондовым данным. Ч. 2: обнаружение неоднородностей в рядах месячного разрешения // Метеорология и гидрология. 2004. № 6. С. 5–22.
- [7] FREE M., DURRE I., AGUILAR E. ET AL. Creating climate reference datasets // CARDS Workshop on Adjusting Radiosonde Temperature Data for Climate Monitoring / BAMS. June 2002. P. 891–899.
- [8] SEIDEL D.J., ANGELL J., CHRISTY J. ET AL. Uncertainty in signals of large-scale climate variations in radiosonde and satellite upper-air temperature datasets // J. Climate. 2004. Vol. 17, N 11. P. 2225–2240.
- [9] STERIN A.M. Variations of upper-air temperature in 1998–1999 and their effect on long period trends // Proc. 24 Annual Climate Diagnostics and Prediction Workshop. NOAA. 2000. P. 222–225.
- [10] THORNE P.W., PARKER D., TETT S.F.B. ET AL. Revisiting radiosonde upper-air temperatures from 1958 to 2002 // J. Geophys. Res. 2005. 110, D18105, doi:10.1029/2004/JD005753.
- [11] LANZANTE J., KLEIN S., SEIDEL D. Temporal homogenization of monthly radiosonde temperature data. Pt I: Methodology // J. Climate. 2003. Vol. 16, N 2. P. 224–240.
- [12] LANZANTE J., KLEIN S., SEIDEL D. Temporal homogenization of monthly radiosonde temperature data. Pt II: Trends, sensitivities and MSU comparison // J. Climate. 2003. Vol. 16, N 2. P. 241–262.
- [13] LANZANTE J.R. Resistant, robust and non-parametric techniques for the analysis of climatic data. Theory and examples, including the applications to historical radiosonde station data // Intern. J. Climatology. 1996. Vol. 16. P. 1197–1226.
- [14] ISKENDERIAN H., ROSEN R.D. Low-frequency signals in midtropospheric submonthly temperature variance // J. Climate. 2000. Vol. 13, N 13. P. 2323–2333.
- [15] SPENCER R.W., CHRISTY J.R. Precise monitoring of global temperature trends from satellites // Science. 1990. Vol. 247. P. 1558–1562.
- [16] CHRISTY J.R., SPENCER R.W., BRASWELL W.D. MSU tropospheric temperatures: dataset construction and radiosonde comparisons // J. of Atmospheric and Oceanic Technology. Sept. 2000. Vol. 17. P. 1153–1170.

- [17] MEARS C.A., SCHABEL M.C., WENTZ F.J. A reanalysis of the MSU channel 2 tropospheric temperature record // J. Climate. 2003. Vol. 16, N 22. P. 3650–3664.
- [18] HUBER P.J. Robust Statistics. N. Y.: John Wiley & Sons, Inc., 1981.
- [19] HOAGLIN D., MOSTELLER F., TUKEY J. Understanding Robust and Exploratory Data Analysis. N. Y.: John Wiley, 1983. 447 p.
- [20] YOHAI V.J. High breakdown point and high efficiency robust estimates for regression // Annals of Statistics. 1987. Vol. 15. P. 642–656.

*Поступила в редакцию 9 ноября 2006 г.*