DOI: 10.21513/2410-8758-2017-2-110-128 УДК 521.524.7

ОЦЕНКИ АНОМАЛИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ТРОПОСФЕРЕ В 2015 - 2016 ГОДАХ

А.М. Стерин[1)], *А.С. Лавров*[1, 2)]

[1)] Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД),
Россия, 249035, г. Обнинск Калужской области, ул. Королева, 6; *sterin@meteo.ru*
[2)] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., 31

Резюме. Статья посвящена вопросу о том, насколько рекордно теплыми оказались 2015 и 2016 годы в целом и их отдельные сезоны для тропосферы. Она содержит результаты оценок аномалий температуры в тропосфере в 2015 и 2016 годах, полученные во ВНИИГМИ-МЦД на основе собственных рядов данных и рядов, подготовленных в ведущих зарубежных центрах на основе радиозондовыхи спутниковых наблюдений. Оценки температуры в тропосфере в рекордно теплые для приземной температуры 2015 и 2016 годы представляют интерес для понимания процессов изменения климата и для мониторинга важнейших характеристик климатической системы. Показано, в частности, что для Земного шара в целом и для Северного полушария тропосфера в 2016 году оказалась рекордно теплой по данным из всех источников, а в 2015 – второй по величинам годовых аномалий, оцененных на основе радиозондовых данных. Приводятся детальные оценки аномалий температуры тропосферы для различных широтных зон и сезонов, различных источников данных. Оценки трендов температуры тропосферы по данным ВНИИГМИ с 1979 г. показывают, что в Северном полушарии потепление происходит в среднем на 0.15 °С за 10 лет, а в Южном полушарии – на 0.08 °С за 10 лет. Включение 2016 г. в расчеты трендов привело лишь к незначительному увеличению некоторых оценок.

Ключевые слова. Климат, температура, тропосфера, радиозондовые данные, спутниковые данные, аномалии, ранг, тренд.

ON THE ESTIMATES OF TROPOSPHERIC TEMPERATURE ANOMALIES IN 2015-2016

A.M. Sterin[1)], *A.S. Lavrov*[1), 2)]

[1)] Russian Research Institute for Hydrometeorological Information – World Data Center (RIHMI-WDC),
6 Korolyov Str., 249035, Obninsk, Kaluga region, Russia; *sterin@meteo.ru*
[2)] National Research Nuclear University “MEPhI”,
31 Kashirskoye sh., 115409, Moscow, Russia

Summary. The article discusses to what extent the whole of 2015 and 2016 and separate seasons of these years appeared to be record warm for the troposphere. It

provides estimates of troposphere temperature anomalies in 2015 and 2016 obtained by RIHMI-WDC on the basis of both time series held in RIHMI-WDC and time series prepared by lead international centers including both radiosonde and satellite data. These estimates are of interest for understanding climate change processes and for monitoring essential characteristics of climate system. In particular it is shown that on the basis of data from all sources the troposphere in 2016 appeared to be record high both for the whole of the globe and for the Northern hemisphere and 2015 ranked second in terms of troposphere temperature annual anomalies estimated on the basis of radiosonde data. Detailed estimates of troposphere temperature anomalies are given for various latitude zones, seasons and data sources. Estimates of troposphere temperature trends based on data of RIHMI-WDC starting from 1979 shows that the rate of warming in the Northern hemisphere is 0.15 °C per 10 years and in the Southern hemisphere it is 0.08 °C per 10 years. When 2016 was included into computation of trends, it resulted in the slight increase of some estimates.

Keywords. Climate, temperature, troposphere, radiosonde data, satellite data, anomalies, rank, trend.

Введение

Опубликованное Всемирной метеорологической организацией в марте 2016 г «Заявление ВМО о состоянии глобального климата в 2015 году» официально подтвердило особенность прошедшего в тот момент 2015 года как самого теплого за всю историю инструментальных наблюдений за температурой воздуха на поверхности Земного шара: «В 2015 году глобальное потепление достигло рекордных уровней в результате длительного повышения глобальных температур (вызванного, главным образом, выбросами парниковых газов в результате деятельности человека) в сочетании с последствиями развития явления Эль-Ниньо» (Заявление ВМО № 1167, 2016). Еще до выхода этого заявления о рекордной положительной аномалии приземной температуры в 2015 году утверждалось в ряде пресс-релизов, экспресс-материалов.

Детальному анализу климатических особенностей температуры на поверхности Земного шара в 2015 г после завершения этого года уже были посвящены опубликованные научные статьи, в частности, детальное исследование сотрудников ИГКЭ, и публикуемые на регулярной основе результаты мониторинга климата, оценки, получаемые международными организациями, национальными метеослужбами и ведущими отечественными и зарубежными центрами (WMO, 2016; NASA GISS, 2016). Оценки этих материалов были единодушны в том, что год 2015 как для поверхности Земного шара в целом, как и для ряда отдельных широтных зон и географических областей, оказался рекордно теплым.

Результаты мониторинга приземной температуры уже с первых месяцев наступившего 2016 года продемонстрировали, что рекорды 2015 года как самого теплого, с большой вероятностью в 2016 г. могут быть превзойдены. Первое полугодие 2016 года оказалось теплее первого полугодия 2015 года, что

и было отражено как в ряде пресс-релизов и экспресс-материалов ведущих мировых центров, так и в статье сотрудников ИГКЭ (Груза и др., 2016б). В опубликованном 14 ноября 2016 г «Предварительном Заявлении ВМО о состоянии глобального климата в 2016 году» утверждалось, что с большой вероятностью самым теплым для Земного шара за всю историю наблюдений станет именно 2016 год, и таким образом, 16 из 17 самых теплых лет будут приходиться на текущее столетие (исключение при этом составит лишь 1998 год).

Значительный интерес для понимания процессов в климатической системе, наряду с температурой на поверхности Земного шара, представляет температура в свободной атмосфере и, в частности, температура в тропосфере. На изменения и колебания температуры в тропосфере влияние оказывают как вызванные человеческой деятельностью процессы выброса парниковых газов, так и процессы в системе «океан-атмосфера» временного масштаба нескольких лет, в частности, положительные и отрицательные фазы явления Эль-Ниньо. Влияние же особенностей рельефа, свойств подстилающей поверхности на температуру в тропосфере менее значительно, чем на приземную температуру, поэтому рядом авторов (Santer et al., 2005) высказаны предположения о «меньшей зашумленности» сигнала температуры в тропосфере по сравнению с сигналом приземной температуры.

В настоящее время несколько научных групп проводят анализ изменений климата свободной атмосферы. Среди них группа из ВНИИГМИ-МЦД, в течение ряда лет осуществляющая мониторинг температуры в свободной атмосфере (тропосфере и нижней стратосфере) и использующая для этого радиозондовые данные по глобальной сети станций. Материалы этого мониторинга регулярно включаются в качестве раздела в «Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации», регулярно издаваемый Росгидрометом и доступный, в частности, по адресу: climate change.igce.ru/index.php.

Так, в изданный в начале 2016 года Доклад были включены подготовленные ВНИИГМИ-МЦД на основе радиозондовых данных оценки аномалий температуры тропосферы в 2015 году, демонстрирующие, что для глобальной тропосферы год 2015 оказался на тот момент рекордно теплым.

В ряде публикаций (Seidel, 2004) проводился сопоставительный анализ рядов температуры в атмосфере, полученных разными авторами (в том числе во ВНИИГМИ-МЦД) на основе радиозондовых и спутниковых данных. В публикуемой журналом «Метеорология и гидрология» статье авторов настоящей работы (Лавров, Стерин, 2017) содержались обновленные результаты детального сопоставления рядов аномалий температуры в тропосфере и нижней стратосфере за период до декабря 2014 г. включительно, полученные из различных источников, в том числе готовящихся во ВНИИГМИ-МЦД.

Настоящая статья посвящена вопросу о том, насколько рекордно теплыми оказались 2015 и 2016 годы для тропосферы. Она содержит результаты оценок аномалий температуры в тропосфере в 2015 и 2016 годах, полученные во ВНИИГМИ-МЦД на основе собственных рядов и рядов, подготовленных в ведущих зарубежных центрах на основе как радиозондовых, так и спутнико-

вых наблюдений. Оценки для температуры в тропосфере в рекордно теплых для приземной температуры 2015 и 2016 годах представляют интерес для мониторинга важнейших характеристик климатической системы.

Данные и их обработка

В настоящей работе для анализа аномалий температуры в 2015 и 2016 годы были использованы несколько регулярно обновляемых рядов температуры в тропосфере из независимых источников, в том числе из двух источников данных микроволнового зондирования с полярно орбитальных ИСЗ NOAA, и из двух источников радиозондовых данных. Ниже приводятся краткие сведения об использованных рядах. Более полно используемые ряды описаны в работе (Лавров, Стерин, 2017).

Ряды на основе данных микроволнового зондирования с ИСЗ (ряды RSS и UAH):

RSS – ряды аномалий температуры, подготовка которых ведется в компании Remote Sensing Systems, Inc. **(RSS)** на основе данных микроволнового зондирования с полярно орбитальных ИСЗ NOAA. В частности, использованы т.н. ряды TLT – аномалии температуры нижней тропосферы.

UAH – ряды аномалий температуры, подготовка которых ведется в Университете Алабамы в Хантсвилле **(UAH)** на основе тех же, что и в **RSS**, данных микроволнового зондирования с полярно орбитальных ИСЗ NOAA.

Наблюдения с ИСЗ ведутся с 1979 г., обновления рядов на основе данных микроволнового зондирования осуществляются регулярно, ряды месячных аномалий без задержек публикуются в сети Интернет.

Ряды на основе данных радиозондирования (ряды RATPAC и RIHMI):

RATPAC (Radiosonde Atmospheric Temperature Products for Assessing Climate) – набор данных радиозондовых наблюдений, созданный усилиями Национального центра климатических данных (NCDC) США (ныне – Национального центра информации об окружающей среде (NCEI)) и других подразделений NOAA (Free et al., 2005). Данные **RATPAC** формируются на основе наблюдений на специально отобранных 85 длиннорядных и не имеющих значительных пропусков станциях на 13 изобарических поверхностях. Значения аномалий в рядах **RATPAC** имеются для периода с 1958 г. и регулярно пополняются и публикуются на интернет-сайтах.

RIHMI – ряды аномалий, начиная с 1958 г по настоящее время, на основе радиозондовых наблюдений, подготовка и регулярное пополнение которых ведется во ВНИИГМИ-МЦД. Данные, начиная с 1993 г собираются во ВНИИГМИ-МЦД по каналам связи по глобальной сети станций. За более ранний период использованы данные, имевшиеся в глобальных массивах ВНИИГМИ-МЦД и других источниках, и данные, собранные по каналам связи в Среднеазиатском региональном вычислительном центре (г. Ташкент). За весь период, представленный в рядах **RIHMI**, число станций, данные которых участвовали в

обобщениях, менялось. В период с 1958 по 1975 гг. среднегодовое число станций увеличивалось от 720 до 880. С середины 1970-х годов до начала 1980-х годов число использовавшихся станций возросло примерно до 1300, после чего начало снижаться, и примерно с 2001 года до настоящего времени число станций, представленных в месячных порциях обрабатываемых данных, составляет порядка 900 - 930 и варьирует от месяца к месяцу. При этом около 700 станций глобальной сети расположены в Северном полушарии.

Рис. 1 демонстрирует географическое распределение станций радиозондирования (по состоянию на начало 2016 г.) данные которых использованы для подготовки рядов **RIHMI** в настоящей работе.

Обработка исходных данных для формирования рядов **RIHMI** состоит в следующем. Данные радиозондовых наблюдений за температурой на каждой из станций выбираются на 15 изобарических поверхностях (1000, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 гПа). На основе порции собранных и проконтролированных данных за конкретный месяц по каждой станции для перечисленных изобарических поверхностей вычисляются аномалии температуры по отношению к средним месячным значениям температуры за период 1981 - 2010 гг.

В данном исследовании использованы два варианта вертикального взвешивания для определения температуры тропосферы.

Первый вариант сводился к тому, что за конкретный месяц по каждой станции вычисляются значения температуры слоев, в частности, слоя 850 - 300 гПа. При этом осуществлялось взвешивание по массе воздуха для температуры слоев между всеми соседними изобарическими поверхностями, входящими в данные диапазоны. Температура слоя 850 - 300 гПа после вертикального взвешивания в рядах **RATPAC** и **RIHMI** используется в качестве первого варианта температуры тропосферы (условно обозначаемого **RIHMI T850-300**). Для взвешенной температуры слоя тропосферы также вычислялись аномалии по отношению к средним значениям за период 1981 - 2010 г.

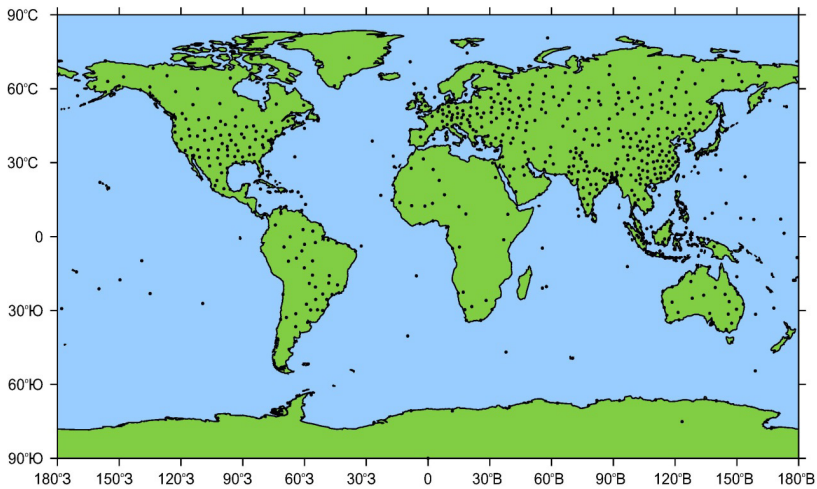

Рисунок 1. Географическое распределение станций радиозондирования, данные которых использованы во ВНИИГМИ-МЦД для оценок аномалий температуры тропосферы

Второй вариант вертикального взвешивания радиозондовых данных, имеющихся у ВНИИГМИ-МЦД и изначально заданных на изобарических поверхностях, состоял в использовании весовой функции, определяющей вклады температуры тропосферы на разных высотах вдоль ее вертикального профиля в интегрально измеряемую температуру при микроволновом зондировании с ИСЗ. График вертикальной весовой функции, используемой при интерпретации данных RSS, построен по табличным значениям, взятым с сайта компании RSS, и приведен на рис. 2. Подобный подход целесообразен для сопоставления радиозондовых и спутниковых измерений температуры. На основе данных ВНИИГМИ-МЦД таким образом были проведены расчеты второго варианта рядов, обозначенных нами как **RIHMI TLT** (Temperature of Lower Troposphere).

На основе постанционных значений аномалий обоих вариантов рядов **RIHMI T850-300** и **RIHMI TLT** путем зонального обобщения с весами, пропорциональными косинусу широты, вычислялись аномалии для широтных поясов.

Значения аномалий по широтным поясам представлены в рядах **RIHMI**, как и в обработанных аналогично рядах на основе данных **RATPAC,** регулярно пополняемых за счет обработки месячных порций данных текущих наблюдений, для периода с 1958 г. Результаты мониторинга температуры свободной атмосферы на основе рядов **RIHMI T850-300** публикуются, как отмечалось, в ежегодных Докладах об особенностях климата на территории Российской Федерации.

К сожалению, в оценках климатических особенностей температуры в тропосфере в 2015 и 2016 годы не стало возможным использовать ряды **HadAT2**– хорошо известный продукт, полученный Хэдли Центром Метеослужбы Великобритании (Thorne et al., 2005) в результате обработки данных 676 длиинорядных станций радиозондирования наблюдений температуры в свободной атмосфере, поскольку регулярное пополнение рядов **HadAT2** после 2012 года не осуществляется.

Базовый период, относительно которого рассчитываются и публикуются аномалии, у использованных рядов различен. У рядов **RIHMI** и **UAH** это 1981 - 2010 гг., у **RSS** – 1979 - 1998 гг, у **RATPAC** – 1973 - 1993. Различия базового периода следует учитывать при интерпретации рядов аномалий, что и будет отмечено ниже при анализе изоплет рядов месячных аномалий.

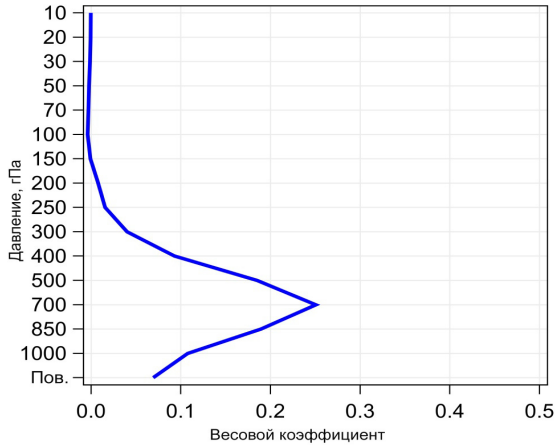

Рисунок 2. Весовая функция, используемая для вертикального взвешивания радиозондовых данных

Исследование рядов из различных источников проводилось по следующим широтным зонам:

- Земной шар (GLOBE): 90S-90N (70S-82.5N для **RSS**);
- Северное полушарие (NH): 0-90N (0-82.5N для **RSS**);
- Северная полярная зона (Nopol): 60N-90N (60N-82.5N для **RSS**);
- Северная внетропическая зона (Noext): 20N-90N (20-82.5N для **RSS**);
- Южное полушарие (SH): 90S-0 (70S-0 для **RSS**);
- Южная полярная зона (Sopol): 90S-60S (70S-60S для **RSS**);
- Южная внетропическая зона (Soext): 90S-20S (70S-20S для **RSS**);
- Тропики (Trpcs): 20S-20N.

Таблица 1 содержит коэффициенты ранговой корреляции Спирмена для оценок близости различных рядов аномалий температуры тропосферы, использованных в анализе аномалий за 2015 и 2016 годы. Поскольку основной интерес представляют ранги аномалий в рассматриваемых рядах, близких к рекордным, приводятся именно ранговые корреляции.

Таблица 1. Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена между рядами аномалий в тропосфере, А) период 1958-2016 гг., Б) период 1979 - 2016 гг.

А)

Ряд	RATPAC	RIHMI T850-300	RIHMI TLT
Земной шар			
RATPAC	**1**	0.73	0.69
RIHMI T850-300	0.84	**1**	0.97
RIHMI TLT	0.80	0.98	**1**
Северная внетропическая зона			
RATPAC	**1**	0.73	0.71
RIHMI T850-300	0.84	**1**	0.97
RIHMI TLT	0.80	0.98	**1**

Б)

Ряд	RATPAC	RIHMI T850-300	RIHMI TLT	RSS	UAH
Земной шар					
RATPAC	**1**	0.71	0.69	0.83	0.82
RIHMI T850-300	0.85	**1**	0.98	0.59	0.60
RIHMI TLT	0.84	0.99	**1**	0.58	0.58
RSS	0.88	0.69	0.71	**1**	0.94
UAH	0.89	0.70	0.71	0.97	**1**
Северная внетропическая зона					
RATPAC	**1**	0.72	0.72	0.82	0.81
RIHMI T850-300	0.84	**1**	0.98	0.67	0.68
RIHMI TLT	0.83	0.99	**1**	0.69	0.68
RSS	0.85	0.73	0.75	1	0.90
UAH	0.91	0.78	0.80	0.96	**1**

Примечание. Верхний правый треугольник – корреляция между месячными аномалиями. Нижний левый треугольник – корреляция между годовыми аномалиями. Все корреляции значимо отличны от нуля с вероятностью 0.95

Коэффициенты корреляции представлены для земного шара и северной внетропической зоны для двух временных периодов: 1958 - 2016 гг. и 1979 - 2016 гг. Коэффициенты корреляции для годовых аномалий превышают соответствующие оценки месячных аномалий, что вполне ожидаемо. Коэффициенты корреляции между **RIHMI T850-300** и **RIHMI TLT**, как и следовало ожидать, близки к единице. Также высокие оценки корреляций (не менее 0.90) наблюдаются между двумя наборами спутниковых данных: **RSS** и **UAH**. Корреляции между **RATPAC** и **RIHMI** значительно не меняются при разных временных периодах и разных способах вертикального обобщения и держатся на уровне порядка 0.70. Со спутниковыми данными сильнее коррелирует **RATPAC** (коэффициент корреляции 0.81), в то время как у **RIHMI T850-300** коэффициент корреляции со спутниковыми данными составляет 0.59 по земному шару и 0.67 в северной внетропической зоне. Существенные отличия между приводимыми в табл. 1 настоящей работы значениями корреляций Спирмена и приведенными нами ранее в работе (Лавров, Стерин, 2017) соответствующими значениями корреляций Пирсона, вычисленными за период по 2014 г, не отмечаются.

Аномалии температуры в тропосфере в 2015 и 2016 годах: рекорды по данным различных источников

В табл. 2 приведены оценки пяти самых теплых лет для тропосферы за период наблюдений. В качестве ранга здесь фактически используется порядковый номер аномалии конкретного года для упорядоченных по убыванию значений аномалии. В табл. 3 приведены сезонные оценки аномалий и ранги для температуры 2016 г.

В соответствии с оценками табл. 2 2015 год, а затем и 2016 год подряд показывают температурные рекорды для тропосферы по всему земному шару и в широтных зонах северного полушария по данным всех наборов радиозондовых данных (исключением является только северная внетропическая зона по оценке **RIHMI T850-300**, в которой оценка аномалии температуры 2015 г. оказалась выше оценки 2016 г.). При этом для Земного шара температурный рекорд 2016 г. превышает рекорд 2015 г. на 0.10 °C по оценкам **RIHMI** и на 0.20 °C по оценке Ratpac. Почти такое же превышение для 2016 г над рекордом 2015 года ряды Ratpac показывают и в Северном полушарии. В тропиках и Южном полушарии 2016 г. является рекордным во всех наборах радиозондовых данных, а 2015 г., хоть и не является рекордным, попадает в пятерку самых теплых лет.

По оценкам спутниковых наборов данных 2016 г. является рекордным по всему Земному шару и в широтных зонах Северного полушария, а в тропиках и Южном полушарии является вторым самым теплым годом после 1998 г. По оценкам спутниковых наборов данных 2015 г не является рекордным, но входит в пятерку самых теплых лет во всех представленных в таблице широтных зонах. Превышение рекорда значения

аномалии 2016 г. по сравнению с имеющим второй ранг значением в Северном полушарии и северной внетропической зоне по оценкам спутниковых наборов данных составляет от 0.10 до 0.20 °С. Из годов, относящихся к XX столетию, в пятерку самых теплых лет при рассмотрении разных источников данных и разных широтных зон стабильно попадает лишь 1998 год.

Таблица 2. Пять самых теплых лет для температуры тропосферы в разных наборах данных по разным широтным зонам

Ранг	Globe		NH		Noext		SH		Trpcs	
	Т	год	Т	год	Т	год	Т	год	Т	год
Ratpac										
1	**0.97**	**2016**	**1.07**	**2016**	**1.08**	**2016**	**0.78**	**2016**	**1.03**	**2016**
2	**0.77**	**2015**	**0.89**	**2015**	**0.94**	**2015**	0.69	1998	0.76	1998
3	0.73	2010	0.82	2010	0.83	2010	0.59	2010	0.76	2010
4	0.70	1998	0.73	2005	0.74	2005	**0.53**	**2015**	**0.71**	**2015**
5	0.60	2005	0.71	1998	0.73	2014	0.46	2014	0.62	2005
Rihmi T850-300										
1	**0.68**	**2016**	**0.67**	**2016**	**0.70**	**2015**	**0.73**	**2016**	**0.73**	**2016**
2	**0.58**	**2015**	**0.65**	**2015**	**0.65**	**2016**	0.47	1998	0.50	1998
3	0.49	1998	0.50	1998	0.49	1998	0.40	2010	0.48	2010
4	0.37	2010	0.42	1959	0.49	1959	0.32	2014	0.40	1987
5	0.34	1959	0.37	2007	0.40	2007	**0.26**	**2015**	**0.36**	**2015**
Rihmi TLT										
1	**0.67**	**2016**	**0.69**	**2016**	**0.69**	**2016**	**0.57**	**2016**	**0.68**	**2016**
2	**0.56**	**2015**	**0.61**	**2015**	**0.66**	**2015**	0.42	1998	0.48	1998
3	0.46	1998	0.48	1998	0.48	1998	**0.35**	**2015**	**0.41**	**2015**
4	0.34	2007	0.39	2007	0.44	2007	0.30	2010	0.37	2010
5	0.33	2010	0.33	2010	0.32	1990	0.29	2014	0.32	1987
Rss										
1	**0.57**	**2016**	**0.73**	**2016**	**0.79**	**2016**	0.48	1998	0.70	1998
2	0.55	1998	0.62	1998	0.64	2010	**0.41**	**2016**	**0.64**	**2016**
3	0.47	2010	0.56	2010	0.59	1998	0.38	2010	0.45	2010
4	**0.36**	**2015**	**0.49**	**2015**	**0.58**	**2015**	0.29	2002	**0.41**	**2015**
5	0.33	2005	0.45	2005	0.49	2005	**0.24**	**2015**	0.38	2005
Uah										
1	**0.50**	**2016**	**0.61**	**2016**	**0.62**	**2016**	0.46	1998	0.68	1998
2	0.48	1998	0.51	1998	0.42	2010	**0.40**	**2016**	**0.61**	**2016**
3	0.34	2010	0.40	2010	0.42	1998	0.27	2002	0.36	2010
4	**0.26**	**2015**	**0.36**	**2015**	**0.38**	**2015**	0.27	2010	**0.34**	**2015**
5	0.22	2002	0.24	2005	0.27	2007	**0.16**	**2015**	0.31	1987

Примечание. Т – годовые аномалии (град. С) по отношению к базовому периоду 1981 – 2010. Для радиозондовых данных – оценки рекордных лет начиная с 1958 г, для спутниковых – с 1979 г. Ярко-красным цветом выделен 2016 год. Черным жирным шрифтом выделен 2015 год.

Таблица 3. Сезонные аномалии температуры тропосферы и ранги 2016 г. по разным наборам данных в разных широтных зонах.

Регион	Год		Зима		Весна		Лето		Осень	
	T	Ранг	T	Ранг	T	Ранг	T	Ранг	T	Ранг
Ratpac										
Globe	**0.97**	**1**	**1.12**	**1**	**1.12**	**1**	**0.91**	**1**	0.85	2
Nh	**1.07**	**1**	**1.19**	**1**	**1.23**	**1**	**1.06**	**1**	0.95	2
Noext	**1.08**	**1**	**1.20**	**1**	**1.19**	**1**	**1.13**	2	0.98	2
Nopol	**1.19**	**1**	0.89	4	**1.35**	**1**	**0.71**	11	**1.70**	**1**
Sh	**0.78**	**1**	**0.98**	**1**	**0.93**	**1**	**0.65**	2	**0.66**	**1**
Soext	**0.70**	**1**	0.89	2	**0.82**	**1**	**0.57**	3	0.61	5
Sopol	0.75	6	-0.22	28	0.90	7	0.50	14	1.61	2
Trpcs	**1.03**	**1**	**1.19**	**1**	**1.27**	**1**	**0.85**	**1**	**0.84**	**1**
RIHMI T850-300										
Globe	**0.68**	**1**	**0.83**	**1**	**0.84**	**1**	**0.70**	**1**	0.54	2
Nh	**0.67**	**1**	**0.86**	**1**	**0.81**	**1**	0.70	2	0.53	2
Noext	0.65	2	**0.83**	**1**	**0.78**	**1**	0.75	2	0.52	2
Nopol	0.88	2	**0.97**	**1**	**1.13**	**1**	**0.74**	**1**	0.89	2
Sh	**0.73**	**1**	**0.66**	**1**	**1.00**	**1**	**0.71**	**1**	**0.56**	**1**
Soext	**0.74**	**1**	0.53	2	**0.99**	**1**	**0.80**	**1**	**0.61**	**1**
Sopol	0.25	10	-0.38	30	0.68	3	-0.23	22	1.03	2
Trpcs	**0.73**	**1**	**0.97**	**1**	**0.96**	**1**	0.49	2	0.54	3
RIHMI TLT										
Globe	**0.67**	**1**	**0.84**	**1**	**0.85**	**1**	**0.64**	**1**	0.52	2
Nh	**0.69**	**1**	**0.89**	**1**	**0.84**	**1**	0.68	2	0.57	2
Noext	**0.69**	**1**	**0.88**	**1**	**0.82**	**1**	0.73	2	0.56	2
Nopol	**1.12**	**1**	**1.36**	**1**	**1.38**	**1**	**0.88**	**1**	1.10	2
Sh	**0.57**	**1**	**0.62**	**1**	**0.89**	**1**	**0.48**	**1**	0.33	5
Soext	**0.55**	**1**	**0.53**	**1**	**0.80**	**1**	0.45	2	0.40	3
Sopol	-0.05	20	-0.44	31	0.39	8	-0.79	32	0.63	2
Trpcs	**0.67**	**1**	**0.85**	**1**	**0.96**	**1**	**0.49**	**1**	0.47	3
Rss										
Globe	**0.57**	**1**	**0.75**	**1**	**0.73**	**1**	0.48	3	**0.44**	**1**
Nh	**0.73**	**1**	**0.94**	**1**	**0.93**	**1**	0.66	3	0.52	3
Noext	**0.79**	**1**	**0.98**	**1**	**0.95**	**1**	0.80	2	0.59	5
Nopol	**1.63**	**1**	**2.03**	**1**	**1.75**	**1**	**1.14**	**1**	**1.65**	**1**
Sh	0.41	2	**0.54**	**1**	0.53	2	0.29	4	**0.35**	**1**
Soext	0.27	3	0.31	3	0.30	2	0.17	8	0.31	3
Sopol	0.27	2	-0.16	25	0.35	5	0.21	9	**0.79**	**1**
Trpcs	0.64	2	0.92	2	0.90	2	0.46	3	0.42	5
Uah										
Globe	**0.50**	**1**	**0.61**	**1**	**0.66**	**1**	0.39	2	**0.43**	**1**
Nh	**0.61**	**1**	**0.79**	**1**	**0.81**	**1**	0.51	2	0.44	2
Noext	**0.62**	**1**	**0.79**	**1**	**0.77**	**1**	0.57	2	**0.46**	**1**
Nopol	**1.19**	**1**	**1.17**	**1**	**1.49**	**1**	0.69	2	**0.27**	**1**
Sh	0.40	2	0.42	2	0.51	2	0.26	3	**0.43**	**1**
Soext	0.28	3	0.21	7	0.29	2	0.15	5	**0.44**	**1**
Sopol	0.20	8	-0.18	28	0.28	10	-0.26	25	0.83	2
Trpcs	0.61	2	0.81	2	0.91	2	0.45	3	0.40	4

Примечание. Жирным шрифтом выделены рекордные для 2016 г аномалии за период начиная с 1979 г.

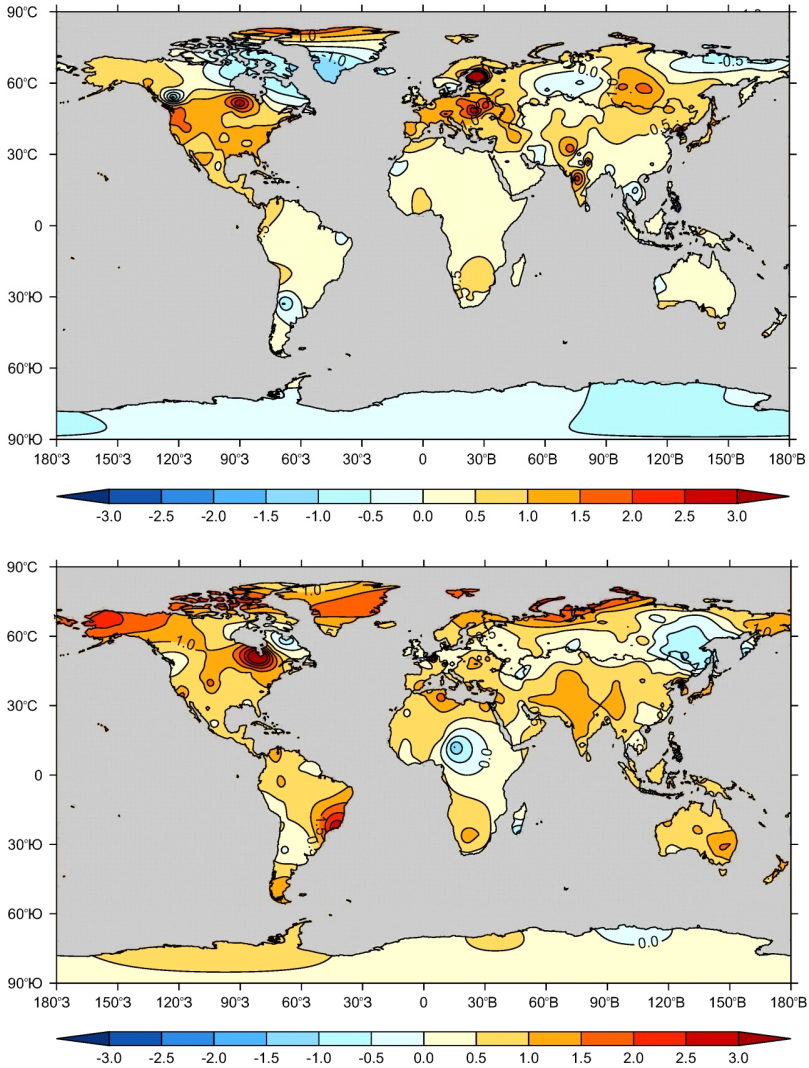

Рисунок 3 – Географическое распределение среднегодовых аномалий температуры в нижней тропосфере над континентами по данным RIHMIT850-300.

А)2015 г. Б) 2016 г.

На рис. 3 представлены географические особенности распределения годовых, а на рис. 4 – сезонных аномалий температуры тропосферы над сушей Земного шара в 2015 и 2016 гг. Для построения карт использованы данные **RIHMI T850-300**.

В 2015 г. области наибольших годовых положительных аномалий наблюдались в Северном полушарии над территориями США, Европы и Центральной Сибири. В Южном полушарии наблюдались близкие к нулю аномалии, а в южной полярной зоне – отрицательные аномалии. В Северном полушарии области отрицательных аномалий наблюдались на северо-востоке Канады, над южной частью Гренландии. Все перечисленные особенности имели в 2015 г место и для приземной температуры (Груза и др., 2016а). Отрицательные годовые аномалии температуры тропосферы наблюдались в 2015 г. над северо-восточной частью Сибири.

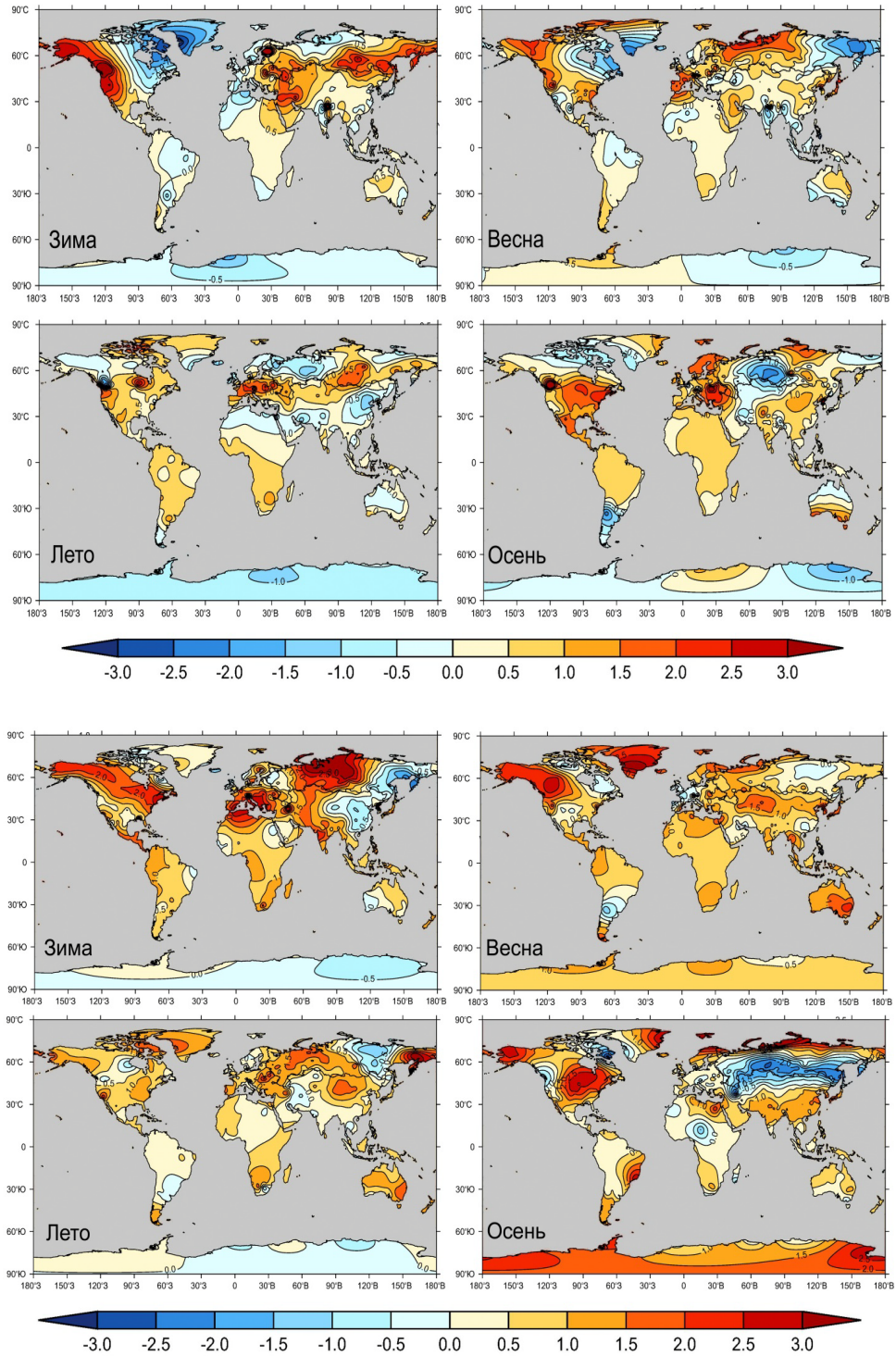

Рисунок 4. Географическое распределение среднесезонных аномалий температуры в нижней тропосфере по данным **RIHMI T850-300**.

А) 2015 год, Б) 2016 год

В 2016 г. большие положительные годовые аномалии температуры тропосферы преобладают над большей частью суши, при этом максимальные положительные аномалии наблюдаются над всей северной полярной зоной. Отрицательные аномалии наблюдаются только в Восточной Сибири, на Дальнем Востоке России, а также над северной частью полуострова Лабрадор. Положительные аномалии над Европой в 2016 году оказались меньшими, чем в 2016 году. Над южной полярной зоной, в отличие от 2015 г., годовые аномалии температуры в 2016 г. положительны.

Зимой 2015 г. являлся вторым самым теплым годом за период 1979-2015 гг. в целом по Земному шару, а также в Северном полушарии. Области наибольших аномалий температуры тропосферы наблюдались на западе Северной Америки, в Европе, в районе Аравийского моря, в Сибири и Японии. В Южном полушарии 2015 г. не попал даже в десятку самых теплых лет. Большие отрицательные аномалии наблюдаются в северной полярной зоне, но в среднем 2015 г. являлся третьим самым теплым годом в северной полярной зоне с аномалией температуры 0.49 °C, наибольшей на протяжении всего года.

Летом 2015 г. в тропосфере не было ни одного температурного рекорда. В целом по Земному шару 2015 г. стал четвертым самым теплым годом, а в тропиках – вторым. В Южном полушарии увеличение температурных аномалий в тропосфере продолжилось, и 2015 г. стал пятым самым теплым годом. В северной полярной зоне аномалия температуры составила всего 0.01 °C. Области наибольших аномалий наблюдались летом 2015 г. над США и восточной Канадой, Европой и Сибирью. Отрицательные аномалии наблюдались над Китаем и Уральскими горами.

Осенью 2015 г. тропосфера снова становится рекордно теплой в Северном полушарии и в целом по Земному шару. Области наибольших аномалий температуры тропосферы наблюдались осенью 2015 г. над южной половиной Северной Америки и над Европой. Отрицательные аномалии наблюдались на северо-востоке Канады, на юге Южной Америки, над Западной и Северо-восточной Сибирью.

В южной полярной области на протяжении всего 2015 года наблюдались отрицательные аномалии температуры, причем они характерны для всех четырех сезонов. Более того, 2015 г. стал одним из самых холодных лет в тропосфере южной полярной зоны. Летом 2015 г. наблюдалась аномалия в -0.82 °C, что было рекордно холодной аномалией температуры начиная с 1979 г.

Ряд особенностей географического распределения аномалий температуры в тропосфере в отдельные сезоны 2015 года соответствуют сезонным особенностям распределения аномалий приземной температуры, приведенным в работе (Груза и др., 2016а).

Зима 2016 г. является рекордно теплой для тропосферы по оценкам на основе наборов радиозондовых данных во всех широтных зонах, за исключением южной внетропической и южной полярной зон, а также северной

полярной зоны по данным Ratpac. В южной полярной широтной зоне зимой 2016 г. наблюдается отрицательная аномалия температуры тропосферы, причем это показывает анализ всех рассмотренных наборов данных. Наибольшие аномалии температуры тропосферы зимой 2016 г. наблюдаются в регионах Западной Сибири, Европы и севера Африки. Над Северной Америкой область высоких положительных аномалий температуры протянута с Аляски через Канаду до востока США. Отрицательные температурные аномалии наблюдаются в районе Китая, Дальнего Востока России и над Антарктидой.

Весной 2016 г. ситуация в определенной мере схожая. По данным радиозондовых наблюдений весенний сезон 2016 г. для тропосферы является рекордно теплым во всех широтных зонах кроме южной полярной зоны. По данным спутниковых наблюдений рекордные температуры наблюдаются в северном полушарии и в среднем по земному шару, а в тропиках и южном полушарии 2016 г. является вторым самым теплым годом. Аномалия температуры тропосферы весной 2016 г в южной полярной зоне, в отличие от зимы 2016 г., по данным всех использованных для анализа наборов является положительной. Наибольшие положительные аномалии температуры тропосферы наблюдаются весной 2016 г. на западе Канады и над Аляской, Гренландией, а также над другими частями суши северной полярной зоны. Необходимо отметить качественное сходство ряда перечисленных особенностей распределения аномалий температуры тропосферы зимой и весной 2016 г. с особенностями распределений приземной температуры, приведенными для отдельных месяцев первой половины 2016 г. в (Груза и др., 2016б).

Осень 2016 г. для тропосферы стала второй самой теплой осенью за время наблюдений в южной полярной зоне, а по данным RSS – рекордно теплой. Осенью 2016 г. наибольшие положительные аномалии температуры тропосферы наблюдались в северной полярной зоне, над северной Евразией, над большей частью территорий США и Канады, над Антарктидой. Напротив, отрицательные аномалии наблюдались осенью 2016 г над умеренными широтами Евразии, по крайней мере, над большой территорией азиатской части этого региона они были существенными. На полушарной и соответствующих зональных оценках аномалии температуры тропосферы для осени 2016 г это сказалось в меньшей степени, поскольку над подавляющей частью североамериканского континента, в противовес умеренным широтам Евразии, в этот период наблюдалась значительная положительная аномалия (рис. 4Б).

Значительная отрицательная аномалия в умеренных широтах Евразии проявилась осенью 2016 г и в приземной температуре (Груза и др., 2017), в результате чего холодная осень 2016 г повлияла на годовые оценки приземной температуры для территории России. Последнее обстоятельство оказалось решающим и для того, чтобы с сентября 2016 г прервался 16-месячный непрерывный период ежемесячных температурных рекордов глобальной приземной температуры, длившийся с мая 2015 по сентябрь 2016 гг.

Временные ряды аномалий температуры в тропосфере за период по 2016 год включительно

На рис. 5 изображены в виде изоплет среднемесячные аномалии температуры в тропосфере за период с 1979 по 2016 гг. в трех широтных зонах (Земной шар, Северное и Южное полушария) для всех использованных наборов данных. Следует отметить, что для всех источников данных и для всех трех рассмотренных широтных зон аномалии всех двенадцати месяцев 2016 года положительны. При анализе значений месячных аномалий 2015 года отмечаются лишь два небольшие по абсолютной величине отрицательные значения для южного полушария, причем только в рядах **RIHMI T850-300**.

Как и следовало предполагать, структуры изоплет и масштабы использованных для их построения численных значений месячных аномалий для рядов **RIHMI T850-300** и **RIHMI TLT** практически полностью идентичны. В меньшей мере, но идентичны структуры изоплет на основе рядов **RSS** и **UAH**, хотя численные значения аномалий для рядов **UAH** несколько меньше. Структуры же изоплет на основе рядов **RATPAC** обладают определенным сходством со структурами для других рядов, однако для рядов **RATPAC** оценки аномалий существенно выше. Последнее объясняется особенностью обработки исходных данных при подготовке рядов, а именно, как указывалось выше, различием использованных базовых периодов. Так, базовый период **RATPAC** не только уменьшен на 10 лет по сравнению с рядами **RIHMI** и **UAH**, но и сдвинут назад почти на 10 лет. Соответственно, он для рядов **RATPAC** не включает годы, начиная со второй половины 1990-х, когда потепление в тропосфере, как и на поверхности земного шара, проявилось наиболее значительно.

Из рис. 5 видно, что потепление тропосферы в Южном полушарии происходит медленнее, чем в Северном полушарии. Это подтверждается оценками трендов (табл. 4), согласно которым для всех наборов данных потепление тропосферы Южного полушария происходит в 2 раза медленнее, чем тропосферы Северного полушария. Особенно на графиках рис. 5 выделяются, помимо 2015 и 2016 гг., изменения аномалий для 1998 и 2010 гг., которые, вместе с 2015 и 2016 гг., попали в пятерку самых теплых лет по оценкам всех наборов данных.

В табл. 4 приведены оценки трендов изменения температуры тропосферы, вычисленные на основе разных источников данных. При этом тренды рассчитаны за периоды 1958-2016 (для радиозондовых данных) и 1979 - 2016 гг. (для радиозондовых и спутниковых данных).

Оценки трендов с 1979 г. по разным наборам данных показывают (табл. 4), что в Северном полушарии потепление в тропосфере происходит в среднем на 0.15 °С за 10 лет, а в Южном полушарии – в среднем на 0.08 °С за 10 лет. Как показал анализ, включение 2016 г. в расчеты оценок трендов изменения температуры привело лишь к незначительному увеличению некоторых оценок.

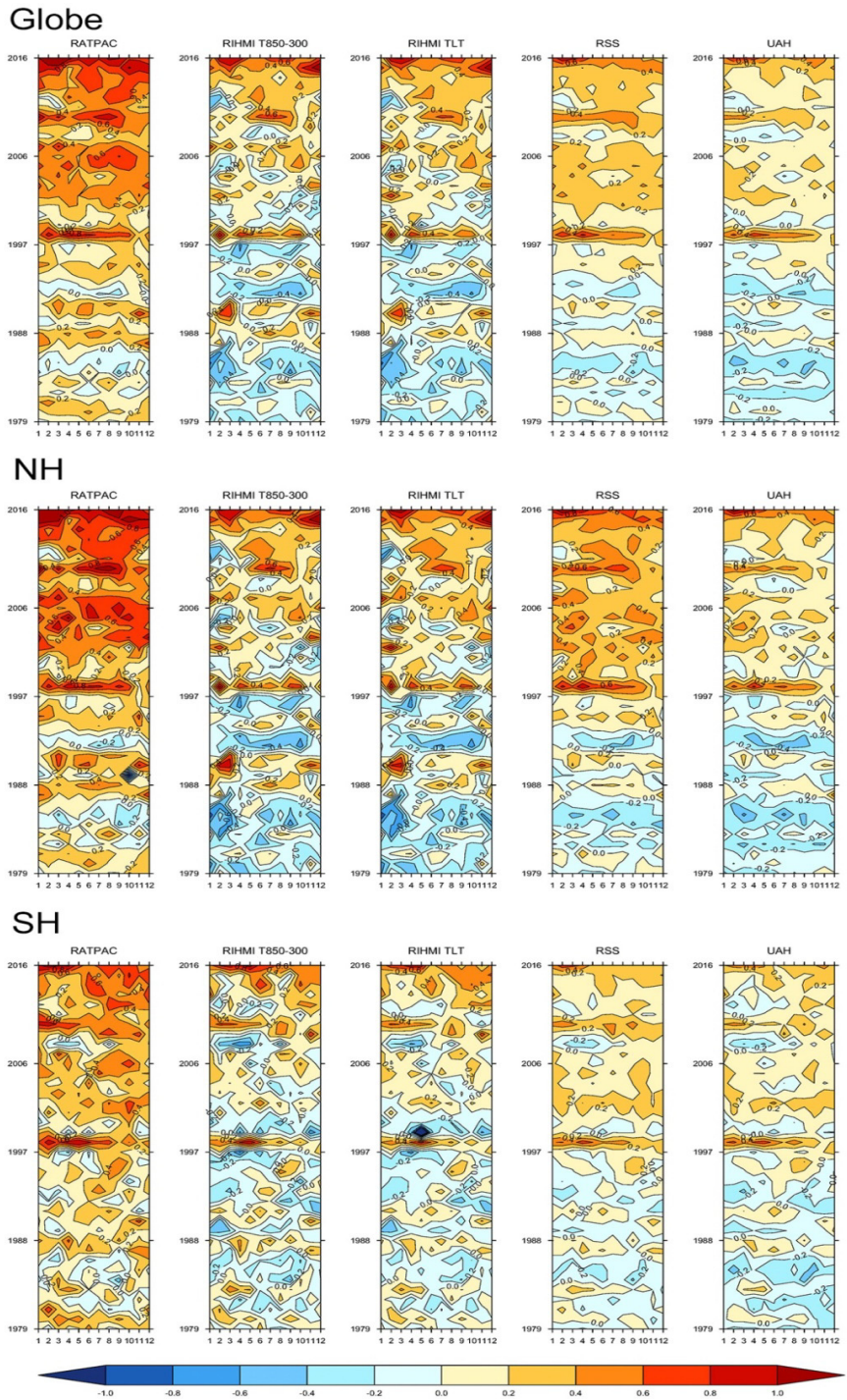

Рисунок 5. Изменение среднемесячных аномалий температуры в нижней тропосфере за период с 1979 по 2016 гг. по Земному шару (Globe), в Северном (NH) и Южном (SH) полушариях

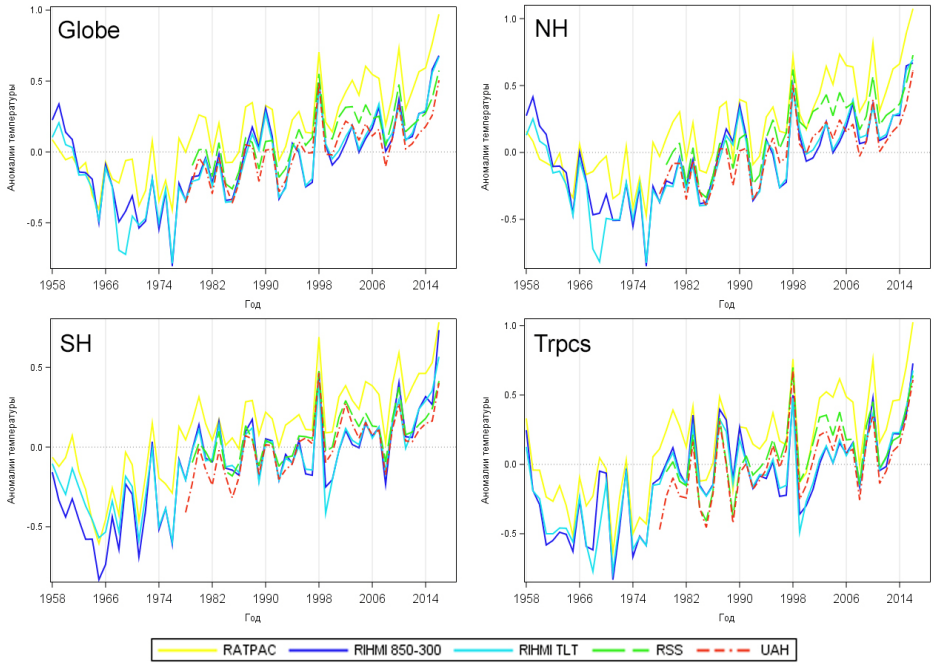

Рисунок 6. Временные ряды среднегодовых аномалий температуры в тропосфере по Земному шару (Globe), в Северном (NH) и Южном (SH) полушариях, в тропической зоне (Trpcs)

На рис. 6 изображены временные ряды среднегодовых аномалий температуры в тропосфере в различных широтных зонах. Ряды на основе радиозондовых данных демонстрируют существенное понижение температуры тропосферы в период до середины 1970-х годов. Это понижение лишь начиная со второй половины 1970-х годов после хорошо известного из литературы скачкообразного повышения температуры тропосферы, связываемого с перестройкой циркуляционных режимов Северного полушария (Santer et al., 2005), сменилось последовательным потеплением.

Таблица 4. Тренды аномалий температуры по разным наборам данных и разным широтным зонам с учетом 2016 г. (°C за 10 лет)

Набор данных	1958 - 2016			1979 - 2016		
	GLOBE	NH	SH	GLOBE	NH	SH
RATPAC	**0.14**	**0.15**	**0.13**	**0.15**	**0.19**	**0.10**
RIHMI T850-300	**0.08**	**0.08**	**0.13**	**0.13**	**0.14**	**0.06**
RIHMI TLT	**0.10**	**0.11**	**0.10**	**0.14**	**0.16**	**0.07**
RSS	—	—	—	**0.13**	**0.18**	**0.08**
UAH	—	—	—	**0.12**	**0.15**	**0.09**

Примечание. Жирным шрифтом выделены статистически значимые значения трендов (все). Красным цветом изображены значения трендов, изменившиеся после добавления 2016 г

Заключительные замечания

Настоящая работа была подготовлена в январе 2017 г., когда еще не были выпущены официальные документы ВМО о состоянии глобального климата в 2016 г. Тем не менее, многочисленные уже опубликованные после завершения 2016 г. материалы отмечают особенность минувшего года как самого теплого на поверхности всего Земного шара за всю историю инструментальных наблюдений. Более того, в (NASA, 2017) отмечено, что рекордно теплыми оказывались годы 2014, 2015 и 2016, причем положительные аномалии глобальной приземной температуры каждого последующего из этих трех лет превосходили рекордные значения аномалий предыдущего.

Приводимые в настоящей работе результаты демонстрируют, что температурные аномалии в тропосфере, оцениваемые по не зависящим друг от друга источникам данных, являются самостоятельной важной характеристикой происходящих в климатической системе процессов. Методики наблюдения за температурой тропосферы, периоды наблюдения, алгоритмы обработки и обобщения этих данных не имеют общего с таковыми для приземной температуры. Тем не менее, как показывают результаты настоящей публикации, для температуры в тропосфере продемонстрированы особенности 2015, а затем и 2016 года как рекордно теплых лет, что хорошо согласуется с многочисленными соответствующими оценками для приземной температуры. Продемонстрировано также определенное качественное сходство горизонтального распределения над континентами между аномалиями температуры в тропосфере и аномалиями приземной температуры. Причем это качественное сходство отмечено для 2015 и для 2016 годов не только для годовых аномалий, но и для аномалий отдельных сезонов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке совместного с Евросоюзом проекта РФФИ (код РФФИ 12-05-91656) и проекта ERACLIM2 Евросоюза.

Список литературы

Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Рочева Э.В., Самохина О.Ф. 2016а. Климатические особенности температурного режима у поверхности земного шара в 2015 г. – Фундаментальная и прикладная климатология, № 1, с. 104 - 136.

Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Рочева Э.В., Самохина О.Ф. 2016б. Особенности температурного режима у поверхности Земли в январе - июне 2016 г. – Фундаментальная и прикладная климатология, № 2, с. 119 - 142.

Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Рочева Э.В., Самохина О.Ф. 2017. Особенности температурных аномалий у поверхности земного шара в 2016 г. – Фундаментальная и прикладная климатология, № 1, (в печати).

Лавров А.С., Стерин А.М. 2017. Результаты сопоставления рядов температуры свободной атмосферы по данным радиозондовых и спутниковых наблюдений. – Метеорология и гидрология, № 2. с. 30 - 44.

Заявление ВМО о состоянии глобального климата в 2015 году. 2016 – ВМО. № 1167. Всемирная метеорологическая организация,

Free M., D.J. Seidel, J.K. Angell, J. Lanzante, I. Durre, and T.C. Peterson. 2005. Radiosonde Atmospheric Temperature Products for Assessing Climate (RATPAC): A new data set of large-area anomaly time series. – J. Geophys. Res., vol. 110, D22101, doi:10.1029/2005JD006169.

NASA GISS. 2016. NASA, NOAA Analyses Reveal Record-Shattering Global Warm Temperatures in 2015. Jan. 20, 2016. Available at http://www.giss.nasa.gov/research/news/20160120/.

NASA, 2017: NASA NOAA Data Show 2016 Warmest Year on Record Globally. Available at https://www.nasa.gov/press-release/nasa-noaa-data-show-2016-warmest-year-on-record-globally.

Santer B.D., Wigley T. M. L., Mears C. et al. 2005. Amplification of surface temperature trends and variability in the tropical atmosphere. – Science, vol. 309, 2 Sept., pp. 1551 - 1556.

Seidel D. J., Angell J. K., Christy J. et al. 2004. Uncertainty in Signals of Large-Scale Climate Variations in Radiosonde and Satellite Upper-Air Temperature Datasets. – J. Climate, vol. 17, pp. 2225 - 2240, doi: http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(2004) 017<2225:UISOLC> 2.0.CO;2

Thorne P. W, Lanzante J. R, Peterson T. C. et al. 2011. Tropospheric temperature trends: History of an ongoing controversy. – Wiley Interdisciplinary Reviews, No. 2, pp. 66 - 88.

Thorne, P.W. et al. 2005. Revisiting radiosonde upper air temperatures from 1958 to 2002. – J. Geophys. Res., vol. 110, D18105. doi:10.1029/ 2004JD005753.

WMO. 2016. 2015 is hottest year on record. – Press Release No 2, 25 January 2016.

Статья поступила в редакцию: 29.01.2017 *После переработки: 6.03.2017*