

УДК 551.524.72

*А.В. Шимарин, Ю.П. Переведенцев, М.В. Сабирова***ОСОБЕННОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В ТРОПОСФЕРЕ И НИЖНЕЙ СТРАТОСФЕРЕ¹**

Представлен анализ годовых значений температурных показателей тропосферы и нижней стратосферы, полученных с помощью радиозондирования на аэрологических станциях Казань, Оренбург, Уфа в период 1979-2016 гг. Сравниваются показания по температуре воздуха, полученные из радиозондовых наблюдений и рядов реанализа Era-interim, Ncep/Ncar, Ncep/Doe. Установлено, что в тропосфере разность между средними значениями температуры, полученных различным путем, меняется в пределах 0,5-1°C, а в нижней стратосфере она достигает 1-2°C. Рассчитанные коэффициенты корреляции также свидетельствуют о лучшем согласии разнородных данных в тропосфере, чем в стратосфере. Коэффициент наклона линейного тренда (КНЛТ) температуры воздуха положителен в тропосфере и отрицателен в стратосфере.

Ключевые слова: температура воздуха, радиозондовые наблюдения, массивы реанализа, коэффициент корреляции, коэффициент наклона линейного тренда.

DOI: 10.35634/2412-9518-2019-29-2-258-266

Начиная с 1990-х гг. в нескольких крупнейших прогностических центрах мира начали интенсивно разрабатываться проекты глобального реанализа. Суть данных проектов заключалась в том, что используя неизменную схему четырехмерного усвоения данных измерений, можно выполнить анализ и получить выходной продукт в виде глобальных полей метеорологических величин в узлах сетки.

В современный период проекты реанализа получили большое развитие по всему миру и количество наименований выходных данных превысило несколько десятков. Они охватывают большую часть различных физических процессов всей атмосферы Земли за достаточно большой промежуток времени.

Простота и удобство использования переменных реанализа способствовала широкому распространению их в научных целях. Большое количество работ и публикаций в гидрометеорологии базируется на использовании этих данных [5]. На основе расчетов по результатам реанализа исследуются процессы в свободной атмосфере и на подстилающей поверхности самых различных временных масштабов, от суточного до нескольких десятилетий. Следует отметить, что поля, представленные в реанализах, не являются чисто эмпирическими данными, поскольку генерируются с результатами гидродинамических моделей. Поэтому для каждого конкретного случая необходимо иметь представление о степени применимости полей реанализа для решения поставленных задач [7].

Свободная атмосфера является одной из важнейших частей климатической системы и мониторинг ее температурных параметров на фоне современного глобального потепления представляет собой актуальную задачу последних лет. Повышение температуры в последние годы, связанное с изменением климата, выражено более явно в средней тропосфере (уровни 5-8 км), чем в нижних слоях тропосферы. Это происходит из-за меньшего влияния мезомасштабных и мелкомасштабных процессов, происходящих у земной поверхности. В то же время атмосфера на уровнях 10 км и выше испытывает похолодание. Таким образом, оценки наблюдаемых изменений температуры на различных уровнях атмосферы, полученные независимо от соответствующих характеристик приповерхностного слоя воздуха, интересны для представления более полной картины изменения компонентов климатической системы [6].

В настоящее время для оценки температурных показателей тропосферы и нижней стратосферы наибольшее распространение получили измерения с помощью радиозондов и приборов, установленных на искусственных спутниках Земли (ИСЗ). Оба способа достаточно хорошо оценивают атмосферные показатели на конкретный момент времени, но эти данные не всегда можно использовать для точной оценки климатических тенденций верхних слоев атмосферы. Это в первую очередь связано с тем, что в спутниковых измерениях используется сложное и дорогостоящее оборудование, а радиозондовые же измерения отличаются большой неоднородностью ряда данных. Поэтому актуален вопрос о возможности использования альтернативных источников информации (реанализа) в оценке климатических показателей свободной атмосферы.

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты 18-05-00721 и 18-45-16006).

Целью данной работы является сравнение и оценка характеристик температуры воздуха на различных уровнях свободной атмосферы по результатам реальных измерений (на примере радиозонда) и данных прогностических моделей свободной атмосферы – современных массивов реанализа.

Материалы и методы исследования

Радиозондовые данные. Используемые радиозондовые измерения получены из аэрологической базы данных *IGRA (Integrated Global Radiosonde Archive)* международного центра данных *NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)*.

Массив *IGRA* содержит данные наблюдений, полученные с помощью радиозондов и шаров-пилотов на более чем 1 500 станций земного шара. В этом архиве доступны материалы наблюдений для стандартных изобарических поверхностей, и уровней особых точек поля давления, температуры, влажности, меридиональной и зональной составляющих скорости ветра [9].

В качестве исходных данных для исследования использованы ряды температур, полученные на трех аэрологических станциях Приволжского федерального округа (ПФО): Казань (55,79 с.ш.; 49,12 в.д.), Оренбург (51,77 с.ш.; 55,1 в.д.), Уфа (54,73 с.ш.; 55,96 в.д.). Для исследования использовались срочные наблюдения (00 и 12 ч.) на 16 изобарических поверхностях в период 1979-2016 гг.

Поскольку правильность выводов, получаемых при анализе данных, находится в зависимости от качества данных и наличия в них ошибок, то необходимым этапом обработки массивов результатов гидрометеорологических наблюдений оказывается контроль их качества. Определение и удаление ошибок особенно важно при любом исследовании изменений климата, так как искажения (ошибки) в метеорологических наблюдениях могут существенно повлиять на полученную оценку.

Данные наблюдений, полученные с помощью радиозондов, достаточно неоднородны как по высоте, так и по времени. Вследствие этого, в первую очередь была поставлена задача восстановления пропущенных данных. Так как в работе рассматриваются данные с трех станций, в первую очередь выявлен объем неоднородных температурных значений, полученных с помощью радиозондовых наблюдений (табл. 1), что характеризует качество исходных данных.

Таблица 1

Объем неоднородности в данных радиозондовых измерений (%)

| Изобар. поверхность, гПа | Объем данных, % | | | Изобар. поверхность, гПа | Объем данных, % | | |
|--------------------------|-----------------|-----------------------|------------|--------------------------|-----------------|-----------------------|------------|
| | Полный | Частич. отсутствующий | Нет данных | | Полный | Частич. отсутствующий | Нет данных |
| 1000 | 53,6 | 40,9 | 5,5 | 200 | 46,1 | 47,1 | 6,8 |
| 925 | 53,2 | 41,3 | 5,5 | 150 | 43,0 | 49,6 | 7,3 |
| 850 | 53,1 | 41,3 | 5,5 | 100 | 38,6 | 53,3 | 8,1 |
| 700 | 53,1 | 41,3 | 5,6 | 70 | 32,9 | 57,2 | 9,9 |
| 500 | 52,8 | 41,5 | 5,7 | 50 | 28,5 | 59,7 | 11,7 |
| 400 | 52,3 | 41,9 | 5,8 | 30 | 21,3 | 61,0 | 17,7 |
| 300 | 51,1 | 42,9 | 6,0 | 20 | 14,2 | 58,6 | 27,1 |
| 250 | 48,3 | 45,3 | 6,4 | 10 | 2,0 | 40,2 | 57,7 |

В приведенной табл. 1 представлены 3 вида данных: 1) полный – данные есть на всех 3 станциях; 2) частичный – данные присутствуют хотя бы на одной; 3) нет данных – процент отсутствующих данных по срокам наблюдений.

Следующей поставленной задачей было установление корреляционной зависимости между метеорологическими данными рассматриваемых станций. Соответствующий коэффициент корреляции был рассчитан по данным, которые присутствуют во всех трех используемых рядах наблюдений (табл. 2). Согласно данным табл. 2, коэффициенты корреляции между станциями находятся в пределах 0,66-0,97. Высокая корреляционная связь между значениями температуры прослеживается на всех изобарических поверхностях, за исключением переходного уровня между тропосферой и стратосферой 200-250 гПа, а также изобарической поверхности 10 гПа (практически не имеющего полных рядов наблюдений).

Таблица 2

Значения коэффициентов корреляции между температурой воздуха для трех станций на различных уровнях

| Изобар. поверхность, гПа | Коэффициент корреляции | | | Изобар. поверхность, гПа | Коэффициент корреляции | | |
|--------------------------|------------------------|------------|--------------|--------------------------|------------------------|------------|--------------|
| | Казань–Оренбург | Казань–Уфа | Оренбург–Уфа | | Казань–Оренбург | Казань–Уфа | Оренбург–Уфа |
| 1000 | 0,93 | 0,94 | 0,96 | 200 | 0,73 | 0,80 | 0,88 |
| 925 | 0,92 | 0,94 | 0,97 | 150 | 0,83 | 0,89 | 0,93 |
| 850 | 0,89 | 0,92 | 0,96 | 100 | 0,83 | 0,89 | 0,91 |
| 700 | 0,88 | 0,91 | 0,94 | 70 | 0,87 | 0,91 | 0,93 |
| 500 | 0,87 | 0,89 | 0,93 | 50 | 0,89 | 0,92 | 0,94 |
| 400 | 0,87 | 0,87 | 0,91 | 30 | 0,89 | 0,90 | 0,94 |
| 300 | 0,84 | 0,82 | 0,87 | 20 | 0,87 | 0,85 | 0,92 |
| 250 | 0,71 | 0,76 | 0,84 | 10 | 0,66 | 0,67 | 0,84 |

Полный объем данных для всех трех станций составляет порядка 40–50 % на всех изобарических поверхностях ниже 100 гПа и заметно снижается в нижней стратосфере. Корреляционная связь между наблюдениями на станциях высокая ($r = 0,85–0,90$), поэтому, согласно [2], для восстановления рядов данных по каждому рассматриваемому уровню была составлена регрессионная зависимость.

Восстановление данных проходило в два этапа. Первоначально, если данные были лишь в одном случае из трех, восстанавливался ряд, имеющий лучший коэффициент корреляции с существующими данными, далее восстановление рядов проводилось с помощью множественной регрессии. В случае, когда данные отсутствовали на всех трех станциях, выставлялась константа отсутствия.

Данные реанализа. В качестве исходного материала использовались массивы реанализов *Era-Interim (Era)*, *Ncep/Ncar (R1)*, *Ncep/Doe (R2)*, с разрешением $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ за сроки 00 и 12 часов. Расчет проводился на 16 изобарических поверхностях от 1000 до 10 гПа в период 1979–2016 гг.

ERA-interim является современным глобальным атмосферным реанализом и производится Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (*ECMWF*). Выходной продукт *Era* имеет возможности меневра в градусном разрешении узлов сетки, но для сравнимости значений все массивы реанализа взяты с одинаковым разрешением $2,5^\circ \times 2,5^\circ$. Основные сведения об исходном информационном продукте содержатся в [8].

Глобальный Реанализ *Ncep / Ncar* представляет собой постоянно обновляемый набор данных, характеризующий состояние атмосферы Земли, включая срочные наблюдения и численное прогнозирование погоды (ЧПП), выводимые с 1948 г. по настоящее время. Это совместный продукт от национальных центров экологического прогнозирования (*NCEP*) и Национального центра атмосферных исследований (*NCAR*) [10].

Так же в работе использованы данные реанализа *Ncep/ Doe (National Centers for Environmental Prediction/Department of Energy)*. Этот продукт является следующей версией реанализа *Ncep/Ncar*. Расчет данных начинается с начала эпохи спутниковых наблюдений с 1979 г. и по настоящее время. В расчетах добавлено больше наблюдений, исправлены ошибки ассимиляции и использована лучшая версия модели [11].

Широта и долгота рассматриваемых станций (Казань, Оренбург, Уфа) не соответствует географическим координатам сетки реанализа, поэтому для приведения данных к точке расчета был применен метод билинейной интерполяции [1]. В результате расчетов были получены среднеголетние показатели температуры атмосферы на различных изобарических поверхностях.

Результаты и их обсуждение

Первым и наиболее важным показателем для сравнимости данных реанализа и радиозондовых наблюдений является среднеголетнее значение температуры (1979–2016 гг.) и его среднеквадратическое отклонение (СКО). Расчеты данных показателей получены для станций Казань, Оренбург, Уфа на 16 основных изобарических поверхностях и отображены в табл. 3-5.

Климатические характеристики исследуемых станций достаточно сильно отличаются, что обусловлено физико-географическими особенностями. Все рассматриваемые пункты находятся под определенным влиянием крупных климатообразующих факторов. На климат Казани оказывает влияние бассейн реки Волги, Оренбург находится под влиянием воздействия со стороны засушливого Казахстана, а Уфа находится в предгорье Уральских гор [4]. Такое климатическое разнообразие интересно с точки зрения выявления влияния различных подстилающих поверхностей на температурный режим вышерасположенных слоев атмосферы.

Таблица 3

Средние многолетние значения температуры (T_{cp} , °C) и СКО (°C) тропосферы и нижней стратосферы Казани по данным радиозондовых наблюдений (Радиозонд) и массивов реанализа *Era-interim* (ERA), *Ncep/Ncar* (R1), *Ncep/Doe* (R2)

| Изобарическая поверхность, гПа | Радиозонд | | ERA | | R1 | | R2 | |
|--------------------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | T_{cp} | σ | T_{cp} | σ | T_{cp} | σ | T_{cp} | σ |
| 1000 | 5,0 | 1,1 | 5,2 | 0,9 | 4,4 | 0,8 | 4,6 | 0,8 |
| 925 | 2,8 | 1,1 | 2,4 | 0,9 | 2,7 | 0,9 | 2,4 | 0,9 |
| 850 | -0,3 | 0,9 | -0,7 | 0,8 | -0,6 | 0,9 | -0,6 | 0,9 |
| 700 | -8,0 | 0,9 | -8,3 | 0,7 | -8,2 | 0,8 | -8,2 | 0,8 |
| 500 | -23,3 | 0,9 | -23,6 | 0,6 | -23,8 | 0,7 | -23,8 | 0,7 |
| 400 | -34,5 | 0,8 | -35,1 | 0,5 | -35,2 | 0,6 | -35,2 | 0,6 |
| 300 | -48,3 | 0,7 | -49,2 | 0,4 | -49,1 | 0,4 | -49,1 | 0,4 |
| 250 | -54,4 | 0,5 | -55,2 | 0,5 | -54,9 | 0,5 | -55,0 | 0,5 |
| 200 | -55,9 | 0,9 | -56,4 | 0,9 | -56,1 | 0,9 | -56,1 | 0,8 |
| 150 | -54,5 | 0,8 | -55,0 | 0,7 | -55,0 | 0,9 | -54,9 | 0,8 |
| 100 | -55,8 | 0,8 | -56,7 | 0,7 | -56,7 | 0,8 | -56,6 | 0,8 |
| 70 | -56,9 | 0,9 | -58,0 | 0,7 | -57,6 | 0,8 | -57,6 | 0,8 |
| 50 | -57,2 | 0,9 | -58,5 | 0,7 | -57,9 | 0,8 | -58,0 | 0,8 |
| 30 | -56,3 | 1,0 | -57,9 | 0,7 | -57,1 | 0,9 | -57,2 | 0,8 |
| 20 | -53,4 | 1,1 | -55,6 | 0,8 | -54,5 | 1,1 | -54,5 | 1,0 |
| 10 | -44,7 | 2,1 | -48,0 | 1,3 | -47,2 | 1,8 | -47,3 | 1,6 |

Таблица 4

Средние многолетние значения температуры (T_{cp} , °C) и СКО (°C) тропосферы и нижней стратосферы в Оренбурге по данным радиозондовых наблюдений (Радиозонд) и массивов реанализа *Era-interim* (ERA), *Ncep/Ncar* (R1), *Ncep/Doe* (R2)

| Изобарическая поверхность, гПа | Радиозонд | | ERA | | R1 | | R2 | |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | T_{cp} , °C | σ , °C | T_{cp} , °C | σ , °C | T_{cp} , °C | σ , °C | T_{cp} , °C | σ , °C |
| 1000 | 6,3 | 1,2 | 6,8 | 1,0 | 6,0 | 1,0 | 6,5 | 1,0 |
| 925 | 4,4 | 1,4 | 4,3 | 1,0 | 4,4 | 1,0 | 4,4 | 1,0 |
| 850 | 1,4 | 1,1 | 1,2 | 0,9 | 1,4 | 1,0 | 1,4 | 0,9 |
| 700 | -6,7 | 0,9 | -6,7 | 0,7 | -6,6 | 0,7 | -6,6 | 0,7 |
| 500 | -22,5 | 1,0 | -22,2 | 0,5 | -22,5 | 0,6 | -22,4 | 0,7 |
| 400 | -34,1 | 1,1 | -33,9 | 0,5 | -34,0 | 0,6 | -33,9 | 0,6 |
| 300 | -48,4 | 1,0 | -48,4 | 0,4 | -48,3 | 0,4 | -48,3 | 0,4 |
| 250 | -54,6 | 0,7 | -54,9 | 0,5 | -54,7 | 0,5 | -54,8 | 0,5 |
| 200 | -55,8 | 0,9 | -56,6 | 0,8 | -56,2 | 0,8 | -56,3 | 0,8 |
| 150 | -55,0 | 0,7 | -55,3 | 0,6 | -55,2 | 0,7 | -55,2 | 0,7 |
| 100 | -56,8 | 0,7 | -57,2 | 0,6 | -57,1 | 0,7 | -57,0 | 0,7 |
| 70 | -57,7 | 0,7 | -58,3 | 0,6 | -57,9 | 0,8 | -57,9 | 0,7 |
| 50 | -57,7 | 0,7 | -58,4 | 0,6 | -57,8 | 0,8 | -57,9 | 0,8 |
| 30 | -55,9 | 0,9 | -57,1 | 0,7 | -56,2 | 0,9 | -56,3 | 0,9 |
| 20 | -52,5 | 1,1 | -54,1 | 0,9 | -53,4 | 1,1 | -53,3 | 1,0 |
| 10 | -43,3 | 1,7 | -46,3 | 1,4 | -45,2 | 1,8 | -45,7 | 1,6 |

Таблица 5

Средние многолетние значения температуры (T_{cp} , °С) и СКО (°С) тропосферы и нижней стратосферы в Уфе по данным радиозондовых наблюдений (Радиозонд) и массивов реанализа *Era-interim (ERA)*, *Ncep/Ncar (R1)*, *Ncep/Doe (R2)*

| Изобарическая поверхность, гПа | Радиозонд | | ERA | | R1 | | R2 | |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | T_{cp} , °С | σ , °С | T_{cp} , °С | σ , °С | T_{cp} , °С | σ , °С | T_{cp} , °С | σ , °С |
| 1000 | 4,5 | 1,1 | 4,6 | 0,9 | 4,1 | 0,9 | 4,7 | 0,9 |
| 925 | 2,7 | 1,3 | 1,7 | 0,8 | 2,8 | 1,0 | 2,6 | 0,9 |
| 850 | -0,5 | 1,0 | -1,3 | 0,8 | -0,2 | 0,9 | -0,1 | 0,9 |
| 700 | -8,4 | 1,0 | -8,9 | 0,7 | -7,9 | 0,8 | -8,0 | 0,8 |
| 500 | -24,1 | 1,4 | -24,1 | 0,6 | -23,7 | 0,7 | -23,6 | 0,7 |
| 400 | -35,6 | 1,7 | -35,6 | 0,5 | -35,1 | 0,6 | -35,0 | 0,6 |
| 300 | -49,4 | 1,5 | -49,5 | 0,4 | -49,1 | 0,4 | -49,1 | 0,4 |
| 250 | -54,9 | 0,8 | -55,3 | 0,5 | -55,2 | 0,5 | -55,3 | 0,5 |
| 200 | -55,8 | 1,1 | -56,3 | 0,9 | -56,3 | 0,9 | -56,3 | 0,9 |
| 150 | -54,9 | 0,9 | -54,9 | 0,8 | -55,1 | 0,8 | -55,0 | 0,8 |
| 100 | -56,4 | 0,9 | -56,6 | 0,8 | -56,8 | 0,8 | -56,7 | 0,7 |
| 70 | -57,4 | 0,9 | -57,9 | 0,7 | -57,6 | 0,8 | -57,6 | 0,7 |
| 50 | -57,6 | 0,9 | -58,6 | 0,7 | -57,8 | 0,8 | -57,8 | 0,8 |
| 30 | -56,0 | 1,2 | -58,2 | 0,7 | -56,6 | 0,9 | -56,7 | 0,9 |
| 20 | -52,5 | 1,4 | -56,0 | 0,8 | -53,9 | 1,1 | -53,8 | 1,1 |
| 10 | -42,9 | 1,8 | -48,5 | 1,3 | -45,9 | 1,9 | -46,4 | 1,7 |

Как видно из табл. 3-5, в целом температура с высотой заметно понижается до уровня тропопавзы (250 гПа), где ее значения достигают около -55 °С, в более высоких слоях ее изменения с высотой не столь значительны (порядка $1 - 2$ °С) и, начиная с изобарической поверхности 50 гПа, в слое стратосферной инверсии начинается ее рост, что соответствует известным положениям о температурной стратификации атмосферы.

При сравнении данных радиозондирования и массивов реанализа необходимо отметить, что в целом последние близки к величинам эмпирических наблюдений. Разность средних многолетних температур данных реанализа и радиозондовых наблюдений до изобарической поверхности 100 гПа находится в пределах $0,5$ °С (за некоторым исключением), для поверхностей выше 100 гПа эта разность возрастает до $1-2$ °С. При этом температура воздуха от поверхности 1000 до 100 гПа снижается от 5 °С до -56 °С, что так же хорошо просматривается в массивах реанализа.

Величина среднеквадратического отклонения для сравниваемых величин имеет несколько большие показания для радиозондовых наблюдений, чем для данных реанализа. То есть последние имеют более сглаженный профиль распределения, хотя, как было отмечено выше, средние значения температур достаточно близки.

Следующим важным показателем для оценки изменений климата является межгодовая изменчивость температуры воздуха. Для выявления скорости ее изменения во времени используется коэффициент наклона линейного тренда (КНЛТ). Данные рис. 1-3 содержат информацию о вертикальном распределении значений КНЛТ, рассчитанных по данным радиозондирования атмосферы и трех различных массивов реанализа.

Как видно из рис. 1-3, в слое 1000–300 гПа наблюдается тенденция роста температур в период 1979 – 2016 гг., а начиная с изобарической поверхности – 200 гПа КНЛТ < 0, что соответствует современным представлениям [3].

Основные выводы из полученных вертикальных профилей КНЛТ температуры воздуха следующие:

- значения КНЛТ многолетнего ряда температур, полученных по данным реанализа, отличаются от соответствующих значений, рассчитанных по данным радиозондирования, и имеют более сглаженный характер распределения по высоте;
- наблюдаемая в слое 300–200 гПа смена знака КНЛТ прослеживается во всех рассматриваемых пунктах;

• сравнение значений КНЛТ различных массивов реанализа показало их различие. Массив реанализа *Era interim* имеет менее значимую величину КНЛТ на всех изобарических поверхностях, начиная с поверхности 200 гПа.

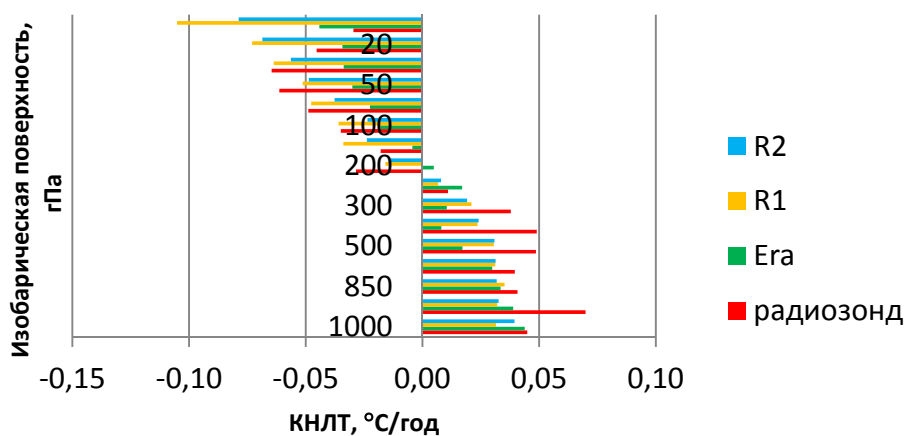


Рис.1. Коэффициент наклона линейного тренда среднегодовых значений температуры тропосферы и нижней стратосферы для станции Казань

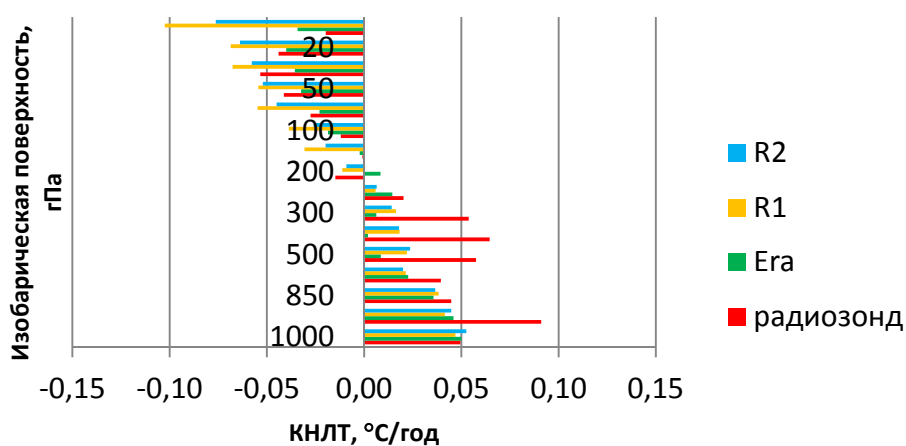


Рис. 2. Коэффициент наклона линейного тренда среднегодовых значений температуры тропосферы и нижней стратосферы для станции Оренбург

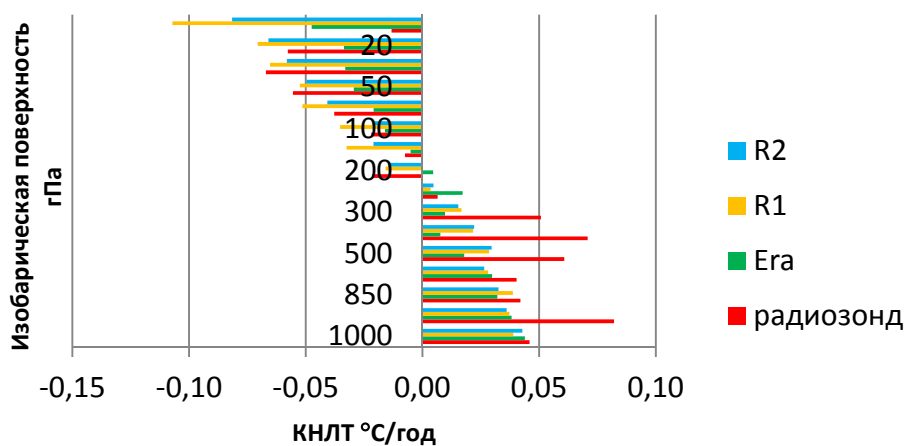


Рис. 3. Коэффициент наклона линейного тренда среднегодовых значений температуры тропосферы и нижней стратосферы для станции Уфа

Таблица 6

Корреляция между температурой воздуха, полученной по результатам реанализа

| Поверхность гПа | Казань | | | Оренбург | | | Уфа | | |
|--------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|
| | Р-зонд Era- Inter- im | Р-зонд Ncep Ncar | Р-зонд Ncep Doe | Р-зонд Era- In- terim | Р-зонд Ncep Ncar | Р-зонд Ncep Doe | Р-зонд Era- Interim | Р-зонд Ncep Ncar | Р-зонд Ncep Doe |
| 1000 | 0,89 | 0,89 | 0,84 | 0,79 | 0,81 | 0,74 | 0,86 | 0,88 | 0,86 |
| 925 | 0,85 | 0,79 | 0,79 | 0,85 | 0,83 | 0,84 | 0,85 | 0,83 | 0,82 |
| 850 | 0,89 | 0,90 | 0,88 | 0,89 | 0,92 | 0,91 | 0,87 | 0,90 | 0,90 |
| 700 | 0,89 | 0,89 | 0,90 | 0,88 | 0,89 | 0,88 | 0,83 | 0,84 | 0,84 |
| 500 | 0,79 | 0,85 | 0,86 | 0,64 | 0,76 | 0,80 | 0,58 | 0,70 | 0,72 |
| 400 | 0,65 | 0,78 | 0,80 | 0,47 | 0,68 | 0,70 | 0,41 | 0,58 | 0,60 |
| 300 | 0,60 | 0,75 | 0,74 | 0,47 | 0,67 | 0,66 | 0,31 | 0,51 | 0,50 |
| 250 | 0,72 | 0,70 | 0,70 | 0,71 | 0,71 | 0,69 | 0,52 | 0,50 | 0,46 |
| 200 | 0,83 | 0,87 | 0,87 | 0,82 | 0,84 | 0,84 | 0,76 | 0,83 | 0,84 |
| 150 | 0,87 | 0,80 | 0,86 | 0,88 | 0,67 | 0,76 | 0,79 | 0,65 | 0,74 |
| 100 | 0,88 | 0,82 | 0,89 | 0,89 | 0,75 | 0,88 | 0,80 | 0,76 | 0,87 |
| 70 | 0,81 | 0,85 | 0,88 | 0,74 | 0,78 | 0,84 | 0,72 | 0,78 | 0,84 |
| 50 | 0,76 | 0,86 | 0,86 | 0,71 | 0,86 | 0,85 | 0,67 | 0,84 | 0,83 |
| 30 | 0,69 | 0,76 | 0,76 | 0,75 | 0,81 | 0,81 | 0,61 | 0,77 | 0,76 |
| 20 | 0,58 | 0,58 | 0,57 | 0,69 | 0,71 | 0,71 | 0,52 | 0,69 | 0,69 |
| 10 | 0,24 | 0,30 | 0,36 | 0,53 | 0,59 | 0,64 | 0,52 | 0,58 | 0,63 |

Как видно из табл. 6, в слое 1000–700 гПа корреляция между температурой воздуха, полученной по результатам радиозондирования, и реанализа достаточно тесная ($r > 0,8$), она вполне удовлетворительна и на более высоких уровнях и лишь в нижней стратосфере недостаточно высокая.

Таким образом, на всех трех станциях по данным реанализа можно получить адекватное представление о термических процессах, происходящих в тропосфере. Что касается стратосферы, то с высотой заметно возрастают как ошибки радиозондирования, так и реанализов. Отметим, что в работе [12] данные реанализа эффективно используются при анализе физических процессов до уровня 64 км.

Выводы

В результате проведенных исследований по оценке особенностей вертикального распределения температуры свободной атмосферы были получены следующие выводы:

- разность средних многолетних температур данных реанализа и радиозондовых наблюдений до изобарических поверхностей 100 гПа находятся в пределах 0,5 °С (за некоторым исключением), для поверхностей выше 100 гПа эта разность возрастает до 1-2 °С. При этом температура воздуха от 1000 до 100 гПа снижается от 5 °С до -56 °С, что также хорошо просматривается в массивах реанализа;
- анализ распределения величин среднеквадратического отклонения σ свидетельствует о том, что значения реанализа имеют более сглаженный характер, меньший разброс, чем данные радиозондирования;
- КНЛТ многолетних значений температуры воздуха для радиозондовых наблюдений имеют тот же знак, что и по данным реанализа, но численно реанализ показывает заниженные величины;
- при сравнении различных моделей реанализа можно сделать выводы: *Era interim* дает хорошие результаты для пограничного слоя (1000–850 гПа) и слоя тропосферы (850–300 гПа), и менее надежные в слоях стратосферы (100–10 гПа), в отличие от значений *Ncep/Ncar* и *Ncep/Doe*, имеющие примерно одинаковые ошибки на всех рассматриваемых поверхностях.

Таким образом, можно сделать вывод, что температурные показатели свободной атмосферы, независимо от используемых моделей реанализа, довольно близки по значениям с реальными данными, полученными с помощью радиозондовых наблюдений. Это дает возможность использовать данные реанализа для изучения многолетних климатических тенденций изменений температуры воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гандин Л.С. Объективный анализ метеорологических полей: монография. Л.: Гидрометеиздат. 1963. 288 с.
2. Дроздов О.А., Васильев В.А., Кобышев Н.В. и др. Климатология: учебник. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 568 с.
3. Переведенцев Ю.П., Гурьянов В.В., Шанталинский К.М. и др. Динамика тропосферы и стратосферы в умеренных широтах Северного полушария и современные изменения климата в Приволжском федеральном округе. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2017. 186 с.
4. Переведенцев Ю.П., Соколов В.В., Наумов Э.П. и др. Климат и окружающая среда Приволжского федерального округа / науч. ред. М.А. Верещагин. Казань: Казан. ун-т, 2013. 274 с.
5. Переведенцев Ю.П., Шанталинский К.М. Оценка современных изменений температуры воздуха и скорости ветра в тропосфере северного полушария // Метеорология и гидрология. 2014, №10. С. 19-31.
6. Стерин А.М. Анализ линейных трендов в рядах температуры свободной атмосферы за 1958-1997 гг. // Метеорология и гидрология. 1999. №5. С. 52-68.
7. Хан В.М., Стерин А.М., Рубинштейн К.Г. Оценки трендов температуры в свободной атмосфере по данным реанализа и радиозондовым наблюдениям // Метеорология и гидрология. 2003. № 12. С. 5-18.
8. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J. et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Q.J.R. Meteorol. Soc. 2011. No. 137. P. 552-597.
9. Durre I., R.S. Vose and D.B. Wuertz, 2006: Overview of the Integrated Global Radiosonde Archive. Journal of Climate. 19. P. 53-68.
10. Kalnay et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, Bull. Amer. Meteor. Soc. 77. 1996. P. 437-470.
11. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2): M. Kanamitsu, W. Ebisuzaki, J. Woollen, S-K Yang, J.J. Hnilo, M. Fiorino, and G. L. Potter. 1631-1643, Nov 2002, Bulletin of the American Meteorological Society.
12. Perevedentsev Yu.P., Shantalinskii K.M., Guryanov V.V and Eliseev A.V. Thermodynamic Parametr Variation in the Troposphere and Stratosphere in 1979-2016// ENVIROMIS2018, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 211(2018) 012015.

Поступила в редакцию 26.04.2019

Шимарин Александр Владимирович, аспирант кафедры метеорологии, климатологии и экологии атмосферы

E-mail: AVShimarin@stud.kpfu.ru

Переведенцев Юрий Петрович, доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой метеорологии, климатологии и экологии атмосферы

E-mail: yperaved@pkfu.ru

Сабирова Марина Валериевна, кандидат географических наук

старший преподаватель кафедры метеорологии, климатологии и экологии атмосферы

E-mail: 1Marina.Isaeva@mail.ru

ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18

A.V. Shimarin, Yu.P. Perevedentsev, M.V. Sabirova

PECULIARITIES OF VERTICAL DISTRIBUTION OF AIR TEMPERATURE IN THE TROPOSPHERE AND LOWER STRATOSPHERE

DOI: 10.35634/2412-9518-2019-29-2-258-266

The article presents the analysis of annual values of the temperature indicators of the troposphere and lower stratosphere obtained using radio sounding at upper-air stations of Kazan, Orenburg, Ufa in the period 1979-2016. Comparison of air temperature data from radiosonde observations and reanalysis series Era-interim, Ncep/Ncar, Ncep/Doe was performed. The average long-term indicators of air temperature and its standard deviation are calculated. The difference was found when comparing within 0.5–1 °C for the troposphere and 1–2 °C for the lower stratosphere. The calculated correlation coefficients also testify to a better agreement of heterogeneous data in the troposphere than in the stratosphere. The linear trend slope coefficient (LTSC) of air temperature is positive in the troposphere and negative in the stratosphere.

Keywords: air temperature, radiosonde observations, reanalysis arrays, correlation coefficient, linear trend slope coefficient.

REFERENCES

1. Gandin L.S. *Ob'ektivnyj analiz meteorologicheskikh polej* [Objective analysis of meteorological fields], Leningrad, Gidrometeoizdat, 1963, 288 p. (in Russ.).
2. Drozdov O.A., Vasiliev V.A., Kobysheva N.V. et al. *Klimatologiya* [Climatology] Leningrad, Gidrometeoizdat, 1989, 568 p. (in Russ.).
3. Perevedentsev Yu.P., Guryanov V.V., and Shantalinsky K.M. et al. *Dinamika troposfery i stratosfery v umerennykh shirotakh Severnogo polushariya i sovremennyye izmeneniya klimata v Privolzhskom federal'nom okruge* [Dynamics of the troposphere and stratosphere in temperate latitudes of the Northern Hemisphere and current climate change in the Volga Federal District], Kazan, Kazan University Press, 2017, 186 p. (in Russ.).
4. *Klimat i okruzhayushhaya sreda Privolzhskogo federal'nogo okruga*, [Climate and environment of the Volga Federal district] Perevedentsev Yu.P., Sokolov V.V., Naumov E.P. and Vereshchagin M.A. (ed) Kazan, Kazan University Press, 2013, 274 p. (in Russ.).
5. Perevedentsev Yu.P., and Shantalinsky K.M. [Assessment of modern changes in air temperature and wind speed in the troposphere of the Northern hemisphere] in *Meteorology and Hydrology*, 2014, vol. 10, pp. 19-31. (in Russ.).
6. Sterin A.M. [Analysis of linear trends in the temperature of the free atmosphere over the 1958–1997 years] in *Meteorology and Hydrology*, 1999, vol. 5, pp. 52-68. (in Russ.).
7. Han. V.M., Sterin A.M. and Rubinstein. K.G. [Estimates of temperature trends in the free atmosphere from reanalysis and radiosonde observations] in *Meteorology and Hydrology*, 2003, vol. 12, pp. 5-18. (in Russ.).
8. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J. et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, in Q.J.R. Meteorol. Soc., 2011, vol. 137, pp. 552-597.
9. Durre, I., Vose R.S., and Wuertz D.B, Overview of the Integrated Global Radiosonde Archive. in *Journal of Climate*, 2006 vol.19, pp 53-68.
10. Kalnay et al., The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, in *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, vol. 77, pp 437-470.
11. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S-K., Hnilo J.J., Fiorino M., and Potter G. L., NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) in *Bulletin of the American Meteorological Society*, Nov 2002, pp. 1631-1643.
12. Perevedentsev Yu.P., Shantalinskii K.M., Guryanov V.V and Eliseev A.V. Thermodynamic Parametr Variation in the Troposphere and Stratosphere in 1979-2016 in ENVIROMIS2018, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 211(2018) 012015.

Received 26.04.2019

Shimarin A.V., postgraduate student

E-mail: AVShimarin@stud.kpfu.ru

Perevedentsev Yu.P., Doctor of Geography, Professor,

Head of the Department of meteorology, climatology and atmosphere ecology

E-mail: ypereved@pkfu.ru

Sabirova M.V., Candidate of Geography, senior lecturer at Department of meteorology, climatology and atmospheric ecology

E-mail: 1Marina.Isaeva@mail.ru

Kazan (Volga region) Federal University

Kremlevskaya st., 18, Kazan, Russia, 420008