АНАЛИЗ АНОМАЛИЙ ПРИЗЕМНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ В ТЕЧЕНИЕ XX ВЕКА ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ И РЕАНАЛИЗОВ

Д.Д. Бокучава^{1),2*)}, В.А. Семенов^{1),2**)}

¹⁾ Институт географии РАН, Россия, 109017, Москва, Старомонетный переулок, д. 29; **d.bokuchava@gmail.com*

²⁾ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., 3; **vasemenov@ifaran.ru

Резюме. Рост глобальной приземной температуры в период инструментальных наблюдений с начала XX века не был монотонным и характеризовался двумя периодами потепления - потеплением середины ХХ века и современным потеплением, разделенными периодом понижения глобальной температуры. Ввиду значительно меньшего количества и худшего качества данных наблюдений в первой половине XX века по сравнению со второй способность реанализов для ХХ века воспроизводить потепление середины века нуждается в исследовании. В данной работе анализируются аномалии приземной температуры в Северном полушарии (СП) по данным трех реанализов, охватывающих весь XX век: американского NOAA-CIRES Twentieth-Century Reanalysis (NOAA20C) и европейских ECMWF ERA20C и CERA20C. Сравнение проведено с сеточными данными GISTEMP GISS/NASA, основанными на станционных наблюдениях. Анализировалась пространственная структура изменения температуры для трех упомянутых выше периодов времени. Показано, что для периода современного потепления изменения приземной температуры во всех реанализах относительно хорошо согласуются между собой и с данными прямых наблюдений везде за исключением высоких широт СП. Однако для предшествующих периодов выявлены существенные различия в пространственной структуре климатических трендов и их значениях для различных регионов СП, наиболее ярко выраженные в высоких широтах СП.

В том числе показано, что реанализ NOAA20C не воспроизводит похолодания 1940-х-1970-х гг., а реанализы ERA20C и CERA20C демонстрируют оба климатических периода потепления с промежуточным похолоданием, но по отношению к данным GISTEMP GISS/NASA завышают и занижают уровень потепления середины XX века соответственно. В целом, относительно других реанализов, наиболее реалистичным в воспроизведении температурных аномалий в СП является реанализ CERA20C.

Ключевые слова. Изменение климата, приземная температура воздуха, реанализы XX века, Арктика, потепление середины XX века.

ANALYSIS OF SURFACE AIR TEMPERATURE ANOMALIES IN THE NORTHERN HEMISPHERE IN THE 20th CENTURY USING OBSERVATIONAL AND REANALYSIS DATA

Bokuchava D.D. 1),2)*, Semenov V.A. 1),2)**

¹⁾Institute of Geography RAS,
29, Staromonetniy, 109017, Moscow, Russia; *bokuchava@gmail.com

²⁾A.M.Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 3, Pyzhyovskiy, 119017, Moscow, Russia; ***vasemenov@mail.ru*

Summary. As it is shown by data of the instrumental observations, the rise of the global surface temperature was not monotonous over the 20th century. It is characterized by two global warming periods, namely, mid-20th century warming and modern warming, separated by recession period. Due to significantly lower number and quality of observational data in the first half of the 20th century, the ability of reanalyses to reflect the mid-century warming is to be investigated.

In this paper, anomalies of the surface air temperature (SAT) in the Northern Hemisphere (NH) are analyzed using hree reanalyses covering the entire 20th century: American NOAA-CIRES Twentieth-Century Reanalysis (NOAA20C) and European ECMWF ERA20C and CERA20C. A comparison is made with the GISS/NASA GISTEMP grid dataset based on the station observations. The spatial structure of SAT variation for the abovementioned three climatic periods is analyzed. It is found that for the current warming period the temperature changes are generally in a good agreement for all the reanalyses and empirical data set over all the Globe excluding high latitudes of the Northern Hemisphere. However, for the preceding periods significant differences in the spatial structure of climatic SAT trends and their magnitude are found in different regions of NH. The differences is most pronounced at high latitudes. In particular, the 1940-1970 cooling is absent in the NOAA20C reanalysis, whereas ERA20C and CERA20C reanalyses reflect the two climatic warming periods with a cooling in between, but overestimate and underestimate magnitudes on the early 20th century warming as compared with GISTEMP GISS/NASA data, respectively. In general, among other reanalyses, the most realistic evolution of the SAT in the Northern Hemisphere over the 20th century is presented by the CER20C.

Keywords. Climate change, surface air temperature, 20th century reanalysis, Arctic, Early 20th Century Warming.

Введение

Глобальная среднегодовая приповерхностная температура с 1880 г. выросла примерно на 1.2°С по данным на 2016г. (GISTEMP Team, 2017). Это потепление не было монотонным. На протяжении XX века было зафиксировано два периода интенсивного роста приповерхностных температур – поте пление начала века с 1920-х гг. по середину 1940-х гг., и современное поте-

пление, с середины 1970-х гг. по настоящее время, разделенных периодом похолодания примерно в 1950-1970 гг.

До конца XX века потепление начала века не уступало по величине современному потеплению. В работе (Jones et al., 1999) отмечается, что в течение двух 20-летних периодов положительных аномалий климата XX века 1925-1944 и 1978-1997 гг. глобальная температура выросла на 0.37° C и 0.32° C соответственно. Такая долгопериодная динамика температурных аномалий в XX в. позволяет говорить о "раннем" потеплении или потеплении середины XX века (ПСДВ) как об отдельно стоящем событии, пиковые значения которого пришлись на период 1940-45 гг. с максимальным потеплением в высоких широтах СП (Bengtsson et al., 2004; Wood et al., 2010; Yamanouchi, 2011) и которое, по всей видимости, (в частности из-за в три раза меньшего темпа роста концентрации парниковых газов (IPCC, 2007; 2013), имело иную природу, чем современное потепление (Johannesen et al., 2004; Thompson et al., 2015; Delworth and Knutson, 2000).

ПСДВ имело выраженную пространственную структуру – его амплитуда значительно возрастала к высоким широтам (рис.1), а также характеризовалось выраженными сезонными особенностями с максимальными значениями роста температур в холодное полугодие Северного полушария. Темпы потепления в Арктике более чем вдвое превышали средние глобальные изменения как во время ПСДВ, так и в последние десятилетия. Такая особенность получила название арктического усиления (АУ) – явления, при котором ряд положительных обратных связей как радиационных, так и динамических, приводит к более сильному изменению температуры в высоких широтах СП, чем в среднем по земному шару (Bekryaev et al., 2010; Polyakov et al., 2002; Алексеев Г.В., 2015; Lee S., 2014; Pithan and Mauritsen, 2014). Среди дополнительных факторов, ответственных за АУ – изменения облачного покрова, уменьшение альбедо поверхности, увеличение содержания водяного пара в атмосфере, усиление меридионального переноса тепла из более низких широт и уменьшение площади морских льдов (Chernokulsky et al., 2017; Chylek et al., 2009; Polyakov et al., 2004; Beitsch et al., 2013; Bader et al., 2011).

В работе (Kuzmina et al., 2008) сравнение пространственного распределения линейных трендов температуры СП в периоды потепления и похолодания показывает, что максимум потепления как для 1920-1939 гг., так и для 1980-1999 гг. приходился на январь в Арктическом регионе. При этом, значения аномалий среднегодовой температуры ПСДВ в Арктике превышали значения потепления современного примерно до 2005 г. К северу от 62° с.ш. максимальная среднегодовая аномалия температуры воздуха в Арктике в период 1930-1940-х гг. достигла 1.7°С и превышала максимум 2000 года величиной 1.5°С. (Polyakov et al., 2003).

Наблюдаемое "раннее" потепление в высоких арктических широтах в начале XX века сравнимо с современным потеплением с точки зрения масштаба, но пространственно-временные характеристики и механизмы климатической аномалии середины XX века остаются по-прежнему предметом дискуссии. Важным фактором современного потепления является рост парниковых газов в атмосфере. Для ПСДВ этот фактор был в несколько раз слабее (концентрации парниковых газов росли в среднем на 5-7 ppm/десятилетие в середине века и на 19-20 ppm/десятилетие для современного периода (IPCC, 2007; 2013), что указывает на существенный вклад других механизмов. Практически все исследования сходятся на том, что потепление середины века объясняется влиянием совокупности факторов, в числе которых, помимо увеличения концентрации парниковых газов, важную роль играют внутренняя изменчивость климата, а также внешние факторы воздействия на климат, такие как вулканические и антропогенные аэрозоли (Bronnimann, 2009; Delworth and Knutson, 2000; Suo et al., 2013).



Рисунок 1. Аномалии среднегодовой приповерхностной температуры (°C) в период 1900-2015 гг. (относительно периода 1951-1980 гг.) по данным GISS/NASA (5-летнее скользящее среднее)

В настоящее время существует ряд обзорных работ, посвященных потеплению середины XX века (Yamanouchi, 2011; Wood and Overland, 2009), а также анализу возможных механизмов ПСДВ, из которых можно выделить три, заслуживающих, на наш взгляд, внимания.

Наиболее правдоподобная гипотеза – это внутренняя естественная изменчивость климатической системы океан – морской лед – атмосфера (Bengtsson et al., 2004; Семенов, 2015), в том числе на долгопериодных климатических масштабах (Delworth and Knutson, 2000; Polyakov et al., 2002; Johannesen et al., 2016; Алексеев, 2014; Frolov et al., 2010). Примером такой изменчивости может быть Атлантическое долгопериодное колебание (Schlesinger and Ramankutty, 1994), в последние 100 лет синхронное с эволюцией температурных аномалий в СП и в Арктике (Levitus et al., 2009; Semenov at al., 2010).

Также предполагается, что ПСДВ могло быть откликом на воздействие внешних естественных радиационных факторов – солнечной и вулканической

Для всего земного шара (черная кривая), Северного полушария (красная кривая), средних широт СП (30°-60° с.ш., зеленая кривая) и высоких широт СП (60°-90° с.ш., синяя кривая)

активности. Реконструкция солнечной активности за последние 400 лет (Lean et al., 1995; Lean and Rind, 1998) в целом показывает согласованность с изменениями приземной температуры, однако данные моделей свидетельствуют о недостаточности таких воздействий как единственного фактора для формирования аномалий температуры в середине XX века (Suo et al., 2013; Shiogama et al., 2006; Nozawa et al., 2005).

Помимо вулканических аэрозолей, предполагается, что ПСДВ могло быть связано и с вариациями антропогенного аэрозоля, в том числе непрямым образом – через воздействие на океаническую циркуляцию в Северной Атлантике (Booth et al., 2012; Gillet et al., 2008). Следует отметить, что возможность такого механизма подвергается сомнению (Zhang et al., 2013).

В силу остающейся неопределенности в факторах, сформировавших ПСДВ, анализ «раннего» периода и сравнение его основных характеристик с современным потеплением важны для понимания климатических процессов, происходящих в наши дни, и для моделирования будущих изменений климата как региональных, так и глобальных.

Изучение потепления середины XX века затруднено низким количеством и качеством данных наблюдений для этого периода. Основной недостаток заключается в том, что данные имеют неравномерное пространственно-временное покрытие с большими пробелами до 1950 г., особенно в Арктике, в силу в том числе отсутствия данных над морским льдом.

Для диагностики изменений климата и понимания механизмов этих изменений, важным и для многих целей единственным источником данных являются атмосферные реанализы. Реанализ – это данные численных расчетов с моделью атмосферы, в которых используются данные наблюдений на нижней границе атмосферы и данные в свободной атмосфере (в том числе температура, скорость ветра, влажность), полученные с помощью станционных, аэрологических и спутниковых наблюдений (Kalnay et al., 1996). При этом используются различные методы ассимиляции этих данных в численные модели, в которых, в упрощенном описании, моделируемая динамика атмосферы «притягивается» к данным наблюдений с помощью добавления релаксационных слагаемых в прогностические уравнения. Следует учитывать, что ряд переменных, в том числе динамические переменные, поля температуры, скорости ветра и влажности в свободной атмосфере в результате процедуры ассимиляции наиболее тесно связаны с данными наблюдений, в то время как, например, осадки и характеристики облачности не привязаны к данным наблюдений и являются исключительно результатами расчетов и характеризуются значительно более серьезными ошибками (Lindsay et al., 2014; Bengtsson et al., 2007).

На сегодняшний день существует более 10-ти различных реанализов, данные которых охватывают период с 1948 г. и позднее. Данные реанализов интенсивно используются для исследования погоды и климата, количество и качество ассимилируемых данных существенно возросло в эпоху интенсивных спутниковых наблюдений (с конца 1970-х гг.)

Наиболее интенсивно используются реанализы NCEP/NCAR Reanalysis I (1948 – по наст. время) (Kalnay et al., 1996), NCEP/DOE Reanalysis II (1979-

2016) (Kanamitsu et al., 2002), ECMWF ERA INTERIM (1979 – по наст. время) (Dee at al., 2011), JRA-55 (1958 – по наст. время) (Kobayashi et al., 2015).

В последние десятилетие созданы реанализы, позволяющие анализировать изменения метеорологических характеристик за весь период XX века, с использованием ограниченного ряда ассимилируемых данных для раннего периода. Такое ограничение приводит к снижению качества (согласованности с данными наблюдений) результатов по сравнению с реанализами для современных периодов (во второй половине XX века), но позволяет получить однородные данные, не зависящие от изменений в количестве ассимилируемых переменных и методах ассимиляции.

В настоящее время таких реанализов существует три. Это – NOAA-CIRES Twentieth-Century Reanalysis V2 (Compo et al., 2011) – американский реанализ, совместный проект Управления океанических и атмосферных исследований (National Oceanic and Atmospheric Administration) – NOAA, и Совместного института по исследованиям в области наук об окружающей среде (Coopera-tive Institute for Research in Environmental Sciences) – CIRES, реанализы Европейского центра среднесрочных прогнозов (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) - ECMWF ERA20C (Poli et al., 2016; Hersbach et al., 2015) и CERA20C (Laloyaux et al., 2016; 2017).

Основное различие между данными реанализами заключается в использовании различных ассимилируемых данных. NOAA20C – использует данные о давлении на поверхности, ERA20C – давление на поверхности, среднее давление на уровне моря и данные о скорости и направлении ветра у поверхности океана. В реанализе CERA20C используется совместная модель атмосферы и океана и, помимо перечисленных ассимилируемых данных для атмосферы, используются также данные по температуре и солености океана. По причине использования различных ассимилируемых данных, моделей, систем усвоения эмпирических данных продукты реанализов существенно различаются как по пространственной структуре, так и временной эволюции.

В данной работе проводится сравнение данных наблюдений и реанализов, использующихся для анализа аномалий температуры в Северном полушарии в течение XX века, в частности в Арктическом регионе. Анализируется пространственная структура среднегодовых аномалий, среднегодовые и среднесезонные тренды температуры в СП в целом, средних широтах СП, Арктике.

Данные и методы исследования

В настоящее время широко используются два массива глобальных сеточных данных о приповерхностной температуре за последние примерно 150 лет. Это данные Института космических исследовании Годдарда Американского аэрокосмического areнтства (Goddard Institute for Space Studies NASA) GISTEMP (GISTEMP Team, 2017; Hansen et al., 2010; Compo et al., 2011), а также данные Центра Гадлея по исследованию климата метеослужбы Великобритании – HadCrut4 (Jones et al., 1999; Brohan et al., 2006).

Массив температуры у поверхности GISTEMP (NASA/GISS) представляет собой оценку глобального поля температуры поверхности и состоит из ежемесячных аномалий температуры с 1880 г. по настоящее время (GISTEMP Team, 2017; Hansen et al., 2010). Измерения температуры воздуха у поверхности Земного шара обновляются примерно в середине каждого месяца с использованием текущих данных с наземных метеорологических станций по всему миру NOAA GHCN (Global Historical Climatology Network). Массив разработан Национальным центром климатических данных (National Climatic Data Center, NCDC), Государственным университетом штата Аризона (Arizona State University), Центром анализа информации о углекислом газе (Carbon Dioxide Information Analysis Center) а также данные с Антарктических станций SCAR (Scientific Committee on Antarctic Research). Данные по температуре поверхности океанов ERSST v4 (Extended Reconstructed Sea Surface Temperature data set) получены с помощью статистического анализа данных наблюдений с кораблей, буев и других морских платформ. На поверхности суши данные собираются с фиксированных станций общим числом примерно 6000 станций. Оригинальный набор данных доступен с 1871г. по настоящее время на сетке 2x2°, и состоит из температурных аномалий, вычисленных относительно базового периода 1951-1980 гг.

Сеточный архив HadCRUT4 (http://www.cru.uea.ac.uk, Jones et al., 1999; Brohan et al., 2006) является совместным продуктом Центра Гадлея Метеорологической службы Соединенного Королевства (UK Met Office Hadley Center: MOHC) и Климатического исследовательского подразделения (Climate Research Unit: CRU) Университета Восточной Англии (University of East Anglia) и представляет собой совместный набор данных по приземной температуре CRUTEM4 (совместно поддерживаемый массив CRU и MOHC) и по температуре поверхности океанов и морей HadSST3 (Hadley Centre sea surface temperature data set). Общее число фиксированных станций на поверхности составляет около 5500 шт. Данные доступны с 1850 г. по настоящее время на широтно-долготной сетке 5х5° в виде аномалий относительно базового периода 1961-1990 гг.

Данные HadSST3, а также ERSST4 являются глобальным ежемесячным набором данных о температуре поверхности океана, полученным путем статистического анализа данных наблюдений Международной базы данных по характеристикам океана и атмосферы (International Comprehensive Ocean–Atmosphere Dataset, ICOADS). ICOADS – это самый обширный в мире архив морских метеорологических данных, представляющий собой цифровую базу данных, содержащую 261 миллион наблюдений за погодой, сделанных судами, стационарными и дрейфующими буями с наибольшим покрытием, начиная с середины XX века (Freeman et al., 2017).

При анализе выбор был сделан в пользу GISTEMP по следующим причинам. Сравнение указанных массивов (Hansen et al., 2010; Jones et al., 2012) показало, что оба набора данных очень похожи, поскольку основаны на одних и тех же исходных данных по температуре, и отдельные различия в данных практически не влияют на результаты для крупных регионов и на глобальные закономерности. При этом расхождения рядов более заметны в XIX – начале XX столетии, когда существенно выше неопределенность оценок (Груза, Ранькова, 2012), особенно в арктическом регионе. В связи с использованием разных методов интерполяции анализ GISTEMP дает более полное и качественное покрытие в регионах, где недостаточно данных (Hansen et al., 2010), в т.ч. в Арктике, по сравнению с анализом HadCRUT4.

Данные реанализов лишены пропусков, поскольку являются продуктом модельных расчетов. В работе использовались данные трех существующих на настоящее время реанализов, охватывающих весь XX век.

NOAA-CIRES Twentieth-Century Reanalysis V2. NOAA20C является проектом по созданию массива данных по характеристикам атмосферы с глобальным покрытием, охватывающий период с конца XIX века (с 1871 по 2012 г.), в котором ассимилируются только данные наблюдений давления у поверхности, а в качестве граничных условий используются наблюдаемые среднемесячные значения температуры поверхности океана и распространения морского льда (Compo et al. 2011; Whitaker et al. 2004). Данные об атмосферном давлении предоставляются Международным банком данных о давлении у поверхности (ISPD v3.2.6 - Cram et al., 2015), включающий в себя наблюдения за атмосферным давлением на метеорологических станциях на суше, морских наблюдениях на судах и отчеты об отслеживании тропических циклонов. Банк данных был создан на основе широкого международного сотрудничества под эгидой инициативы «Реконструкция атмосферной циркуляции над Землей» (ACRE – Сотро et al., 2011) и рабочих групп GCOS (GCOS-200, 2016) и WCRP (WCRP, 2017). Нижние граничные условия – температура поверхности океана и распространение морского льда, необходимые для модели атмосферы, берутся из массива данных Центра Гадлея Метеорологической службы Великобритании UK Met Office HadISST1.1 (Rayner et al., 2003).

ЕСМWF ERA 20С. ERA20С – атмосферный реанализ ЕСМWF (Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды), специально разработанный в 2014 г. для климатических исследований, охватывающий период 1900-2010 гг. Этот реанализ, в отличие от предыдущих проектов ERA, ассимилирует наблюдения, которые ранее не использовались для численного прогноза погоды (Poli et al., 2016, Hersbach et al., 2015). Использованные данные наблюдений включают в себя давление атмосферы у поверхности, а также данные о скорости ветра и высоте ветровой волны. Наблюдения атмосферного давления у поверхности взяты из Международного банка данных по давлению (ISPD v3.2.6, Cram et al., 2015) и Международного набора данных по атмосфере и океану (ICOADS v2.5.1, Woodruff et al., 2011), а также данные по ветру у поверхности океана от ICOADS v2.5.1. В случае дублирования данных по давлению у поверхности предпочтение отдается ICOADS (Hersbach et al., 2015).

По сравнению с NOAA20C, ERA20C охватывает меньший период, но имеет лучшее горизонтальное и вертикальное разрешение. Из-за различий в усвояемых данных результаты ERA20C в целом лучше, чем NOAA20C в относительно хорошо покрытых данными наблюдений регионах, таких как Западная Европа, в то время как NOAA20C показывает лучшие результаты в регионах с

плохим покрытием данных, таких как Южное полушарие в средних и высоких широтах (Poli, Paul & National Center for Atmospheric Research Staff, 2017).

ECMWF CERA 20C. В 2016 г. ЕСМWF выпустил новый глобальный реанализ XX века, CERA20C, охватывающий период 1901-2010 гг. (Poli, Paul & National Center for Atmospheric Research Staff, 2017; Laloyaux et al., 2016). В отличии от двух ранее рассмотренных реанализов, CERA20C – продукт расчетов с совместной моделью атмосферы и океана. Атмосферные наблюдения, ассимилированные в CERA20C, включают давление у поверхности и среднее давление на уровне моря из архивов ISPDv3.2.6 и ICOADSv2.5.1 и данные ветра у поверхности из архива ICOADSv2.5.1. Для ассимиляции в океаническую модель используются наблюдения температуры и солености океана из набора данных EN4.2.0 Центра Гадлея (Good et al., 2013). Первые результаты сравнений показывают, что CERA20C имеет более реалистичное представление тепловых потоков между океаном и атмосферой и среднего давления на уровне моря по сравнению с другими реанализами для XX века (Laloyaux et al., 2016; 2017).

В то же время наблюдаются ошибки в оценках теплоемкости океана и завышение площади арктических морских льдов. Усовершенствованная оценка погрешности, моделирование двухстороннего теплообмена между океаном и атмосферой, а также более совершенная версия модели приводят к заметному улучшению результатов CERA20C по сравнению с ERA20C для первой половины XX века. Тем не менее, данные CERA20C показывают несколько худшие результаты для современного периода (после 1979 г.), когда становится доступным более широкий спектр наблюдений. (Laloyaux et al., 2017).

Для сравнения аномалий температуры по данным различных реанализов, для расчета аномалий в реанализах был использован базовый (контрольный) период 1951-1980 гг., который используется в данных GISTEMP. Так как рассматриваемые массивы данных представлены на разных сетках с разным разрешением, данные реанализов были интерполированы на сетку данных наблюдений 2×2°. Кроме этого, данным реанализов присваивались значения «отсутствие данных» в тех же ячейках, где данные отсутствовали в архиве GISTEMP.

В данной работе проанализировано пространственное распределение трендов температуры и оценка их статистической значимости для данных наблюдений GISTEMP и реанализов NOAA20C, ERA20C и CERA20C для различных климатических периодов с начала XX века. Анализировалась корреляция между детрендированными рядами аномалий температуры в различных массивах данных для различных периодов, а также пространственная корреляция между распределением трендов аномалий температуры.

Результаты

Зональное распределение аномалий температуры

Аномалии зонально осредненной среднегодовой приповерхностной температуры за период 1900-2010 гг. по данным наблюдений и реанализов представлены на рис. 2. По данным наблюдений GISTEMP отчетливо прослеживается период ПСДВ в арктических широтах с максимумом в начале 1940-х гг. ПСДВ в ERA20C имеет наиболее близкую к данным наблюдений амплитуду, однако, и широтная протяженность и длительность ПСДВ значительно превышает аномалии по эмпирическим данным. В ERA20C ПСДВ начинается уже в начале XX века и охватывает область до средних широт (40° - 50° с.ш.).



Рисунок 2. Аномалии зонально осредненной среднегодовой приповерхностной температуры (в °C, 11-летнее скользящее среднее) по данным наблюдений GISTEMP (а) и реанализов NOAA20C (б), ERA20C (в), CERA20C (г)

Реанализ CERA20C в отличие от ERA20C демонстрирует в начале века аномалии отрицательного знака вплоть до конца 1930-х гг., а положительные аномалии температуры в период ПСДВ существенно занижены по сравнению с данными GISTEMP. В данных реанализа NOAA20C отрицательные аномалии температуры охватывают всю первую половину XX века с постепенным уменьшением амплитуды и переходя в современное потепление в отличие от реанализов ERA20C и CERA20C, которые, как и данные наблюдений, демонстрируют период отрицательных аномалий в 1970-х гг., разделяющий положительные аномалии ПСДВ и современного потепления. Современное же потепление в высоких широтах Северного полушария в целом достаточно реалистично представлено во всех массивах данных.

Температурные аномалии в различных широтных зонах СП

Изменение среднегодовых аномалий температуры на протяжении XX века для различных широтных зон представлено на рис. 3. Масштаб температурной шкалы на графике для высоких широт (рис. 3в) в 2 раза меньше, чем на графиках для Северного полушария (рис. 3а) и средних широт (рис. 3б). Для учета эффекта неполного покрытия данными в архиве GISTEMP при сравнении аномалий температуры, данным реанализов присваивались значения «отсутствие данных» в тех же ячейках, где они отсутствовали в массиве GISTEMP. На рис. 3 приведены как оригинальные значения массивов реанализов (линия пунктиром), так и значения осредненные по той же области покрытия, как в GISTEMP (сплошная линия). Следует отметить, что осреднение реанализов по маске данных GISTEMP (сплошные линии) для всех реанализов приводит к более согласованным с данными наблюдений аномалиям.



Рисунок 3. Аномалии среднегодовой приповерхностной температуры по данным наблюдений GISTEMP и трех реанализов ERA20C, CERA20C и NOAA20C (°C, 5-летнее скользящее среднее) для Северного полушария (а), региона 40°-60°с.ш. (б) и региона 60°-90°с.ш. (в)

Масштаб шкалы ординат на графиках а), б) и с) отличается в 2 раза. Сплошными линиями показаны аномалии, полученные при осреднении данных реанализов по массе данных GISTEMP, прерывистыми – данные реанализов без пропусков (оригинальные данные)

Ввиду выбранного базового периода 1951-1980 гг., относительно которого вычислялись аномалии, временные ряды аномалий температуры по различным данным наиболее близки в 1950-1980-е гг. для всех широтных зон. Для СП в целом (рис. 3а), заметны расхождения между данными наблюдений и результатами реанализов в первую половину XX века. Для Северного полушария лучше всего ПСДВ воспроизводят реанализы CERA20C и NOAA20C, в то время как ERA20C завышает значения потепления вплоть до начала 1940-х гг. При меньшем расхождении всех массивов данных в современном периоде наилучшее соответствие с данными наблюдений наблюдается для реанализа CERA20C.

В средних широтах картина несколько меняется (рис. 3б). Наиболее высокое соответствие в первой половине XX века отмечается для данных GISTEMP и NOAA20C, в то время как европейские реанализы ERA20C и CERA20C завышают значения (до 0.2°C и 0.5°C соответственно), а в течение современного периода лучше коррелируют с данными наблюдений, чем американский реанализ. Амплитуда температурных аномалий для этой широтной зоны весьма близка к средне-полушарным аномалиям. При этом различия между оригинальными данными реанализов и данными с пропусками практически отсутствуют ввиду достаточно полного покрытия данными наблюдений средних широт СП в последние десятилетия.

Значительно более сильные расхождения между аномалиями приземной температуры воздуха (ПТВ) по данным наблюдений и реанализов отмечаются

в высоких широтах ($60^{\circ}-90^{\circ}$ с.ш.) СП (рис. 3в). Периоды потепления и похолодания середины XX века выражены лучше, с большими (в два и более раза) аномалиями температуры, чем в средних широтах и в целом для СП как по данным наблюдений, так и в реанализах. Причем значения "раннего" потепления по данным ERA20C и GISTEMP превышали значения современного вплоть до 2000 г. (для 5-летнего скользящего осреднения). Несмотря на лучшее (среди реанализов) соответствие в период ПСДВ для всего СП, совместный реанализ CERA20C занижает аномалии ПСДВ (до 0.3°C) по сравнению с атмосферным реанализом ERA20C, который, наоборот, завышает значения (до 0.4°C). Реанализ NOAA20C занижает значения потепления в середине века по сравнению с данным GISTEMP, а различия между аномалиями ПТВ в NOAA20C и ERA20C составляет примерно 1.5°C до начала 1950-х гг.

По данным реанализа NCEP20C в высоких широтах, период ПСДВ и последующего похолодания 1946-75 гг. характеризуется значительными декадными колебаниями температуры без выраженной мультидекадной аномалии ПСДВ как в данных других реанализах и данных GISTEMP. Пик потепления в NOAA20C наступает примерно на 5 лет раньше (конец 1930-х гг.), а последующий температурный минимум – уже в начале 1950-х гг., за чем следует достаточно монотонное потепление. Аномалии температуры в период ПСДВ на 0.4°C - 0.8°C ниже в сравнении со всеми остальными массивами данных. В современный период с 1985 г. реанализ NOAA20C занижает температурные аномалии в Арктике.

Сезонные особенности изменений ПТВ в высоких широтах СП

Анализ данных наблюдений показал, что арктическое усиление наиболее ярко проявлялось в зимний и весенний период (Bekryaev et al., 2010; Polyakov et al., 2002; Serreze et al., 2006). Изменение сезонных аномалий температуры на протяжении XX века для высоких широт СП (60-90° с.ш.) представлено на рис. 4. При этом реанализам также присваивались значения «отсутствие данных» по маске массива GISTEMP.

Аномалии температуры в период современного потепления и ПСДВ также максимальны зимой как по данным GISTEMP, так и реанализов (рис. 4a) и сравнимы с аномалиями для осеннего сезона (рис. 4г). При этом для эволюции среднесезонных температур реанализы демонстрируют совершенно разные результаты по согласованности с данными наблюдений в различные сезоны.

Сопоставление данных не позволяет однозначно ранжировать реанализы по их способности воспроизводить сезонные аномалии температуры в Арктике. Так, например, если ERA20C практически идеально согласуется с данными GISTEMP осенью и, в целом, зимой для всего анализируемого периода, то для весны и лета этот реанализ показывает, в сравнении с другими, худшие результаты до 1950-х гг. (завышает значения на 1.5°C). Весной и летом наилучшее соответствие с данными наблюдений отмечается для реанализа CERA20C, который показывает также достаточно хорошее соответствие и в зимний период. Но этот реанализ показывает меньшие значения по сравнению с данными GISTEMP в период ПСДВ осенью.



Рисунок 4. Аномалии среднесезонной приповерхностной температуры по данным наблюдений GISTEMP и реанализов ERA20C, CERA20C и NOAA20C (°C, 5-летнее скользящее среднее) для высоких широт (60°-90°с.ш.) Северного полушария, для зимы (а), весны (б), лета (в), осени (г)

Для реанализа NOAA20C период похолодания середины столетия заметен только в зимний период (рис. 4а), но это похолодание начинается раньше, чем в других данных. В остальные сезоны это похолодание выражено крайне слабо (рис. 4 б,в,г). Американский реанализ существенно занижает значения по сравнению с эмпирическими данными (примерно до 1.2°C)

Можно отметить, что в целом эволюция аномалий температуры лучше всего совпадает с данными наблюдений в реанализе CERA20C, за исключением осеннего периода, где данный реанализ заметно уступает ERA20C.

Коэффициенты линейных трендов среднегодовых и среднесезонных температурных рядов для 30-летних временных периодов 1916-45 гг., 1946-75 гг., 1976-2005 гг., в СП, средних широтах СП (40°-60° с.ш.) и в арктическом регионе (60-90° с.ш.), соответствующие данным на рис. 3 и 4, представлены в табл. 1. Данные временные отрезки выбраны как представляющие периоды потепления начала века, последующего похолодания и современного потепления. Отметим, что выбор таких временных отрезков обусловлен необходимостью единого критерия количественной оценки климатических трендов для различных данных и является компромиссным решением. Годы экстремумов долгопериодной эволюции ПТВ в СП существенно различаются, равно как и продолжительность периодов потепления и похолодания (рис. 1, 3, 4), но в целом максимум потепления в середине века в СП приходится на 1940-е гг., а минимум похолодания – на середину 1970-х гг.

Таблица 1. Коэффициенты линейных трендов (после осреднения 5-летнем скользящем средним, как на рис. 3 и 4) аномалий температуры, осредненных для различных широтных зон: Северного полушария, средних широт (40-60° с.ш.) и высоких широт (60-90° с.ш.) СП, для периодов 1916-45 гг., 1946-75 гг., 1976-2005 гг., для зимы, весны, лета и осени. Коэффициенты,

Северное Полушарие 40-60°N 60-90°N CERA 20C CERA 20C NCEP NCEP NCEP CERA GISS ERA20C GISS ERA20C GISS ERA20C 20C 20C 20C 20C 1916/45 0.50 0.49 0.26 0.37 0.34 0.36 -0.05 0.16 1.07 1.00 0.50 0.94 зима 0.53 0.53 0.37 0.52 0.27 0.49 0.11 0.39 1.80 1.39 0.92 1.43 0.51 0.35 0.15 0.36 0.41 0.13 -0.35 0.10 1.05 0.30 -0.23 0.50 весна 0.47 0.46 0.18 0.24 0.41 0.28 0.02 0.03 0.47 0.86 0.23 0.58 лето 0.51 0.58 0.31 0.34 0.34 0.52 0.02 0.10 0.96 1.07 1.04 осень 0.61 -0.23 -0.39 1946/75 -0.11 0.05 -0.17 -0.14 0.14 -0.14 -0.26 0.81 -0.26 0.01 -0.23 -0.12 0.11 -0.16 -0.28 -0.01 0.28 -0.04 -0.44 1.29 0.01 0.07 зима -0.05 0.15 -0.18 -0.22 0.06 0.37 -0.03 -0.13 -0.43 1.10 -0.43 -0.38 весна -0.09 -0.13 -0.35 -0.25 -0.30 0.13 -0.07 лето 0.08 -0.11 0.02 0.90 0.32

-0.06

0.80

0.68

0.69

1.02

0.78

-0.26

1.20

1.44

0.96

1.17

1.19

-0.39

0.99

1.27

0.78

0.88

0.98

-0.80

1.21

1.08

1.46

1.06

1.37

0.02

0.80

-0.15

1.22

1.37

0.69

-0.59

1.95

1.92

2.01

1.67

2.27

-0.07

1.25

1.18

1.19

1.08

1.52

-0.16

0.72

0.74

0.71

0.72

0.72

осень 1976/05

зима

весна

лето

осень

-0.11

0.69

0.54

0.68

0.81

0.70

-0.25

1.00

1.02

0.93

0.97

1.06

-0.28

0.77

0.85

0.73

0.69

0.79

-0.22

0.96

1.17

0.83

0.98

0.86

значимые на уровне 1% выделены жирным шрифтом

Можно отметить, что для СП в периоды потеплений данные GISTEMP и реанализов качественно согласуются между собой, показывая статистически значимые тренды для среднегодовых и всех среднесезонных аномалий. При этом для современного потепления отмечается и относительно наилучшее количественное соответствие. В период 1946-1975 гг. эмпирические данные и данные реанализов демонстрируют статистически значимые отрицательные среднегодовых температур (за исключением тренды для реанализа NOAA20C), но для среднесезонных аномалий отмечаются существенные различия, в том числе и в знаке трендов.

Для средних широт СП согласованные качественно и, в целом, количественно положительные тренды по всем данным отмечаются лишь для перисовременного потепления. В период 1916-1945 ГГ. наилучшее ода соответствие трендов с данными наблюдений демонстрирует реанализ NOAA20C, а в период похолодания реанализы (за исключением NOAA20C) хорошо согласуются с данными наблюдений только для лета и осени.

В Арктике в период 1976-2005 гг. отмечается существенный разброс между темпами потепления в данных GISTEMP и реанализах. Если CERA20С показывает достаточно успешно воспроизводит наблюдаемые тенденции, то ERA20C и NOAA20C примерно на 50% завышают и занижают величину положительных трендов, соответственно. В американском реанализе это происходит главным образом из-за отрицательного тренда зимой, который связан с декадным температурным максимумом в начале 1980-х гг. и относительно слабым потеплением в 1990-х и 2000-х гг. NOAA20С также

выделяется в период 1946-1975 гг., демонстрируя значимые положительные тренды для среднегодовой ПТВ и трех (кроме осени) сезонов.

Пространственное распределение трендов приповерхностной температуры

На рис. 5 представлены тренды среднегодовой ПТВ к северу от 30° с.ш., для трех климатических 30-летних периодов – потепления середины XX века (1916-1945 гг.), следующего за ним похолодания (1946-1975 гг.) и современного потепления (1976-2005 гг.), для всех анализируемых массивов данных. Данным реанализов присваивались значения "отсутствие данных" в тех ячей-ках, где количество пропущенных значений в каждом 30-летнем временном ряде составляло более 3-х лет по данным GISTEMP.



Рисунок 5. Тренды среднегодовой приповерхностной температуры (°С/30 лет) во внетропических широтах СП по данным наблюденийGISTEMP (первый ряд) и реанализов ERA20C (второй ряд), CERA20C (третий ряд), NOAA20C (четвертый ряд, для трех 30-летних климатических периодов: потепления начала XX века, 1916-1945 гг. (левая колонка), похолодания 1946-1975 гг. (средняя колонка) и современного потепления 1976-2005 гг. Регионы со статистически значимыми коэффициентами трендов (уровень значимости 1%) отмечены точками Как видно из рис. 5, период ПСДВ в отличие от современного потепления, характеризуется существенной пространственной неоднородностью распределения трендов с разнонаправленными тенденциями. Потепление во внетропических широтах СП в целом отмечалось в Западном полушарии и высоких широтах Восточного полушария, а над Евразией, особенно западной частью, и Тихим океаном примерно южнее 40° с.ш. отмечаются обширные регионы с отрицательными трендами для всех массивов данных. Но отрицательные тренды, за исключением некоторых относительно небольших регионов, являются статистически незначимыми.

По данным наблюдений GISTEMP области с положительными трендами являются статистически значимыми в зоне Атлантического океана, в также в высоких широтах Тихого (на уровне 1% и выше). Те же тенденции наблюдаются по данным европейских реанализов, а в случае NOAA20C статистически значимые положительные тренды появляются также над Северной Америкой. Кроме этого, присутствует существенное отличие европейских реанализов от данных наблюдений – отмечаются статистически значимые отрицательные тренды над Евразией.

Период похолодания 1946-75 гг. имеет более однородную структуру с преобладанием отрицательных трендов за исключением Европейской территории, высоких широт Северной Америки и Тихого океана, где отмечалось некоторое потепление в этот период, но тренды в данных областях не являются статистически значимыми. Такая картина характерна для данных наблюдений и всех реанализов за исключением NOAA20C. Этот реанализ показывает положительные, статистически значимые тренды практически над всей Арктикой и на востоке Северной Евразии, что и приводит при пространственном осреднении к отсутствию выраженного похолодания в период 1946-1975 гг., для всего СП и для Арктики, что обсуждалось ранее (рис. 3). Также можно отметить область значимого потепления в Монголии и Северном Китае в реанализах ERA20C и NOAA20C, которая отсутствует в данных GISTEMP. В целом период похолодания отличается самым низким покрытием значимыми трендами для всех реанализов и данных наблюдений.

Для современного периода высокое покрытие статистически значимыми положительными трендами для внетропических регионов наблюдается для всех массивов данных. Максимальное покрытие отмечается для реанализа ERA20C, наиболее близкое к эмпирическим данным распределение трендов отмечается в европейских реанализах.

Для периода ПСДВ наибольшей согласованности с данными наблюдений, по сравнению с другими массивами, достигает реанализ ERA20C. А для периода похолодания середины века с данными GISTEMP лучше соотносятся европейские реанализы как в пространственной структуре (рис. 5), так и в по оценке осредненных по регионам трендов (табл. 1).

Временная и пространственная корреляции аномалий приземной температуры

На рис. 6 представлена временная корреляция между аномалиями температуры в трех реанализах и данных наблюдений в каждой точке сетки для трех климатических периодов для региона 30-90° с.ш. Корреляции рассчитывались после вычитания линейных трендов для соответствующих периодов, т.е. представляют оценку согласованности аномалий в диапазоне изменчивости от межгодового до декадного.



Рисунок 6. Временная корреляция между аномалиями температуры (после удаления линейных трендов) и пространственная корреляция между температурными трендами по данным GISTEMP и реанализов ERA20C (левая колонка), CERA20C (средняя колонка), NOAA20C (правая колонка) для трех 30-летних климатических периодов: потепления начала XX века, 1916-1945 гг. (верхний ряд), похолодания 1946-1975 гг. (средний ряд) и современного потепления 1976-2005 гг. (нижний ряд).

Внизу каждой карты показано значение пространственной корреляции распределения

В целом, от начала XX века к современному периоду значения корреляции с данными GISTEMP становятся выше для всех сравниваемых реанализов (рис. 6). Для потепления середины XX века наилучшая корреляция достигается между данными наблюдений и реанализом CERA20C с районами стати-

стически значимой корреляции в Европе, Северной Америке и над Тихим океаном. То же самое справедливо и для похолодания 1946-75 гг. Наиболее слабая корреляция наблюдается между GISTEMP и NOAA20C на протяжении всего XX века, в особенности в период ПСДВ. Следует отметить и слабую корреляцию данных NOAA20C с наблюдениями в азиатском регионе в современный период.

Необходимо отметить, что для всех массивов данных наименьшая корреляция наблюдается в районе Арктики и азиатской части Евразии для периода ПСДВ.

Для количественной оценки схожести пространственной структуры температурных трендов (рис. 5) была также рассчитана пространственная корреляция для внетропических широт СП (30-90° с.ш.) между полями трендов в реанализах и в данных GISTEMP.

Наибольшая пространственная корреляция наблюдается между полями трендов по данным GISTEMP и реанализа NOAA20C (0.74) в течение периода ПСДВ 1915-1946 гг.. Самые низкие значения пространственной корреляции (0.24) отмечены в период современного потепления также между данными наблюдений и реанализом NOAA20C, что связано с существенно заниженными темпами среднегодового потепления над Северной Евразией и северной частью Северной Америки.

В период ПСДВ и современного потепления значения пространственной корреляции между полями трендов GISTEMP и европейскими реанализами лежат в диапазоне 0.64...0.68. Корреляция между полями трендов по данным наблюдений и реанализов в период похолодания 1946-1975 гг. значительно ниже (не более 0.44).

Заключение

Выполнено сравнение данных по приповерхностной температуре в Северном полушарии для трех реанализов, охватывающих весь XX век – ERA20C, CERA20C и NOAA20C – с эмпирическими данными GISTEMP. Особое внимание уделялось температурным аномалиям в период потепления середины XX века.

Анализ эволюции температурных аномалий в течение XX века для разных широтных зон показал, что наибольшие различия между данными наблюдений и реанализами наблюдаются в период потепления середины XX века (1916-1945 гг.) и последующего похолодания (1946-1975 гг.), особенно ярко выраженные в высоких широтах СП (60-90 °с.ш.). В целом, лучшее соответствие с эмпирическими данными отмечается для европейских реанализов (рис. 2).

Изменения среднегодовых аномалий температуры для всего СП и арктического региона (рис. 3) наиболее реалистично воспроизводит реанализ CERA20C на протяжении всего XX века.

Успешность того или иного реанализа в воспроизведении климатических аномалий температуры в высоких широтах СП существенно зависит от сезона, что не позволяет выделить какой-либо продукт как однозначно самый успешный. В целом, для среднесезонных климатических аномалий первой половины XX века, CERA20C показывает лучший результат для всех сезонов кроме осени, где это реанализ уступает ERA20C по согласованности с данными наблюдений (рис. 4).

Для пространственного распределения температурных трендов (рис. 5) данные NOAA20C также хуже согласуются с данными наблюдений остальных реанализов – значения трендов остаются положительными и во время похолодания 1946-1975 гг. Европейские реанализы показывают лучшее соответствие эмпирическим трендам на протяжении всего XX века.

Оценка статистической значимости температурных трендов показала, что для всех реанализов наибольшее покрытие значимыми трендами во внетропических широтах СП характерно для современного периода и чуть меньшее покрытие – для периода ПСДВ. Минимальное же покрытие значимыми трендами наблюдается для периода похолодания 1946-1975 гг.

Реанализы достаточно успешно воспроизводят межгодовую изменчивость среднегодовых температурных аномалий. Коэффициенты корреляции детрендированных рядов для 30-летних отрезков, как правило, выше 0.8 (рис. 6). Относительно низкая корреляция отмечается в восточной Азии и западной части Северной Америки. Согласованность температурных аномалий в целом растет от начала века к современному периоду. Наиболее высокие значения корреляции среднегодовых аномалий с данными наблюдений отмечаются для реанализа CERA20C.

Таким образом, можно сделать вывод, что изменения температуры во внетропических широтах СП, в течение всего XX века, в том числе в период ПСДВ и период последующего похолодания более реалистичны в европейских реанализах, прежде всего в реанализе CERA20C. Реанализ NOAA20C существенно хуже воспроизводит реальную временную и пространственную динамику изменений аномалий температуры в первой половине XX века.

Следует отметить и существенное расхождение величины современных аномалий температуры (в первом десятилетии XXI века), достигающее 0.5°C для среднегодовых аномалий в СП, 1°C в Арктике, и более 1.5°C для среднесезонных аномалий в Арктике зимой и осенью. При этом NOAA20C занижает, а CERA20C и ERA20C завышают значения современных температурных аномалий.

Работа выполнена по теме Госзадания 0148-2014-0015 (рег. № 01201352488). Сравнительный анализ данных в арктических широтах выполнен при поддержке РНФ (проект №14-17-00647-П).

Список литературы

Алексеев Г.В. 2015. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике. – Фундаментальная и прикладная климатология, № 1, с. 11-26.

Алексеев Г.В. 2014. Арктическое измерение глобального потепления. – Лёд и Снег. № 2, с.126. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. 2012. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. – Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД».

Семенов, В. А. 2015. Колебания современного климата, вызванные обратными связями в системе атмосфера – арктические льды – океан. –Фундаментальная и прикладная климатология, № 1, с.232-248.

Bader J., Mesquita M.D., Hodges K.I., Keenlyside N., Østerhus S., Miles M. 2011. A review on Northern Hemisphere sea-ice, storminess and the North Atlantic Oscillation: observations and projected changes. – Atmospheric Research, vol. 101(4), pp. 809-834.

Bao X., Zhang F. 2013. Evaluation of NCEP–CFSR, NCEP–NCAR, ERA-Interim, and ERA-40 reanalysis datasets against independent sounding observations over the Tibetan Plateau. – Journal of Climate, vol. 26(1), pp. 206-214.

Beitsch A., Jungclaus J.H., Zanchettin D. 2014. Patterns of decadal-scale Arctic warming events in simulated climate. – Climate dynamics, vol. 43(7-8), pp. 1773-1789.

Bekryaev R. V., Polyakov I. V., Alexeev V. A. 2010. Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern Arctic warming. – Journal of Climate, vol. 23(14), pp. 3888-3906.

Bengtsson L., Semenov V., Johannessen O. 2004. The early twentieth-century warming in the Arctic — a possible mechanism. – Journal of Climate, vol. 17(20), pp. 4045-4057.

Booth B.B., Dunstone N.J., Halloran P.R., Andrews T., Bellouin N. 2012. Aerosols implicated as a prime driver of twentieth-century North Atlantic climate variability. – Nature, vol. 484(7393), pp. 228-232.

Brohan P., Kennedy J.J., Harris I., Tett S.F., Jones P.D. 2006. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850. – Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol. 111(D12).

Brönnimann S. 2009. Early twentieth-century warming. – Nature Geoscience, vol. 2(11), pp. 735-736.

Chernokulsky A.V., Esau I., Bulygina O.N., Davy R., Mokhov I.I., Outten S., Semenov V.A. 2017. Climatology and Interannual Variability of Cloudiness in the Atlantic Arctic from Surface Observations since the Late Nineteenth Century. – Journal of Climate, vol. 30(6), pp. 2103-2120.

Chylek P., Folland C.K., Lesins G., Dubey M.K., Wang M. 2009. Arctic air temperature change amplification and the Atlantic Multidecadal Oscillation. – Geophysical Research Letters, vol. 36(14).

Compo G.P., Whitaker J.S., Sardeshmukh P.D., Matsui N., Allan R.J., Yin X., Brönnimann S. 2011. The twentieth century reanalysis project. – Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 137(654), pp. 1-28.

Cram T.A., Compo G.P., Yin X., Allan R.J., McColl C., Vose R.S., Whitaker J.S., Matsui N., Ashcroft L., Auchmann R., Bessemoulin P., Brandsma T., Brohan P.,

Brunet M., Comeaux J., Crouthamel R., Gleason Jr B.E., Groisman P.Y., Hersbach H., Jones P.D., Jonsson T., Jourdain S., Kelly G., Knapp K.R., Kruger A., Kubota H., Lentini G., Lorrey A., Lott N., Lubker S.J., Luterbacher J., Marshall G.J., Maugeri M., Mock C.J., Mok H.Y., Nordli O., Rodwell M.J., Ross T.F., Schuster D., Srnec L., Valente M.A., Vizi Z., Wang X.L., Westcott N., Woollen J.S., Worley S.J. 2015. The international surface pressure databank version 2. – Geoscience Data Journal, vol. 2(1), pp. 31-46.

Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Bechtold P. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. – Quarterly Journal of the royal meteorological society, vol. 137(656), pp. 553-597.

Delworth T.L., Knutson T.R. 2000. Simulation of early 20th century global warming. – Science, vol. 287(5461), pp. 2246-2250.

Freeman E., Woodruff S.D., Worley S.J., Lubker S.J., Kent E.C., Angel W.E., Berry D.I., Brohan P., Eastman R.,Gates L., Gloeden W., Ji Z., Lawrimore J., Rayner N.A.,Rosenhagen G, Smith S.R. 2017. ICOADS Release 3.0: A major update to the historical marine climate record. – Int. J. Climatol. (CLIMAR-IV Special Issue), vol. 37, pp. 2211-2237, doi:10.1002/joc.4775.

Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Kovalev E.G. & Smolyanitsky V.M. 2010. Climate change in Eurasian Arctic shelf seas: centennial ice cover observations. – Springer Science & Business Media.

Gillett N.P., Stone D.A., Stott P.A., Nozawa T., Karpechko A.Y., Hegerl G.C., Jones P. D. 2008. Attribution of polar warming to human influence. – Nature Geoscience, vol. 1(11), pp. 750-754.

GISTEMP Team. 2017: GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP). – j NASA Goddard Institute for Space Studies. Dataset accessed 20YY-MM-DD at https://data.giss.nasa.gov/gistemp/.

Good S.A., Martin M.J., Rayner N.A. 2013. EN4: Quality controlled ocean temperature and salinity profiles and monthly objective analyses with uncertainty estimates. – Journal of Geophysical Research: Oceans, vol. 118(12), pp. 6704-6716.

Hansen J., Ruedy R., Sato M. & Lo, K. 2010. Global surface temperature change. – Reviews of Geophysics, vol. 48(4).

Hansen J., Ruedy R., Glascoe J. & Sato M. 1999. GISS analysis of surface temperature change. – Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol. 104(D24), pp. 30997-31022.

Hersbach H., Peubey C., Simmons A., Berrisford P., Poli P. & Dee D. 2015. ERA-20CM: a twentieth-century atmospheric model ensemble. – Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 141(691), 2350-2375.

IPCC 2007. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR4). 2007. – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC 2013. Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR5). 2013. – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Johannesen O. M., Bengtsson L., Miles M. W., Kuzmina S. I., Semenov V. A., Alekseev G. V., Nagurnyi A.P., Zakharov V.F., Bobylev L.P., Petterson L.H., Hasselmann K., Cattle H.P. 2004. Arctic climate change: Observed and modelled temperature and sea-ice variability. – Tellus A, vol. 56(4), pp. 328-341.

Johannesen O.M., Kuzmina S.I., Bobylev L.P., Miles M.W. 2016. Surface air temperature variability and trends in the Arctic: new amplification assessment and regionalisation. – Tellus A: Dynamic meteorology and Oceanography, vol. 68(1), pp. 28234.

Jones P.D., New M., Parker D.E., Martin S., Rigor I.G. 1999. Surface air temperature and its changes over the past 150 years. – Reviews of Geophysics, vol. 37(2), pp. 173-199.

Jones P.D., Lister D.H., Osborn T.J., Harpham C., Salmon M. & Morice C.P. 2012. Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010. – Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol. 117(D5).

Kalnay E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds R. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. – Bulletin of the American meteorological Society, vol. 77(3), pp. 437-471.

Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woolle J., Yang S.K., Hnilo J.J., Fiorino M., & Potter G.L. 2002. Ncep-doe amip-ii reanalysis (r-2). – Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 83(11), pp. 1631-1643.

Kobayashi S., Ota Y., Harada Y., Ebita A., Moriya M., Onoda H., Onogi K., Kamahori H., Kobayashi C., Endo H., Miyaoka K., Takahashi K. 2015. The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. – Journal of the Meteorological Society of Japan, ser. II, vol. 93(1), pp. 5-48.

Kuzmina S.I., Johannessen O.M., Bengtsson L., Aniskina O.G., & Bobylev L.P. 2008. High northern latitude surface air temperature: comparison of existing data and creation of a new gridded data set 1900–2000. – Tellus A, vol. 60(2), pp. 289-304.

Laloyaux P., Balmaseda M., Dee D., Mogensen K. & Janssen P. 2016. A coupled data assimilation system for climate reanalysis. – Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 142(694), pp. 65-78.

Laloyaux P, de Boisséson E, Dalhgren P. 2017. CERA-20C: an Earth system approach to reanalysis. ECMWF Winter Newsletter, issue 150.

Lean J., Beer J., Bradley R.S. 1995. Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implications for climate change. – Geophysical Research Letters, vol. 22(23), pp. 3195-3198.

Lean J., Rind D. 1998. Climate forcing by changing solar radiation. – Journal of Climate, vol. 11(12), pp. 3069-3094.

Lee S. 2014. A theory for polar amplification from a general circulation perspective. – Asia-Pac. J. Atmos. Sci, vol. 50, pp. 31-43.

Levitus S., Matishov G., Seidov D., Smolyar I. 2009. Barents Sea multidecadal variability. – Geophysical Research Letters, vol. 36(19).

Lindsay R., Wensnahan M., Schweiger A., Zhang J. 2014. Evaluation of seven

different atmospheric reanalysis products in the Arctic. – Journal of Climate, vol. 27(7), pp. 2588-2606.

Nozawa T., Nagashima T., Shiogama H., Crooks S.A. 2005. Detecting natural influence on surface air temperature change in the early twentieth century. – Geophysical Research Letters, vol. 32(20).

Pithan F., Mauritsen T. 2014. Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models. – Nature Geoscience, vol. 7(3), pp. 181.

Poli P., Hersbach H., Dee D.P., Berrisford P., Simmons A.J., Vitart F., Trémolet Y. 2016. ERA-20C: An atmospheric reanalysis of the twentieth century. – Journal of Climate, vol. 29(11), pp. 4083-4097.

Poli, Paul & National Center for Atmospheric Research Staff. 2017. The Climate Data Guide: ERA-20C: ECMWF's atmospheric reanalysis of the 20th century (and comparisons with NOAA's 20CR).

Polyakov I.V., Alekseev G.V., Bekryaev R.V., Bhatt U., Colony R.L., Johnson M.A., Karklin V.P., Makshtas A.P., Walsh D., Yulin A.V. 2002. Observationally based assessment of polar amplification of global warming. – Geophysical research letters, vol. 29(18).

Polyakov I.V., Bekryaev R.V., Alekseev G.V., Bhatt U.S., Colony R.L., Johnson M.A., Maskshtas A.P., Walsh, D. 2003. Variability and trends of air temperature and pressure in the maritime Arctic, 1875–2000. – Journal of Climate, vol. 16(12), pp. 2067-2077.

Polyakov I.V., Alekseev G.V., Timokhov L.A., Bhatt U.S., Colony R.L., Simmons H.L., Zakharov V.F. 2004. Variability of the intermediate Atlantic water of the Arctic Ocean over the last 100 years. – Journal of Climate, vol. 17(23), pp. 4485-4497.

Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B., Folland C.K., Alexander L.V., Rowell D.P., Kent E.C., Kaplan A. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol. 108(D14).

Schlesinger M.E. & Ramankutty N. 1994. An oscillation in the global climate system of period 65-70 years. – Nature, vol. 367(6465), pp. 723-726.

Semenov V.A., Latif M., Dommenget D., Keenlyside N.S., Strehz A., Martin T., Park W. 2010. The impact of North Atlantic-Arctic multidecadal variability on Northern Hemisphere surface air temperature. – Journal of Climate, vol. 23(21), pp. 5668-5677.

Shiogama H., Nagashima T., Yokohata T., Crooks S.A., Nozawa T. 2006. Influence of volcanic activity and changes in solar irradiance on surface air temperatures in the early twentieth century. – Geophysical Research Letters, vol. 33(9).

Suo L., Otterå O.H., Bentsen M., Gao Y. & Johannessen O.M. 2013. External forcing of the early 20th century Arctic warming. – Tellus A: Dynamic meteorology and Oceanography, vol. 65(1), pp. 20578.

The Global Observing System for Climate: Implementation Needs, GCOS-200, – Geneva. 2016.

Thompson D.M., Cole J.E., Shen G.T., Tudhope A.W., Meehl G.A. 2015. Early twentieth-century warming linked to tropical Pacific wind strength. – Nature Geoscience, vol. 8(2), pp. 117-121.

WGCM-CMIP (WCRP Coupled Model Intercomparison Project). 2017. Available at: https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip6 [Last accessed 8 May 2017].

Whitaker J.S., Compo G.P., Wei X., Hamill T.M. 2004. Reanalysis without radiosondes using ensemble data assimilation. – Monthly Weather Review, vol. 132(5), pp. 1190-1200.

Wood K.R., Overland J.E. 2010. Early 20th century Arctic warming in retrospect. – International Journal of Climatology, vol. 30(9), pp. 1269-1279.

Woodruff S.D., Worley S.J., Lubker S.J., Ji Z., Eric Freeman J., Berry D.I., Brohan P., Kent E.C., Reynolds R.W., Smith S.R., Wilkinson, C. 2011. ICOADS Release 2.5: extensions and enhancements to the surface marine meteorological archive. – International journal of climatology, vol. 31(7), pp. 951-967.

Yamanouchi T. 2011. Early 20th century warming in the Arctic: A review. – Polar Science, vol. 5(1), pp. 53-71.

Zhang R., Delworth T.L., Sutton R., Hodson D.L., Dixon K.W., Held I.M., Robson J. 2013. Have aerosols caused the observed Atlantic multidecadal variability? – Journal of the Atmospheric Sciences, vol. 70(4), pp. 1135-1144.

Статья поступила в редакцию: 18.08.2017 г.

После переработки: 02.02.2018 г.