

Обзоры и хроника

УДК 551.58

DOI: 10.31857/S2076673422030144, EDN: JGPYAJ

Роль естественных колебаний и факторов внешнего воздействия на климат в потеплении середины XX века в Северном полушарии

© 2022 г. Д.Д. Бокучава^{1*,2}, В.А. Семенов^{1,2}¹Институт географии РАН, Москва, Россия;²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

*d.bokuchava@gmail.com

The role of natural fluctuations and factors of external forcing in the Early 20th Century Warming in Northern Hemisphere

D.D. Bokuchava^{1*,2}, V.A. Semenov^{1,2}¹Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;²A.M. Obukhov Institute of Atmosphere Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*d.bokuchava@gmail.com

Received August 22, 2021 / Revised May 17, 2022 / Accepted July 11, 2022

Keywords: *early 20th century warming, global warming, sea ice, internal natural variability, solar activity, volcanism, anthropogenic aerosols, greenhouse gases.*

Summary

The warming in the first half of the 20th century in the Northern Hemisphere, the Early Twentieth Century Warming was comparable in magnitude to the current warming but occurred at a time when the growth rate of the greenhouse gases concentration in the atmosphere was 4–5 times slower than in recent decades. The mechanisms of the early warming are still a subject of discussion. The Early Twentieth Century Warming was most pronounced in the high latitudes of the Northern Hemisphere, and the recent reconstructions consistently indicate a significant negative anomaly of the Arctic sea ice area during early warming period linked with enhanced Atlantic water inflow to the Arctic and amplified warming in high latitudes of the Northern Hemisphere. Assessment of contributions of internal variability and external natural and anthropogenic factors to this climatic anomaly is a key issue for understanding historical and modern climate dynamics. The paper overviews mechanisms of the Early Twentieth Century Warming associated with various internal variability and external anthropogenic and natural factors. An analysis of the findings on the topic of long-term studies of climate variations in the Northern Hemisphere during the period of instrumental observations does not allow one to attribute the Early Twentieth Century Warming to one particular mechanism of internal climate variability or external forcing of the climate. It is most likely, that this event was caused by a combined effect of long-term climatic fluctuations in the North Atlantic and the North Pacific Ocean with a noticeable contribution of external radiative forcing associated with a decrease in volcanic activity, changes in solar activity, and an increase of greenhouse gases concentration in the atmosphere due to anthropogenic emissions. Furthermore, this climate variation in high latitudes of the Northern Hemisphere was enhanced by a number of positive feedbacks.

Citation: Bokuchava D.D., Semenov V.A. The role of natural fluctuations and factors of external forcing in the Early 20th Century Warming in Northern Hemisphere. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2022, 62 (3): 455–474. [In Russian].
doi: 10.31857/S2076673422030144, edn: jgpyaj.

Поступила 22 августа 2022 г. / После доработки 17 мая 2021 г. / Принята к печати 11 июля 2022 г.

Ключевые слова: *потепление середины XX в., глобальное потепление, морские льды, внутренняя естественная изменчивость, солнечная активность, вулканизм, антропогенные аэрозоли, чёрный углерод, парниковые газы.*

Дан обзор существующих исследований, а также приведены основные механизмы внутренней и внешней изменчивости климата в Северном полушарии в середине XX в. Несмотря на то, что внутренняя изменчивость климатической системы, по всей видимости, это – основной механизм, объясняющий потепление середины XX в., количественная оценка вклада каждого фактора остаётся неопределённой, так как существенно зависит от начальных условий в моделях и недостатка инструментальных данных в период середины XX в., особенно в полярных широтах.

Принятые в статье сокращения

АМО (Atlantic Multidecadal Oscillation – АМО) – Атлантическая мультидекадная осцилляция
 АО (Arctic Oscillation – АО) – Арктическая осцилляция
 ДУМ – давление на уровне моря
 ПГ – парниковые газы
 ПСДВ – потепление середины XX в.
 ПТВ – приземная температура воздуха
 САК (North Atlantic Oscillation – NAO) – Северо-Атлантическое колебание
 СП (Northern Hemisphere – NH) – Северное полушарие
 ТДО (Pacific Decadal Oscillation – PDO) – Тихоокеанская декадная осцилляция.
 ТПО – температура поверхности океана
 ТСАК (Pacific-North American index – PNA) – Тихоокеанско-Североамериканское колебание
 ТХЦ – термохалинная циркуляция
 ЮК – южное колебание
 ЮП (Southern Hemisphere – SH) – Южное полушарие

Введение

Рост глобальной приземной температуры в период инструментальных наблюдений с начала XX в. не был монотонным и характеризовался двумя периодами потепления – потеплением в середине XX в. и современным потеплением, разделёнными периодом понижения глобальной температуры. Потепление середины XX в. (ПСДВ) достигло своего максимума в 1940–1945 гг., при этом темпы глобального потепления в этот период были сравнимы с ростом температуры в конце XX в. и составляли 0,47 и 0,48 °C в 30-летние периоды 1916–1945 и 1962–1991 гг. соответственно (рис. 1). В то же время динамика скользя-

щих 30-летних трендов показывает, что с темпами более 0,4 °C за 30 лет глобальная температура повышается для всех 30-летних интервалов с 1958 г., а в период ПСДВ таких темпов рост приземной температуры достигает лишь для трёх 30-летних периодов, начинавшихся в 1914–1916 гг.

Потепление климата в середине XX в. вызывает значительный интерес, так как сопоставимо по амплитуде и пространственным особенностям с современным потеплением, хотя рост концентрации парниковых газов (ПГ) во время ПСДВ происходил в 4–5 раз медленнее по сравнению с ростом в последние десятилетия. Характерный признак обоих эпизодов потепления – усиленный рост приземной температуры воздуха

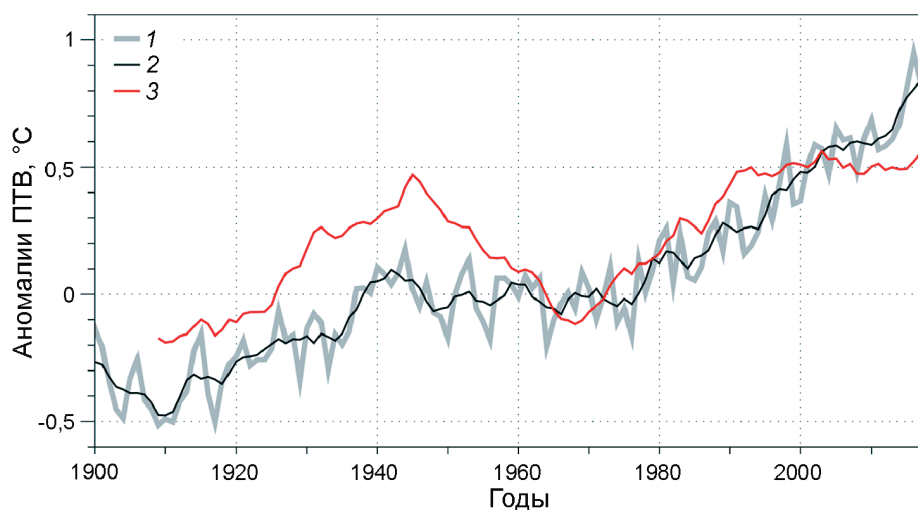


Рис. 1. Аномалии глобальной среднегодовой приземной температуры воздуха (°C) в период 1880–2015 гг.: 1 – без сглаживания; 2 – 5-летнее скользящее среднее; 3 – скользящие 30-летние тренды глобальной среднегодовой приземной температуры воздуха (°C/30 лет, значение соответствует концу 30-летнего периода скользящего тренда); по данным наблюдений BERKLEY (Rohde, 2013)

Fig. 1. Global annual average surface air temperature anomalies (°C) in the period 1880–2015: 1 – without smoothing; 2 – 5-year running mean; 3 – 30-year moving trends of the global annual mean surface air temperature anomalies (°C/30 years, the year corresponds to the end of the 30-year moving window); according to BERKLEY observations (Rohde, 2013)

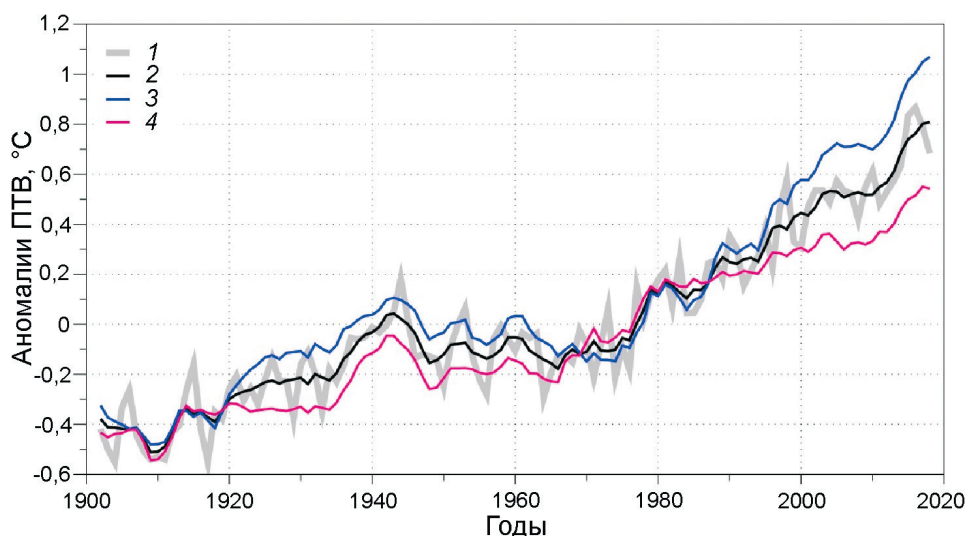


Рис. 2. Аномалии среднегодовой приземной температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) в период 1900–2015 гг.: 1 – глобальные, без сглаживания; 2 – глобальные, 5-летнее скользящее среднее; 3 – СП; 4 – ЮП. По данным наблюдений HadCRUT5.0 (Morice et al., 2021). Для рис. 2–10 базовый период для температурных аномалий – 1951–1980 гг.

Fig. 2. Average annual surface air temperature anomalies ($^{\circ}\text{C}$) in period 1900–2015: 1 – global; 2 – 5-year moving average and global without running mean smoothing; 3 – Northern Hemisphere; 4 – Southern Hemisphere. According to instrumental data HadCRUT5.0 (Morice et al., 2021). The reference period for temperature anomalies for Fig. 2–10 is 1951–1980

(ПТВ) в Северном полушарии (СП) с максимальными значениями в высоких широтах СП в зимний период (Векругаев et al., 2010; Бокучава, Семенов, 2018).

Механизмы потепления середины века в Арктическом регионе анализировались в работе (Vokuchava, Semenov, 2021). Однако региональные климатические аномалии во время ПСДВ наблюдались также за пределами Арктики и не только в зимний, но и в летний сезоны. Так, катастрофические пыльные бури («Пыльный котел», англ. «Dust Bowl») и волны жары в 1930-х годах в Северной Америке, экстремально холодные зимы и летние засухи в 1940-х годах в Европе, засухи в Австралии в период Второй мировой войны могли быть связаны с ПСДВ (Hegerl et al., 2018). Воздействие одних и тех же факторов потепления в СП отличается от воздействия в Арктическом регионе в результате их существенной зависимости от региональных взаимосвязей и масштаба. Например, антропогенные аэрозоли ввиду различий в их свойствах в Арктике приводят к эффекту, ведущему к усилению потепления (Vokuchava, Semenov, 2021), в то время как в СП в первую очередь играют роль аэрозоли, отражающие солнечную радиацию и приводящие к уменьшению среднеполушарной

температуры. Отклик на воздействие вулканического стратосферного аэрозоля существенно зависит от широты, на которой произошло извержение (Kravitz, Robock, 2011). Океанические и атмосферные моды внутренней изменчивости климата в средних и низких широтах СП могут оказывать принципиально иное воздействие на климат СП по сравнению с климатом Арктики.

Динамика изменений температуры в Южном и Северном полушариях имеет существенные отличия (рис. 2). Эволюция среднегодовой приземной температуры в Южном полушарии (ЮП) характеризуется монотонным потеплением с конца XIX в. за исключением периода между концом 1930-х – началом 1970-х годов, во время которого наблюдалось небольшое похолодание ($0,06^{\circ}\text{C}$), крайне слабое по сравнению с СП, где понижение температуры проявлялось гораздо существенней ($0,27^{\circ}\text{C}$) (Jones et al., 1986). Менее выраженная положительная аномалия в середине XX в. в ЮП (в котором доля площади суши примерно вдвое меньше, чем в СП) указывает на предположительно важную роль температурных аномалий над сушей и льдом в формировании среднеполушарного потепления в середине XX в. В частности, из-за переноса влаги с океана на сушу температурный отклик на рост приходящей к по-

верхности тепловой радиации над сушей сильнее, чем над океаном (Dommenges, 2009).

Однозначной теории, объясняющей ПСДВ и его природу максимального проявления в высоких широтах СП, до сих пор не существует. Пока не ясно, вызвано ли потепление в середине XX в. в СП региональными процессами или является откликом на глобальные изменения климата. Климатические модели указывают на основную роль внутренней естественной изменчивости климата (Delworth, Knutson, 2005) и обратных климатических связей (Chen et al., 2018; Bengtsson et al., 2004). Однако внешние естественные (Suo et al., 2013; Nozawa et al., 2005) и антропогенные факторы, в том числе сульфатные, сажевые аэрозоли (Booth et al., 2012; Shindell, Fulavegi, 2009) и парниковые газы (Meehl et al., 2004), также могут вносить вклад в формирование этой климатической аномалии. Ряд исследований (Hegerl et al., 2018) указывает, что ПСДВ можно объяснить как совместное проявление внутренней изменчивости климатической системы в виде квазипериодических колебаний или стохастических флуктуаций климата на фоне роста глобальной температуры, связанного с внешним антропогенным и природным

воздействием (увеличение выбросов парниковых газов и паузой в вулканических извержениях).

Особенно актуальный вопрос на текущий момент – выделение основной роли северных атлантического или тихоокеанского секторов в событии ПСДВ. Большая часть исследований предыдущих двух десятилетий указывают на Северо-Атлантический сектор как основной регион, ответственный за приток дополнительного атмосферного и океанического тепла во внетропические широты СП, однако эксперименты с климатическими моделями выделяют роль северного сектора Тихого океана как сравнимый с Северо-Атлантическим по вкладу в климатические изменения в середине XX в. в СП.

Эволюция результатов численного моделирования изменений климата с помощью ансамблей моделей климата разных поколений (IPCC, 2001; IPCC, 2007; IPCC, 2013) показывает, что совершенствование моделей и более полный учёт факторов внешнего (естественного и антропогенного) воздействия на климат позволяют более успешно воспроизводить динамику глобальных и региональных изменений температуры за последние 150 лет, в том числе и ПСДВ (рис. 3, а). Видно, что более современные по-

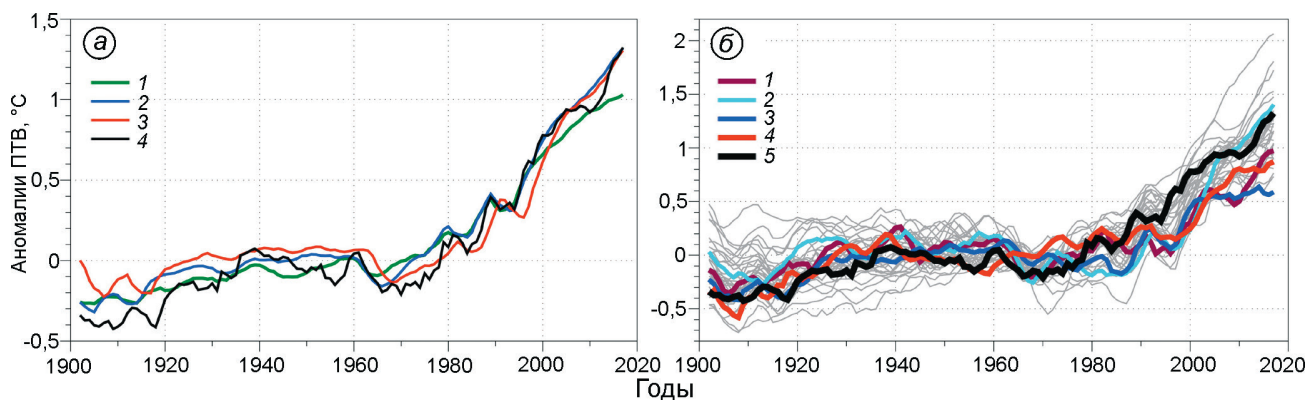


Рис. 3. Среднегодовые аномалии приземной температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) в Северном полушарии:

a – среднее значение по ансамблям моделей: 1 – CMIP3; 2 – CMIP5; 3 – CMIP6; 4 – CRUTEM5; *b* – отдельные реализации из ансамблевых расчётов моделей CMIP6 (серые линии) с выделенными цветом реализациями: 1 – GISS-E2-1-G; 2 – HadGEM3-GC31-LL; 3 – INM-CM4-8; 4 – MPI-ESM1-2-HR, которые демонстрируют долгопериодные изменения приземной температуры воздуха, схожие с данными наблюдений; 5 – CRUTEM5.

Все данные усреднены по маске данных CRUTEM5, исключая области, где в сеточном архиве CRUTEM5 отсутствуют данные, 5-летнее скользящее среднее

Fig. 3. Annual Northern Hemisphere surface air temperature ($^{\circ}\text{C}$) anomalies: *a* – as observed (CRUTEM5 data) and averaged (ensemble mean) over: 1 – CMIP3; 2 – CMIP5; 3 – CMIP6 model simulation ensembles; 4 – CRUTEM5; *b* – as simulated in individual models from CMIP6 ensemble (grey lines) with highlighted (by thick colored lines): 1 – GISS-E2-1-G; 2 – HadGEM3-GC31-LL; 3 – INM-CM4-8; 4 – MPI-ESM1-2-HR, simulations that exhibit multidecadal surface air temperature variations similar to observations; 5 – CRUTEM5.

All data are masked as in CRUTEM5 data set and smoothed with 5-year running mean

колениа моделей СМIP5 и СМIP6 воспроизводят более сильную амплитуду ПСДВ, чем раннее поколение моделей СМIP3, в частности, показывая заметное похолодание в 1960-х годах как отклик на внешнее воздействие на климат. Вместе с тем, в то время как современное потепление практически идеально воспроизводится при усреднении по ансамблю моделей (что указывает на внешние, прежде всего антропогенные воздействия на климат как главный фактор его современных изменений), амплитуда ПСДВ, несмотря на рост реалистичности результатов моделирования, до сих пор значительно занижается в климатических моделях. Это может указывать на важную роль внутренней изменчивости климата, в том числе и на междесятилетних временных масштабах (Johannessen et al., 2004; Semenov et al., 2010; Семенов, 2015). Нельзя также исключать и возможность некорректного задания в моделях внешнего воздействия на климат в первой половине XX в., когда отсутствовали прямые данные наблюдений по аэрозолям достаточного покрытия.

Расхождение между наблюдаемой и моделируемой (в ответ на внешнее воздействие) ПТВ в СП указывает на важную роль внутренних климатических изменений в многолетнем масштабе (Delworth, Knutson, 2005; Bengtsson et al., 2004; Latonin et al., 2021). Климатические модели способны воспроизводить значительные внутренние колебания, которые аналогичны наблюдаемым (см. рис. 3, б). Отдельные реализации ансамблевых расчётов содержат естественные внутренние колебания климата на фоне изменений, вызванных внешним воздействием. При усреднении по ансамблю реализаций внутренние колебания, имеющие случайные фазы, отфильтровываются и остаются лишь изменения, связанные с внешним воздействием (см. рис. 3, а). Некоторые из реализаций способны достаточно хорошо воспроизвести динамику изменений температуры СП в XX в., что подразумевает важную роль случайной внутренней динамики климата в формировании ПСДВ.

Исследование причин потепления середины века затруднено недостаточным количеством и качеством климатических данных, особенно в полярных широтах (Векругаев et al., 2010). Знания о климате за этот временной отрезок большей частью основаны на нерегулярных метеорологи-

ческих наблюдениях на земной поверхности, судовых измерениях и некоторых климатических реконструкциях (Hansen et al., 2010). Пространственное покрытие данными в период ПСДВ по сравнению с современным периодом отличается большими пропусками во многих ключевых регионах, охваченных только спорадическими измерениями, например, в зоне тропического Тихого океана и большей части ЮП, во внутренних районах Африки, в полярных широтах. Обширная территория Северного Ледовитого океана до сих пор не охвачена непрерывными наблюдениями. На рис. 4 представлены среднегодовые аномалии ПТВ на суше СП на основе трёх основных современных глобальных анализов эмпирических данных ПТВ. Это – анализ глобальной приземной температуры над сушей и океанами BERKLEY (Rohde, 2013; <http://berkeleyearth.org/>), данные GISTEMP (Lenssen et al., 2019; <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>) и данные приземной температуры над сушей CRUTEM5 (Morice et al., 2021; <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>). Аномалии ПТВ усреднены по маске, учитывающей отсутствующие данные в сеточном архиве CRUTEM5. Все три архива демонстрируют схожие изменения температуры в СП в XX в., особенно в части долгопериодных колебаний.

Альтернативный источник данных – реанализы (Lindsay et al., 2014), охватывающие весь XX в. или его часть и представляющие собой полный набор метеорологических данных со 100%-м покрытием. Реанализы – результат численных экспериментов с моделями океана и атмосферы, которые ассимилируют доступные данные наблюдений и приводят динамические и термодинамические переменные атмосферы и океана к эмпирическим данным. В случае реанализов XX в. из-за отсутствия других многолетних данных наблюдений за состоянием атмосферы давление на уровне моря (ДУМ) – единственная атмосферная переменная, используемая для ассимиляции. Данные ДУМ также сильно ограничены в начале XX в. в разных регионах по всему миру и полностью отсутствуют над Северным Ледовитым океаном (даже в настоящее время). Проиллюстрированы данные ПТВ в СП для трёх реанализов XX в. по сравнению друг с другом и данными наблюдений (см. рис. 4). Используются два атмосферных реанализа – NOAA

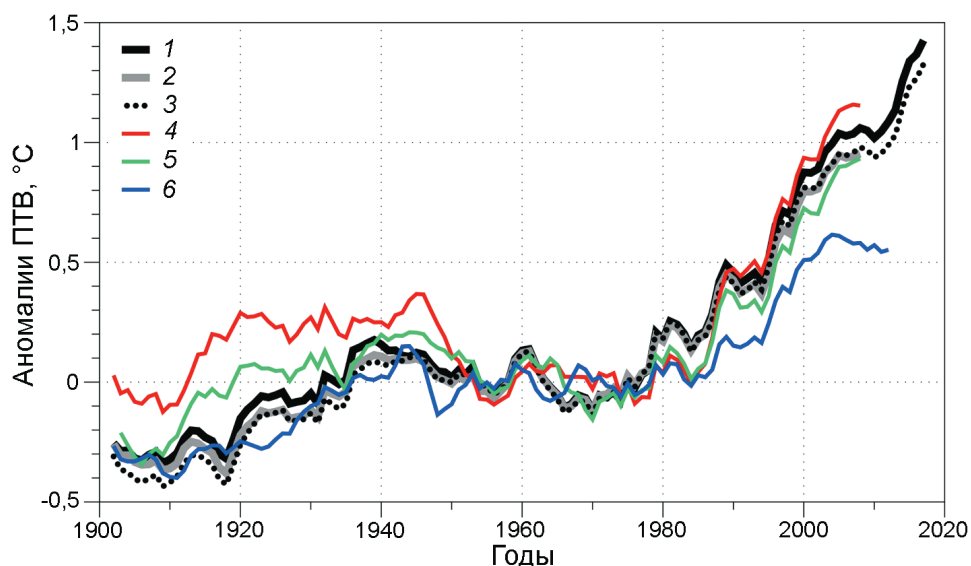


Рис. 4. Среднегодовые аномалии приземной температуры воздуха (°C) в Северном полушарии по данным массивов:

1 – CRUTEM5; 2 – GISTEMP; 3 – BERKLEY по маске в соответствии с пропущенными данными CRUTEM5 и по данным реанализов; 4 – ERA 20C; 5 – CERA 20C; 6 – NOAA 20C, а также по маске CRUTEM5, 5-летнее скользящее среднее

Fig. 4. Annual mean surface air temperature anomalies (°C) in the Northern Hemisphere according to:

1 – CRUTEM5; 2 – GISTEMP; 3 – BERKLEY datasets when masked according to CRUTEM5 missing data and from the: 4 – ERA 20C; 5 – CERA 20C; 6 – NOAA 20C reanalysis products, also according to the CRUTEM5 mask, 5-year running mean

20C (Compo et al., 2011) и ERA 20C (Poli et al., 2016) – и один совместный реанализ атмосферы и океана CERA 20C (Lalouaux, 2018). Сравнение различных реанализов XX в. с данными наблюдений и между собой выявило существенные различия в тенденциях изменений температуры, часто качественного характера, в первой половине XX в., что не позволяет рассматривать эти данные как полноценную замену отсутствующим наблюдениям и показывает, что реанализы следует использовать в качестве замены отсутствующих наблюдений в период ПСДВ с большой осторожностью (Бокучава, Семенов, 2018).

Понимание механизмов периода ПСДВ и последующего похолодания – ключ к определению относительного вклада внутренней естественной изменчивости на фоне отклика на внешние, в том числе антропогенные, воздействия в глобальном изменении климата на многолетнем временном масштабе, а исследование региональных изменений температуры в СП в середине XX в. (Brönnimann, 2009) позволяет выявить возможные механизмы естественной изменчивости (Pithan, Mauritsen, 2014). В статье приводится обзор гипотез, объясняющих ПСДВ, с упором на анализ механизмов внутренней кли-

матической изменчивости, а также оценён вклад атмосферных и океанических мод северных секторов Атлантического и Тихоокеанского регионов в колебания ПТВ в СП в течение XX в.

Внешние факторы воздействия на климат

Парниковые газы и антропогенные аэрозоли.

Изменения температуры за последние 50 лет обусловлены в первую очередь антропогенным увеличением парниковых газов (ПГ) (Алексеев и др., 2014), но роль этого фактора для потепления середины XX в. – предмет дискуссии, так как интенсивный рост концентраций ПГ начался уже после 1940-х годов. Антропогенная деятельность приводит к выбросам в атмосферу четырёх основных ПГ: диоксида углерода (CO_2), метана (CH_4), закиси азота (N_2O) и галогенуглеродов (фтор, хлор, бром) (Forster et al., 2007). Усиление парникового эффекта в результате увеличения в атмосфере концентрации CO_2 за счёт сжигания ископаемого топлива не может в одиночку объяснить событие ПСДВ, так как с 1906 по 1945 г. его рост составил лишь 10% (с 299 до 311 частиц на миллион (ppm) от всего роста с доиндустри-

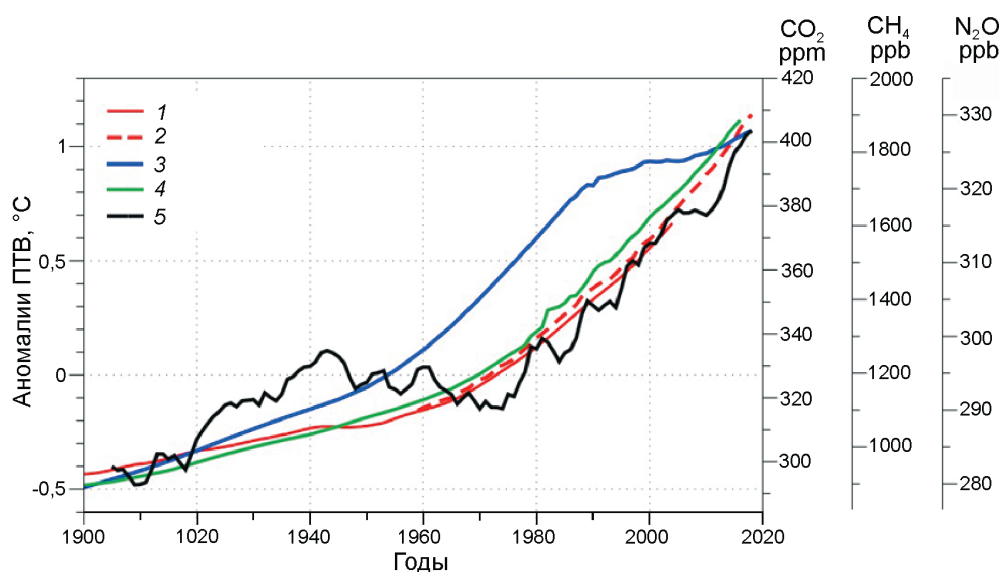


Рис. 5. Концентрации углекислого газа CO_2 в атмосфере (ppm) в период 1900–2018 гг.: 1 – на основе реконструкции концентрации атмосферного CO_2 по ледяным кернам в Антарктике (Etheridge et al., 1998); 2 – по данным наблюдений на станции Мауна Лоа (Tans, Keeling, 2020); 3 – концентрации метана CH_4 (ppb) (Ritchie et al., 2020); 4 – концентрации оксида азота N_2O (ppb) (Ritchie et al., 2020); 5 – аномалии приземной температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) в Северном полушарии согласно данным наблюдений HadCRUT5.0 (Morice et al., 2021), 5-летнее скользящее среднее

Fig. 5. Concentrations of carbon dioxide in the atmosphere (ppm) for 1900–2018: 1 – according to Antarctic ice core CO_2 reconstructions (Etheridge et al., 1998); 2 – and observational data at Mauna Loa (Tans, Keeling, 2020); 3 – methane concentrations CH_4 (ppb) (Ritchie et al., 2020); 4 – nitrogen dioxide concentrations N_2O (ppb) (Ritchie et al., 2020); 5 – surface air temperature anomalies ($^{\circ}\text{C}$) in Northern Hemisphere according to HadCRUT5.0 (Morice et al., 2021) observations, 5-year running mean

альных значений 1850 г. (286 ppm) по настоящее время (408 ppm) (Macfarling Meure et al., 2006). Вклад CH_4 в парниковый эффект в несколько раз меньше по сравнению с CO_2 , но парниковый потенциал CH_4 в 25 раз больше за столетний период. Примерно с 1750 г. содержание метана в атмосфере выросло почти втрое, что обусловлено деятельностью, связанной с сельским хозяйством, в то время как важнейшим естественным источником метана служат болота, влажная почва и вечная мерзлота, интенсивность выделения CH_4 которыми также сильно зависит от изменений климата (Елисеев, 2018). N_2O выделяется в атмосферу в результате активного использования удобрений и сжигания ископаемого топлива, имеет ещё меньшую концентрацию в атмосфере чем метан, но делает существенный вклад в парниковый эффект из-за высокого парникового потенциала (Meinhausen et al., 2017).

Интенсивный рост CO_2 , CH_4 и N_2O начался во второй половине XX в. (рис. 5), что не согласуется с динамикой температуры в течение

ПСДВ и не может играть доминирующую роль в росте глобальной температуры в этот период. Однако данные модельных экспериментов (см. рис. 3) показывают, что рост концентраций ПГ мог внести определённый вклад в потепление 1920–1940 гг. в сочетании с другими факторами – паузой в вулканических извержениях, ростом солнечной активности (Meehl et al., 2004; Suo et al., 2013) и внутренней климатической изменчивостью (Delworth, Knutson, 2005).

Отклонения же от устойчивого процесса потепления, вызванного увеличением концентраций парниковых газов в атмосфере, на десятилетних временных масштабах могут быть связаны с воздействием антропогенного аэрозоля (Shindell, Falavegi, 2009), количественные оценки влияния которого на глобальные и региональные изменения климата крайне неопределённые из-за различий в своих характеристиках, часто приводящих к аномалиям температуры разного знака (Haywood, Boucher, 2000; Booth et al., 2012; Undorf et al., 2018). Основной вклад в охлаждающий эф-

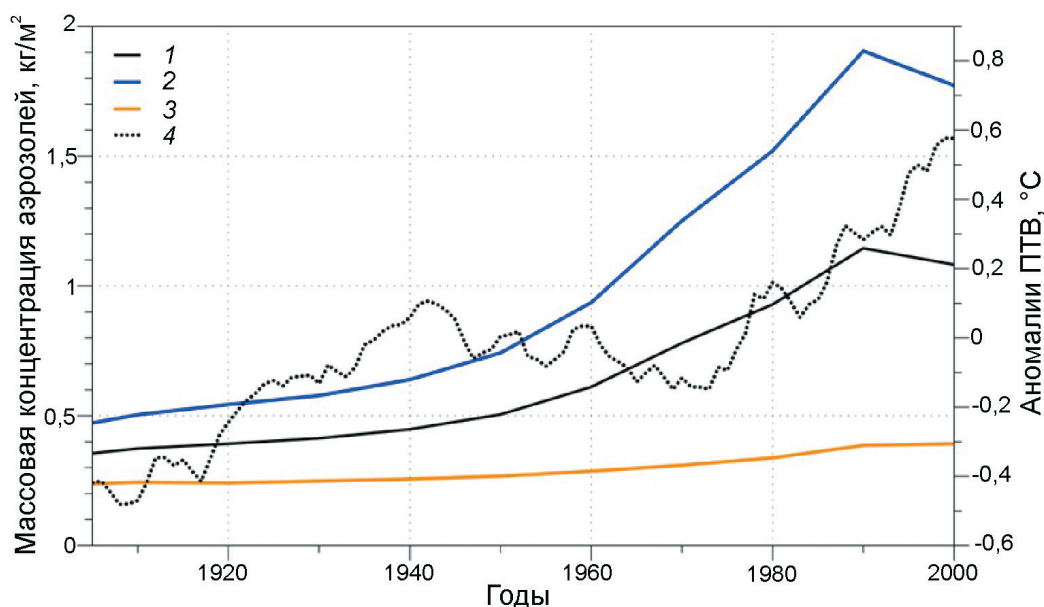


Рис. 6. Массовая концентрация аэрозолей (kg/m^2) по данным климатической модели GISS для CMIP5 с заданной реконструкцией эмиссий антропогенных аэрозолей:

1 – глобальная; 2 – для Северного полушария; 3 – для Южного полушария; 4 – аномалии приземной температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) в Северном полушарии по данным наблюдений HadCRUT5.0 (Morice et al., 2021), 5-летнее скользящее среднее

Fig. 6. Aerosols mass concentrations (kg/m^2) according to the GISS climate model with a given reconstruction of anthropogenic aerosol emissions:

1 – global; 2 – for Northern Hemisphere; 3 – for Southern Hemisphere; 4 – annual surface air temperature anomalies ($^{\circ}\text{C}$) for the Northern Hemisphere according to HadCRUT5.0 (Morice et al., 2021) observations, 5-year running mean

фект вносят сульфатные аэрозоли, составляющие около двух третей массы аэрозолей антропогенного происхождения, наиболее высокие значения концентрации которых наблюдаются прежде всего в СП, где по сравнению с ЮП выше доля суши по отношению к океану, проживает большая часть населения и, как следствие, расположен основной объём производств – источников выбросов аэрозолей (рис. 6).

Изменение солнечной и вулканической активности. Оценки относительного вклада солнечной радиации в формирование изменений климата в XX в., основанные на модельных расчётах и анализе данных наблюдений и реконструкций, имеют очень широкий диапазон, но в целом показывают относительно небольшую роль солнечной активности в изменчивости ПТВ (Reid, 1997; Lean, Rind, 2008; Мохов, Смирнов, 2008; Przybylak et al., 2020). Глобальное снижение ПТВ на несколько десятых градуса Цельсия в течение нескольких месяцев после крупных вулканических извержений происходит главным образом из-за богатого серной кислотой стратосферного аэрозоля, который, поднимаясь до нижней границы стратосфе-

ры, увеличивает планетарное альbedo (Sigurdsson, 1990). Это вызывает отрицательные аномалии радиационного баланса Земли, и эффект может сохраняться в зависимости от силы извержения в течение нескольких лет из-за тепловой инерции охлаждённых океанов (Mass, Portman, 1989; Robock, 2000). Снижение вулканической активности совместно с усилением солнечной радиации – существенные факторы, влияющие на глобальные изменения климата, однако по данным модельных экспериментов (Nozawa et al., 2005; Suo et al., 2013) этих факторов недостаточно для объяснения как амплитуды ПСДВ, так и его динамики, в том числе похолодания 1945–1955 гг.

Согласно модельным экспериментам, усиленная солнечная радиация – более важный фактор для периода ПСДВ, чем антропогенный (Nozawa et al., 2005), и, наряду с низкой вулканической активностью в 1920–50-х годах, в значительной степени ответственна за потепление середины XX в. во внетропических широтах СП (Suo et al., 2013), однако все перечисленные факторы вместе не могут объяснить событие ПСДВ полностью (рис. 7).

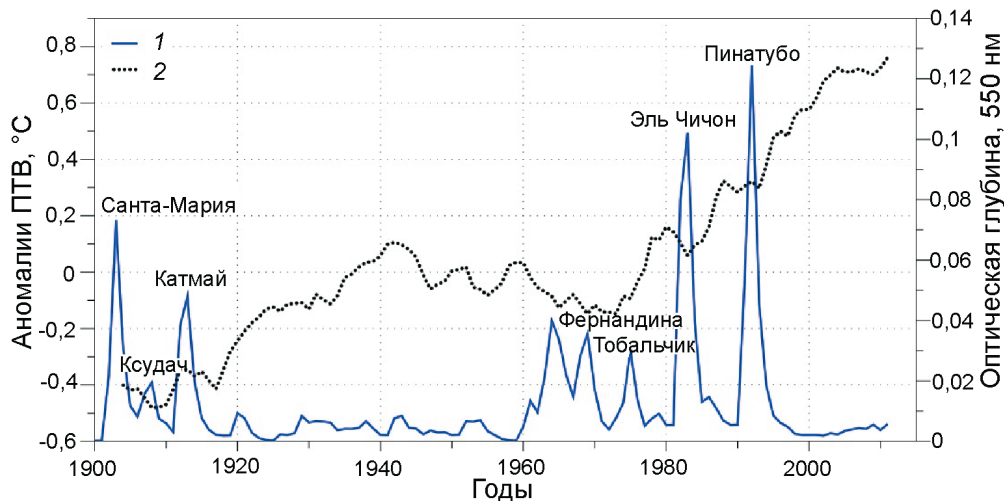


Рис. 7. Изменения средней оптической толщины аэрозоля в XX в., вызванные воздействием вулканического аэрозоля по данным климатической модели GISS с заданной реконструкцией вулканической активности (Miller et al., 2014):

1 – для Северного полушария; 2 – аномалии среднегодовой приземной температуры воздуха (°C) в Северном полушарии по данным наблюдений HadCRUT5.0 (Morice et al., 2021), 5-летнее скользящее среднее

Fig. 7. Changes in the aerosol average optical thickness in the 20th century caused by the impact of volcanic aerosol according to the GISS climate model with a given reconstruction of volcanic activity (Miller et al., 2014):

1 – for Northern Hemisphere; 2 – annual surface air temperature anomalies (°C) in Northern Hemisphere according to HadCRUT5.0 (Morice et al., 2021) observations, 5-year running mean

Внутренние механизмы колебания климата

Внутренняя изменчивость атмосферной циркуляции. Основная проблема в определении причин изменений климата в последнем столетии связана с оценкой относительного вклада внутренней естественной изменчивости климатической системы и внешнего антропогенного воздействия (Delworth, Knutson, 2005). Потепление в 1920–40-х годов было предметом научного интереса уже в первой половине XX в. Некоторые исследования, начатые ещё в 1930 г., показали важную роль циркуляции атмосферы и океана в развитии региональных колебаний климата (Визе, 1937). Аналогичные исследования проводятся и в настоящее время. Численные эксперименты с моделями климата (например, Wang et al., 2007) показывают, что внутренняя изменчивость атмосферы и обратные связи между компонентами климатической системы (атмосфера, океан, морской лёд) способны привести к аномалиям климата, сопоставимым с ПСДВ. Значительная часть изменчивости межгодовых и десятилетних аномалий приповерхностной температуры и связанных с ними процессов в Арктике и в других регионах в первой половине

XX в. может быть объяснена изменчивостью ведущих режимов крупномасштабной циркуляции атмосферы (Wood, Overland, 2010). Северные регионы Атлантического и Тихого океанов – ключевые регионы атмосферной циркуляции, ответственные за межширотный перенос тепла в атмосфере средних и высоких широт СП.

Во второй половине XX в. такие индексы, как Северо-Атлантическое колебание (САК; North Atlantic Oscillation – NAO), Арктическая осцилляция (АО; Arctic Oscillation – AO), Тихоокеанско-Североамериканское колебание (ТСАК; Pacific–North American index – PNA) и другие, по разным оценкам могут объяснить от 40 до более 80% изменчивости ПТВ во внетропических широтах с СП (Wood, Overland, 2010; Попова и др., 2018; Попова, 2018). Существуют также индексы, воздействующие на климат на региональном масштабе, – Скандинавское колебание (Scandinavian index – SCAND), Восточная Атлантика – Западная Сибирь (ВАЗС; East Atlantic Western Russia – EAWR), East Pacific – North Pacific, West Pacific (Barnston, Livezey, 1987) и др. В работе сделан упор на основные паттерны атмосферной изменчивости, имеющей наибольшее воздействие на климат СП.

САК — доминирующий режим крупномасштабной изменчивости атмосферы в зимний период в Северо-Атлантическом секторе СП, характеризующийся колебаниями разности атмосферного приземного давления между Исландским минимумом и Азорском максимумом (Stephenson et al., 2003). С САК тесно связан индекс АО, отражающий изменение давления на уровне моря во внетропических широтах СП. АО определяет колебания атмосферных потоков в средних широтах СП с севера на юг в течение зимнего периода (Ambaum et al., 2001). САК характеризует силу и направление западных ветров на восток и распределение путей движения циклонов через Северную Атлантику, формируя климат европейской части Евразийского континента в холодное полугодие. АО и САК не имеют ярко выраженных циклов колебаний (Ambaum et al., 2001), а их изменчивость, в том числе долгопериодная, не может статистически значимо отличаться от случайного процесса (Semenov et al., 2008).

В течение первых десятилетий XX в. положительная фаза САК выражалась в более сильной, чем обычно, зональной циркуляции над Северной Атлантикой. Долгосрочное доминирование такого характера атмосферной циркуляции приводит к ветровой адвекции тёплых атлантических вод в северо-восточную часть Северной Атлантики и в Арктику (Dickson et al., 2000), что могло способствовать потеплению в СП в этот период. Однако в период наиболее интенсивной фазы потепления в 1920–30-х годах индекс САК снижался. Поэтому вклад САК в ПСДВ в долгопериодные аномалии климата во внетропических широтах СП маловероятен, что также подтверждается анализом пространственной и корреляционной структуры аномалий температуры в СП в XX в. (Semenov, Bengtsson, 2003; Semenov et al., 2008). Для САК была выявлена также связь с региональными аномалиями морских льдов. Сильная отрицательная аномалия индекса САК в 2009–2010 гг. с усилением меридиональной циркуляции была самым низким значением по данным станционных наблюдений с середины XIX в. (Overland et al., 2011), когда концентрации морского льда в высоких широтах СП достигали наиболее низких значений.

Индекс Тихоокеанского Северо-Американского колебания (ТСАК) описывает режим циркуляции атмосферы в Северо-Тихоокеанском

секторе. ТСАК характеризует градиент давления между севером Тихого океана (Алеутский минимум) и востоком Северной Америки (Канадский максимум) и отражает колебания зонального переноса в регионе. В случае ТСАК обе циркуляционные фазы индекса могут способствовать региональному затоку тёплого воздуха во внетропические широты СП в разных долготных секторах. В 1930–50-х годах отрицательная фаза привела к переносу тёплых воздушных масс к полюсу через северо-западную часть Тихого океана, а положительный пик 1940 г. — к усилению зонального переноса к западному побережью Канады и Аляске (Hegerl et al., 2018).

Индекс Южного колебания (ЮК; Southern Oscillation — SOI) характеризует атмосферное проявление изменчивости Эль Ниньо — Южная осцилляция (ЭНЮК; ENSO — El Niño Southern Oscillation (Zhang et al., 1997), являющееся основным естественным климатическим сигналом в глобальной системе океан–атмосфера на десятилетнем масштабе. ЮК характеризует разницу между ДУМ в тропической западной части Тихого океана — в Дарвине, Австралии и в центральной части Тихого океана — на Таити. Отклонения разницы от средних значений указывают на усиление/ослабление зональной циркуляции Уокера (Meng et al., 2012). ЮК воздействует на изменчивость климата СП не только в Тихоокеанском регионе (Yu & Zwiers, 2007; Renwick and Wallace, 1996), в том числе через возможную взаимосвязь с ТСАК (Renwick and Wallace, 1996; Straus, Shukla, 2002; Yu & Zwiers, 2007). Некоторые исследования также выявляют отклик на ЭНЮК в Северо-Атлантическом секторе (Stenseth et al., 2003; Wang et al., 2013).

Анализ изменчивости ведущих крупномасштабных мод атмосферной циркуляции во внетропических регионах показывает, что внутренняя динамика атмосферы может оказывать воздействие на ПТВ в СП в первой половине XX в., учитывая существенный вклад как Атлантического, так и Тихоокеанского секторов в изменения потоков южных воздушных масс во внетропические широты СП (Wegmann et al., 2017). Тем не менее, исключительно внутренняя атмосферная изменчивость не может быть достаточным фактором для формирования аномалии с амплитудой ПСДВ (Hegerl et al., 2018) и должна дополняться другими факторами внутренней и внешней изменчивости климата.

Внутренняя изменчивость океанической циркуляции. Интенсивный рост ПТВ в СП в XX в. может быть связан не только с ростом атмосферного притока тепла, но и с увеличением переноса тепла океаном во внетропические широты СП. Как было показано, усиление океанической меридиональной циркуляции в Атлантике увеличивает потоки тепла из океана в атмосферу в Северной Атлантике и Арктике, приводя к положительной аномалии температуры около $0,4^{\circ}\text{C}$ (Semenov, 2010). Анализ данных модельных экспериментов показывает, что ПСДВ в СП может быть следствием усиления океанического притока из Северной Атлантики в Баренцево море с сокращением площади морских льдов, усиленным положительной обратной связью (Bengtsson et al., 2004), а также указывает на связь температурной изменчивости во внетропических широтах СП с колебаниями термохалинной циркуляции в Северной Атлантике (Delworth, Mann, 2000). Термохалинная циркуляция (ТХЦ), называемая также океаническим конвейером, приводится в движение градиентами температуры и солёности, определяющими плотность морской воды; она регулирует вертикальное перемешивание и крупномасштабные круговороты воды и способствует переносу тепловой энергии между океаническими бассейнами (Лаппо и др., 1990). Усиление ТХЦ вызывает усиленный перенос тёплых вод в Северную Атлантику и могло внести вклад как в потепление в первой половине XX в., так и в современное потепление (Delworth, Mann, 2000; Semenov et al., 2010).

Изменчивость температуры поверхности океана (ТПО) в Северной Атлантике в течение XIX–XX вв. характеризовалась квазициклическими колебаниями разного знака на временных масштабах 50–80 лет (Polyakov et al., 2004). Такие колебания в Северо-Атлантическом регионе получили название Атлантической мультидекадной осцилляции (АМО; Atlantic Multidecadal Oscillation – АМО (Enfield et al., 2001). Однако тот факт, что значительная часть изменчивости ТПО во время ПСДВ происходила на десятилетних временных масштабах (Yamanouchi, 2011), в то время как цикл АМО составляет 50–70 лет, а также учёт важной роли адвекции воздушных масс во внетропические широты СП из Тихоокеанского региона привели к появлению гипотезы о роли этого региона

в ПСДВ. Синхронный с АМО сдвиг фаз Тихоокеанской декадной осцилляции (ТДО; Pacific Decadal Oscillation – PDO (Mantua et al., 1997), представляющей собой долгопериодные колебания ТПО в Тихоокеанском регионе севернее 20° с.ш. (Mantua et al., 1997), как показали недавние исследования, может играть не менее важную роль в поступлении тепла в высокие широты СП в середине века, чем АМО (Wegmann et al., 2017).

Мода ТДО сильно взаимосвязана с фазами ЭНЮК (Yu, Zwiers, 2007). Океанические индексы Ниньо (ОИН; Oceanic Nino index – ONI) и Ниньо 3.4 (Nino 3.4) – наиболее часто используемые для определения явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья (Webb, Magi, 2022), представляющие собой средние ТПО в экваториальном секторе Тихого океана. Периодичность ТДО больше чем у ЭНЮК, но меньше чем у АМО и составляет 20–40 лет (Mantua et al., 1997). Тем не менее, ЭНЮК – основной источник предсказуемости ТДО, который играет ключевую роль в его формировании (Nidheesh et al., 2017). Отдельное событие Эль-Ниньо наблюдалось в 1939–1942 гг., а выраженные явления Ла-Нинья на протяжении XX в. совпадают с отрицательными фазами ТДО (рис. 8). Несколько современных исследований предполагают синхронный сдвиг фаз АМО и ТДО в качестве важного фактора интенсивного потепления в высоких широтах СП, в том числе в середине века (Tokinaga et al., 2017; Малинин, Вайновский, 2018).

Результаты некоторых модельных экспериментов (Chylek et al., 2016), где АМО и ТДО – потенциальные предикторы для объяснения естественной изменчивости климата, помимо естественного и антропогенного внешнего воздействия, показывают, что ТДО в отличие от АМО не вносит существенного вклада в изменения глобальной температуры в XX в. Другие модельные эксперименты (Svendsen et al., 2018) утверждают, что именно ТДО – ключевой фактор потепления во внетропических широтах в СП в середине XX в., когда оно перешло в положительную фазу с углублением Алеутского минимума и аномальной адвекцией тёплых воздушных масс в Арктические широты. Модельные эксперименты без учёта изменчивости ТПО в тропической зоне Тихого океана воспроизводят монотонное потепление на всём протяжении XX в., в том числе и в период похолодания

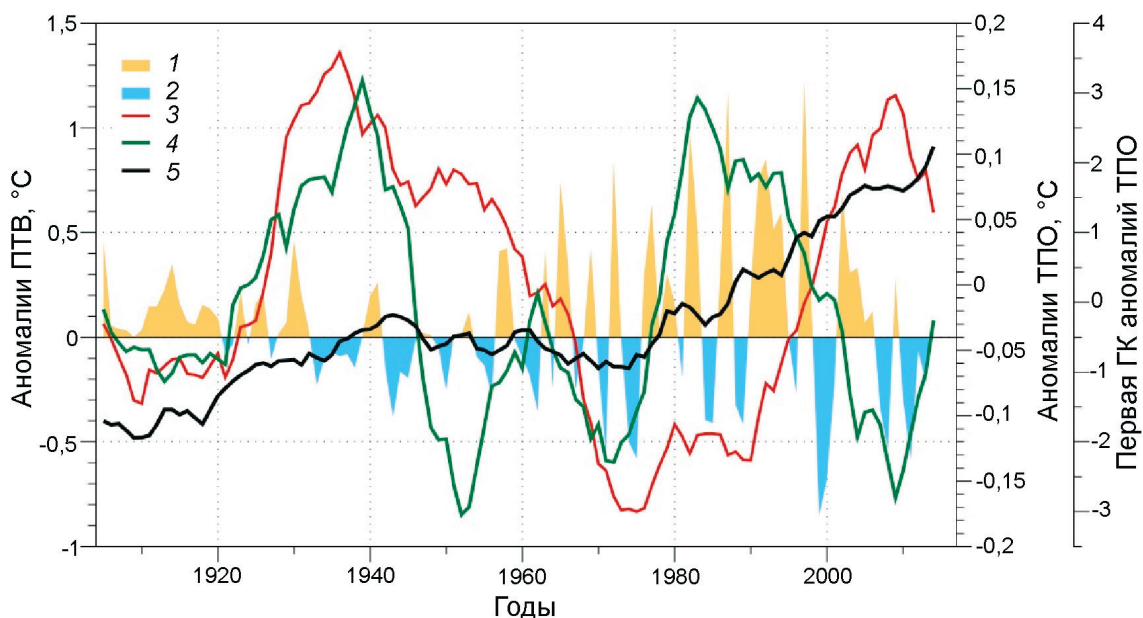


Рис. 8. Индексы океанической циркуляции:

1, 2 – Океанический индекс Ниньо; 3 – Атлантическая мультидекадная осцилляция; 4 – Тихоокеанская декадная осцилляция по данным наблюдений HadISST2.0 (Titchner, Rayner, 2014), 10-летнее скользящее среднее; 5 – аномалии среднегодовой приземной температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) в период 1900–2015 гг. по данным наблюдений HadCRUT5.0 (Morice et al., 2021) для СП, 5-летнее скользящее среднее

Fig. 8. Ocean circulation indices:

1, 2 – Oceanic Nino Index; 3 – Atlantic Multidecadal Oscillation; 4 – Pacific Decadal Oscillation according to HadISST2.0 observations (Titchner, Rayner, 2014), 10-year running mean; 5 – annual surface air temperature anomalies ($^{\circ}\text{C}$) for 1900–2015 according to HadCRUT5.0 (Morice et al., 2021) observations for NH, 5-year running mean

1950–60-х годов (Svendsen et al., 2018). Анализ изменчивости АМО и ТДО в ансамбле моделей климата CMIP5 (Stolpe et al., 2017) показал, что их вклад в ПСДВ на глобальном масштабе мог составлять до $0,15^{\circ}\text{C}$, в то время как вклад в потепление последних 50 лет не превышал 10%.

Таким образом, внутренняя изменчивость – один из наиболее вероятных механизмов, который объясняет значительную часть ПСДВ в СП. При этом в последние годы увеличилось число работ, указывающих на Тихий океан как источник долгопериодных колебаний. В то же время количественная оценка вклада Атлантического и Тихоокеанского секторов в ПСДВ на данный момент не определена. Спорный вопрос об основной роли АМО или ТДО может заключаться в том, что индексы способны усиливать или компенсировать воздействие друг друга на ПТВ из-за разности в длительности колебаний. Модельные эксперименты (Delworth, Knutson, 2005; Shiogama et al., 2006; Yamanouchi, 2011) показывают, что внутренняя изменчивость как единственный фактор не может объяснить всю

амплитуду температурных колебаний в первой половине XX в. и должна дополняться естественным и антропогенным внешним воздействием и/или положительными обратными связями в климатической системе СП.

Чтобы оценить потенциальный вклад основных индексов естественной изменчивости, а именно АМО, ТДО, САК, АО и ТСАК, в многолетние колебания ПТВ в СП использован множественный регрессионный анализ. Индексы ЭНЮК (ЮК, ОИН) показывают крайне незначимый вклад (менее $0,1\%$) и в дальнейшем анализе не используются. Как отмечалось ранее, моды изменчивости Тихоокеанского экваториального региона могут воздействовать на климат СП через воздействие на индексы ТДО, ТСАК и САК. (Straus, Shukla, 2002; Yu & Zwiers, 2007; Wang et al., 2013; Nidheesh et al., 2017). На рис. 9 показана ПТВ в СП после вычета линейного тренда, в первом приближении описывающая отклик внешнего воздействия на климат по данным наблюдений и рассчитанная на основе множественной линейной регрессии температуры

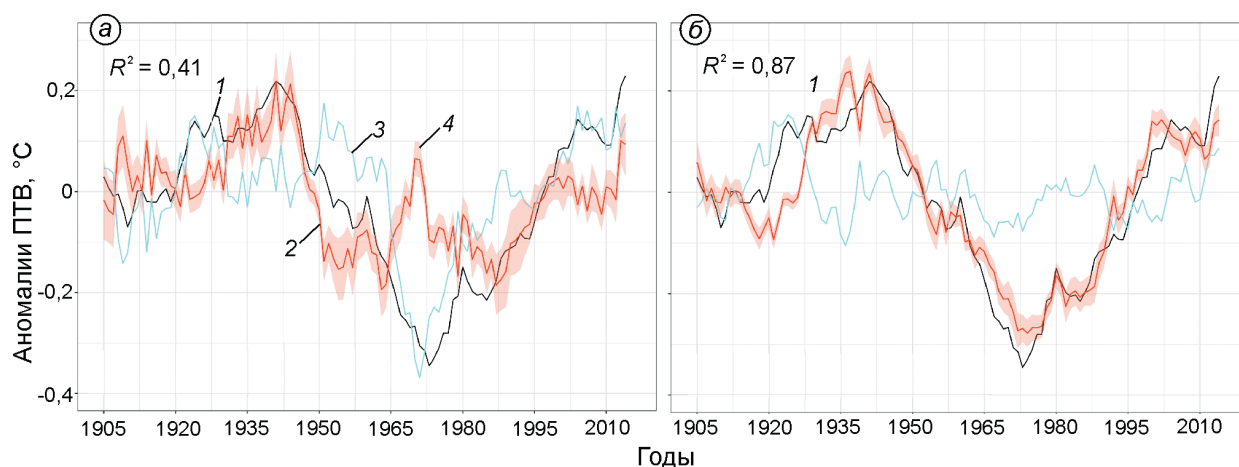


Рис. 9. Многолетние изменения зимней (январь–март) приземной температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) в Северном полушарии по данным наблюдений HadCRUT5.0 (Morice et al., 2021) и рассчитанные с применением множественной регрессии наблюденной приземной температуры воздуха на индексы:

a – Тихоокеанско-Североамериканское колебание, Арктическая осцилляция, Северо-Атлантическое колебание; *б* – Тихоокеанско-Североамериканское колебание, Арктическая осцилляция, Северо-Атлантическое колебание, Атлантическая мультидекадная осцилляция, Тихоокеанская декадная осцилляция; 1 – аномалии приземной температуры воздуха для зимнего сезона (январь–март) в Северном полушарии за 1905–2010 гг.; 2 – модель; 3 – ошибка модели; 4 – 90%-й доверительный интервал, все значения даны в $^{\circ}\text{C}$, 7-летнее скользящее среднее, все временные ряды детрендированы

Fig. 9. Long-term surface air temperature ($^{\circ}\text{C}$) changes in Northern Hemisphere according to HadCRUT5.0 observations (Morice et al., 2021) and calculated using multiple regression of the observed surface air temperature on indices: *a* – Pacific North-American, Arctic Oscillation, North Atlantic Oscillation; *б* – Pacific North-American, Arctic Oscillation, North Atlantic Oscillation, Atlantic Multidecadal Oscillation, Pacific Decadal Oscillation; 1 – average annual surface air temperature anomalies ($^{\circ}\text{C}$) for the Northern Hemisphere for 1905–2010; 2 – model; 3 – model error; 4 – 90% confidence interval. According to HadCRUT5.0 (Morice et al., 2021) observations, all values in $^{\circ}\text{C}$, 7-year running mean, all time-series are detrended

на атмосферные индексы САК, АО и ТСАК и совместно на атмосферно-океанические индексы САК, АО, ТСАК, АМО и ТДО (перед процедурой регрессионного анализа линейный тренд также удалялся из многолетних рядов индексов атмосферных и океанических мод). Результаты показывают, что моды атмосферной циркуляции (см. рис. 9, *a*) объясняют лишь 40% изменчивости среднегодовой ПТВ в СП в течение XX в., при этом модель не согласуется с данными наблюдений с 1965 по 1980 гг., что указывает на возможную роль океанической изменчивости.

Совместная изменчивость океана и атмосферы может объяснить значительную часть наблюдаемых долгопериодных отклонений ПТВ от векового тренда как в течение ПСДВ, так и в современный период, приводя к изменениям температуры до $0,5^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 9, *б*), что согласуется с оценками в работе (Semenov et al., 2010), полученными с помощью численных экспериментов с моделью климата. Такая регрессионная модель объясняет 87% изменчивости детрендированной ПТВ в СП за период 1905–

2014 гг., при этом 46% приходится на АМО, 28% на САК, 12,5% на ТСАК и менее 1% на АО и ТДО. Данная регрессионная модель основана на предположении, что используемые предикторы независимы друг от друга и не подвержены воздействию других, внешних факторов. Такое предположение можно считать идеализированным, так как существуют исследования, указывающие, что перечисленные режимы могут быть взаимосвязаны и подвержены внешнему воздействию (Deser et al., 2004; d’Orgeville et al., 2007).

Обратные связи в высоких широтах Северного полушария. Чувствительность климатической системы к таким внешним воздействиям, как рост содержания парниковых газов в атмосфере, определяется действующими в ней обратными связями. Положительные обратные связи – один из ключевых элементов в климатической системе, приводящий к ускоренным изменениям климата и формированию климатических циклов (Pithan, Mauritsen, 2014). В число положительных обратных связей, способствующих ускоренному потеплению, входят: увеличение

поглощения солнечной радиации из-за снижения альbedo поверхности в результате таяния морского льда и снега; усиление парникового эффекта из-за роста концентраций водяного пара при нагреве воздуха. Увеличение облачного покрова в результате высокой влажности может также способствовать усилению парникового эффекта, задерживая земное длинноволновое излучение, но одновременно с этим рассеивать приходящую солнечную коротковолновую радиацию; а далее следуют – изменения углеродного цикла, например, высвобождение CO_2 и метана из почвы в результате таяния вечной мерзлоты, изменения циркуляции океана и атмосферы в результате воздействия парниковых газов и аэрозолей, приводящие к усилению переноса тепла из низких широт в высокие.

Положительные обратные связи усиливают климатический отклик на исходное радиационное воздействие, а отрицательные – компенсируют. В частности, положительная обратная связь температура – водяной пар усиливает реакцию на радиационное воздействие в результате роста углекислого газа примерно втрое (Roe, 2009), связь температура воздуха – альbedo подстилающей поверхности усиливает климатический отклик на удвоение концентрации CO_2 в атмосфере на 10% (Катцов и др., 2008). Установлено, что характеристики облачности в высоких широтах СП сильно коррелируют с арктическими концентрациями морского льда и показателями атмосферной циркуляции (Chernokulsky, Esau, 2019). Важную роль в формировании климатических изменений в СП играют региональные обратные связи в системе лёд–океан–атмосфера в полярных широтах, которые способны усилить или компенсировать влияние внешнего и внутреннего воздействия.

Усилившееся сокращение ледяного покрова в высоких широтах СП в результате аномально большого переноса океанического тепла из Атлантики ведёт к росту приземной температуры и формированию восходящих воздушных потоков в новых зонах открытой воды, что, как следствие, вызывает локальное уменьшение давления и изменение ветровых полей, в том числе рост циклонической активности в атмосфере (Золотокрылин и др., 2015). В результате приток атлантических аномально тёплых вод усиливается западными и юго-западными ветрами,

что ведёт к ещё большему сокращению морского льда. Описанные механизмы образуют процессы положительной обратной связи, влияющие на атмосферную циркуляцию Арктики и, следовательно, на климат СП в целом (Chen et al., 2018), но атмосферный отклик существенно зависит от региона сокращения морского льда (Семенов, 2015). Интенсивное взаимодействие между атмосферой и океаном в Баренцевом море играет важную роль в изменении климата СП за последние, как минимум, 2500 лет (Smedsrud et al., 2013). Баренцево море составляет около 10% площади Северного Ледовитого океана – ключевого региона, через который проходит примерно половина океанического тепла из Атлантики в Северный Ледовитый океан, формируя региональные аномалии климата, влияющие на климат всего СП (Семенов, 2015). Усиленный рост температуры в арктических широтах вносит существенный вклад в колебания климата СП и может формироваться как внутри арктической климатической системы, а затем воздействовать на глобальные изменения температуры (Semenov et al., 2010), так и за счёт отклика на глобальные изменения климата из-за ряда радиационных и термодинамических положительных обратных связей (Pithan, Mauritsen, 2014).

Изменения площади арктических морских льдов в период ПСДВ. До недавнего времени считалось, что эволюция общей площади морских льдов в Арктике до начала современного сокращения в 1970-х годах представляет собой «плато» без существенных декадных и мультидекадных колебаний (см., например, Walsh, Chapman, 2001; Rayner et al., 2003). Вместе с тем данные о ледовитости морей Восточной Арктики, полученные в Арктическом и Антарктическом НИИ, указывали на существенные региональные отрицательные аномалии в середине XX в. в летний период (Алексеев и др., 2009), но такие аномалии считались региональным проявлением, компенсируемым аномалиями противоположного знака в Западной Арктике и не приводящим к значимым изменениям общей площади арктических морских льдов (Lemke et al., 2007).

В последнее десятилетие стали появляться косвенные данные (Semenov, Latif, 2012; Семенов, 2014) и материалы реконструкций, которые указывали на значительные, сравнимые с современными, отрицательные аномалии пло-

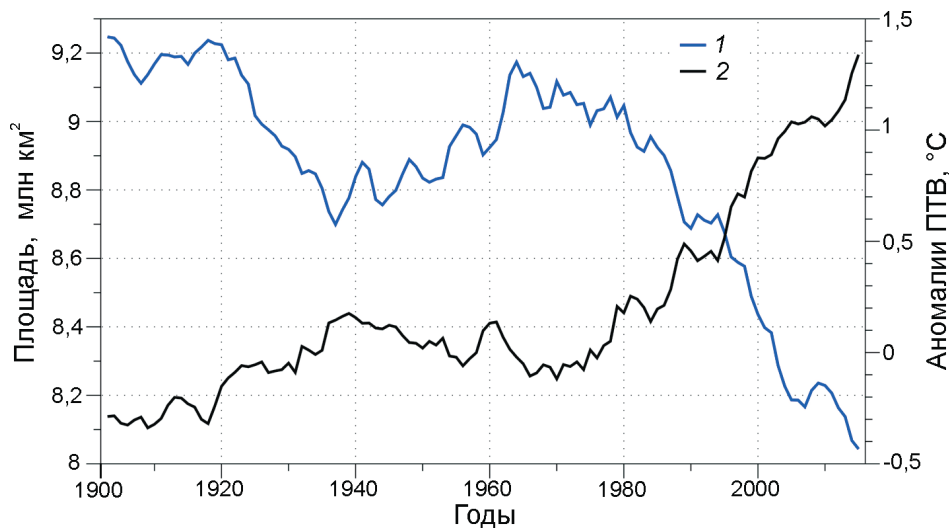


Рис. 10. Среднегодовая площадь арктических морских льдов (млн км²) по сеточным данным: 1 – температурные данные (Brennan et al., 2020); 2 – аномалии среднегодовой температуры в Северном полушарии (°C) на суше по данным наблюдений CRUTEM5 (Morice et al., 2021), 7-летнее скользящее среднее

Fig. 10. The average annual area of Arctic Sea ice (million km²) according to the grid data: 1 – temperature data (Brennan et al., 2020); 2 – average annual surface air temperature anomalies (°C) for Northern Hemisphere according to CRUTEM5 observations (Morice et al., 2021), 7-year running mean

щади морских льдов в Арктике в период ПСДВ (Алексеев и др., 2009). Помимо оценок вариаций общей площади морских льдов в Арктике, в последние годы появились и сеточные архивы, представляющие собой данные по распространению морских льдов в СП, основанные как на анализе эмпирических данных (Walsh et al., 2017), совместном анализе данных наблюдений и модельных экспериментов (Brennan et al., 2020), так и на материалах с использованием связей изменений концентрации морских льдов с вариациями температуры (Матвеева и др., 2020; Семенов, Матвеева, 2020).

На рис. 10 показаны среднегодовые значения площади морских льдов в Арктике по данным (Семенов, Матвеева, 2020) с начала XX в. вместе с аномалиями ПТВ с СП. Видно, что ПСДВ сопровождалось значительной отрицательной аномалией площади льдов, которая была превышена современным сокращением площади льдов в 1990-х годах и на настоящее время примерно в 2 раза меньше по амплитуде, чем современная аномалия. Отметим также в целом синфазные изменения ПТВ СП и площади арктических морских льдов. Ряд исследований указывает на тесную связь долгопериодных аномалий площади арктических морских льдов с АМО, главным образом вызванную изменениями притока

атлантических вод в Арктику (Miles et al., 2014; Попова, 2018). Это позволяет предположить значимое влияние АМО на формирование ускоренного потепления в высоких широтах во время ПСДВ путём изменения площади морских льдов и соответственно аномального нагрева атмосферы в зимний период.

Заключение

Проанализированы результаты исследований на тему потепления середины XX в. в СП, обсуждаются возможные механизмы формирования ПСДВ за счёт внутренней и внешней изменчивости климата и внешних воздействий, в том числе антропогенных. ПСДВ в СП сравнимо с современным периодом по темпам роста температуры и пространственным особенностям, но механизмы этой климатической аномалии остаются по-прежнему предметом дискуссии. ПСДВ также сопровождалось значительной отрицательной аномалией площади арктических морских льдов, сравнимой с современной, что было связано с изменениями притока атлантических вод в Арктику. К основным механизмам, которые могли привести к ПСДВ, относятся: внешнее антропогенное воздействие из-за изме-

нения концентраций парниковых газов и аэрозолей различной природы; внешние природные воздействия – солнечное излучение и вулканическая активность; естественная внутренняя изменчивость климатической системы.

Роль антропогенных парниковых газов в ПСДВ не может быть доминирующей, так как интенсивный рост концентраций ПГ в атмосфере начался во второй половине XX в., а во время ПСДВ увеличение концентраций ПГ происходило в 4–5 раз медленнее, чем во время современного потепления, при сравнимых темпах роста температуры. Отклонения от монотонного векового тренда потепления может частично объясняться ростом эмиссий антропогенных аэрозолей, приводящих к отрицательному радиационному воздействию и компенсирующих эффект антропогенных ПГ. Аномалии глобальной и среднеполюсарной температуры на временных масштабах от междесятилетних до межвековых коррелируют с изменениями солнечной активности, восстановленной по индексам солнечных пятен и изотопному анализу. Пауза в интенсивной вулканической активности в 1920–60-х годах также могла внести вклад в ПСДВ. Однако результаты экспериментов с климатическими моделями показывают, что даже совместного воздействия внешних естественных и антропогенных факторов недостаточно для объяснения ПСДВ. Статистические модели, основанные на наиболее достоверных данных последнего столетия, оценивают вклад солнечной активности в изменения температуры в XX в. как относительно небольшой по сравнению с другими факторами, по последним оценкам не превышающими $0,15^{\circ}\text{C}$.

Приведённые результаты исследований показывают, что естественная внутренняя изменчивость климата может объяснить значительную часть изменений температуры во время ПСДВ. Изменения ПТВ связаны с колебаниями ведущих режимов внутренней крупномасштабной циркуляции атмосферы и океана в СП. Многие исследования указывают на АМО как на главный фактор внутренней изменчивости для формирования ПСДВ ввиду синфазных долгопериодных вариаций индекса АМО и температуры в СП, особенно в высоких широтах. Механизм влияния АМО также тесно связан с колебаниями площади морских арктических льдов, что может вызывать изменения притока тёплых атлантических

вод из низких в высокие широты СП. К важному фактору относится и САК, формирующее зимние аномалии температуры над средними и северными широтами Евразии. В последние годы ряд исследований выделяет также естественную климатическую изменчивость в северной части Тихого океана как важный фактор в формировании ПСДВ. Оценки, сделанные в данной работе с помощью регрессионного анализа, показывают, что индексы ведущих мод естественной изменчивости циркуляции океана и атмосферы объясняют примерно 87% долгопериодной изменчивости ПТВ в СП в XX в. после вычета линейного векового тренда (см. рис. 9, б). При этом основной вклад вносят АМО, САК и ТСАК. Многочисленные модельные эксперименты показывают, что внутренняя изменчивость как единственный фактор не может объяснить всю амплитуду изменений температуры во время ПСДВ и должна дополняться воздействием внешних антропогенных и естественных факторов, которые также вносят вклад как в потепление 1920–40-х годов, так и в последовавшее похолодание 1960-х годов.

Таким образом, внутренняя изменчивость климатической системы, усиленная положительными обратными связями в высоких широтах СП и внешним антропогенным и естественным воздействием на климат, внесла сравнимый вклад в формирование ПСДВ в СП. Вместе с тем количественная оценка вклада каждого механизма, особенно внутренней естественной изменчивости в глобальные и региональные изменения климата, остаётся неопределённой, поскольку существенно зависит от различий климатических моделей, постановки численных экспериментов, недостатка эмпирических данных в середине XX в., особенно в высоких широтах, а также всё ещё недостаточного понимания динамики климата, в частности механизмов обратных связей. Отдельная задача на текущий момент – исследование и определение основной роли Атлантического или Тихоокеанского сектора в событии потепления середины XX в. в СП.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 20-15-50314.

Acknowledgments. The work was performed with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research, project № 20-15-50314.

References

- Alekseev G.V., Asarin A.E., Baloshnikova J.A., Bitkov L.M., Bulygina O.N., Bugrov L.Y., Vinogradova V.V., Gavrilova S.Y., Ganushkin D.A., Ginzburg A.I., Georgievsky M.V. *Vtoroj ochenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii*. The second evaluation report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. Leningrad: Roshydromet, 2014: 7. [In Russian].
- Alekseev G.V., Danilov A.I., Kattsov V.M., Kuzmina S.I., Ivanov N.E. Changes in the area of sea ice in the Northern hemisphere in the XX and XXI centuries according to observations and modeling data. *Izvestiya Ros. Akad. Nauk. Fizika atmosfery i okeana*. Proc. of RAS. Physics of Atmosphere and Ocean. 2009, 45 (6): 723–735. [In Russian].
- Bokuchava D.D., Semenov V.A. Analysis of surface air temperature anomalies in the Northern Hemisphere in the 20th century using observational and reanalysis data. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Klimatologiya*. Fundamental and Applied Climatology. 2018, 1: 28–51. doi: 10.21513/2410-8758-2018-1-28-51. [In Russian].
- Vize V.Y. Causes of the Arctic warming. *Sovetskaya Arktika*. Soviet Arctic. 1937, 1: 3–12. [In Russian].
- Eliseev A.V. Global methane cycle: a review. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Klimatologiya*. Fundamental and Applied Climatology. 2018, 1: 52. [In Russian].
- Zolotokrylin A.N., Titkova T.B., Mikhailov A.Yu. Climatic variations of the Arctic front and the Barents sea ice cover in winter time. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2015, 54 (1): 85–90. [In Russian].
- Kattsov V.M., Meleshko V.P., Govorkova V.A. Models designed to assess future climate changes. *Trudy Gos. Hydrophysics. Observatories*. Proc. of the State Hydrophysical Observatory. 2008, 5: 112–151. [In Russian].
- Lappo S.S., Gulev S.K., Rozhdestvenskii A.E. *Krupnomasshtabnoe teplovoe vzaimodeistvie v sisteme ocean—atmosfera i energoaktivnye oblasti Mirovogo okeana*. Large-scale heat interaction in the ocean–atmosphere system and energy-active zones in the world ocean. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1990: 10–15. [In Russian].
- Malinin V.N., Vainovsky P.A. On the causes of the first warming of the Arctic in the XX century *Uchenye zapiski RGGMU*. Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University. 2018, 53: 34–55. [In Russian].
- Matveeva T.A., Semenov V.A., Astafeva E.S. Arctic sea ice extent and its connection to the surface air temperature in the Northern Hemisphere. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2020, 60 (1): 134–48. [In Russian].
- Mokhov I.I., Smirnov D.A. Diagnostics of the causal relationship of solar activity and changes in the global near-surface temperature of the Earth. *Izvestiya Ros. Akad. Nauk. Fizika atmosfery i okeana*. Proc. of RAS. Physics of Atmosphere and Ocean. 2008, 44 (3): 283–293. [In Russian].
- Popova V.V. Present-Day Changes in Climate in the North of Eurasia as a Manifestation of Variation of the Large-Scale Atmospheric Circulation. *Fundam. Prikl. Klimatol.* Fundamental and Applied Climatology. 2018, 1: 84–111. doi: org/10.21513/2410-8758-2018-1-84-111. [In Russian].
- Popova V.V., Matskovsky V.V., Mikhailov A.Y. Modern changes in the land climate of the extratropical zone of the Northern Hemisphere. *Vestnik Moskovskogo Universiteta*. Bulletin of the Moscow University. 2018, 1: 5. [In Russian].
- Semenov V.A. Role of sea ice in formation of wintertime arctic temperature anomalies. *Izvestiya Ros. Akad. Nauk. Fizika atmosfery i okeana*. Proc. of RAS. Atmospheric and Oceanic Physics. 2014, 50 (4): 343–349. [In Russian].
- Semenov V.A. Modern climate fluctuations caused by feedbacks in the atmosphere–Arctic ice–ocean system. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Klimatologiya*. Fundamental and Applied Climatology. 2015, 1 (1): 232–248. [In Russian].
- Semenov V.A., Matveeva T.A. Changes in Arctic sea ice in the first half of the XX century: spatial and temporal reconstruction based on temperature data. *Izvestiya Ros. Akad. Nauk. Fizika atmosfery i okeana*. Proc. of RAS. Atmospheric and Oceanic Physics. 2020, 56 (5): 611–616. [In Russian].
- Ambaum M.H., Hoskins B.J., Stephenson D.B. Arctic oscillation or North Atlantic oscillation? *Journ. of Climate*. 2001, 14 (16): 3495–3507. doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<3495:AOONAO>2.0.CO;2.
- Barnston A.G., Livezey R.E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly Weather Review*. 1987, 115 (6): 1083–1126. doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2.
- Bekryaev R.V., Polyakov I.V., Alexeev V.A. Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern Arctic warming. *Journ. of Climate*. 2010, 23 (14): 3888–3906. doi.org/10.1175/2010JCLI3297.1.
- Bengtsson L., Semenov V.A., Johannessen O.M. The early twentieth-century warming in the Arctic–A possible mechanism. *Journ. of Climate*. 2004, 17 (20): 4045–4057. doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<4045:TE TWIT>2.0.CO;2.
- Booth B.B., Dunstone N.J., Halloran P.R., Andrews T., Bellouin N. Aerosols implicated as a prime driver of twentieth-century North Atlantic climate variability. *Nature*. 2012, 484 (7393): 228–232. doi.org/10.1038/nature10946.
- Bokuchava D.D., Semenov V.A. Mechanisms of the Early 20th Century Warming in the Arctic. *Earth-Science Reviews*. 2021, 222: 103820.

- Brennan M.K., Hakim G.J., Blanchard Wrigglesworth E.* Arctic sea ice variability during the instrumental era. *Geophys. Research Letter*. 2020, 47 (7): e2019GL086843. doi.org/10.1029/2019GL086843.
- Brönnimann S.* Early twentieth-century warming. *Nature Geoscience*. 2009, 2 (11): 735. doi.org/10.1038/ngeo670.
- Chen L., Francis J., Hanna E.* The «Warm Arctic / Cold continents» pattern during 1901–2010. *Intern. Journ. of Climatology*. 2018, 38 (14): 5245–5254. doi.org/10.1002/joc.5725.
- Chernokulsky A., Esau I.* Cloud cover and cloud types in the Eurasian Arctic in 1936–2012. *Intern. Journ. of Climatology*. 2019, 39 (15): 5771–5790. doi.org/10.1002/joc.6187.
- Chylek P., Klett J.D., Dubey M.K., Hengartner N.* The role of Atlantic Multi-decadal Oscillation in the global mean temperature variability. *Journ. of Climate Dynamic*. 2016, 47 (9–10): 3271–3279. doi.org/10.1007/s00382-016-3025-7.
- Compo G.P., Whitaker J.S., Sardeshmukh P.D., Matsui N., Allan R.J., Yin X., Gleason B.E., Vose R.S., Rutledge G., Bessemoulin P., Brönnimann S.* The twentieth century reanalysis project. *Quaternary Journ. of Royal Meteorol. Society*. 2011, 137 (654): 1–28. doi: 10.1002/qj.776.
- Delworth T.L., Knutson T.R.* Simulation of early 20th century global warming. *Science*. 2005, 287 (5461): 2246–2250. doi: 10.1126/science.287.5461.2246.
- Delworth T.L., Mann M.E.* Observed and simulated multidecadal variability in the Northern Hemisphere. *Journ. of Climate Dynamic*. 2000, 16 (9): 661–676. doi.org/10.1007/s003820000075.
- Dickson R.R., Osborn T.J., Hurrell J.W., Meincke J., Blindheim J., Adlandsvik B., Vinje T., Alekseev G., Maslowski W.* The Arctic ocean response to the North Atlantic oscillation. *Journ. of Climate*. 2000, 13 (15): 2671–2696.
- Enfield D.B., Mestas Nuñez A.M., Trimble P.J.* The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental US. *Geophys. Research Letter*. 2001, 15 (28–10): 2077–2080.
- Etheridge D.M., Steele L.P., Langenfelds R.L., Francey R.J., Barnola J.M., Morgan V.I.* Historical CO₂ records from the Law Dome DE08, DE08-2 and DSS ice cores. *Trends: a compendium of data on global change*. 1998: 351–364.
- Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., Berntsen T., Betts R., Fahey, D.W., Haywood J., Lean J., Lowe D.C., Myhre G., Nganga J., Prinn R., Raga G., Schulz M., Van Dorland R.* Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. Chapter 2. *Climate change 2007: The physical science basis*.
- Hansen J., Ruedy R., Sato M., Lo K.* Global surface temperature change. *Reviews of Geophysics*. 2010, 48 (4). doi.org/10.1029/2010RG000345.
- Haywood J., Boucher O.* Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: *Reviews of Geophysics*. 2000, 38 (4): 513–543. doi.org/10.1029/1999RG000078.
- Hegerl G.C., Brönnimann S., Schurer A., Cowan T.* The early 20th century warming: anomalies, causes, and consequences. *Wiley Interdisciplinary Review of Climate Change*. 2018, 9 (4): e522. doi.org/10.1002/wcc.522.
- Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC). *Iii W.G.* Third assessment report. Summary for policy-makers. 2001.
- Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC). *Solomon S.* The physical science basis: Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Clim. Change*. 2007: P. 996.
- Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC). *Stocker T.F., Qin D., Plattner G.K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M.* The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. *Clim. Change*. 2013: 1535.
- Johannessen 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., Pettersson L.H., Hasselmann K.* Arctic climate change: observed and modelled temperature and sea-ice variability. *Tellus A: Dynamic Meteorol. Oceanogr*. 2004, 56 (4): 328–341. doi.org/10.3402/tellusa.v56i4.14418.
- Jones P.D., Raper S.C.B., Wigley T.M.L.* Southern Hemisphere surface air temperature variations: 1851–1984. *Journ. of Climate and Applied Meteorology*. 1986, 25 (9): 1213–1230.
- Kravitz B., Robock A.* Climate effects of high latitude volcanic eruptions: Role of the time of year. *Journ. of Geophys. Research: Atmosphere*. 2011, 116: D01105. doi.org/10.1029/2010JD014448.
- Lalouaux P., de Boisseson E., Balmaseda M., Bidlot J.R., Broennimann S., Buizza R., Dalhgren P., Dee D., Haimberger L., Hersbach H., and Kosaka Y.* CERA 20C: A coupled reanalysis of the twentieth century. *Journ. of Adv. Model. Earth Syst*. 2018, 10 (5): 1172–1195. doi.org/10.1029/2018MS001273.
- Latonin M.M., Bashmachnikov I.L., Bobylev L.P., Davy R.* Multi-model ensemble mean of global climate models fails to reproduce early twentieth century Arctic warming. *Journ. of Polar Science*. 2021: 100677. doi.org/10.1016/j.polar.2021.100677.
- Lean J.L., Rind D.H.* How natural and anthropogenic influences alter global and regional surface temperatures: 1889 to 2006. *Geophys. Research Letter*. 2008, 35 (18). doi.org/10.1029/2008GL034864.
- Lemke P., Ren J., Alley R.B., Allison I., Carrasco J., Flato G., Fujii Y., Kaser G., Mote P., Thomas R.H., Zhang T.* Observations: changes in snow, ice and frozen ground, *Climat. Change 2007: The Physical Science Basis*.

- Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007: 337–383.
- Lenssen N., Schmidt G., Hansen J., Menne M., Persin A., Ruedy R., Zyss D.* Improvements in the GIS-TEMP uncertainty model. *Journ. Geophys. Research. Atmosphere.* 2019, 124 (12): 6307–6326. doi: 10.1029/2018JD029522.
- Lindsay R., Wensnahan M., Schweiger A., Zhang J.* Evaluation of seven different atmospheric reanalysis products in the Arctic. *Journ. of Climate.* 2014, 27 (7): 2588–2606. doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00014.1.
- Macfarling Meure C., Etheridge D., Trudinger C., Steele P., Langenfelds R., Van Ommen T., Smith A., Elkins J.* Law Dome CO₂, CH₄ and N₂O ice core records extended to 2000 years BP. *Geophys. Research Letter.* 2006, 33 (14). doi.org/10.1029/2006GL026152.
- Mantua N.J., Hare S.R., Zhang Y., Wallace J.M., Francis R.C.* A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. of Amer. Meteorol. Society.* 1997, 78 (6): 1069–1080. doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<1069:APICOW>2.0.CO;2.
- Meehl G.A., Washington W.M., Ammann C.M., Arblaster J.M., Wigley T.M.L., Tebaldi C.* Combinations of natural and anthropogenic forcings in twentieth-century climate. *Journ. of Climate.* 2004, 17 (19): 3721–3727. doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<3721:CONAAF>2.0.CO;2.
- Meng Q., Latif M., Park W., Keenlyside N.S., Semenov V.A., Martin T.* Twentieth century Walker circulation change: Data analysis and model experiments. *Journ. of Climate Dynamic.* 2012, 9: 1757–1773.
- Miles M.W., Divine D.V., Furevik T., Jansen E., Moros M., Ogilvie A.E.* A signal of persistent Atlantic multidecadal variability in Arctic sea ice. *Geophys. Research Letter.* 2014, 41 (2): 463–469. doi.org/10.1002/2013GL058084.
- Miller R.L., Schmidt G.A., Nazarenko L.S., Tausnev N., Bauer S.E., Del Genio A.D., Kelley M., Lo K.K., Ruedy R., Shindell D.T., Aleinov I.* CMIP5 historical simulations (1850–2012) with GISS Model E2. *Journ. Adv. Model.* 2014, 6 (2): 441–478. doi.org/10.1002/2013MS000266.
- Morice C.P., Kennedy J.J., Rayner N.A., Winn J.P., Hogan E., Killick R.E., Dunn R.J.H., Osborn T.J., Jones P.D., Simpson I.R.* An updated assessment of near surface temperature change from 1850: The HadCRUT5 data set. *Journ. of Geophys. Research: Atmosphere.* 2021, 126 (3): e2019JD032361. doi.org/10.1029/2019JD032361.
- Nidheesh A.G., Lengaigne M., Vialard J., Izumo T., Unnikrishnan A.S., Cassou C.* Influence of ENSO on the Pacific decadal oscillation in CMIP models. *Journ. of Climate Dynamic.* 2017, 49 (9): 3309–3326.
- Nozawa T., Nagashima T., Shiogama H., Crooks S.A.* Detecting natural influence on surface air temperature change in the early twentieth century. *Geophys. Research Letter.* 2005, 32 (20). doi.org/10.1029/2005GL023540.
- Overland J.E., Wood K.R., Wang M.* Warm Arctic-cold continents: climate impacts of the newly open Arctic Sea. *Journ. of Polar Research.* 2011, 30 (1): 15787.
- Pithan F., Mauritsen T.* Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models. *Nature Geoscience.* 2014, 7 (3): 181–184. doi.org/10.1038/ngeo2071.
- Poli P., Hersbach H., Dee D.P., Berrisford P., Simmons A.J., Vitart F., Trémolet Y.* ERA-20C: An atmospheric reanalysis of the twentieth century. *Journ. of Climate.* 2016, 29 (11): 4083–4097. doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0556.1
- Polyakov I.V., Alekseev G.V., Timokhov L.A., Bhatt U.S., Colony R.L., Simmons H.L., Walsh D., Walsh J.E., Zakharov V.F.* Variability of the intermediate Atlantic water of the Arctic Ocean over the last 100 years. *Journ. of Climate.* 2004, 17 (23): 4485–4497. doi.org/10.1175/JCLI-3224.1.
- Przybylak R., Svyashchennikov P.N., Uscka-Kowalkowska J., Wyszynski P.* Solar radiation in the Arctic during the Early Twentieth Century Warming (1921–1950): Presenting a compilation of newly available data. *Journ. of Climate.* 2020: 1–44. doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0257.1.
- Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B., Folland C.K., Alexander L.V., Rowell D.P., Kent E.C., Kaplan A.* Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *Journ. of Geophys. Research: Atmosphere.* 2003, 108 (14).
- Renwick J.A., Wallace J.M.* Relationships between North Pacific wintertime blocking, El Niño and the PNA pattern. *Monthly weather review.* 1996, 124 (9): 2071–2076.
- Ritchie H., Roser M., Rosado P.* CO₂ and greenhouse gas emissions. *Our world in data.* 2020.
- Roe G.* Feedbacks, timescales, and seeing red. *Annual Review of Earth. Planetary Science.* 2009, 37: 93–115. doi.org/10.1146/annurev.earth.061008.134734.
- Robock A.* Volcanic eruptions and climate. *Review Geophys.* 2000, 38 (2): 191–219. doi.org/10.1029/1998RG000054.
- Rohde R.* Comparison of Berkeley Earth, NASA GISS, and Hadley CRU averaging techniques on ideal synthetic data. *Berkeley Earth Memo.* 2013: 013.
- Semenov V.A., Bengtsson L.* Modes of the wintertime Arctic temperature variability. *Geophys. Research Letters.* 2003, 30 (15). doi.org/10.1029/2003GL017112.
- Semenov V.A., Latif M.* The early twentieth century warming and winter Arctic sea ice. *The Cryosphere.* 2012, 6 (6): 1231–1237. https://doi.org/10.5194/tc-6-1231-2012, 2012.
- Semenov V.A., Latif M., Dommenges D., Keenlyside N.S., Strehz A., Martin T., Park W.* The impact of North Atlantic-Arctic multidecadal variability

- ity on Northern Hemisphere surface air temperature. *Journ. of Climate*. 2010, 23 (21): 5668–5677. doi.org/10.1175/2010JCLI3347.1.
- Semenov V.A., Latif M., Jungclaus J.H., Park W.* Is the observed NAO variability during the instrumental record unusual? *Geophys. Research Letters*. 2008, 35: L11701.
- Shindell D., Faluvegi G.* Climate response to regional radiative forcing during the twentieth century. *Nat. Geoscience*. 2009, 2 (4): 294–300. doi.org/10.1038/ngeo473.
- Shiogama H., Nagashima T., Yokohata T., Crooks S.A., Nozawa T.* Influence of volcanic activity and changes in solar irradiance on surface air temperatures in the early twentieth century. *Geophys. Research Letter*. 2006, 33 (9). doi.org/10.1029/2005GL025622.
- Sigurdsson H.* Evidence of volcanic loading of the atmosphere and climate response. *Palaeogeography. Palaeoclimatology. Palaeoecology*. 1990, 89 (3): 277–289. doi.org/10.1016/0031-0182(90)90069-J.
- Smedsrud L.H., Esau I., Ingvaldsen R.B., Eldevik T., Haugan P.M., Li C., Lien V.S., Olsen A., Omar A.M., Otterå O.H., Risebrobakken B.* The role of the Barents Sea in the Arctic climate system. *Review Geophys*. 2013, 51 (3): 415–449. doi.org/10.1002/rog.20017.
- Stenseth N.C., Ottersen G., Hurrell J.W., Mysterud A., Lima M., Chan K.S., Yoccoz N.G., Ådlandsvik B.* Studying climate effects on ecology through the use of climate indices: the North Atlantic Oscillation, El Niño Southern Oscillation and beyond. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biolog. Science*. 2003, 270 (1529): 2087–2096.
- Stephenson D.B., Wanner H., Brönnimann S., Luterbacher J.* The history of scientific research on the North Atlantic Oscillation. *Geophys. Monography. Amer. Geophys. Union*. 2003, 134: 37–50. doi.org/10.1029/134GM02.
- Stolpe M.B., Medhaug I., Knutti R.* Contribution of Atlantic and Pacific multidecadal variability to twentieth-century temperature changes. *Journ. of Climate*. 2017, 30 (16): 6279–6295. doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0803.1.
- Straus D.M., Shukla J.* Does ENSO force the PNA? *Journ. of Climate*. 2002, 15 (17): 2340–2358.
- Svendsen L., Keenlyside N., Bethke I., Gao Y., Omrani N.E.* Pacific contribution to the early twentieth-century warming in the Arctic. *National Climate Change*. 2018, 8 (9): 793–797. doi.org/10.1038/s41558-018-0247-1.
- Suo L., Otterå O.H., Bentsen M., Gao Y., Johannessen O.M.* External forcing of the early 20th century Arctic warming. *Tellus A: Dynamic. Meteorology Oceanography*. 2013, 65 (1): 20578. doi.org/10.3402/tellusa.v65i0.20578.
- Tans P., Keeling R.* Annual mean atmospheric CO₂ values for Mauna Loa from Pieter Tans, NOAA/ESRL and Dr. Ralph Keeling, Scripps Institution of Oceanography: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/data.html>, last access: 24th April 2020.
- Titchner H.A., Rayner N.A.* The Met Office Hadley Centre sea ice and sea surface temperature data set, version 2: 1. Sea ice concentrations. *Journ. of Geophys. Research: Atmosphere*. 2014, 119 (6): 2864–2889.
- Tokinaga H., Xie S.P., Mukougawa H.* Early 20th-century Arctic warming intensified by Pacific and Atlantic multidecadal variability. *PNAS*. 2017, 114 (24): 6227–6232. doi.org/10.1073/pnas.1615880114.
- Undorf S., Bollasina M.A., Hegerl G.C.* Impacts of the 1900–74 increase in anthropogenic aerosol emissions from North America and Europe on Eurasian summer climate. *Journ. of Climate*. 2018, 31 (20): 8381–8399.
- Walsh J.E., Chapman W.L.* 20th-century sea-ice variations from observational data. *Annals of Glaciology*. 2001, 33: 444–448.
- Walsh J.E., Fetterer F., Scott Stewart J., Chapman W.L.* A database for depicting Arctic sea ice variations back to 1850. *Geogr. Review*. 2017, 107 (1): 89–107.
- Wang B., Liu J., Kim H.J., Webster P.J., Yim S.Y., Xiang B.* Northern Hemisphere summer monsoon intensified by mega-El Niño/southern oscillation and Atlantic multidecadal oscillation. *Proc. of the National Academy of Sciences*. 2013, 110 (14): 5347–5352.
- Wang M., Overland J.E., Kattsov V., Walsh J.E., Zhang X., Pavlova T.* Intrinsic versus forced variation in coupled climate model simulations over the Arctic during the twentieth century. *Journ. of Climate*. 2007, 20 (6): 1093–1107. doi.org/10.1175/JCLI4043.1.
- Webb E.J., Magi B.I.* The Ensemble Oceanic Niño Index. *Intern. Journ. of Climatology*. 2022: 1–21. doi.org/10.1002/joc.7535.
- Wegmann M., Brönnimann S., Compo G.P.* Tropospheric circulation during the early twentieth century Arctic warming. *Journ. of Climate Dynamic*. 2017, 48 (7–8): 2405–2418. doi.org/10.1007/s00382-016-3212-6.
- Wood K.R., Overland J.E.* Early 20th century Arctic warming in retrospect. *Intern. Journ. of Climatology*. 2010, 30 (9): 1269–1279. doi.org/10.1002/joc.1973.
- Yamanouchi T.* Early 20th century warming in the Arctic: A review. *Polar Research*. 2011, 5 (1): 53–71. doi.org/10.1016/j.polar.2010.10.002.
- Yu B., Zwiers F.W.* The impact of combined ENSO and PDO on the PNA climate: A 1,000-year climate modeling study. *Journ. of Climate Dynamic*. 2007, 29 (7): 837–851.
- Zhang Y., Wallace J.M., Battisti D.S.* ENSO-like interdecadal variability: 1900–93. *Journ. of Climate*. 1997, 10 (5): 1004–1020.