

Гидрометеорология и экология. 2023. № 71. С. 207—230.
Hydrometeorology and Ecology. 2023;(71):207—230.

КЛИМАТОЛОГИЯ. ОБЗОР

Научная статья
УДК [551.501+551.583:001.891.57](98)
doi: 1033933/2713-3001-2023-71-207-230

Потепление климата Арктики: расхождения между глобальными моделями климата и наблюдениями и возможные причины

Генрих Васильевич Алексеев

ФГБУ «ААНИИ», Санкт-Петербург, Россия, alexgv@aari.ru

Аннотация. Глобальные модели климата используются для предсказания антропогенных изменений климата и планирования на этой основе социально-экономической деятельности в изменяющихся климатических условиях. В тоже время отмечаются расхождения между модельными проекциями и наблюдаемыми изменениями климата, особенно в низких широтах и полярных областях. Одной из причин сохраняющихся расхождений может быть недостаточное внимание к естественным воздействиям на климатическую систему. Поэтому исследования роли естественных факторов в развитии современного потепления актуальны для повышения надёжности прогнозов развития климатической обстановки на Земле, на основе которых планируются глобальные социально-экономические преобразования.

Ключевые слова: глобальные модели климата, Арктика, потепление, низкие широты, инсоляция
Благодарности. Расчёты на избранных глобальных моделях климата предоставлены Климатическим центром Росгидромета на базе Главной геофизической обсерватории им. А. И. Войкова и обработаны научным сотрудником ГГО В. А. Говорковой.

Для цитирования: Алексеев Г. В. Потепление климата Арктики: расхождения между глобальными моделями климата и наблюдениями и возможные причины // Гидрометеорология и экология. 2023. № 71. С. 207—230. doi: 1033933/2713-3001-2023-71-207-230.

CLIMATOLOGY. REVIEW

Original article

Arctic climate warming: discrepancies between global climate models and observations and possible causes

Genrikh V. Alekseev

FSBI “AARI”, Saint Petersburg, Russia, alexgv@aari.ru

Summary. Global climate models are used to predict anthropogenic climate change and to plan social and economic activities under changing climatic conditions. At the same time, there are discrepancies

between model projections and observed climate changes, especially in low latitudes and polar regions. One reason for the discrepancy may be insufficient attention to natural forcings on the climate system. Therefore, studies of the role of natural factors in the development of modern warming are relevant for improving the reliability of forecasts for the development of the climatic situation on Earth. Particular attention is paid to the impact of climate change in low latitudes on the Arctic. A significant contribution to these changes can be made by a long-term increase in low-latitude insolation. Most of the low latitudes are occupied by the ocean, which absorbs the bulk of the incoming solar radiation. The contribution of the increase in insolation to the increase in ocean surface temperature at low latitudes is estimated from the available data on insolation of the upper boundary of the atmosphere. The changes in SST at low latitudes are compared according to reanalysis data and calculations of global climate models. Comparison of climate changes in low latitudes and in the Arctic is made. The influence from low latitudes on the reduction in the area of sea ice and the increase in water temperature in the Arctic basin is estimated. Changes in the characteristics of the atmosphere and ocean at low latitudes, associated with an increase in insolation, after 3 years are manifested in changes in the characteristics of the climate and sea ice in the Arctic. This indicates the potential for improved global modeling of warming in the Arctic and at low latitudes when taking into account slow changes in radiative forcing at the upper boundary of the atmosphere due to the Earth's orbital dynamics. Insolation trends at low latitudes are maximum in spring, i.e., in the vicinity of the vernal equinox in the Earth's orbit. This indicates the influence of precession — a slow shift of the equinox point, when the influx of solar radiation to low latitudes is maximum, to the perihelion, where it will be 3 W/m² more.

Keywords: Global climate models, Arctic, warming, low latitudes, insolation

Acknowledgments. Calculations on selected global climate models were provided by the Climate Center of Roshydromet on the basis of the Main Geophysical Observatory. A. I. Voeikov and processed by the MGO researcher V. A. Govorkova

For citation: Alekseev G. V. Arctic climate warming: discrepancies between global climate models and observations and possible causes. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(71):207—230. (In Russ.). doi: 1033933/2713-3001-2023-71-207-230.

Введение

Глобальные численные модели климатической системы Земли являются основным инструментом для получения количественных оценок изменений климата, вызванных антропогенной деятельностью [1]. Новые результаты расчётов на моделях регулярно обсуждаются и обобщаются в оценочных отчетах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Выпуску отчётов предшествует анализ численных экспериментов, выполненных в соответствии с согласованным списком на глобальных моделях для ансамбля CMIP6. Предыдущий ансамбль расчетов CMIP5 использовался при подготовке отчета IPCC, выпущенного в 2013 году. С тех пор модели были усовершенствованы с учетом рекомендаций, основанных на анализе расчетов CMIP5. Первые расчеты для нового ансамбля показали более высокую равновесную чувствительность к удвоению концентрации CO₂ относительно доиндустриального уровня по сравнению с моделями CMIP5 [2], что пока не нашло объяснения.

Изменения, зафиксированные в ледяных кернах, не подтверждают столь высокую чувствительность климата. Ранее большинство моделей прогнозировали потепление, ожидаемое при удвоении содержания углекислого газа в атмосфере в два раза по сравнению с доиндустриальными временами — между 2 °C и 4,5 °C. Но многие из новых моделей от ведущих центров показали потепление более чем на 5 °C [3] и прогнозируют слишком быстрые темпы потепления. Расчёты

похолодания в последнем ледниковом периоде 20000 лет назад на новой модели NCAR при заданном низком уровне CO_2 показали вдвое более низкую температуру по сравнению с данными палеоклиматических записей в результате высокой чувствительности модели к изменениям концентрации CO_2 . Тем не менее чувствительные модели хорошо воспроизводят климат в целом, лучше, чем их предшественники, поэтому разработчики моделей рекомендуют не заикливаясь на чрезмерной чувствительности моделей, а использовать модельные расчёты для практических целей.

В феврале 2020 года в Гамбурге, состоялся семинар ВПИК [4], на котором обсуждались научные вопросы на следующее десятилетие и пробелы в знаниях, которые следует учитывать при подготовке отчетов МГЭИК. Среди проблем, выделенных на ближайшее десятилетие, была чувствительность климата к выбросам парниковых газов и последствия потепления, превышающие уровни, указанные в Парижском соглашении. Отмечены погрешности модельных оценок, а также то, что в некоторых областях остаются те же проблемы, что и двадцать лет назад. Отмечено, что глобальные модели — инструмент, который можно использовать в сочетании с другими инструментами, при этом следует применять различные методы оценки.

Глобальные модели климата, настроенные на антропогенное потепление, оказываются не в состоянии воспроизвести наблюдаемые крупные аномалии климата. В июне 2021 года над северо-западом Тихого океана и прилегающей сушей Северной Америки сформировалась экстремальная аномалия с температурой воздуха до $49,6^\circ\text{C}$, что привело к гибели от перегрева более 1000 человек. Попытки воспроизвести аномалию в экспериментах с глобальными моделями оказались неэффективным и привели к выводу, что антропогенное потепление не вызывает подобных аномалий [5]. К подобному заключению пришли также авторы статьи [6], отметившие, что климатические модели не отражают наблюдаемое усиление зональной циркуляции в Северной Атлантике как реакцию на антропогенные выбросы. Ранее анализ модельных расчетов из ансамбля CMIP5 [7] показал, что модели недооценивают величину наблюдаемой междекадной изменчивости и искажают ее пространственный характер.

Обращает на себя внимание недооценка в моделях положительных тенденций потепления океана в низких широтах, где аккумулируется большая часть тепла солнечной радиации [8—11]. В результате глобальные совместные модели воспроизводят особенности изменения климата в отдельных регионах средних и высоких широт с меньшей достоверностью, чем модели атмосферной циркуляции с наблюдаемым потеплением в тропических океанах [12—14]. Причины несоответствия между моделируемым и наблюдаемым потеплением заключаются в том, что некоторые важные процессы в тропиках не учитываются в совместных моделях [13] или модели недооценивают внутреннюю изменчивость [10].

Целью статьи является исследование причин расхождений между наблюдаемыми и моделируемыми изменениями климата Арктики и поиск путей их уменьшения, учитывая роль естественных факторов в развитии современного потепления

Арктика в глобальных моделях климата

В новом поколении глобальных моделей из СМIP6 наибольшее расхождение сохраняется между наблюдаемым и смоделированным распределением морского льда в Арктике в сентябре, которое увеличивается с начала XXI века. Большинство моделей СМIP6 показывает меньшую потерю льда в сентябре на градус потепления по сравнению с наблюдениями [15]. Большинство моделей СМIP6 недооценивает наблюдаемую среднюю температуру в Арктике с 1979 г. по 2014 г. В 22 моделях из ансамбля СМIP6 наибольшие смещения модельной температуры воздуха наблюдаются над Норвежским, Баренцевым и морями, что связано с недооценкой в моделях океанического переноса тепла из Атлантики [16]. Глобальные совместные модели в значительной степени недооценивают межгодовую изменчивость температуры в слое атлантических вод Северного Ледовитого океана и повышение температуры, наблюдаемое здесь с конца 1970-х годов [17].

Современные климатические модели показывают большой разброс прогнозируемого сокращения площади морского льда в XXI веке [18]. Для прогнозов сентябрьского льда в Арктике внутренняя изменчивость составляет до 60 % общей неопределенности в следующие несколько десятилетий. В зимнее время в Гренландском и Баренцевом морях внутренняя изменчивость площади морского льда составляет до 70 % от общей неопределенности его прогностических оценок. Необходимо улучшение представления в моделях внутренней изменчивости арктического морского льда для сокращения неопределенности в будущих прогнозах [19].

Модели климата используются для исследования влияния потепления в Арктике на погоду и климат средних широт. В статье [20] и многих других доказывалось такое влияние. Сомнения в возможности арктического потепления вызвать значимые изменения в средних широтах приводятся в других статьях (например, [21—27]). В обзоре публикаций о влиянии арктического усиления на зимние похолодания в средних широтах, насчитывающем 203 ссылки [28], отмечается, что расхождения в выводах между модельными исследованиями и наблюдениями затрудняют понимание того, как арктическое усиление потепления влияет на погоду в средних широтах.

Задавая аномалии сплоченности морских льдов в Арктике, в моделях получают реакцию климата не только в средних, но и в низких широтах, что может быть следствием обратимости модельного климата, поскольку в модели можно поменять местами причину и следствие. В статьях [29, 30] на основе моделирования получены противоположные выводы о влиянии тихоокеанского колебания на потепление в Арктике. Эти примеры подтверждают необходимость анализа не только результатов глобальных моделей, но и рядов наблюдений исходя из физических представлений о связи между ними.

Причины потепления в Арктике

В работах [31—34] был установлен основной вклад атмосферного переноса тепла в энергетический баланс Арктики в холодную половину года. Расчёты переносов атмосферного тепла и влаги в Арктику по данным реанализа ERA Interim

за 1980—2015 гг., показали [35], что основная часть явного и скрытого тепла поступает в Арктику к северу от 70° с.ш. зимой между 0° и 80° в.д. и между поверхностью и 750 гПа. Этот приток определяет более 50 % изменчивости зимней температуры воздуха и более 40 % средней за год, а приток водяного пара усиливает парниковый эффект, который замедляет рост толщины льда зимой и ускоряет начало таяния [36, 37].

Изменчивость атмосферного переноса тепла в Арктику обусловлена изменением атмосферной циркуляции в северном полушарии [38—41]. Эти изменения, в частности, являются результатом воздействия аномалий температуры поверхности океана на интенсивность атмосферной циркуляции [13, 22, 42, 43]. Влияние аномалий ТПО в низких широтах особенно важно, поскольку здесь аккумулируется большая часть притока тепла от Солнца и от глобального потепления [44, 45], которое переносится в средние и высокие широты. Аномалии ТПО в тропиках усиливают конвекцию в атмосфере, что сопровождается усилением и расширением циркуляционной ячейки Хэдли [46—51], порождают волны Россби [41, 52—55] и колебания Маддена—Джулиана [56], влияют на Североатлантическое колебание [57]. В результате увеличивается перенос тепла и влаги в высокие широты. Перечисленные результаты получены при изучении влияния ТПО на атмосферные циркуляционные структуры в низких широтах, проявляющегося в Арктике через 2—3 недели.

ТПО в тропической Атлантике воздействует не только на атмосферный, но и на океанский перенос тепла в приатлантические арктические моря и в Арктический бассейн [58].

Приток теплой и соленой воды из Северной Атлантики в Баренцево и Гренландское моря влияет на потепление и сокращение площади морского льда зимой [26, 59—61]. Увеличение притока и повышение температуры поступающей атлантической воды повлияло на структуру водных масс в Арктическом бассейне. Переход произошёл в 1990-е годы и сопровождался, в частности, уменьшением содержания пресной воды (СПВ) в евразийской и ростом в амеразийской частях Арктического бассейна, согласующимися с притоками пресной воды с речным стоком, осадками и таянием/заморозанием [62, 63].

Влияние ТПО в низких широтах на переносы в Арктику осуществляется посредством общей циркуляции атмосферы и циркуляции океана в Северной Атлантике. Начальным воздействием является формирование роста ТПО, вызывающее усиление меридиональных переносов в атмосфере, а в Атлантическом океане — увеличение океанического переноса тепла. В результате через 2,25 года отмечается рост температуры воды в Баренцевом море и увеличение зимних атмосферных переносов тепла через «атлантические ворота» на 70° с.ш., зимней температуры воздуха и сокращение площади морского льда в приатлантической Арктике [64, 65].

Установлена [65] тесная связь изменений толщины и объёма льда в Арктическом бассейне зимой с нисходящей длинноволновой радиацией, управляемой ростом приповерхностной температуры воздуха и содержания водяного пара, которые, в свою очередь, связаны с изменением температуры и содержанием водяного пара осенью на 27—32 месяца ранее в области 0 — 25° с.ш., формирующихся с участием инсоляции (рис. 1).

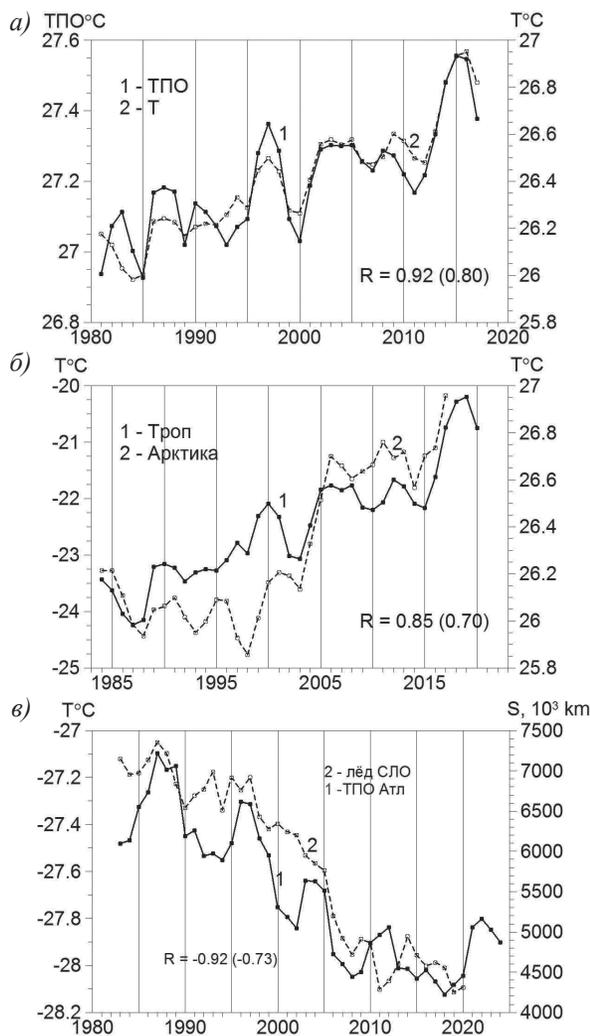


Рис. 1. Влияние ТПО в тропиках на приповерхностную температуру и морской лёд в Арктике.

- а) ТПО в августе в области 10° юш.— 10° с.ш. и ПТВ в области ($0-25^{\circ}$ с.ш.) в октябре;
 б) ПТВ в области ($0-25^{\circ}$ с.ш.) в октябре и в области ($70-87.5^{\circ}$ с.ш.) зимой через 3 года;
 в) ТПО в тропической Атлантике в октябре и ледовитость (площадь, занятая морским льдом) в СЛО в сентябре через 4 года. Все ряды сглажены скользящим усреднением по 3 года. R — коэффициенты корреляции между рядами (1) и (2), в скобках — между несглаженными рядами.

Fig. 1. Impact of SST in the tropics on surface air temperatures (SAT) and sea ice in the Arctic.

- а) SST in August in the area of 10° S— 10° N and SAT in the region ($0-25^{\circ}$ N) in October;
 б) SAT in the region ($0-25^{\circ}$ N) in October and in the region ($70-87.5^{\circ}$ N) in winter after 3 years;
 в) SST in the tropical Atlantic in October and sea ice extent (the area occupied by sea ice) in the Arctic Ocean in September after 4 years. All series are smoothed by moving average over 3 years.
 R — correlation coefficients between series (1) and (2), in brackets — between unsmoothed series.

Рост инсоляции в низких широтах

В низких широтах находятся климатические области максимальной температуры воздуха, максимальной ТПО и максимального содержания водяного пара в атмосфере, которым соответствует наибольший приток солнечной радиации. Здесь накапливается основная часть тепла, поглощаемого океаном [66].

Инсоляция на верхней границе атмосферы здесь растёт с января по июль [67—70]. Эти тренды инсоляции в результате орбитальной динамики Земли малы, но их влияние усиливается за счет накопления тепла в океане, который составляет большую часть области низких широт, малого альбеда поверхности океана и нелинейных обратных связей между температурой, содержанием водяного пара и нисходящим длинноволновым излучением. Наши расчёты по данным об инсоляции [71] показали (рис. 2), что тренды инсоляции в низких широтах максимальны весной, т.е. в окрестности точки весеннего равноденствия на орбите Земли. Это указывает на влияние прецессии — медленного смещения точки равноденствия, когда приток солнечной радиации в низкие широты максимален, к перигелию, где будет на 3 Вт/м^2 больше приходиться солнечной радиации в низкие широты.

Помимо трендов в инсоляции в низких широтах содержатся колебания, близкие к тем, что присутствуют в спектрах изменчивости параметров океана и атмосферы (рис. 3, а). Своим происхождением эти колебания обязаны вариациям расстояния между Землей и Солнцем (рис 3, б).

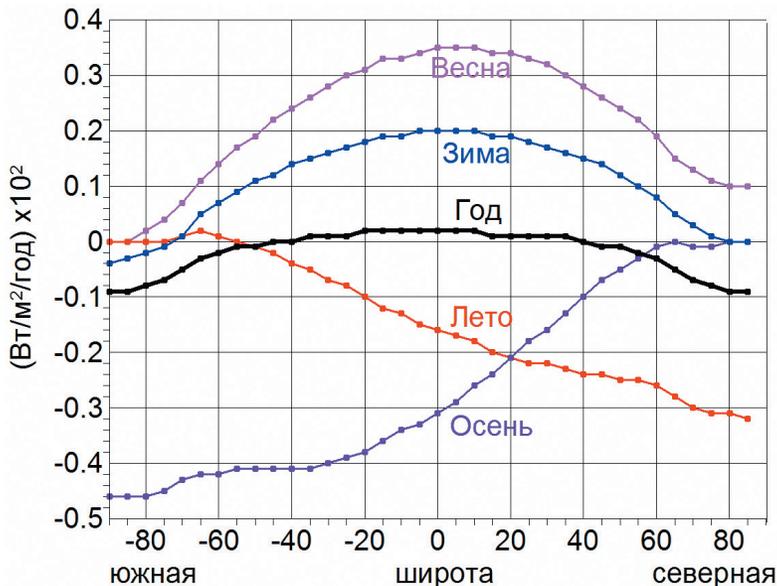


Рис. 2. Тренды инсоляции на верхней границе атмосферы за 1979—2018 гг.

Fig. 2. Trends in insolation of the upper boundary of the atmosphere for 1979—2018.

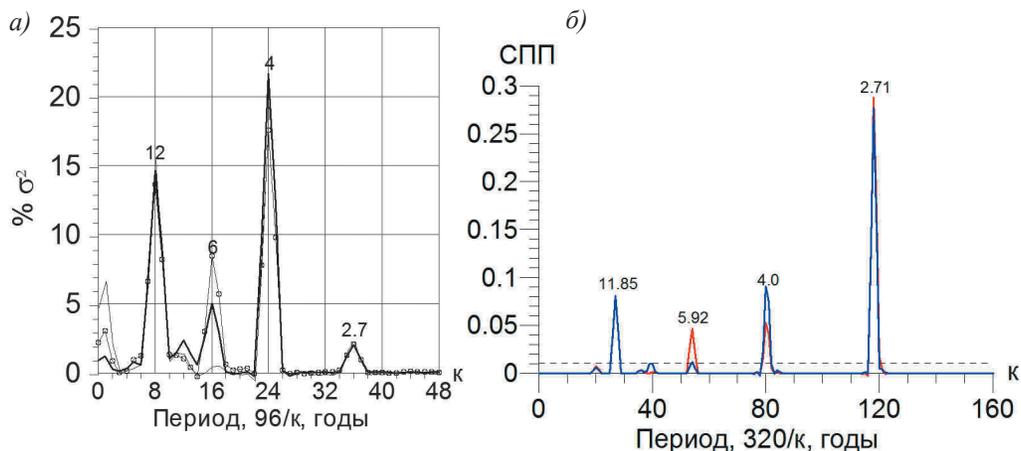


Рис. 3. Спектральные плотности колебаний инсоляции в низких широтах и расстояния между Землей и Солнцем.

а) Спектральная плотность (СПП) инсоляции весной (жирная линия) и в марте, апреле, мае и зимой (тонкие линии) 1900—2017 гг.; б) СПП изменений расстояния между Землей и Солнцем зимой (синий) и летом (красный) за 500 лет по расчётам Е. В. Питьевой из Института прикладной астрономии РАН (<https://iaaras.ru/people/pitjeva/>).

Fig. 3. Spectral densities of insolation fluctuations at low latitudes and distances between the Earth and the Sun.

а) Spectral density (SPD) of insolation in spring (thick line) and in March, April, May and winter (thin lines) 1900—2017; б) SPD of changes in the distance between the Earth and the Sun in winter (blue) and summer (red) for 500 years according to the calculations of E. V. Pitjeva from the Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences (<https://iaaras.ru/people/pitjeva/>).

СПП рассчитаны по алгоритму:

$$СПП(\kappa) = \frac{\delta(\kappa)}{m} \left\{ \hat{R}_0 + \sum_1^m R_z \cos \frac{\pi \kappa \tau}{m} \left(1 + \cos \frac{\pi \tau}{m} \right) \right\},$$

$$\delta(\kappa) = \begin{cases} \frac{1}{2}, & \kappa = 0, m \\ 1, & 0 < \kappa < m \end{cases},$$

где R — нормированная автокорреляционная функция, $\cos \frac{\pi \kappa \tau}{m} \left(1 + \cos \frac{\pi \tau}{m} \right)$ — ядро Тьюки.

Описание алгоритма можно найти в книге [72]. Использование ядра Тьюки позволяет представить часть дисперсии в « κ »-полосе. Всего полос « m » — по числу использованных значений автокорреляционной функции, которые задаются исходя из желаемого разрешения спектра и требования статистической надёжности оценки.

На рис. 3 оценки СПП безразмерны, поскольку автокорреляционная функция нормирована на дисперсию и дают распределение единичной дисперсии в процентах на рис. 3 а и в долях единицы на рис. 3 б. Чтобы получить размерные оценки, нужно умножить на дисперсию (σ^2). Переход от условной частоты « k » к периоду T_k осуществляется по формуле $T_k = 2m/k$, поскольку интервал частот спектра равен $(0, 1/2\Delta t)$, где Δt — дискретность ряда, число частотных полос — $1/2m$ ($\Delta t = 1$), а $k/2m$ — k полоса частот, которой соответствует период $T_k = 2m/k$.

Спектр изменений расстояния между Солнцем и Землей и спектр изменений инсоляции совпадают частично, поскольку инсоляция изменяется не только в результате изменений расстояния, но и других параметров планетарной динамики Земли (нутаии, прецессии и др.). В частности, в спектре инсоляции присутствует период 18,6 года в результате изменений угла наклона Земли под влиянием Луны [69]. В изменениях расстояния более длительные чем 12 лет периоды, в частности 60 лет, не проявляются.

Тренды инсоляции низких широт малы. В сумме тренды за январь — август — месяцы, предшествующие максимуму ПТВ, составляют 0,0156 Вт/м².

В работе [73] найдена высокая корреляция между инсоляцией весной и поверхностной температурой воздуха, температурой поверхности воды, содержанием водяного пара, нисходящей длинноволновой радиацией осенью в низких широтах. Такую связь можно объяснить кумулятивным эффектом притока инсоляции на поверхность океана, формирующим осенний максимум ТПО. Изменения характеристик атмосферы и океана в низких широтах, связанные с изменениями инсоляции, через 3 года проявляются в изменениях характеристик климата и морских льдов в Арктике [58, 74, 75].

Оценку вклада роста инсоляции в повышение ТПО можно получить из анализа линейной чувствительности климатических параметров. Использование понятия «чувствительность» в климатических исследованиях предложено Г. С. Голицыным и И. И. Моховым [76, 77]. В общем случае чувствительность — реакция линейной системы на малое изменение на входе. В климатологии чувствительность оценивают коэффициентом регрессии между исследуемыми параметрами. В случае сравнения двух гармонических колебаний (например, сезонного хода двух параметров климатической системы) можно использовать в качестве чувствительности амплитудно-частотную характеристику — отношение амплитуды сигнала на выходе системы к амплитуде сигнала на входе. Здесь определим чувствительность (Sn) по отношению амплитуд (A) сезонного хода параметров y и x :

$$Sn_x^y = \frac{A_y}{A_x}. \quad (1)$$

Вклад роста параметра X в тренд параметра Y будет:

$$\Delta Tr Y = Sn_x^y \times Tr X. \quad (2)$$

В табл. 1 и 2 представлены рассчитанные по формулам (1) и (2) взаимные чувствительности и вклады в тренд соответствующих параметров.

Таблица 1

Оценки чувствительности по амплитуде сезонных изменений —
отношение амплитуды параметра в верхней строке к амплитуде параметра
в первом столбце с соответствующим отношением размерностей

Sensitivity estimates for the amplitude of seasonal changes are the ratio
of the amplitude of the parameter in the top row to the amplitude of the parameter
in the first column with the corresponding ratio of dimensions

	CO ₂ , ppm	TCVW, Kgm ⁻²	STRD, Wm ⁻²	SST, °C
Ins, Wm ⁻²	0,046	0,173	0,346	0,0323
CO ₂ , ppm	—	3,768	7,522	0,703
TCVW, Kgm ⁻²	—	—	1,996	0,187
STRD, Wm ⁻²	—	—	—	0,0934

Таблица 2

Вклад в тренд параметров в верхней строке тренда параметров в первом столбце,
найденный по чувствительности из табл. 1 и тренду

The contribution to the trend of the parameters in the top line of the trend of the parameters
in the first column, found by the sensitivity from Table 1 and the trend

	CO ₂ , ppm	TCVW, Kgm ⁻²	STRD, Wm ⁻²	SST, °C
Ins, Wm ⁻²	—	0,0028 (4 %)	0,0054 (2,6 %)	—
CO ₂ , ppm	—	6,745	14,367	1,343
TCVW, Kgm ⁻²	—	—	0,1343 (66 %)	0,0126 (55 %)
STRD, Wm ⁻²	—	—	—	0,019 (83 %)

Примечание. В табл. 1 и 2: Ins — инсоляция на верхней границы атмосферы по [71], CO₂ — концентрация по [78] в области 0—25° с.ш., TCWV — общее содержание водяного пара, STRD — нисходящая ДВ радиация на поверхности по ERA5, SST — температура поверхности океана в области 5—25° с.ш., 20—60° з.д. по HadISST. Используются данные за 1979—2018 гг.

In table 1 and 2: Ins — insolation of the upper boundary of the atmosphere according to [71], CO₂ — concentration according to [78] in the region of 0—25° N, TCWV — total water vapor content, STRD — descending DW radiation on the surface according to ERA5, SST is the ocean surface temperature in the area 5—25°N, 20—60°W. by HadISST. Data for 1979—2018 are used.

Из табл. 1 и 2 следует, что чувствительность климатических параметров в рассматриваемой области низких широт к росту CO₂ нереально велика — вклад роста в тренд климатических параметров (табл. 2) превышает 5000 %. Вклад роста содержания водяного пара (TCWV) в нисходящую ДВ радиацию (STRD) составляет 66 %. Оставшиеся 34 % тренда STRD можно отнести на счёт роста CO₂, на которые придётся 28 % тренда SST. Таковую же оценку (28 %) вклада CO₂ в тренд SST получим из разности вкладов STRD (83 %) и TCWV (55 %). Оставшиеся 17 % можно отнести на счёт приближенности оценок.

Чувствительность климатических параметров к росту инсоляции мала, поэтому прямой вклад инсоляции в их рост не превышает 4 %. Но незначительный рост инсоляции приводит к значимым изменениям климатических параметров с участием нелинейной зависимости уходящей и падающей ДВ радиации и

концентрации водяного пара от температуры в низких широтах. Учёт нелинейных зависимостей в расчётах, выполненных в работе [73], показал вклад роста инсоляции в тренд SST равным 57 %, близким к 55 % вклада вследствие роста общего содержания водяного пара, полученным из табл. 2.

Оценки в табл. 1 и 2 показывают, что основной вклад в рост ТПО (83 %) в рассматриваемой низкоширотной области Северной Атлантики вносит нисходящая ДВ-радиация. Рост нисходящей ДВ-радиации формируется за счёт увеличения содержания водяного пара (55 %) и повышения концентрации CO_2 (28 %). Ранее в работе [73] получено, что повышение содержания водяного пара в атмосфере низких широт вследствие незначительного роста инсоляции обеспечивает 57 % повышения ТПО в этой же области Северной Атлантики. Близость двух независимых оценок вклада содержания водяного пара в повышение ТПО подтверждает влияние малого повышения инсоляции в формирование тренда ТПО в низких широтах и указывает на возможную причину расхождений с оценками роста ТПО в расчётах глобальных моделей.

В радиационном атмосферном блоке глобальных моделей детально учитываются распространение вертикальных потоков радиации в атмосфере, но не содержится сведений о расчёте распределения солнечной радиации, приходящей на верхнюю границу атмосферы [1]. В обзоре [79] показано, что в радиационном блоке глобальных моделей CMIP6 солнечное воздействие представлено полной солнечной радиацией (TSI), солнечной спектральной освещённостью (SSI) и индексом F10.7, а также воздействием частиц, включая геомагнитные индексы Ap и Kp, скоростью ионизации для учёта эффектов солнечных протонов, электронов и галактических космических лучей. Данные о солнечном воздействии представлены с дневным и месячным разрешением для исторического (1850—2014 гг.) и будущего (2015—2300 гг.) моделирования. Для доиндустриального моделирования учтены 11-летние и более короткие временные масштабы изменчивости солнечного воздействия, но без долгосрочных изменений. Об учёте долговременных изменений в распределении солнечного воздействия на верхней границе атмосферы, связанных с орбитальной динамикой Земли не упоминается ввиду априори принятого положения об их малости даже в сравнении с влиянием космических лучей.

Для сравнения инсоляции на верхней границе атмосферы низких широт в глобальных моделях и в расчётах Фёдорова и Костина [71]) были выбраны 7 моделей (табл. 3) с наименьшими среднеквадратическими ошибками с климатом в ERA5 и HadISST.

Если сезонные изменения инсоляции с максимумом в мае и минимумом в декабре в разных моделях и в расчётах Фёдорова и Костина (ФК) близки между собой, то многолетние тренды за 1979—2018 гг. среднемесячных значений инсоляции на верхней границе атмосферы показывают большой разброс между моделями и отличия от расчётов по данным ФК (рис. 4). При этом в большинстве моделей отсутствует тренд инсоляции на верхней границе атмосферы низких широт в отличие от тренда инсоляции в расчётах по данным Фёдорова и Костина с максимумом в апреле.

Совместные модели* циркуляции атмосферы и океана из CMIP5
 Joint Atmospheric-Ocean Circulation Models* from CMIP5

№	Центр, страна	Название модели, год создания	Модель общей циркуляции атмосферы (разрешение)	Модель общей циркуляции океана (разрешение)
1	CCCMA, Канада	CanESM2, 2010	T63 (1.9° × 1.9°) L35	CanOM4(~0.7° × ~0.9°) L40 256×192
2	NCAR, США	CESM1-BGC, 2010	f09_g16(1.25° × 0.9°) L27 288×192	POP2(1.1° × 0.3~0.6°) L60, 320×384
3	NCAR, США	CCSM4, 2010	f09_g16(1.25° × 0.9°) L27, 288×192	POP2(1.1° × 0.3~0.6°) L60, 320×383
4	CMCC, Италия	CMCC-CM, 2009	T159(0.75° × 0.75°) L31 480×240	ORCA2(2.0° × 0.5°~2°) L31, 182×149
5	INM, Россия	INM CM4, 2009	(2.0° × 1.5°) L21	R1×(1.0°-0.5°) L40 360×340
6	AORI/NIES/JAMES&T, Япония	MIROC5, 2010	T85L40(1.4° × 1.4°) L40 256×128	COCO4.5R(1.4° × 0.5°) L50 256×224
7	MPI, Германия	MPI-ESM-MR, 2009	T63 (1.9° × 1.9°) L95	MPIO TP04(~0.4° × 0.4°) L40 802×404

* Расчёты на выбранных моделях предоставлены Климатическим центром Росгидромета в базе Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова и обработаны В. А. Говорковой.

* Calculations on the selected models were provided by the Climate Center of Roshydromet in the database of the Main Geophysical Observatory named after A. I. Voeikov and processed by V. A. Govorkova.

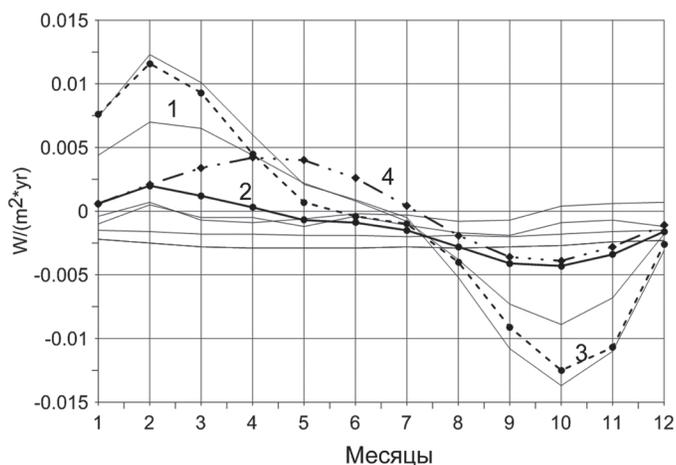


Рис. 4. Тренды инсоляции на верхней границе атмосферы в 7 глобальных моделях CMIP5 (из табл. 3), в ERA5, в данных из <http://www.solar-climate.com>.

1 — тренды в отдельных моделях, 2 — средний тренд по 7 моделям, 3 — тренд в ERA5, 4 — тренд по данным ФК.

Fig. 4. Trends in insolation of the upper boundary of the atmosphere in 7 global CMIP5 models (from Table 3), in ERA5, in data from <http://www.solar-climate.com>.

1 — trends in individual models, 2 — average trend for 7 models, 3 — trend in ERA5, 4 — trend according to data FK.

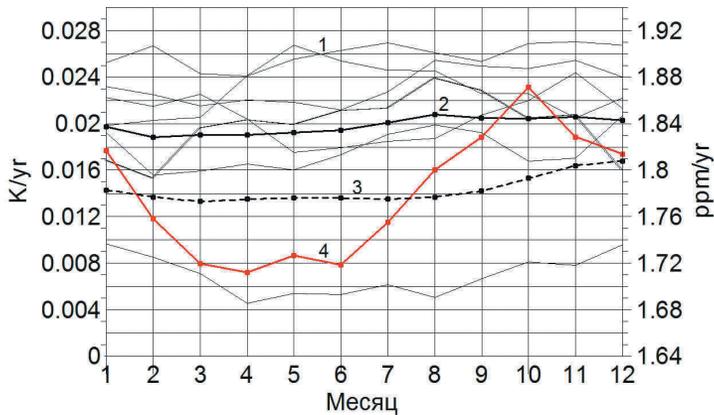


Рис. 5. Тренды среднемесячных значений ТПО и CO_2 в выбранном районе тропической Северной Атлантики ($5\text{--}25^\circ$ с.ш.; $60\text{--}10^\circ$ з.д.) за 1979—2018 гг.

1 — тренды смоделированной ТПО; 2 — средний тренд по 7 моделям; 3 — тренд CO_2 ; 4 — тренд ТПО по данным HadISST. Тренды отдельных моделей показывают межмодельный разброс.

Fig. 5. Trends in monthly average SST and CO_2 values in a selected area of the tropical North Atlantic ($5\text{--}25^\circ\text{N}$; $60\text{--}10^\circ\text{W}$) for 1979—2018.

1 — trends in the simulated SST; 2 — average trend for 7 models; 3 — CO_2 trend; 4 — SST trend according to HadISST data. Trends of individual models show inter-model scatter.

Тренды среднегодовой инсоляции на верхней границе атмосферы области $0\text{--}25^\circ$ с.ш. во всех моделях и в ERA5 отрицательны в отличие от рассчитанной по ФК. В четырёх моделях тренды инсоляции во все месяцы отрицательны. В модели CMCC-CM (Италия) тренды положительны с января по июнь с максимумом в марте и близким к нему значением в апреле. Таким образом, во всех рассмотренных моделях присутствует разный форсинг от многолетних изменений инсоляции на верхней границе атмосферы, который к тому же уменьшается в отличие от инсоляционного форсинга в расчётах по ФК.

Ни в одной из рассмотренных моделей не получено близкого к HadISST распределения трендов ТПО в выбранном районе тропической Северной Атлантики с максимумом в октябре, а все модельные тренды близки к распределению трендов CO_2 (рис. 5).

Тренды среднемесячных значений приповерхностной температуры воздуха, общего содержания водяного пара в атмосфере и нисходящей длинноволновой радиации на поверхности в области низких широт в моделях также показывают большой разброс, а тренды средних по семи моделям превосходят тренды этих параметров по данным ERA5.

Заключение

Исследования роли естественных факторов в развитии современного потепления актуальны для повышения надёжности прогнозов развития климатической

обстановки на Земле, на основе которых планируются глобальные социально-экономические преобразования. Обострение социально-экономических последствий глобального потепления требует принятия адекватных мер, зависящих от надежных установленных причин и механизмов потепления.

В настоящее время основным инструментом для получения количественных оценок изменений климата служат глобальные численные модели климатической системы Земли, а главной причиной изменений считается рост содержания CO_2 , вызванный антропогенной деятельностью. В тоже время отмечаются расхождения между модельными проекциями и наблюдаемыми изменениями климата, особенно в низких широтах и полярных областях, которые остаются, несмотря на развитие моделей. Одной из причин сохраняющихся расхождений может быть недостаточное внимание к неантропогенным (естественным) воздействиям на климатическую систему.

Расчеты изменений климата для ансамбля CMIP6 показали более высокую равновесную чувствительность к удвоению концентрации CO_2 относительно доиндустриального уровня по сравнению с моделями из предыдущего ансамбля CMIP5.

Глобальные модели климата, настроенные на антропогенное потепление, оказываются не в состоянии воспроизвести наблюдаемые крупные аномалии климата и не отражают наблюдаемое усиление зональной циркуляции в Северной Атлантике.

Привлекает внимание и недооценка в глобальных моделях положительных тенденций потепления океана в низких широтах, где аккумулируется большая часть тепла солнечной радиации. В результате глобальные совместные модели воспроизводят особенности изменения климата в отдельных регионах средних и высоких широт с меньшей достоверностью, чем модели атмосферной циркуляции с заданным наблюдаемым потеплением в тропических океанах. Тем не менее, глобальные модели из CMIP6 хорошо воспроизводят климат в целом лучше, чем их предшественники, поэтому разработчики моделей рекомендуют использовать модельные расчёты для практических целей.

В новом поколении глобальных моделей из CMIP6 наибольшее расхождение сохраняется между наблюдаемым и смоделированным распределением морского льда в Арктике в сентябре. Большинство моделей показывают меньшую потерю льда в сентябре на градус потепления по сравнению с наблюдениями и недооценивают наблюдаемую среднюю температуру в Арктике, особенно над Норвежским, Баренцевым и Карским морями, и повышение температуры в слое атлантических вод Северного Ледовитого океана, что связано с недооценкой в моделях океанического переноса тепла из Атлантики.

Модели климата используются как для доказательства влияния усиления потепления в Арктике на погоду и климат средних широт, так и для противоположного утверждения о малости или отсутствии такого влияния. Во многом это связано с обратимостью — в модели можно поменять местами причину и следствие. В результате Арктика оказывает влияние на аномалии в низких широтах. Это подтверждает необходимость планирования расчётов на глобальных моделях

на основе физических представлений о природе климатических процессов и связей между ними.

Основная часть явного и скрытого тепла зимой в Арктику к северу от 70° с.ш. поступает между 0° и 80° в.д. и определяет более 50 % изменчивости зимней температуры воздуха и более 40 % средней за год, а приток водяного пара усиливает парниковый эффект, который замедляет рост толщины льда зимой и ускоряет начало таяния. Изменения притока, в частности, являются результатом воздействия аномалий температуры поверхности океана на интенсивность атмосферной циркуляции, особенно аномалий ТПО в низких широтах, где аккумулируется большая часть притока тепла от Солнца.

Влияние ТПО в низких широтах на переносы в Арктику осуществляется посредством общей циркуляции атмосферы и циркуляции океана в Северной Атлантике. Начальным воздействием является формирование роста ТПО, вызывающее усиление меридиональных переносов в атмосфере, а в Атлантическом океане — увеличение океанического переноса тепла. В результате через 2,25 года отмечается рост температуры воды в Баренцевом море и увеличение зимних атмосферных переносов тепла через «атлантические ворота» на 70° с.ш., зимней температуры воздуха и сокращение площади морского льда в приатлантической Арктике.

Наибольший приток солнечной радиации приходится на низкие широты, где он формирует климатические области наибольшей температуры воздуха, максимальной ТПО и максимального содержания водяного пара в атмосфере. Инсоляция на верхней границе атмосферы здесь растёт. Эти изменения инсоляции в результате орбитальной динамики Земли невелики, но их влияние усиливается за счет накопления тепла в океане, который составляет большую часть области низких широт, малого альбеда поверхности океана и нелинейных обратных связей между температурой, содержанием водяного пара и нисходящим длинноволновым излучением.

Тренды инсоляции в низких широтах максимальны весной, т.е. в окрестности точки весеннего равноденствия на орбите Земли. Это указывает на влияние прецессии — медленного смещения точки равноденствия, когда приток солнечной радиации в низкие широты максимален, к перигелию, где он будет на 3 Вт/м^2 больше.

Найдена высокая корреляция в низких широтах между инсоляцией весной и приповерхностной температурой воздуха, температурой поверхности воды, содержанием водяного пара, нисходящей длинноволновой радиацией осенью. Такую связь можно объяснить кумулятивным эффектом притока инсоляции на поверхность океана, формирующим осенний максимум ТПО. Изменения характеристик атмосферы и океана в низких широтах, связанные с изменениями инсоляции, через 3 года проявляются в изменениях характеристик климата и морских льдов в Арктике.

Незначительный рост инсоляции приводит к значимым изменениям климатических параметров с участием нелинейной зависимости уходящей ДВ радиации и концентрации водяного пара от температуры. Учёт нелинейных зависимостей

показал вклад роста инсоляции в тренд ТПО равным 57 %. Оценка через чувствительность ТПО к росту общего содержания водяного пара и нисходящей ДВ-радиации составляет 55 % вклада роста общего содержания водяного пара в тренд ТПО и 28 % вклада роста концентрации CO_2 .

В радиационном блоке глобальных моделей CMIP6 солнечное воздействие представлено полной солнечной радиацией (*TSI*), солнечной спектральной освещенностью (*SSI*) и индексом F10.7, а также воздействием частиц, включая геомагнитные индексы *Ap* и *Kp*, скоростью ионизации для учета эффектов, солнечных протонов, электронов и галактических космических лучей. Об учёте долговременных изменений в распределении солнечного воздействия на верхней границе атмосферы, связанных с орбитальной динамикой Земли не упоминается ввиду априори принятого положения об их малости даже в сравнении с влиянием космических лучей.

Сравнение инсоляции на верхней границе атмосферы низких широт в 7 глобальных моделях и в расчётах из (<http://www.solar-climate.com>) показало, что сезонные изменения инсоляции с максимумом в мае и минимумом в декабре в разных моделях и в расчётах близки между собой, а тренды за 1979—2018 гг. среднемесячных значений инсоляции на верхней границе атмосферы показывают большой разброс между моделями и отличия от расчётов. При этом в моделях отсутствует тренд инсоляции верхней границе атмосферы низких широт весной, в отличие от трендов в расчётах с максимумом в апреле. Ни в одной из рассмотренных моделей не получено близкого к данным HadISST распределения трендов ТПО в выбранном районе тропической Северной Атлантики с максимумом в октябре, а все модельные тренды близки к равномерному распределению трендов содержания CO_2 в атмосфере низких широт.

Выполненные исследования указывают на потенциал улучшения воспроизведения глобальными моделями климата потепления в Арктике и в низких широтах при учёте медленных изменений радиационного воздействия на верхней границе атмосферы вследствие орбитальной динамики Земли.

Список литературы

1. Володин Е. М., Галин В. Я., Грицун А. С. и др. Математическое моделирование Земной системы. Под ред. Яковлева Н. Г. М.: МАКС Пресс, 2016. 328 с.
2. Voosen P. New climate models predict a warming surge // *Science*. 2019. Vol. 364. Issue 6437. P. 222—223. DOI: 10.1126/science.364.6437.222.
3. Voosen P. U. N. climate panel confronts implausibly hot forecasts of future warming // *Science*. 2021. Vol. 373. Issue 6554. P. 474—475. <https://doi.org/10.1126/science.373.6554.474>
4. World Climate Research Programme. WCRP High-level Science Questions and Flagship Workshop, 24 — 26 February 2020. Hamburg, Germany. April 2020. WCRP Publication No.: 2/2020.
5. Voosen P. Studies tying weather extremes to global warming gain rigor // *Science*. 2022. Vol 376. Issue 6599. P. 1256—1257 <https://doi.org/10.1126/science.add4866>.
6. Blackport R., Fyfe J. C. Climate models fail to capture strengthening wintertime North Atlantic jet and impacts on Europe // *Science Advances*. 2022. Vol. 8. Issue 45. DOI: 10.1126/sciadv.abn3112.
7. Kravtsov S. Pronounced differences between observed and CMIP5-simulated multidecadal climate variability in the twentieth century // *Geophysical Research Letters*. 2017. Vol. 44. P. 5749—5757. doi:10.1002/2017GL074016.

8. Palmer M. D., Good S. A., Haines K. et al. A new perspective on warming of the global oceans // *Geophysical Research Letters*. 2009. Vol. 36. P. 1—5. doi:10.1029/2009GL039491.
9. IPCC Working Group I I; Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K. et al. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In *Proceedings of the IPCC; Stocker, T., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P. M., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2013; Volume AR5, p. 1535.*
10. Laepple T., Huybers P. Global and regional variability in marine surface temperatures // *Geophysical Research Letters*. 2014. Vol. 41. doi:10.1002/2014GL059345.
11. Bilbao R. A. F., Gregory J.M., Bouttes N. et al. Attribution of ocean temperature change to anthropogenic and natural forcings using the temporal, vertical and geographical structure // *Climate Dynamics*. 2019. Vol. 53. P. 5389—5413. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04910-1>.
12. Barsugli J. J., Shin S.-I., Sardeshmukh P. D. Sensitivity of global warming to the pattern of tropical ocean warming // *Climate Dynamics*. 2006. Vol. 27. P. 483—492.
13. Shin S.-I., Sardeshmukh P.D. Critical influence of the pattern of tropical ocean warming on remote climate trends // *Climate Dynamics*. 2011. Vol. 36. P. 1577—1591. doi:10.1007/s00382-011-0091-1.
14. Ding Q., Wallace J. M., Battisti D.S. et al. Tropical forcing of the recent rapid Arctic warming in north-eastern Canada and Greenland // *Nature*. 2014. Vol. 509. P. 209—212. doi:10.1038/nature13260.
15. Long M., Zhang L., Hu S., Qian S. Multi-Aspect Assessment of CMIP6 Models for Arctic Sea Ice Simulation // *Journal of Climate*. 2021. Vol. 34. Issue 4. P. 1515—1529.
16. Cai Z., You Q., Wu F., et al. Arctic warming revealed by multiple CMIP6 models: evaluation of historical simulations and quantification of future projection uncertainties // *Journal of Climate*. 2021. Vol. 34. Issue 12. P. 4871—4892. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0791.1>.
17. Shu Q., Wang Q., Su J., et al. Assessment of the Atlantic water layer in the Arctic Ocean in CMIP5 climate models // *Climate Dynamics*. 2019. Vol. 53. P. 5279—5291.
18. Bonan D. B., Schneider T., Eisenman I., Wills R. C. J. Constraining the date of a seasonally ice-free Arctic using a simple model // *Geophysical Research Letters*. 2021. Vol. 48. e2021GL094309. doi: [10.1029/2021GL094309](https://doi.org/10.1029/2021GL094309).
19. Bonan D., Lehner F., Holland M. M. Partitioning uncertainty in projections of Arctic sea ice // *Environmental Research Letters*. 2021. Vol. 16. Issue 4. id.044002. 11 pp.
20. Cohen J., Screen J. A., Furtado J. C., et al. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather // *Nature Geoscience*. 2014. Vol. 7. P. 627—637.
21. Blackport R., Screen J.A. Insignificant effect of Arctic amplification on the amplitude of midlatitude atmospheric waves // *Science Advances*. 2020. Vol. 6. eaay2880.
22. Perlwitz J., Hoerling M., Dole R. Arctic tropospheric warming: Causes and linkages to lower latitudes // *Journal of Climate*. 2015. Vol. 28. P. 2154—2167. doi:10.1175/JCLI-D-14-00095.1.
23. Meleshko V. P., Johannessen O. M., Baidin A. V., et al. Arctic amplification: does it impact the polar jet stream // *Tellus A*. 2016. Vol. 68. 32330.
24. Байдин А. В., Мелешко В. П. Реакция атмосферы высоких и умеренных широт на сокращение площади морского льда и повышение температуры поверхности океанов // *Метеорология и гидрология*. 2014. № 6. С. 5—18.
25. Семенов В. А., Мохов И. И., Латиф М. Роль границ морского льда и температуры поверхности океана в изменениях регионального климата в Евразии за последние десятилетия // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2012. Т. 48. № 4. С. 403—421.
26. Årthun M., Eldevik T. On Anomalous Ocean Heat Transport toward the Arctic and Associated Climate Predictability // *Journal of Climate*. 2016. Vol. 29. No. 2. P. 689—704.
27. Blackport R., Screen J. A., van der Wiel K., Bintanja R. Minimal influence of reduced Arctic sea ice on coincident cold winters in mid-latitudes // *Nature Climate Change*. 2019. Vol. 9. P. 697-704.
28. Cohen J., Zhang X., Francis J., et al. Divergent consensus on Arctic amplification influence on midlatitude severe winter weather // *Nature Climate Change*. 2020. Vol. 10. P. 20—29. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0662-y>.
29. Screen J. A., Francis J. A. Contribution of sea-ice loss to Arctic amplification is regulated by Pacific Ocean decadal variability // *Nature Climate Change*. 2016. Vol. 6(9). P. 856.

30. Tokinaga H., Xie S. P., Mukougawa H. Early 20th-century Arctic warming intensified by Pacific and Atlantic multidecadal variability // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2017. Vol. 114(24). P. 6227—6232.
31. Oort A. H. Year-to-year variations in the energy balance of the arctic atmosphere // *Journal of Geophysical Research*. 1974. Vol. 79. P. 1253—1260. doi:10.1029/JC079i009p01253.
32. Марчук Г. И., Кондратьев К. Я., Козодеров В. В. Радиационный баланс Земли, ключевые аспекты. М.: Наука, 1988. 216 с.
33. Nakamura N., Oort A. H. Atmospheric heat budgets of the polar regions // *Journal of Geophysical Research*. 1988. Vol. 93. P. 9510—9524. doi:10.1029/JD093iD08p09510.
34. Serreze M. C., Barrett A. P., Slater A. G., et al. The large-scale energy budget of the Arctic // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2007. Vol. 112. D11122. doi:10.1029/2006JD008230.
35. Alekseev G., Kuzmina S., Bobylev L., et al. Impact of atmospheric heat and moisture transport on the Arctic warming // *International Journal of Climatology*. 2019. Vol. 39. P. 1—11. doi:10.1002/joc.6040.
36. Cao Y., Liang S., Chen X., et al. Enhanced wintertime greenhouse effect reinforcing Arctic amplification and initial sea-ice melting // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. 8462. doi:10.1038/s41598-017-08545-2.
37. Lee S., Gong T., Feldstein S.B., et al. Revisiting the cause of the 1989—2009 Arctic surface warming using the surface energy budget: Downward infrared radiation dominates the surface fluxes // *Geophysical Research Letters*. 2017. Vol. 44. P. 10.654—10.661, doi:10.1002/2017GL075375.
38. Визе В. Ю. Причины потепления Арктики // *Советская Арктика*. 1937. Т. 1. С. 1—7.
39. Huang J., Mcelroy M. B. Contributions of the Hadley and Ferrel circulations to the energetics of the atmosphere over the past 32 years // *Journal of Climate*. 2014. Vol. 27. P. 2656—2666. doi:10.1175/JCLI-D-13-00538.1.
40. Gong T., Feldstein S., Lee S. The role of downward infrared radiation in the recent arctic winter warming trend // *Journal of Climate*. 2017. Vol. 30. P. 4937—4949. doi:10.1175/JCLI-D-16-0180.1.
41. Yoo C., Lee S., Feldstein S. B. Arctic response to an MJO-like tropical heating in an idealized GCM // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2012. Vol. 69. P. 2379—2393. doi:10.1175/JAS-D-11-0261.1.
42. Compo G. P., Sardeshmukh P. D. Oceanic influences on recent continental warming // *Climate Dynamics*. 2009. Vol. 32. P. 333—342. doi:10.1007/s00382-008-0448-9.
43. Hao X., He S., Han T., Wang H. Impact of global oceanic warming on winter Eurasian climate // *Advances in Atmospheric Sciences*. 2018. Vol. 35. P. 1254—1264. doi:10.1007/s00376-018-7216-5.
44. Palmer M. D., Haines K., Tett S. F. B., Ansell T. J. Isolating the signal of ocean global warming // *Geophysical Research Letters*. 2007. Vol. 34. P. 1—6. doi:10.1029/2007GL031712.
45. Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Pachauri, R. K., Meyer, L. A., Eds.; IPCC: Geneva, Switzerland, 2014.
46. Huang J., Mcelroy M. B. Contributions of the Hadley and Ferrel circulations to the energetics of the atmosphere over the past 32 years // *Journal of Climate*. 2014. Vol. 27. P. 2656—2666. doi:10.1175/JCLI-D-13-00538.1.
47. Hoerling M. P., Hurrell J. W., Xu T. Tropical origins for recent North Atlantic climate change // *Science*. 2001. Vol. 292. P. 90—92.
48. Adam O., Schneider T., Harnik N. Role of changes in mean temperatures versus temperature gradients in the recent widening of the Hadley circulation // *Journal of Climate*. 2014. Vol. 27. P. 7450—7461. doi:10.1175/JCLI-D-14-00140.1.
49. Garfinkel C. I., Waugh D. W., Polvani L. M. Recent Hadley cell expansion: The role of internal atmospheric variability in reconciling modeled and observed trends // *Geophysical Research Letters*. 2015. Vol. 42. P. 10824—10831. doi:10.1002/2015GL066942.
50. Lee S., Gong T., Johnson N., et al. On the possible link between tropical convection and the northern hemisphere arctic surface air temperature change between 1958 and 2001 // *Journal of Climate*. 2011. Vol. 24. P. 4350—4367. doi:10.1175/2011JCLI4003.1.
51. Park H. S., Lee S., Son S. W., et al. The impact of poleward moisture and sensible heat flux on arctic winter sea ice variability // *Journal of Climate*. 2015. Vol. 28. P. 5030—5040. doi:10.1175/JCLI-D-15-0074.1.

52. Ye K., Wu R., Liu Y. Interdecadal change of Eurasian snow, surface temperature, and atmospheric circulation in the late 1980s // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2015. Vol. 120. P. 2738—2753. doi:10.1002/2015JD023148.
53. Wettstein J. J., Deser C. Internal variability in projections of twenty-first-century Arctic sea ice loss: Role of the large-scale atmospheric circulation // *Journal of Climate*. 2014. Vol. 27. P. 527—550. doi:10.1175/JCLI-D-12-00839.1.
54. Goss M., Feldstein S. B., Lee S. Stationary wave interference and its relation to tropical convection and Arctic warming // *Journal of Climate*. 2016. Vol. 29. P. 1369—1389. doi:10.1175/JCLI-D-15-0267.1.
55. Hall R. J., Hanna E., Chen L. Winter Arctic Amplification at the synoptic timescale, 1979—2018, its regional variation and response to tropical and extratropical variability // *Climate Dynamics*. 2021. Vol. 56. P. 457—473. doi:10.1007/s00382-020-05485-y.
56. Yoo C., Feldstein S., Lee S. The impact of the Madden-Julian Oscillation trend on the Arctic amplification of surface air temperature during the 1979—2008 boreal winter // *Geophysical Research Letters*. 2011. Vol. 38. P. 1—6. doi:10.1029/2011GL049881.
57. Hurrell J. W., Kushnir Y., Ottersen G., Visbeck M. *The North Atlantic Oscillation: Climate Significance and Environmental Impact*. American Geophysical Union: Washington, DC, USA, 2003. Vol. 134.
58. Алексеев Г. В., Вязилова А. Е., Глок Н. И., и др. Влияние аномалий температуры воды в низких широтах океана на колебания климата Арктики и их предсказуемость // *Арктика: экология и экономика*. 2019. № 3 (35). С. 73—83.
59. Sandø A. B., Gao Y., Langehaug H. R. Poleward ocean heat transports, sea ice processes, and Arctic sea ice variability in NorESM1-M simulations // *Journal of Geophysical Research: Ocean*. 2014. Vol. 119. P. 2095—2108. doi:10.1002/2013JC009435.
60. Alekseev G. V., Glok N. I., Smirnov A. V., Vyazilova A. E. The influence of the North Atlantic on climate variations in the Barents Sea and their predictability // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2016. Vol. 41. P. 544—558. doi:10.3103/S1068373916080045.
61. Årthun M., Eldevik T., Smedsrud L. H. The role of Atlantic heat transport in future Arctic winter sea ice loss // *Journal of Climate*. 2019. Vol. 32. P. 3327—3341. doi:10.1175/JCLI-D-18-0750.1.
62. Pnyushkov A., Polyakov I., Rember R., et al. Heat, salt, and volume transports in the eastern Eurasian Basin of the Arctic Ocean, from two years of mooring observations // *Ocean Science*. 2018. Vol. 14. P. 1—23. <https://doi.org/10.5194/os-14-1-2018>.
63. Алексеев Г. В., Пнюшков А. В., Смирнов А. В., и др. Влияние притока из Атлантики на содержание пресной воды в верхнем слое Арктического бассейна // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2019. Том 65. № 4. С. 363—388.
64. Алексеев Г. В., Кузмина С. И., Глок Н. И. Влияние аномалий температуры океана в низких широтах на атмосферный перенос тепла в Арктику // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2017. Том 1. С. 106—123;
65. Alekseev G. V., Glok N. I., Vyazilova A. E., et al. Influence of SST in Low Latitudes on the Arctic Warming and Sea Ice // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9. Issue 1145. <https://doi.org/10.3390/jmse9101145>.
66. Cheng L., Abraham J., Hausfather Z., Trenberth K. E. How fast are the oceans warming? Observational records of ocean heat content show that ocean warming is accelerating // *Science*. 2019. Vol. 363. P. 128—129. Doi: 10.1126/science.aav7619.
67. Borisenkov E. P., Tsvetkov A. V., Eddy J. A. Combined effect of Earth orbit perturbation and solar activity on terrestrial insolation. Part 1: Sample days and annual mean values // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1985. Vol. 42 (9). P. 933.
68. Borisenkov E. P., Tsvetkov A. V., Agaponov S.V. On Some Characteristics of Insolation Changes in the Past and in the Future // *Climate Change*. 1983. Vol. 5. P. 237—244.
69. Федоров В. М. Инсоляция Земли и современные изменения климата. М.: Физматлит, 2017. 231 с.
70. Федоров В. М. Широтная изменчивость приходящей солнечной радиации в различных временных циклах // *Доклады РАН*. 2015. Т. 460. № 3. С. 339—342.
71. Солнечная радиация и климат Земли: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.solar-climate.com> (дата обращения: 1.08.2022).
72. Алексеев Г. В., Священников П. Н. «Естественная изменчивость характеристик климата Северной полярной области и Северного полушария». Л.: Гидрометеиздат, 1991. 159 с.

73. Alekseev G. V., Glok N. I., Vyazilova A. E., Kharlanenkova N. E. Climate change in the Arctic: causes and mechanisms // IOP Conference Series. 2020. EES 606. EESE6061(002).
74. Alekseev G. Rise of Insolation of Low Latitudes Affects Arctic Warming // Global Scientific Research in Environmental Science. 2021. Vol. 1(3). P. 1—3. 000514Qu.
75. Алексеев Г. В., Кузмина С. И., Глок Н. И., и др. Влияние Атлантики на потепление и сокращение морского ледяного покрова в Арктике // Лёд и Снег. 2017. Том 57(3). С. 381—390.
76. Голицын Г. С., Мохов И. И. Оценки чувствительности и роли облаков в простых моделях климата // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1978. Т. 14. № 8. С. 803—814.
77. Мохов И. И. Температурная чувствительность площади криосферы Северного полушария // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1984. Т. 20. № 2. С. 136—143.
78. Chevallier F., Ciais P., Conway T. J., et al. CO₂ surface fluxes at grid point scale estimated from a global 21 year reanalysis of atmospheric measurements // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. Vol. 115, Issue D21. /10.1029/2010JD013887 doi.org.
79. Matthes K., Funke B., Andersson M. E., et al. Solar forcing for CMIP6 (v3.2) // Geoscientific Model Development. 2017. Vol. 10. P. 2247—2302. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2247-2017>.

References

1. Volodin E. M., Galin V. YA., Gricun A. S., et al. *Matematicheskoe modelirovanie Zemnoj sistemy = Mathematical modeling of the Earth system*. Ed. Yakovlev N.G. Moscow: MAKS Press, 2016: 328 p. (In Russ.).
2. Voosen P. New climate models predict a warming surge. *Science*. 2019; (364;6437):222—223. DOI: 10.1126/science.364.6437.222.
3. Voosen P. U. N. climate panel confronts implausibly hot forecasts of future warming. *Science*. 2021; (373;6554):474—475. <https://doi.org/10.1126/science.373.6554.474>
4. *World Climate Research Programme*. WCRP High-level Science Questions and Flagship Workshop, 24 — 26 February 2020. Hamburg, Germany. April 2020. WCRP Publication No.: 2/2020.
5. Voosen P. Studies tying weather extremes to global warming gain rigor. *Science*. 2022; (376;6599):1256—1257 <https://doi.org/10.1126/science.add4866>.
6. Blackport R., Fyfe J. C. Climate models fail to capture strengthening wintertime North Atlantic jet and impacts on Europe. *Science Advances*. 2022;(8;45) DOI: 10.1126/sciadv.abn3112.
7. Kravtsov S. Pronounced differences between observed and CMIP5-simulated multidecadal climate variability in the twentieth century. *Geophysical Research Letters*. 2017;(44):5749—5757. doi:10.1002/2017GL074016.
8. Palmer M. D., Good S. A., Haines K. et al. A new perspective on warming of the global oceans. *Geophysical Research Letters*. 2009;(36):1—5. doi:10.1029/2009GL039491.
9. IPCC Working Group 1 I; Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K. et al. *IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In Proceedings of the IPCC; Stocker, T., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P. M., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2013; Volume AR5, p. 1535.
10. Laepple T., Huybers P. Global and regional variability in marine surface temperatures. *Geophysical Research Letters*. 2014;(41) doi:10.1002/2014GL059345.
11. Bilbao R. A. F., Gregory J.M., Bouttes N. et al. Attribution of ocean temperature change to anthropogenic and natural forcings using the temporal, vertical and geographical structure. *Climate Dynamics*. 2019;(53):5389—5413. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04910-1>.
12. Barsugli J. J., Shin S.-I., Sardeshmukh P. D. Sensitivity of global warming to the pattern of tropical ocean warming. *Climate Dynamics*. 2006;(27):483—492.
13. Shin S.-I., Sardeshmukh P. D. Critical influence of the pattern of tropical ocean warming on remote climate trends. *Climate Dynamics*. 2011;(36):1577—1591. doi:10.1007/s003.
14. Ding Q., Wallace J.M., Battisti D.S. et al. Tropical forcing of the recent rapid Arctic warming in north-eastern Canada and Greenland. *Nature*. 2014;(509):209—212. doi:10.1038/nature13260.
15. Long M., Zhang L., Hu S., Qian S. Multi-Aspect Assessment of CMIP6 Models for Arctic Sea Ice Simulation. *Journal of Climate*. 2021;(34;4):1515—1529.

16. Cai Z., You Q., Wu F., et al. Arctic warming revealed by multiple CMIP6 models: evaluation of historical simulations and quantification of future projection uncertainties. *Journal of Climate*. 2021;(34;12):4871—4892. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0791.1>.
17. Shu Q., Wang Q., Su J., et al. Assessment of the Atlantic water layer in the Arctic Ocean in CMIP5 climate models. *Climate Dynamics*. 2019;(53):5279—5291.
18. Bonan D. B., Schneider T., Eisenman I., Wills R. C. J. Constraining the date of a seasonally ice-free Arctic using a simple model. *Geophysical Research Letters*. 2021;(48): e2021GL094309. doi.org/10.1029/2021GL094309.
19. Bonan D., Lehner F., Holland M. M. Partitioning uncertainty in projections of Arctic sea ice. *Environmental Research Letters*. 2021;(16;4):11 pp.
20. Cohen J., Screen J. A., Furtado J. C., et al. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nature Geoscience*. 2014;(7):627—637.
21. Blackport R., Screen J. A. Insignificant effect of Arctic amplification on the amplitude of midlatitude atmospheric waves. *Science Advances*. 2020;(6): eaay2880.
22. Perlwitz J., Hoerling M., Dole R. Arctic tropospheric warming: Causes and linkages to lower latitudes. *Journal of Climate*. 2015;(28):2154—2167. doi:10.1175/JCLI-D-14-00095.1.
23. Meleshko V. P., Johannessen O. M., Baidin A. V., et al. Arctic amplification: does it impact the polar jet stream. *Tellus A*. 2016;(68):32330.
24. Baidin A. V., Meleshko V. P. Response of the atmosphere at high and middle latitudes to the reduction of sea ice area and the rise of sea surface temperature. *Meteorologiya i gidrologiya = Russian Meteorology and Hydrology*. 2014;(6): (5—18). (In Russ.).
25. Semenov V. A., Mokhov I. I., Latif M. Influence of the ocean surface temperature and sea ice concentration on regional climate changes in Eurasia in recent decades. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana = Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2012;(48, 4): (403—421). (In Russ.).
26. Årthun M., Eldevik T. On Anomalous Ocean Heat Transport toward the Arctic and Associated Climate Predictability. *Journal of Climate*. 2016;(29;2):689—704.
27. Blackport R., Screen J. A., van der Wiel K., Bintanja R. Minimal influence of reduced Arctic sea ice on coincident cold winters in mid-latitudes. *Nature Climate Change*. 2019;(9): 697—704.
28. Cohen J., Zhang X., Francis J., et al. Divergent consensus on Arctic amplification influence on mid-latitude severe winter weather. *Nature Climate Change*. 2020;(10): 20—29. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0662-y>.
29. Screen J. A., Francis J. A. Contribution of sea-ice loss to Arctic amplification is regulated by Pacific Ocean decadal variability. *Nature Climate Change*. 2016;(6(9)): 856.
30. Tokinaga H., Xie S. P., Mukougawa H. Early 20th-century Arctic warming intensified by Pacific and Atlantic multidecadal variability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2017;(114(24)): 6227—6232.
31. Oort A. H. Year-to-year variations in the energy balance of the arctic atmosphere. *Journal of Geophysical Research*. 1974;(79):1253—1260. doi:10.1029/JC079i009p01253.
32. Marchuk G. I., Kondrat'ev K. YA., Kozoderov V. V. *Radiacionnyj balans Zemli, klyucheveye aspekty = Earth radiation budget: key aspects*. Moscow: Nauka, 1988: 216 p. (In Russ.).
33. Nakamura N., Oort A. H. Atmospheric heat budgets of the polar regions. *Journal of Geophysical Research*. 1988;(93): 9510—9524. doi:10.1029/JD093iD08p09510.
34. Serreze M. C., Barrett A. P., Slater A. G., et al. The large-scale energy budget of the Arctic. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2007;(112): D11122. doi:10.1029/2006JD008230.
35. Alekseev G., Kuzmina S., Bobylev L., et al. Impact of atmospheric heat and moisture transport on the Arctic warming. *International Journal of Climatology*. 2019;(39): 1—11. doi:10.1002/joc.6040.
36. Cao Y., Liang S., Chen X., et al. Enhanced wintertime greenhouse effect reinforcing Arctic amplification and initial sea-ice melting. *Scientific Reports*. 2017;(7):8462. doi:10.1038/s41598-017-08545-2.
37. Lee S., Gong T., Feldstein S. B., et al. Revisiting the cause of the 1989—2009 Arctic surface warming using the surface energy budget: Downward infrared radiation dominates the surface fluxes. *Geophysical Research Letters*. 2017;(44):10.654—10.661, doi:10.1002/2017GL075375.
38. Vize V. Yu. The causes of Arctic warming. *Sovetskaya Arktika = Soviet Arctic*. 1937;(1): (1—7). (In Russ.).

39. Huang J., Mcelroy M. B. Contributions of the Hadley and Ferrel circulations to the energetics of the atmosphere over the past 32 years. *Journal of Climate*. 2014;(27):2656—2666. doi:10.1175/JCLI-D-13-00538.1.
40. Gong T., Feldstein S., Lee S. The role of downward infrared radiation in the recent arctic winter warming trend. *Journal of Climate*. 2017;(30):4937—4949. doi:10.1175/JCLI-D-16-0180.1.
41. Yoo C., Lee S., Feldstein S. B. Arctic response to an MJO-like tropical heating in an idealized GCM. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2012;(69):2379—2393. doi: 10.1175/JAS-D-11-0261.1.
42. Compo G. P., Sardeshmukh P. D. Oceanic influences on recent continental warming. *Climate Dynamics*. 2009;(32): 333—342. doi:10.1007/s00382-008-0448-9.
43. Hao X., He S., Han T., Wang H. Impact of global oceanic warming on winter Eurasian climate. *Advances in Atmospheric Sciences*. 2018;(35): 1254—1264. doi:10.1007/s00376-018-7216-5.
44. Palmer M. D., Haines K., Tett S. F. B., Ansell T. J. Isolating the signal of ocean global warming. *Geophysical Research Letters*. 2007;(34):1—6. doi:10.1029/2007GL031712.
45. *Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Pachauri, R. K., Meyer, L. A., Eds.; IPCC: Geneva, Switzerland, 2014.
46. Huang J., Mcelroy M. B. Contributions of the Hadley and Ferrel circulations to the energetics of the atmosphere over the past 32 years. *Journal of Climate*. 2014;(27): 2656—2666. doi:10.1175/JCLI-D-13-00538.1.
47. Hoerling M. P., Hurrell J. W., Xu T. Tropical origins for recent North Atlantic climate change. *Science*. 2001;(292): 90—92.
48. Adam O., Schneider T., Harnik N. Role of changes in mean temperatures versus temperature gradients in the recent widening of the Hadley circulation. *Journal of Climate*. 2014;(27): 7450—7461. doi:10.1175/JCLI-D-14-00140.1.
49. Garfinkel C. I., Waugh D. W., Polvani L. M. Recent Hadley cell expansion: The role of internal atmospheric variability in reconciling modeled and observed trends. *Geophysical Research Letters*. 2015;(42):10824—10831. doi:10.1002/2015GL066942.
50. Lee S., Gong T., Johnson N., et al. On the possible link between tropical convection and the northern hemisphere arctic surface air temperature change between 1958 and 2001. *Journal of Climate*. 2011;(24): 4350—4367. doi:10.1175/2011JCLI4003.1.
51. Park H. S., Lee S., Son S. W., et al. The impact of poleward moisture and sensible heat flux on arctic winter sea ice variability. *Journal of Climate*. 2015;(28): 5030—5040. doi:10.1175/JCLI-D-15-0074.1.
52. Ye K., Wu R., Liu Y. Interdecadal change of Eurasian snow, surface temperature, and atmospheric circulation in the late 1980s. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2015; (120): 2738—2753. doi:10.1002/2015JD023148.
53. Wettstein J. J., Deser C. Internal variability in projections of twenty-first-century Arctic sea ice loss: Role of the large-scale atmospheric circulation. *Journal of Climate*. 2014;(27): 527—550. doi:10.1175/JCLI-D-12-00839.1.
54. Goss M., Feldstein S. B., Lee S. Stationary wave interference and its relation to tropical convection and Arctic warming. *Journal of Climate*. 2016;(29): 1369—1389. doi:10.1175/JCLI-D-15-0267.1.
55. Hall R. J., Hanna E., Chen L. Winter Arctic Amplification at the synoptic timescale, 1979—2018, its regional variation and response to tropical and extratropical variability. *Climate Dynamics*. 2021; (56): 457—473. doi:10.1007/s00382-020-05485-y.
56. Yoo C., Feldstein S., Lee S. The impact of the Madden-Julian Oscillation trend on the Arctic amplification of surface air temperature during the 1979—2008 boreal winter. *Geophysical Research Letters*. 2011;(38): 1—6. doi:10.1029/2011GL049881.
57. Hurrell J. W., Kushnir Y., Ottensen G., Visbeck M. *The North Atlantic Oscillation: Climate Significance and Environmental Impact*. American Geophysical Union: Washington, DC, USA, 2003. Vol. 134.
58. Alekseev G. V., Vyazilova A. E., Glok N.I., et al. The effect of water temperature anomalies at low latitudes of the ocean on Arctic climate variations and their predictability. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: ecology and economy*. 2019;(3(35)): (73—83). (In Russ.).
59. Sandø A. B., Gao Y., Langehaug H. R. Poleward ocean heat transports, sea ice processes, and Arctic sea ice variability in NorESM1-M simulations. *Journal of Geophysical Research: Ocean*. 2014; (119): 2095—2108. doi:10.1002/2013JC009435.

60. Alekseev G. V., Glok N. I., Smirnov A. V., Vyazilova A. E. The influence of the North Atlantic on climate variations in the Barents Sea and their predictability. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2016;(41): 544—558, doi:10.3103/S1068373916080045.
61. Årthun M., Eldevik T., Smedsrud L. H. The role of Atlantic heat transport in future Arctic winter sea ice loss. *Journal of Climate*. 2019;(32): 3327—3341, doi: 10.1175/JCLI-D-18-0750.1.
62. Pnyushkov A., Polyakov I., Rember R., et al. Heat, salt, and volume transports in the eastern Eurasian Basin of the Arctic Ocean, from two years of mooring observations. *Ocean Science*. 2018; (14): 1—23, <https://doi.org/10.5194/os-14-1-2018>.
63. Alekseev G. V., Pnyushkov A. V., Smirnov A. V., et al. Influence of Atlantic inflow on the freshwater content in the upper layer of the Arctic basin. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2019; (65,4): (363—388). (In Russ.).
64. Alekseev G. V., Kuzmina S. I., Glok N. I. Influence of water temperature anomalies in the low latitudes of the ocean on the atmospheric transport of heat to the Arctic. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and applied climatology*. 2017: (1): (106—123). (In Russ.).
65. Alekseev G. V., Glok N. I., Vyazilova A. E., et al. Influence of SST in Low Latitudes on the Arctic Warming and Sea Ice. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021;(9;1145) <https://doi.org/10.3390/jmse9101145>.
66. Cheng L., Abraham J., Hausfather Z., Trenberth K. E. How fast are the oceans warming? Observational records of ocean heat content show that ocean warming is accelerating. *Science*. 2019;(363): 128—129. Doi: 10.1126/science.aav7619.
67. Borisenkov E. P., Tsvetkov A. V., Eddy J. A. Combined effect of Earth orbit perturbation and solar activity on terrestrial insolation. Part 1: Sample days and annual mean values. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1985; (42 (9)): 933.
68. Borisenkov E. P., Tsvetkov A. V., Agaponov S. V. On Some Characteristics of Insolation Changes in the Past and in the Future. *Climate Change*. 1983;(5):237—244.
69. Fedorov V. M. *Insolyaciya Zemli i sovremennye izmeneniya klimata = Earth insolation and modern climatic changes*. Moscow: Fizmatlit, 2017: 231 p. (In Russ.).
70. Fedorov V. M. Latitudinal variability of incoming solar radiation in various time cycles. *Doklady RAN = Proceedings of the Russian Academy of Sciences*. 2015;(460,3): (339—342). (In Russ.).
71. Solar radiation and the Earth's climate. Available at: <http://www.solar-climate.com>
72. Alekseev G. V., Svyaschennikov P. N. *Natural Variability of Climate Characteristics of the Northern Polar Region and the Northern Hemisphere*. L.: Gidrometeoizdat, 1991. 159 p.
73. Alekseev G. V., Glok N. I., Vyazilova A. E., Kharlanenkova N. E. Climate change in the Arctic: causes and mechanisms // *IOP Conference Series*. 2020. EES 606. EESE6061(002).
74. Alekseev G. Rise of Insolation of Low Latitudes Affects Arctic Warming // *Global Scientific Research in Environmental Science*. 2021. Vol. 1(3). P. 1—3. 000514Qu.
75. Alekseev G. V., Kuzmina S. I., Glock N. I., et al., Influence of the Atlantic on warming and reduction of sea ice cover in the Arctic, *Led i Sneg*. 2017. Volume 57(3). pp. 381—390.
76. Golitsyn G. S., Mokhov I. I. Estimates of the sensitivity and role of clouds in simple climate models // *Izv. Academy of Sciences of the USSR. Physics of the atmosphere and ocean*. 1978. V. 14. No. 8. S. 803—814.
77. Mokhov I. I. Temperature sensitivity of the area of the cryosphere of the Northern Hemisphere // *Izvestiya AN SSSR. Physics of the atmosphere and ocean*. 1984. V. 20. No. 2. S. 136—143.
78. Chevallier F., Ciais P., Conway T. J., et al. CO₂ surface fluxes at grid point scale estimated from a global 21 year reanalysis of atmospheric measurements // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. Vol. 115, Issue D21. /10.1029/2010JD013887 doi.org.
79. Matthes K., Funke B., Andersson M. E., et al. Solar forcing for CMIP6 (v3.2) // *Geoscientific Model Development*. 2017. Vol. 10. P. 2247—2302. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2247-2017>.

Информация об авторе

Алексеев Генрих Васильевич, доктор геогр. наук, профессор, Отдел взаимодействия океана и атмосферы, зав. отделом, пл. научн. сотрудник, ФГБУ «ААНИИ», alexhgv@aari.ru.

Information about author

Alekseev Genrikh Vasilievich, Doctor Sci., professor, Department of Ocean-Atmosphere Interaction, Head of department, FGBU "AARI".

Статья поступила 18.03.2023

Принята в печать 03.05.2023

The article was received on 18.03.2023

The article was accepted 03.05.2023