

Арктическое усиление: роль междуширотного обмена в атмосфере

Г.В. Алексеев^{}, Н.Е. Харланенкова, А.Е. Вязилова*

ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»,
Россия, 199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38

^{*}Адрес для переписки: alexgv@aari.ru

Реферат. Усиление потепления в Арктике по сравнению с остальной частью Северного полушария или Земного шара по-прежнему привлекает внимание, несмотря на большое количество выполненных исследований. Возможные причины арктического усиления рассматривались и продолжают обсуждаться во многих статьях и обзорах. В статье впервые выполнена количественная оценка роли атмосферных переносов в формировании изменчивости и трендов средней приповерхностной температуры воздуха в Арктике и на прилегающих широтах Северного полушария и предложено аналитическое описание усиления в высоких широтах. Для исследования использованы данные реанализов NCEP и ERA5 за 1989-2020 гг. и представление о множестве событий воздухообмена между широтами в простой модели атмосферы на полушарии при неизменных условиях на границах, на основе которого получены аналитические выражения для отношений среднеквадратичных отклонений (СКО) и трендов температуры в соседних областях. Степень близости эмпирического и модельного отношения СКО и трендов принята как мера вклада воздухообмена в усиление СКО и трендов при потеплении. Получено, что обмен между полярной и прилегающей областями достигает более низких широт при расширении приполярной области от 70° с.ш. до 60° с.ш. Широта, до которой в среднем распространяется полярный воздух, уменьшается при учтённом в СКО тренде, что подтверждает влияние потепления на усиление обмена воздушными массами. Модельное значение усиления тренда средней температуры воздуха в полярной области изолированной однородной атмосферы над полушарием относительно тренда в прилегающей области определяется отношением их площадей, умноженным на отношение коэффициентов детерминации трендов. Усиление тренда температуры в полярной области реальной атмосферы, по данным реанализов NCEP и ERA5 за 1989-2020 годы, сравнивалось с модельным значением – тем самым, оценивался вклад обмена воздушными массами в усиление тренда температуры в полярной области. Получено, что обменом объясняется 54% усиления тренда температуры воздуха (арктического усиления) в области 90-60° с.ш. в среднем за год и 66% в холодную часть года относительно остальной части Северного полу-

шария. Если принять во внимание установленную южную границу обмена воздушными массами между полярной и прилегающей областью, то усиление тренда температуры воздуха в области 90-60° с.ш. относительно тренда в прилегающей области, с которой происходит обмен воздушными массами, почти полностью (на 93% в среднем за год) будет результатом обмена, а в области 90-70° с.ш. – в основном (на 74% в среднем за год).

Ключевые слова. Арктика, температура воздуха, потепление, арктическое усиление, СКО, тренд, воздухообмен.

Arctic amplification: the role of interlatitudinal exchange in the atmosphere

G.V. Alekseev^{}, N.E. Kharlanenkova, A.E. Vyazilova*

Arctic and Antarctic Research Institute,
38, Bering str., 199397, St. Petersburg, Russian Federation

^{*}Correspondence address: *alexgv@aari.ru*

Abstract. The increase in warming in the Arctic relative to the rest of the Northern Hemisphere or the globe continues to attract attention, despite the large amount of research done. Possible causes of the Arctic amplification have been considered and continue to be discussed in many articles and reviews. In this article, for the first time, a quantitative assessment of the role of atmospheric transports in the formation of variability and trends in the average surface air temperature in the Arctic and at adjacent latitudes of the Northern Hemisphere performed. An analytical description of their increase in high latitudes was proposed. For the study, data from NCEP and ERA5 reanalyses for 1989-2020 were used. and an idea of the set of events of air exchange between latitudes in a simple model of the atmosphere in a hemisphere under constant conditions at the boundaries, on the basis of which analytical expressions are obtained for the ratios of standard deviations (RMS) and temperature trends in neighboring areas. It has been found that the exchange between the polar and adjacent regions reaches lower latitudes as the polar region expands from 70° N up to 60° N. The latitude to which the polar air propagates on average decreases with the trend taken into account in the RMS, which may mean the effect of warming on an increase in the exchange of air masses. The model value of the increase in the average air temperature trend in the polar region of an isolated homogeneous atmosphere above the hemisphere relative to the trend in the adjacent region is determined by the ratio of their areas multiplied by the ratio of the trend determination coefficients. The increase in the temperature trend in the polar region of the real atmosphere according to the NCEP and ERA5 reanalysis for 1989-2020 was compared with the model value - thereby assessing the contribution of air exchange to the increase in the temperature trend in the polar region. It was found that 54% of the increase in the air temperature trend (Arctic increase) in the area of 90-60° N can be explained by the exchange on average per year and 66% in the cold part of the year relative to the rest of the

Northern Hemisphere. If we take into account the southern border of the exchange of air masses between the polar and adjacent regions, then strengthening of the air temperature trend in the area of 90-60° N relative to the trend in the adjacent area, with which the exchange of air masses occurs, almost completely (by 93% on average per year) will be the result of the exchange and in the area of 90-70° N – mostly (by 74% on average per year).

Keywords. Arctic, air temperature, warming, Arctic amplification, RMS, trend, air exchange.

Введение

Усиление потепления в Арктике по сравнению с остальной частью Северного полушария или Земного шара по-прежнему привлекает внимание, несмотря на большое количество выполненных исследований. Усиление – это, прежде всего, большее повышение средней температуры приземного воздуха в Арктике по сравнению с повышением средней температуры в более широкой области, например, в Северном полушарии (Davy et al., 2018). Считается, что арктическое усиление является важным аспектом антропогенного изменения климата, но его причины и последствия до конца не изучены (Smith et al., 2019).

По мнению исследователей (Bekryev et al., 2010; Davy et al., 2018), количественная оценка арктического усиления важна для установления физической сущности феномена. Но предложить априори адекватную меру усиления без представления о его природе сложно. В этом аспекте изучения полярного усиления пока нет единого мнения. Первым было названо уменьшение альбедо поверхности в высоких широтах при сокращении морского ледяного покрова в результате потепления, которое сопровождается арктическим усилением (Serreze, Francis, 2006). Позднее указывали на роль притоков тепла и влаги из более низких широт (Алексеев и др., 2016; Cao et al., 2017; Alekseev et al., 2019), на нелинейность зависимости уходящей ДВ-радиации от температуры, в результате которой высокие широты теряют меньше тепла (Алексеев, 2014; Pithan, Mauritsen, 2014). Ранее исследования влияния на климат меридиональной составляющей переносов тепла (МПТ) были проведены использованием энергобалансовых моделей климата, не включавших обмен с подстилающей поверхностью (Budyko, 1969; Sellers, 1969; North et al., 1981). Были получены широтные распределения дисперсий среднезональных температур с полярным усилением (Демченко, Зубарев, 1989; North, 1982; Flannery, 1984), показано влияние МПТ на чувствительность климатической системы к внешним воздействиям (Васюта и др., 1989; Демченко, Зубарев, 1989; Алексеев и др., 1990), в результате роста вихревой активности в атмосфере при потеплении (Мохов и др., 1992).

Возможные причины арктического усиления рассматривались в обзорах (Serreze, Barry, 2011; Латонин и др., 2020; Henderson et al., 2021; Previdi et al., 2021). В них перечислялись причины арктического усиления без количественной оценки их вклада. В недавних публикациях по-прежнему представлены разные

точки зрения на природу арктического усиления – основной вклад адвекции тепла атмосферной циркуляцией и нисходящей ДВ радиации (Clark et al., 2021) и ключевая роль lapse-rate вместе с потерей морского льда (Zhang et al., 2021).

Еще больше расхождений отмечается в вопросе о последствиях арктического усиления для климата неарктических широт. Почти вслед за многочисленными утверждениями о влиянии арктического усиления и связанного с ним сокращения площади льда в Баренцевом и Карском морях на зимние похолодания в Евразии, например, (Petoukhov, Semenov, 2010; Семенов и др., 2012; Inoue et al., 2012; Francis, Vavrus, 2012) появляются статьи об отсутствии или незначительности такого влияния, например, (Perlwitz et al., 2015; Meleshko et al., 2016; Blackport et al., 2019; Blackport, Screen, 2020).

В обзоре публикаций о влиянии арктического усиления на зимние похолодания в средних широтах, насчитывающем 203 ссылки (Cohen et al., 2020), констатируется, что расхождения в выводах между модельными исследованиями и наблюдениями и даже между моделями продолжают затруднять понимание, как арктическое усиление влияет на погоду в средних широтах. Чтобы улучшить понимание этого явления, в шестом проекте взаимного сравнения глобальных моделей климата CMIP6 выполнялось сравнение полярного усиления в моделях (PAMIP) с помощью скоординированного набора численных экспериментов (Smith et al., 2019).

В данной статье выполнена количественная оценка роли атмосферных переносов в усилении изменчивости и трендов средней приповерхностной температуры воздуха в высоких широтах Северного полушария.

Методы и материалы

Для исследования использованы данные реанализов NCEP за 1948-2020 гг., ERA5 за 1979-2020 гг. Рассчитывались средние квадратичные отклонения и тренды рядов средней за месяц приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) по разным широтным областям за период потепления в Арктике с 1989 по 2020 годы. Далее выполнялось сравнение СКО и трендов ПТВ в двух приполярных областях ($90-70^\circ$ с.ш.) и ($90-60^\circ$ с.ш.) с СКО и трендами ПТВ в примыкающих с юга областях ($70-\varphi_S$) и ($60-\varphi_S$), где $\varphi_S = 65, 60, 55, \dots, 0^\circ$ с.ш. Результаты сравнения отношения СКО и трендов полярной и примыкающей с юга областей сравнивались со значением отношения, найденного в простой модели атмосферы в результате множества событий воздухообмена между областями на полушарии при неизменных условиях на границах. Степень близости эмпирического и модельного отношений СКО и трендов принята за меру вклада воздухообмена в усиление СКО и трендов в полярной области.

Результаты

Влияние атмосферных переносов на усиление изменчивости температуры воздуха в высоких широтах Северного полушария

Движение воздуха и воды в атмосфере и океане, возникающее вследствие неодинакового по широте притока тепла от Солнца к поверхности

Земли, преобразуются под влиянием вращения планеты и распределения суши и океанов в наблюдаемую сложную систему циркуляции, которая составляет главный внутренний механизм формирования климата. Характерные пространственные и временные масштабы циркуляции в обеих средах отличаются на порядок в соответствии с различием их основных термодинамических параметров, что отражается и в их влиянии на формирование изменений климата. На межгодовые колебания в наибольшей степени влияет атмосферная циркуляция, которая формируется системой крупномасштабных циркуляционных ячеек, струй и вихрей с характерными масштабами, определяемыми фундаментальными параметрами планеты и ее атмосферы (Лоренц, 1970; Голицын, 1973; Дымников, Филатов, 1990; Мохов, 1993).

Атмосферные переносы тепла и влаги, которые, помимо постоянной составляющей, содержат значительную переменную часть, ответственны за формирование значительной части межгодовой изменчивости приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) в Арктике (Алексеев и др., 2016; Alekseev et al., 2019). Из Арктики в ответ выносятся холодные воздушные массы, влияющие на среднюю ПТВ на прилегающих широтах. Отношение изменчивости средней ПТВ в обеих областях, оцениваемой среднеквадратичными отклонениям, будет мерой влияния обмена на ПТВ каждой области.

Найдём отношение СКО в модели однородной атмосферы одинаковой высоты над полушарием без обмена с подстилающей поверхностью, в которой температура растёт от экватора к полюсу и постепенно повышается, т.е. имеется тренд, а также присутствует синоптическая изменчивость. При событии обмена k между полярным и соседним объёмами атмосферы V_N и V_S с одинаковыми свойствами воздуха средняя температура объёмов T_N и T_S изменится и станет:

$$T_N^k = \frac{T_N (V_N - \Delta V_k) + T_S \Delta V_k}{V_N} \quad \text{и} \quad T_S^k = \frac{T_S (V_S - \Delta V_k) + T_N \Delta V_k}{V_S} \quad (1)$$

Отклонения от средних температур будут:

$$\Delta T_N^k = (T_N^k - T_N) = \frac{(T_S - T_N) \Delta V_k}{V_N}; \quad \Delta T_S^k = \frac{(T_N - T_S) \Delta V_k}{V_S} \quad (2)$$

Возводя в квадрат выражения (2) и осредняя по множеству событий обмена k , придём к отношению средних квадратичных отклонений (СКО);

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_S} = \frac{V_S}{V_N} = \frac{\sin \varphi_N - \sin \varphi_S}{1 - \sin \varphi_N} = F(\varphi). \quad (3)$$

При выводе формул (1)-(3) принимались одинаковая высота и постоянство термодинамических параметров воздуха в рассматриваемой модели

атмосферы. В формуле (3) правая часть определяет отношение СКО в полярной области ($90 \div \varphi_N$) и в соседней области ($\varphi_N \div \varphi_S$).

В реальной атмосфере отношение СКО средней температуры воздуха смежных областей отличается от отношения в формуле (3). Расчёты СКО средней приповерхностной температуры воздуха смежных областей, по данным о среднемесячной температуре из реанализов NCEP и ERA5, показали (рис. 1), что кривые, отражающие соотношение $F(\varphi)$ и фактическое отношение $\frac{\sigma_N}{\sigma_S}$, отличаются, но имеют точку пересечения $\frac{\sigma_N}{\sigma_S} = F(\varphi_S)$. Широта отмечает южную границу области ($\varphi_N \div \varphi_S$), в которой СКО температуры удовлетворяет соотношению (3). Поэтому можем принять эту широту за границу распространения воздухообмена между областями.

Расчёты отношений выполнялись для значений φ_N и φ_S , равных:

$$\varphi_N = 70^\circ, \varphi_S = 65^\circ, 60, 55, \dots 0^\circ; \quad \varphi_N = 60^\circ, \varphi_S = 55^\circ, 50, 45, \dots 0^\circ$$

На рис. 1 показаны примеры модельных и фактических отношений СКО.

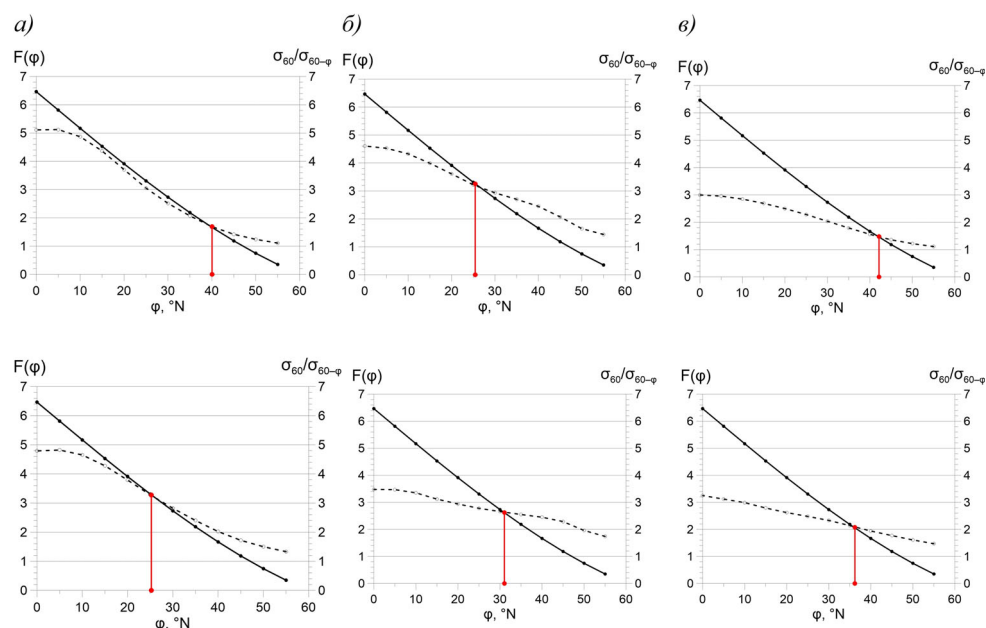


Рисунок 1. Модельные (сплошная линия) и фактические отношения СКО (пунктир) среднемесячной температуры воздуха в январе (а), мае (б) и сентябре (в) в приполюсной ($90-60^\circ$ с.ш.) и прилегающих ($60-\varphi^\circ$) областях Северного полушария
 Верхний ряд – отношения СКО отклонений от тренда за рассматриваемый период 1989-2020 гг., нижний ряд – отношения СКО исходных рядов

Figure 1. Model $F(\varphi)$ (solid line) and actual RMS ratios (dashed line) of mean monthly air temperatures in January, May, and September in the near-pole ($90-60^\circ$ N) and adjacent ($60-\varphi^\circ$) regions of the Northern Hemisphere
 The upper row is the RMS ratios of the deviations from the trend for 1989-2020; the lower row is the RMS ratios of the original series

Широты точек пересечения модельных и фактических отношений СКО обобщены в виде диаграмм (рис. 2).

Из рисунков следует, что обмен между полярной и прилегающей областями достигает более низких широт при расширении полярной области от 70° с.ш. до 60° с.ш. Широта, до которой в среднем распространяется полярный воздух, уменьшается при включённом в СКО тренде, что может означать влияние потепления на усиление обмена воздушными массами. В годовом ходе выделяются апрель и май, когда широты минимальны, что указывает на возможное распространение полярного воздуха из области севернее 60° с.ш. далеко на юг. Минимум широты в октябре для влияния из арктической области к северу от 70° с.ш. связан с увеличением изменчивости температуры за счёт притока тепла при охлаждении и ледообразовании на открытой воде.

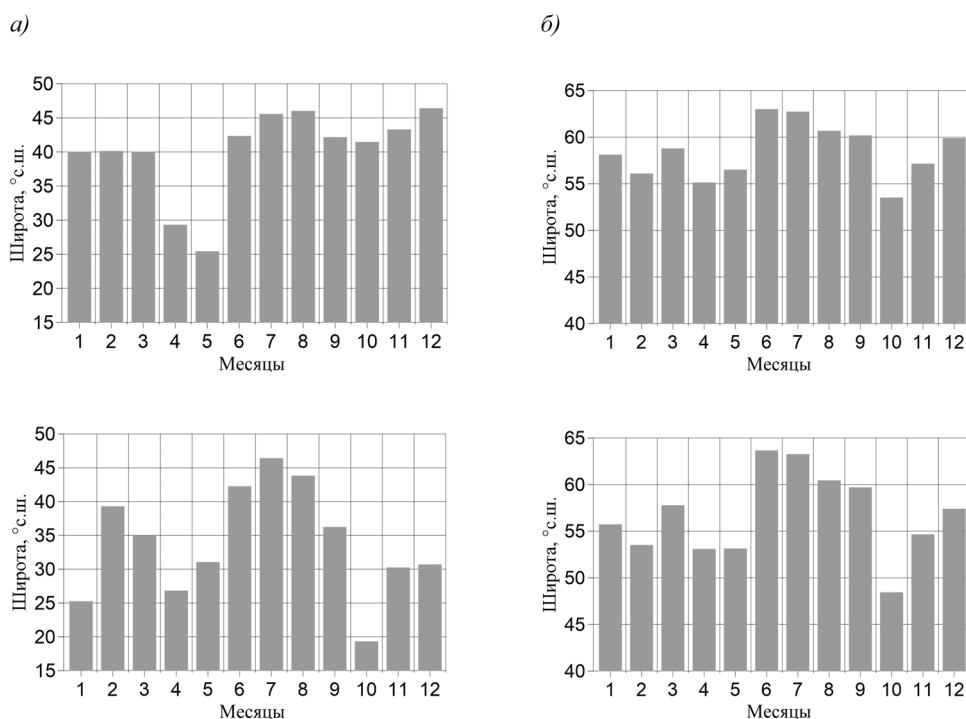


Рисунок 2. Широты точек пересечения модельных и фактических отношений СКО средней приповерхностной температуры воздуха в областях: а) $90^{\circ} \div 60^{\circ}$ с.ш., б) $90^{\circ} \div 70^{\circ}$ с.ш. и в прилегающих с юга областях ($60^{\circ} \div 0$) и ($70^{\circ} \div 0$)
Верхний ряд – отношения СКО отклонений от тренда; нижний ряд – отношения СКО от исходных рядов

Figure 2. Latitudes of the intersection points of model and actual RMS ratios of mean surface air temperature in the regions of (a) $90^{\circ} \div 60^{\circ}$ N, (b) $90^{\circ} \div 70^{\circ}$ N and in the regions adjacent from the south ($60^{\circ} \div 0$) and ($70^{\circ} \div 0$)
Upper row – ratios of RMS of deviations from the trend; lower row - ratios of RMS of the original series

Влияние атмосферных переносов на усиление трендов температуры в высоких широтах

Рассмотрим влияние воздухообмена между смежными областями однородной атмосферы над приполярной областью ($90-\varphi_N$) объемом V_N и прилегающей областью ($\varphi_N-\varphi_S$) объемом V_S на тренды средней температуры воздуха в этих областях a_N и a_S . Для этого представим дисперсию температуры суммой дисперсии, отражаемой трендом σ_a^2 и остаточной дисперсии σ_ε^2 :

$$V_N^2(\sigma_{a_N}^2 + \sigma_{\varepsilon_N}^2) = V_S^2(\sigma_{a_S}^2 + \sigma_{\varepsilon_S}^2) \quad (4)$$

Далее

$$V_N^2 \sigma_{a_N}^2 \left(1 + \frac{\sigma_{\varepsilon_N}^2}{\sigma_{a_N}^2}\right) = V_N^2 \sigma_{a_N}^2 \left(1 + \frac{\sigma^2 - \sigma_{a_N}^2}{\sigma_{a_N}^2}\right) = V_N^2 \frac{\sigma_{a_N}^2}{R_{a_N}^2} = V_S^2 \frac{\sigma_{a_S}^2}{R_{a_S}^2}, \quad (5)$$

где R – коэффициент детерминации тренда.

Из (5) имеем:

$$\frac{\sigma_{a_N}}{\sigma_{a_S}} = \frac{V_S}{V_N} \frac{R_{a_N}}{R_{a_S}}. \quad (6)$$

Откуда

$$\frac{a_N}{a_S} = \frac{R_{a_N}}{R_{a_S}} \left(\frac{\sin \varphi_N - \sin \varphi_S}{1 - \sin \varphi_N} \right) \quad (7)$$

Т.е. отношение трендов средней температуры воздуха двух смежных областей изолированной атмосферы над полушарием определяется отношением их площадей, умноженным на отношение коэффициентов детерминации трендов.

Оценим близость отношения трендов средней температуры областей реальной атмосферы к отношению, описываемому выражением (7). Тренды и коэффициенты детерминации трендов рассчитаем по данным реанализа NCEP за 1989-2020 годы, в которые происходило заметное потепление в Арктике. Рассчитывались значения:

$$F1 = \frac{R_{a_N}}{R_{a_S}} \frac{\sin \varphi_N - \sin \varphi_S}{1 - \sin \varphi_N} \quad \text{и} \quad F2 = \frac{a_N}{a_S}, \quad (8)$$

по которым оценивался вклад обмена (%) в усиление тренда в северных областях ($90-70^\circ$ с.ш.) и ($90-60^\circ$ с.ш.) по сравнению с прилегающими с юга областями ($70-0^\circ$ с.ш.) и ($60-0^\circ$ с.ш.) по формуле:

$$f_{NS} = \frac{F_2}{F_1} \times 100\%, \quad (9)$$

при условии $F_2 \leq F_1$, где $N=70, 60$; $S=0$. При $F_{NS} = 100\%$, что выполняется в изолированной системе. В реальной атмосфере изменчивость температуры в обеих областях связана не только с обменом между ними, поэтому отношение трендов будет отличаться от представляемого формулой (7). В этом случае формула (9) оценивает вклад обмена в усиление тренда температуры в полярной области.

Расчёты вклада выполнены по данным реанализов NCEP и ERA5 за 1989-2020 годы, когда потепление в северных широтах стало особенно заметным.

На рис. 3 показана диаграмма вкладов обмена в усиление трендов средней температуры северных областей в разные месяцы года, по данным реанализа NCEP и ERA5.

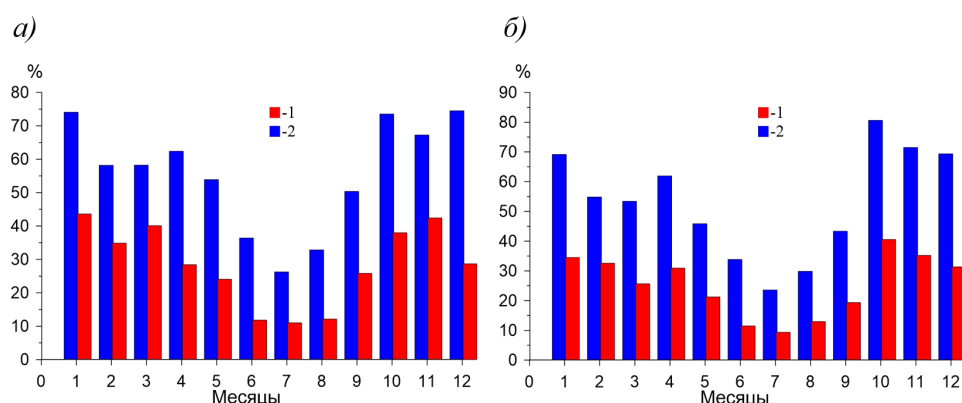


Рисунок 3. Вклад (%) воздухообмена между полярными и прилегающими с юга областями Северного полушария в усиление тренда средней температуры воздуха в полярной области, по данным реанализа NCEP (а) и ERA5 (б) за 1989-2020 годы

1 – обмен между областями (90-70° с.ш.) и (70-0° с.ш.), 2 – обмен между областями (90-60° с.ш.) и (60-0° с.ш.)

Figure 3. Input (%) of air transfer between the circumpolar and the regions of the Northern Hemisphere adjacent from the south in the amplification of mean air temperature trend in the polar region according to the NCEP (a) and ERA5 reanalysis (b) for 1989-2020
1 – Exchange between regions (90-70° N) and (70° N-0° N), 2 – Exchange between regions (90-60° N) and (60° N-0° N)

Из рис. 3 следует, что обменом воздушными массами между полярной и остальной частью Северного полушария объясняется 54% усиления тренда температуры воздуха (арктического усиления) в области 90-60° с.ш. и 28% арктического усиления в области 90-70° с.ш. Большой вклад обмена в усиление (66% и 38%) отмечается в холодную часть года (октябрь-апрель), а в теплую часть – с мая по сентябрь – вклад составляет 38% и 17% соответственно в области 90-60° с.ш. и 90-70° с.ш. Приведенные значения получены как средние из оценок по NCEP и ERA5, которые, по данным ERA5, меньше на 2.5- 4.3%.

Если принять во внимание южную границу обмена воздушными массами между полярной и прилегающей областью, показанную на рис. 2 (нижний ряд), то вклад обмена в усиление тренда будет больше (табл. 1).

Таблица показывает, что усиление тренда температуры воздуха в области 90-60° с.ш. относительно тренда в прилегающей области, с которой происходит обмен воздушными массами, почти полностью (на 93% в среднем за год) является результатом обмена, а в области 90-70° с.ш. – в основном (на 74% в среднем за год).

Таблица 1. Вклад (%) воздухообмена между полярной и прилегающей областью Северного полушария, между которыми происходит обмен воздушными массами, в усиление тренда температуры воздуха в полярной области

Table 1. Input (%) of air transfer between the polar region and the adjacent region of the Northern Hemisphere, between which the exchange of air masses occurs, in the amplification of the air temperature trend in the polar region

Область	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Обмен до (°с.ш.)	25	39	35	27	31	42	46	44	36	19	30	31
В 90-60° с.ш., вклад	99	90	89	95	98	94	92	82	98	92	93	99
Обмен до широты (°с.ш.)	56	54	58	53	53	64	63	60	60	48	55	57
В 90-70° с.ш., вклад	78	72	70	76	64	62	66	85	69	85	90	71

Обсуждение и выводы

Оценки роли воздухообмена в формировании изменчивости и трендов температуры воздуха получены с помощью простой модели атмосферы, учитывающей важные особенности реальной атмосферы на полушарии – повышение температуры от экватора к полюсу, тренд на потепление и присутствие синоптических вихрей. Тем не менее, в них отражены такие черты межгодовой изменчивости температуры воздуха в реальной атмосфере как сезонные изменения области обмена между полярными и прилегающими широтами и ее увеличение при потеплении.

Подтверждением расширения междуширотного обмена является участвовавшие в последнее десятилетие выпадение снега и похолодания в Саудовской Аравии и Сахаре, где после 2018 года почти ежегодно сообщается о таких явлениях (например, <https://novosti.kg/2023/>; <https://24.kg>; <https://turkmenportal.com/>). Свидетельства о распространении полярного воздуха на юг весной приведены в статье (Виноградова, 2018), в которой отмечено, что повторяемость волн холода в меньшей степени зависит от сезона и что наибольшая продолжительность волн холода на Европейской территории и в Западной Сибири приходится на весну. Весенние снегопады и похолодания в последние годы отмечались на юге Европы (<https://geocenter.info/new/snegopady-v-evrope-maj>), в Саудовской Аравии (<https://www.meteoprog.com>).

Полученные с помощью модели оценки вклада воздухообмена в усиление тренда температуры в полярной области не имеют аналогов. Они показывают сезонные изменения, подобные сезонным изменениям трендов, и соответствуют усилению воздухообмена при потеплении (Мохов и др., 1992). Оценки вклада обмена в усиление тренда за 1960-1989 гг. были получены для 6 месяцев, когда имело место усиление. В трёх месяцах вклад был меньше, чем за 1989-2020 гг., а в трёх – больше. В остальные месяцы тренд в южной области был больше, чем в полярной, либо тренд в полярной области был отрицательный.

Оценки усиления СКО и трендов температуры воздуха в полярной области Северного полушария учитывают постоянное присутствие воздухообмена в земной атмосфере, но не указывают на его первоисточник. При потеплении циркуляция в обеих средах усиливается (Мохов и др., 1992; Hu et al., 2020) и усиливается обмен между областями. Источники интенсификации циркуляции находятся в низких широтах океана, где зарождаются события Эль Ниньо-Ла Нинья, колебания Маддена-Джулиана (Yoo et al., 2011), цепочки волн Россби (Ding et al., 2014), Гольфстрим, возбуждающие возмущения в атмосфере и переносящие тепло в полярные области (Goss et al., 2016; Lee et al., 2011; Park et al., 2015).

В данной статье впервые выполнена количественная оценка роли атмосферных переносов в формировании изменчивости и трендов средней приповерхностной температуры воздуха в Арктике и на прилегающих широтах Северного полушария и предложено аналитическое описание их усиления в высоких широтах.

Для исследования использованы данные реанализов NCEP за 1948-2020 гг., ERA5 за 1979-2020 гг. Использована простая модель однородной атмосферы одинаковой высоты над полушарием без обмена с подстилающей поверхностью, в которой температура растёт от экватора к полюсу и постепенно повышается, т.е. имеется тренд, а также присутствует синоптическая изменчивость. В модели происходят события воздухообмена между широтными областями. Путём осреднения по множеству событий получены аналитические выражения для отношений СКО и трендов температуры в соседних областях. Степень близости эмпирического и модельного отношений трендов, принята как мера вклада воздухообмена в усиление трендов при потеплении.

Получено, что обмен между полярной и прилегающей областями достигает более низких широт при расширении приполярной области от 70° с.ш. до 60° с.ш. Широта, до которой в среднем распространяется полярный воздух, уменьшается при включённом в СКО тренде, что показывает влияние потепления на усиление обмена воздушными массами.

Модельное значение усиления тренда средней температуры воздуха в полярной области изолированной однородной атмосферы над полушарием относительно тренда в прилегающей области определяется отношением их площадей, умноженным на отношение коэффициентов детерминации трендов.

Усиление тренда средней температуры в полярной области реальной атмосферы, по данным реанализов NCEP и ERA5 за 1989-2020 годы, сравни-

валось с модельным значением, а их отношением оценивался вклад обмена в усиление тренда температуры в полярной области реальной атмосферы.

Получено, что обменом воздушными массами между полярной и остальной частью Северного полушария объясняется 54% усиления тренда температуры воздуха (арктического усиления) в области 90-60° с.ш. и 28% арктического усиления в области 90-70° с.ш. Большой вклад обмена в усиление (66% и 38%) отмечается в холодную часть года (октябрь-апрель), а в теплую часть – с мая по сентябрь – вклад составляет 38% и 17%. Приведенные значения получены как средние из оценок по NCEP и ERA5, которые, по данным ERA5, меньше на 2.5–4.3%.

Если принять во внимание установленную (рис. 2, нижний ряд) южную границу обмена воздушными массами между полярной и прилегающей областью, то вклад обмена в усиление тренда будет больше: усиление тренда температуры воздуха в области 90-60° с.ш. относительно тренда в прилегающей области, с которой происходит обмен воздушными массами, почти полностью (на 93% в среднем за год) будет результатом обмена, а в области 90-70° с.ш. – в основном (на 74% в среднем за год).

На основе полученных результатов можно заключить, что арктическое усиление в значительной степени является свойством изменчивости температуры воздуха на земном шаре, формируемым вихревым обменом в атмосфере в присутствии разности температуры между экватором и полюсом и тренда, которые поддерживаются внешними воздействиями. На формирование арктического усиления влияет и обмен с подстилающей поверхностью в морской Арктике и другие механизмы, вклад которых также необходимо оценить.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 23-47-10003.

Список литературы

Алексеев, Г.В. (2014) Динамическое усиление глобального потепления, в сб.: *Труды международной конференции памяти академика А.М. Обухова*, ГЕОС, Москва, с. 290-306.

Алексеев, Г.В., Кузмина, С.И., Уразгильдеева, А.В., Бобылев, Л.П. (2016) Влияние атмосферных переносов тепла и влаги на усиление потепления в Арктике в зимний период, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 1, с. 43-63.

Алексеев, Г.В., Подгорный, И.А., Священников, П.Н. (1990) Адвективно-радиационные колебания климата, *ДАН СССР*, т. 315, № 4, с. 824-827.

Васюта, Ю.В., Мохов, И.И., Петухов, В.К. (1988) Чувствительность малопараметрических моделей климата к изменению характеристик меридионального переноса тепла, *Изв. АН СССР. ФАО*, т. 24, № 2, с. 115-125.

Виноградова, В.В. (2018) Зимние волны холода на территории России со второй половины XX века, *Известия РАН, Серия географическая*, № 3, с. 37-46.

Голицын, Г.С. (1973) *Введение в динамику планетных атмосфер*, Гидрометеиздат, Л., 109 с.

Демченко, П.Ф., Зубарев, А.П. (1989) Оценки низкочастотной изменчивости среднезональных температур, вызванной флуктуациями меридионального переноса тепла, *Известия АН СССР, ФАО*, т. 25, с. 917-924.

Дымников, В.П., Филатов, А.Н. (1990) *Устойчивость крупномасштабных атмосферных процессов*, Гидрометеиздат, Л., 236 с.

Латонин, М.М., Башмачников, И.Л., Бобылёв, Л.П. (2020) Явление арктического усиления и его движущие механизмы, *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*, т. 13, № 3, с. 3-19, doi: 10.7868/S2073667320030016.

Лоренц, Э.Н. (1970) *Природа и теория общей циркуляции атмосферы*, Гидрометеиздат, Л., 259 с.

Мохов, И.И. (1993) *Диагностика структуры климатической системы*, Гидрометеиздат, СПб., 270 с.

Мохов, И.И., Мохов, О.И., Петухов, В.К., Хайрулин, Р.Р. (1992) Влияние глобальных климатических изменений на вихревую активность в атмосфере, *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*, т. 28, № 1, с. 11-26.

Семенов, В.А., Мохов, И.И., Латиф, М. (2012) Роль границ морского льда и температуры поверхности океана в изменениях регионального климата в Евразии за последние десятилетия, *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, т. 48, № 4, с. 403-421.

Alekseev, G.V, Kuzmina, S., Bobylev, L., Urazgildeeva, A., Gnatiuk, N. (2019) Impact of atmospheric heat and moisture transport on the Arctic warming, *International Journal of Climatology*, vol. 39, no. 8, pp. 3582-3592, <https://doi.org/10.1002/joc.6040>.

Bekryaev, R.V., Polyakov, I.V., Alexeev, V.A. (2010) Role of Polar Amplification in Long-Term Surface Air Temperature Variations and Modern Arctic Warming, *Journal of Climate*, vol. 23(14), pp. 3888-3906, doi: 10.1175/2010JCLI3297.1.

Blackport, R., Screen, J.A. (2020) Insignificant effect of Arctic amplification on the amplitude of midlatitude atmospheric waves, *Science Advances*, vol. 6, no. 8, DOI: 10.1126/sciadv.aay2880.

Blackport, R., Screen, J.A., van der Wiel, K., Bintanja, R. (2019) Minimal influence of reduced Arctic sea ice on coincident cold winters in mid-latitudes, *Nature climate change*, vol. 9, pp. 697-704, doi: 10.1038/s41558-019-0551-4.

Budyko, M.I. (1969) The effect of solar radiation variations on the climate of the Earth, *Tellus*, vol. 212, pp. 611-619.

- Cao, Y., Liang, S., Chen, X., He, T., Wang, D., Cheng, X. (2017) Enhanced wintertime greenhouse effect reinforcing Arctic amplification and initial sea-ice melting, *Scientific Reports*, vol. 7, 8462, doi:10.1038/s41598-017-08545-2.
- Clark, J.P., Shenoy, V., Feldstein, S.B., Lee, S., Goss, M. (2021) The role of horizontal temperature advection in arctic amplification, *Journal of Climate*, vol. 34(8), pp. 2957-2976, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0937.1>.
- Cohen, J., Zhang, X., Francis, J., Jung, T., Kwok, R., Overland, J., Ballinger, T.J., Bhatt, U.S., Chen, H.W., Coumou, D., Feldstein, S., Gu, H., Handorf, D., Henderson, G., Ionita, M., Kretschmer, M., Laliberte, F., Lee, S., Linderholm, H. W., Maslowski, W., Peings, Y., Pfeiffer, K., Rigor, I., Semmler, T., Stroeve, J., Taylor, P.C., Vavrus, S., Vihma, T., Wang, S., Wendisch, M., Wu, Y., Yoon, J. (2020) Divergent consensus on Arctic amplification influence on midlatitude severe winter weather, *Nature Climate Change*, vol. 10, pp. 20-29, <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0662-y>.
- Davy, R., Chen, L., Hanna, E. (2018) Arctic amplification metrics, *International Journal of Climatology*, vol. 38, no. 12, pp. 4384-4394, doi: 10.1002/joc.5675.
- Ding, Q., Wallace, J.M., Battisti, D.S., Steig, E.J., Gallant, A.J.E., Kim, H.-J., Geng, L. (2014) Tropical forcing of the recent rapid Arctic warming in northeastern Canada and Greenland, *Nature*, vol. 509, pp. 209-213.
- Flannery, B.P. (1984) Energy-balance models incorporating transport of thermal and latent energy, *Journal of the Atmospheric Sciences*, no. 41, pp. 414-421.
- Francis, J.A., Vavrus, S.J. (2012) Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes, *Geophysical Research Letters*, vol. 39, L06801, doi: 10.1029/2012GL051000.
- Goss, M., Feldstein, S.B., Lee, S. (2016) Stationary Wave Interference and Its Relation to Tropical Convection and Arctic Warming, *Journal of Climate*, vol. 29, no. 4, pp. 1369-1389.
- Henderson, G.R., Barrett, B.S., Wachowicz, L.J., Mattingly, K.S., Preece, J.R., Mote, T.L. (2021) Local and Remote Atmospheric Circulation Drivers of Arctic Change. A Review, *Frontiers in Earth Science*, vol. 9, 709896, doi: 10.3389/feart.2021.709896.
- Hu, S., Sprintall, J., Guan, C., McPhaden, M.J., Wang, F., Hu, D., Cai, W. (2020) Deep-reaching acceleration of global mean ocean circulation over the past two decades, *Science Advances*, vol. 6, no. 6, doi: 10.1126/sciadv.aax7727.
- Inoue, J., Hori, M.E., Takaya, K. (2012) The role of Barents sea ice in the wintertime cyclone track and emergence of a warm-Arctic cold-Siberian anomaly, *Journal of Climate*, vol. 25, no. 7, pp. 2561-2568.
- Lee, S., Gong, T., Johnson, N., Feldstein, S.B., Pollard, D. (2011) On the possible link between tropical convection and the northern hemisphere arctic
-

surface air temperature change between 1958 and 2001, *Journal of Climate*, vol. 24, pp. 4350-4367.

Meleshko, V.P., Johannessen, O.M., Baidin, A.V., Pavlova, T.V., Govorkova, V.A. (2016) Arctic amplification: does it impact the polar jet stream? *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, vol. 68(1), pp. 32330, doi: <http://doi.org/10.3402/tellusa.v68.32330>.

North, G.R., Cahalan, R.F., Coakley, J.A. (1981) Energy balance climate models, *Reviews of geophysics and space physics*, vol. 19, no. 1, pp. 91-121.

North, G.R., Moeng, F.J., Bell, T.L., Cahalan, R.F. (1982) Latitudinal dependence of the variability of sonal mean, *Monthly Weather Review*, vol. 110, no. 5, pp. 319-326.

Park, H.S., Lee, S., Son, S.W., Feldstein, S.B., Kosaka, Y. (2015) The impact of poleward moisture and sensible heat flux on arctic winter sea ice variability, *Journal of Climate*, vol. 28, no. 13, pp. 5030-5040.

Perlwitz, J., Hoerling, M., Dole, R. (2015) Arctic tropospheric warming: causes and linkages to lower latitudes, *Journal of Climate*, vol. 28, pp. 2154-2167, doi: [10.1175/JCLI-D-14-00095.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00095.1).

Petoukhov, V., Semenov, V.A. (2010) A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents, *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, vol. 115, no. 21, doi: [10.1029/2009JD013568](https://doi.org/10.1029/2009JD013568).

Pithan, F., Mauritsen, T. (2014) Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models, *Nature Geoscience*, vol. 7, pp. 181-184, <https://doi.org/10.1038/ngeo2071>.

Previdi, M., Smith, K.L., Polvani, L.M. (2021) Arctic amplification of climate change: a review of underlying mechanisms, *Environmental Research Letters*, vol. 16(9), 093,003, doi: [10.1088/1748-9326/ac1c29](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1c29).

Sellers, W.D. (1969) A climate model based on the energy balance of the earth-atmosphere system, *Journal of Applied Meteorology*, no. 8, pp. 392-400.

Serreze, M.C., Francis, J.A. (2006) The Arctic Amplification Debate, *Climatic Change*, vol. 76, pp. 241-264, <https://doi.org/10.1007/s10584-005-9017-y>.

Serreze, M.C., Barry, R.G. (2011) Processes and impacts of Arctic amplification. A research synthesis, *Global and Planetary Change*, vol. 77, no. 1-2, pp. 85-96, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.03.004>.

Smith, D.M., Screen, J.A., Deser, C., Cohen, J., Fyfe, J.C., García-Serrano, J., Jung, T., Kattsov, V., Matei, D., Msadek, R., Peings, Y., Sigmond, M., Ukita, J., Yoon, J.-H., Zhang, X. (2019) The Polar Amplification Model Intercomparison Project (PAMIP) contribution to CMIP6: investigating the causes and consequences of polar amplification, *Geoscientific Model Development*, vol. 12, pp. 1139-1164, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1139-2019>, 2019.

Yoo, C., Feldstein, S., Lee, S. (2011) 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*, vol. 38, no. 24, doi: 10.1029/2011GL049881.

Zhang, R., Wang, H., Fu, Q., Rasch, P.J., Wu, M., Maslowski, W. (2021) Understanding the cold season Arctic surface warming trend in recent decades, *Geophysical Research Letters*, vol. 48, GL094878, <https://doi.org/10.1029/2021GL094878>.

References

Alekseev, G.V. (2014) Dinamicheskoe usilenie global'nogo potepleniya [Dynamic amplification of global warming], *Trudy mezhdunarodnoj konferencii pamyati akademika A.M. Obuhova* [Proc. Int. Conf. in Memory of Academician A.M. Obukhov], GEOS, Moscow, Russia, pp. 290-306.

Alekseev, G.V., Kuzmina, S.I., Urazgildeeva, A.V., Bobylev, L.P. (2016) Vliyanie atmosferynyh perenosov tepla i vlagi na usilenie potepleniya v Arktike v zimnij period [Impact of atmospheric heat and moisture transport on Arctic warming in winter], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 1, pp. 43-63.

Alekseev, G.V., Podgornyy, I.A., Svyashchennikov, P.N. (1990) Advektivno-radiacionnye kolebaniya klimata [Advection-radiation climate fluctuations], *DAN SSSR*, vol. 315, no. 4, pp. 824-827.

Vasyuta, Yu.V., Mohov, I.I., Petuhov, V.K. (1988) Chuvstvitel'nost' maloparametricheskikh modelej klimata k izmeneniyu harakteristik meridional'nogo perenosa tepla [Sensitivity of low-parameter climate models to changes in meridional heat transport characteristics], *Izvestiya AN SSSR. FAO*, vol. 24, no. 2, pp. 115-125.

Vinogradova, V.V. (2018) Zimnie volny holoda na territorii Rossii so vtoroj poloviny XX veka [Winter waves of cold in Russia since the second half of the twentieth century], *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*, no. 3, pp. 37-46.

Golicyn, G.S. (1973) *Vvedenie v dinamiku planetnyh atmosfer* [Introduction to the Dynamics of Planetary Atmospheres], Gidrometeoizdat, Leningrad, Moscow, Russia, 109 p.

Demchenko, P.F., Zubarev, A.P. (1989) Ocenki nizkochastotnoj izmenchivosti srednezonal'nyh temperatur, vyzvannoj fluktuაციyami meridional'nogo perenosa tepla [Estimates of low-frequency variability of zonal mean temperatures caused by fluctuations in meridional heat transport], *Izvestiya AN SSSR. FAO*, vol. 25, pp. 917-924.

Dymnikov, V.P., Filatov, A.N. (1990) *Ustojchivost' krupnomasshtabnyh atmosferynyh processov* [Stability of large-scale atmospheric processes], Gidrometeoizdat, Leningrad, Moscow, Russia, 236 p.

Latonin, M.M., Bashmachnikov, I.L., Bobylev, L.P. (2020) Yavlenie arkticheskogo usileniya i ego dvizhushchie mekhanizmy [The Arctic amplification phenomenon and its driving mechanisms], *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*, vol. 13, no 3, pp. 3-19, doi: 10.7868/S2073667320030016.

Lorenz, E.N. (1970) *Priroda i teoriya obshchej cirkulyacii atmosfery* [The nature and theory of the general circulation of the atmosphere], Gidrometeoizdat, Leningrad, Moscow, Russia, 259 p.

Mokhov, I.I. (1993) *Diagnostika struktury klimaticheskoy sistemy* [Diagnostics of the Climatic System Structure], Gidrometeoizdat, St. Petersburg, Moscow, Russia, 270 p.

Mokhov, I.I., Mokhov, O.I., Petukhov, V.K., Khayrullin, R.R. (1992) Vliyanie global'nyh klimaticheskikh izmenenij na vihrevuyu aktivnost' v atmosfere [Effect of global climatic changes on the cyclonic activity in the atmosphere], *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*, vol. 28, no. 1, pp. 11-26.

Semenov, V.A., Mokhov, I.I., Latif, M. (2012) Vliyanie temperatury poverhnosti okeana i granic morskogo l'da na izmenenie regional'nogo klimata v Evrazii za poslednie desyatiletiya [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*, vol. 48, no. 4, pp. 403-421.

Alekseev, G.V., Kuzmina, S., Bobylev, L., Urazgildeeva, A., Gnatiuk, N. (2019) Impact of atmospheric heat and moisture transport on the Arctic warming, *International Journal of Climatology*, vol. 39, no. 8, pp. 3582-3592, <https://doi.org/10.1002/joc.6040>.

Bekryaev, R.V., Polyakov, I.V., Alexeev, V.A. (2010) Role of Polar Amplification in Long-Term Surface Air Temperature Variations and Modern Arctic Warming, *Journal of Climate*, vol. 23(14), pp. 3888-3906, doi: 10.1175/2010JCLI3297.1.

Blackport, R., Screen, J.A. (2020) Insignificant effect of Arctic amplification on the amplitude of midlatitude atmospheric waves, *Science Advances*, vol. 6, no. 8, DOI: 10.1126/sciadv.aay2880.

Blackport, R., Screen, J.A., van der Wiel, K., Bintanja, R. (2019) Minimal influence of reduced Arctic sea ice on coincident cold winters in mid-latitudes, *Nature climate change*, vol. 9, pp. 697-704, doi: 10.1038/s41558-019-0551-4.

Budyko, M.I. (1969) The effect of solar radiation variations on the climate of the Earth, *Tellus*, vol. 212, pp. 611-619.

Cao, Y., Liang, S., Chen, X., He, T., Wang, D., Cheng, X. (2017) Enhanced wintertime greenhouse effect reinforcing Arctic amplification and initial sea-ice melting, *Scientific Reports*, vol. 7, 8462, doi:10.1038/s41598-017-08545-2.

Clark, J.P., Shenoy, V., Feldstein, S.B., Lee, S., Goss, M. (2021) The role of horizontal temperature advection in arctic amplification, *Journal of Climate*, vol. 34(8), pp. 2957-2976, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0937.1>.

Cohen, J., Zhang, X., Francis, J., Jung, T., Kwok, R., Overland, J., Ballinger, T.J., Bhatt, U.S., Chen, H.W., Coumou, D., Feldstein, S., Gu, H., Handorf, D., Henderson, G., Ionita, M., Kretschmer, M., Laliberte, F., Lee, S., Linderholm, H. W., Maslowski, W., Peings, Y., Pfeiffer, K., Rigor, I., Semmler, T., Stroeve, J., Taylor, P.C., Vavrus, S., Vihma, T., Wang, S., Wendisch, M., Wu, Y., Yoon, J. (2020) Divergent consensus on Arctic amplification influence on midlatitude severe winter weather, *Nature Climate Change*, vol. 10, pp. 20-29, <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0662-y>.

Davy, R., Chen, L., Hanna, E. (2018) Arctic amplification metrics, *International Journal of Climatology*, vol. 38, no. 12, pp. 4384-4394, doi: 10.1002/joc.5675.

Ding, Q., Wallace, J.M., Battisti, D.S., Steig, E.J., Gallant, A.J.E., Kim, H-J., Geng, L. (2014) Tropical forcing of the recent rapid Arctic warming in northeastern Canada and Greenland, *Nature*, vol. 509, pp. 209-213.

Flannery, B.P. (1984) Energy-balance models incorporating transport of thermal and latent energy, *Journal of the Atmospheric Sciences*, no. 41, pp. 414-421.

Francis, J.A., Vavrus, S.J. (2012) Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes, *Geophysical Research Letters*, vol. 39, L06801, doi: 10.1029/2012GL051000.

Goss, M., Feldstein, S.B., Lee, S. (2016) Stationary Wave Interference and Its Relation to Tropical Convection and Arctic Warming, *Journal of Climate*, vol. 29, no. 4, pp. 1369-1389.

Henderson, G.R., Barrett, B.S., Wachowicz, L.J., Mattingly, K.S., Preece, J.R., Mote, T.L. (2021) Local and Remote Atmospheric Circulation Drivers of Arctic Change. A Review, *Frontiers in Earth Science*, vol. 9, 709896, doi: 10.3389/feart.2021.709896.

Hu, S., Sprintall, J., Guan, C., McPhaden, M.J., Wang, F., Hu, D., Cai, W. (2020) Deep-reaching acceleration of global mean ocean circulation over the past two decades, *Science Advances*, vol. 6, no. 6, doi: 10.1126/sciadv.aax7727.

Inoue, J., Hori, M.E., Takaya, K. (2012) The role of Barents sea ice in the wintertime cyclone track and emergence of a warm-Arctic cold-Siberian anomaly, *Journal of Climate*, vol. 25, no. 7, pp. 2561-2568.

Lee, S., Gong, T., Johnson, N., Feldstein, S.B., Pollard, D. (2011) On the possible link between tropical convection and the northern hemisphere arctic surface air temperature change between 1958 and 2001, *Journal of Climate*, vol. 24, pp. 4350-4367.

Meleshko, V.P., Johannessen, O.M., Baidin, A.V., Pavlova, T.V., Govorkova, V.A. (2016) Arctic amplification: does it impact the polar jet stream? *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, vol. 68(1), pp. 32330, doi: <http://doi.org/10.3402/tellusa.v68.32330>.

North, G.R., Cahalan, R.F., Coakley, J.A. (1981) Energy balance climate models, *Reviews of geophysics and space physics*, vol. 19, no. 1, pp. 91-121.

North, G.R., Moeng, F.J., Bell, T.L., Cahalan, R.F. (1982) Latitudinal dependence of the variability of sonal mean, *Monthly Weather Review*, vol. 110, no. 5, pp. 319-326.

Park, H.S., Lee, S., Son, S.W., Feldstein, S.B., Kosaka, Y. (2015) The impact of poleward moisture and sensible heat flux on arctic winter sea ice variability, *Journal of Climate*, vol. 28, no. 13, pp. 5030-5040.

Perlwitz, J., Hoerling, M., Dole, R. (2015) Arctic tropospheric warming: causes and linkages to lower latitudes, *Journal of Climate*, vol. 28, pp. 2154-2167, doi: 10.1175/JCLI-D-14-00095.1.

Petoukhov, V., Semenov, V.A. (2010) A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents, *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, vol. 115, no. 21, doi: 10.1029/2009JD013568.

Pithan, F., Mauritsen, T. (2014) Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models, *Nature Geoscience*, vol. 7, pp. 181-184, <https://doi.org/10.1038/ngeo2071>.

Previdi, M., Smith, K.L., Polvani, L.M. (2021) Arctic amplification of climate change: a review of underlying mechanisms, *Environmental Research Letters*, vol. 16(9), 093,003, doi:10.1088/1748-9326/ac1c29.

Sellers, W.D. (1969) A climate model based on the energy balance of the earth-atmosphere system, *Journal of Applied Meteorology*, no. 8, pp. 392-400.

Serreze, M.C., Francis, J.A. (2006) The Arctic Amplification Debate, *Climatic Change*, vol. 76, pp. 241-264, <https://doi.org/10.1007/s10584-005-9017-y>.

Serreze, M.C., Barry, R.G. (2011) Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis, *Global and Planetary Change*, vol. 77, no. 1-2, pp. 85-96, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.03.004>.

Smith, D.M., Screen, J.A., Deser, C., Cohen, J., Fyfe, J.C., García-Serrano, J., Jung, T., Kattsov, V., Matei, D., Msadek, R., Peings, Y., Sigmond, M., Ukita, J., Yoon, J.-H., Zhang, X. (2019) The Polar Amplification Model Intercomparison Project (PAMIP) contribution to CMIP6: investigating the causes and consequences of polar amplification, *Geoscientific Model Development*, vol. 12, pp. 1139-1164, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1139-2019>, 2019.

Yoo, C., Feldstein, S., Lee, S. (2011) 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*, vol. 38, no. 24, doi: 10.1029/2011GL049881.

Zhang, R., Wang, H., Fu, Q., Rasch, P.J., Wu, M., Maslowski, W. (2021) Understanding the cold season Arctic surface warming trend in recent decades,

Статья поступила в редакцию (Received): 08.02.2023.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 10.02.2023.

Принята к публикации (Accepted): 24.02.2023.

Для цитирования / For citation:

Алексеев, Г.В., Харланенкова, Н.Е., Вязилова, А.Е. (2023) Арктическое усиление: роль междуширотного обмена в атмосфере, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 9, № 1, с. 13-32, doi:10.21513/2410-8758-2023-1-13-32.

Alekseev, G.V., Kharlanenkova, N.E., Vyazilova A.E. (2023) Arctic amplification: the role of interlatitudinal exchange in the atmosphere, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 9, no. 1, pp. 13-32, doi:10.21513/2410-8758-2023-1-13-32.