

НАУКИ О ЗЕМЛЕ
EARTH SCIENCESУДК 531.583
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-4-322-329>Поступило в редакцию 04.06.2025
Received 04.06.2025**Академик В. Ф. Логинов***Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь***УСИЛЕНИЕ ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА ВЫСОКИХ ШИРОТ
СЕВЕРНОГО И ЮЖНОГО ПОЛУШАРИЙ В ПЕРИОД С 1956 ПО 2023 г.**

Аннотация. Представлены результаты анализа различий климатических норм в разные месяцы года в период современного потепления климата (1990–2023 гг.) и предшествующий период (1956–1989 гг.) в высоких широтах Северного и Южного полушарий (60–90° с. и ю. ш.). Проведен сравнительный анализ изменений градиента температуры приэкваториальных (0–10° с. ш.) и полярных (65–90° с. и ю. ш.) широт Северного и Южного полушарий. Уменьшение градиентов температуры оказалось наиболее существенным в переходные сезоны года и особенно осенью. В Южном полушарии наибольшее уменьшение градиентов температуры произошло зимой и весной (июнь–октябрь). Рассмотрены возможные причины усиления потепления климата в высоких широтах Северного и Южного полушарий.

Ключевые слова: климатические нормы, усиление потепления климата, градиент температуры высоких и приэкваториальных широт, причины потепления

Для цитирования. Логинов, В. Ф. Усиление потепления климата высоких широт Северного и Южного полушарий в период с 1956 по 2023 г. / В. Ф. Логинов // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2025. – Т. 69, № 4. – С. 322–329. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-4-322-329>

Academician Vladimir F. Loginov*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***AMPLIFICATION OF WARMING OF HIGH-LATITUDE CLIMATE IN THE NORTHERN
AND SOUTHERN HEMISPHERES IN 1956–2023**

Abstract. The results of the analysis of differences in climate norms in different months of the year during the modern climate warming period (1990–2023) and the preceding period (1956–1989) in the high latitudes of the Northern and Southern hemispheres (60–90°N and 60–90°S) are presented. A comparative analysis of changes in temperature gradient was conducted for near-equatorial (0–10°N and 0–10°S) and polar (65–90°N and 65–90°S) latitudes of the Northern and Southern hemispheres. The decrease in the gradient value was most significant in transitional seasons of the year and especially in autumn. In the Southern hemisphere, the largest decrease in temperature gradient occurred in winter and spring (June–October). The possible causes of climate warming in the high latitudes of the Northern and Southern hemispheres are considered.

Keywords: climate norm, climate warming amplification, temperature gradient of high and near-equatorial latitudes, causes of warming

For citation. Loginov V. F. Amplification of warming of high-latitude climate in the Northern and Southern hemispheres in 1956–2023. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2025, vol. 69, no. 4, pp. 322–329 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-4-322-329>

Введение. Интенсивное повышение температуры приземного воздуха в высоких широтах Северного полушария (65–90° с. ш.) называют арктическим усилением потепления климата. В подавляющем числе выполненных к настоящему времени работ его скорость оценивается величиной коэффициента линейного тренда температуры (α) по известной формуле $y = \alpha x + \beta$. Его величина в последние 35–40 лет варьирует в зависимости от района и месяца года от нескольких

сотых до нескольких десятых градуса Цельсия в год. Наибольшие величины коэффициентов линейного тренда температуры имеют место в холодное время года (октябрь–февраль), достигая максимальной величины в октябре месяце ($\alpha \approx 0,25^\circ$ в год). Это означает арктическое усиление потепления климата в холодное время в 5–7 раз выше, чем в других регионах Земного шара. В антарктических широтах усиление потепления климата выражено приблизительно в 1,5 раза слабее и характерно больше для западной части Антарктики.

Следует отметить, что указанные выше оценки изменения линейного тренда температуры в разных районах Земного шара и сезонах года испытывают значительные колебания в зависимости от выбранного периода для подсчета коэффициентов линейного тренда. Например, в период времени с 1998 по 2014 г. в Северном полушарии наблюдалось замедление скорости роста температуры: наступила пауза в изменении температуры в зимнее время [1]. В феврале коэффициент линейного тренда температуры стал даже отрицательным.

В [2] указано, что арктическое усиление является внутренним явлением в климатической системе, которое определяется множеством причин: сокращением площади льда, влияющего на потоки тепла и влагообмен между океаном и атмосферой, переносами тепла в атмосфере и океане, облачным покровом, содержанием водяного пара в атмосфере, увеличением притока длинноволновой радиации к подстилающей поверхности, связанным с ростом концентрации в атмосфере парниковых газов антропогенного происхождения, изменением содержания в атмосфере аэрозолей естественного (вулканического) и антропогенного происхождения, приводящего в том числе к загрязнению льда и снега в полярных шапках Земли.

В одной из первых работ, посвященных этому вопросу [2], причиной арктического усиления было названо уменьшение альбедо поверхности высоких широт при сокращении площади ледового покрова в период современного потепления климата. В последующих работах [3–5] обращено внимание на роль притоков тепла и влаги из низких широт в арктическом усилении. Нелинейная зависимость уходящей длинноволновой радиации от температуры приводит к повышению средней температуры при усилении меридионального переноса явного и скрытого тепла, тогда как средние потери тепла с уходящей длинноволновой радиацией остаются неизменными [4]. В работе авторами также отмечается, что у экватора основной вклад в повышение температуры при условии относительной прозрачности атмосферы вносит парниковый эффект, тогда как у полюса – меридиональные переносы явного и скрытого тепла.

Природа арктического усиления потепления климата исследовалась в дальнейшем в многочисленных работах [5–10], но дискуссионность этого вопроса сохраняется до настоящего времени.

Теоретические и экспериментальные оценки притоков явного и скрытого турбулентного тепла в Северном Ледовитом океане и вблизи границы ледяной корки в Южном океане показали, что максимальные притоки явного и скрытого тепла в указанных районах Земного шара приходятся на октябрь в Северном Ледовитом океане и май (конец осени в Южном полушарии) в Южном океане [11–13]. Для этих месяцев года характерны самые высокие скорости роста температуры в полярных широтах Северного и Южного полушарий, т. е. самое большое по величине арктическое и антарктическое усиление потепления климата.

Важным фактором изменений циркуляционного и термического режима на Земном шаре является градиент температуры высоких и приэкваториальных широт (экватор–полюс) Северного и Южного полушарий.

С изменениями величины градиента температуры «экватор–полюс» связаны пространственно-временные изменения зональной и меридиональной циркуляций и вихрей (циклонов и антициклонов), ответственных за меридиональный обмен воздушных масс. Численное моделирование тропосферной циркуляции показало, что существует однозначная связь между перепадом температуры «экватор–полюс» с напряженностью западного переноса воздушных масс. Полученные оценки оказались в хорошем согласии с реальными пространственно-временными характеристиками западного переноса [14].

Материалы и методы исследований. Используются данные Национальных центров экологической информации (NCEI, <https://www.ncsi.noaa.gov>) о температуре по 5° -ным квадратам за период с 1956 по 2023 г. Проанализированы два подпериода, продолжительность которых

близка к рекомендованному Всемирной метеорологической организацией (ВМО) тридцатилетнему периоду для вычисления норм и других статистических параметров: а) 1956–1989 гг. и б) 1990–2023 гг.

Принимая во внимание, что ряды изменений температуры, кроме трендовой компоненты, содержат значительные по амплитуде короткопериодные флюктуации, выбор отрезка ряда для подсчета коэффициентов линейного тренда в значительной мере предопределяет результат оценки величины арктического усиления потепления климата. В связи с этим для оценки степени арктического усиления потепления климата использован другой подход, который основан на сравнительном анализе более устойчивых параметров климата – климатических норм для периода наиболее выраженного современного потепления климата (1990–2023 гг.) и предшествующего ему периода (1956–1989 гг.).

Первый указанный период характеризуется самым значительным ростом температуры. Он является частью надежно документированного периода инструментальных наблюдений (1856–2024 гг.), когда плотность метеорологической сети на Земном шаре была вполне удовлетворительной. В период с 1990 по 2023 г. отмечалось 15 самых теплых лет за историю наблюдений.

На Земном шаре нормы температуры для каждого месяца года 34-летнего периода (1990–2023 гг.) сравнивались с нормами температуры предшествующего ему периода равной продолжительности. Указанные периоды близки к рекомендованному Всемирной метеорологической организацией ООН (ВМО) 30-летнему периоду для надежного вычисления первого статистического момента (климатической нормы).

Как показано в многочисленных работах, наиболее яркой по проявлению в изменении климата является квазишестидесятилетняя компонента. Ее продолжительность находится в интервале 55–70 лет [1; 15]. Используемый для анализа ряд температуры (1956–2023 гг.) близок по длительности к указанной квазишестидесятилетней компоненте в изменении климата, что также было необходимо учесть при анализе изменений климатических норм температуры.

Результаты и их обсуждение. *Изменение климатических норм температуры в высоких широтах Северного и Южного полушарий.* Из рис. 1 следует, что во второй половине года, как правило, межпериодные разности норм температуры несколько выше. Самые большие межпериодные разности норм температуры особенно характерны для октября–ноября в полярной шапке (75–90° с. ш.). Особенно интенсивное увеличение межпериодных разностей температуры (климатических норм) наблюдается в арктических широтах, полностью покрытых льдом. Это и есть

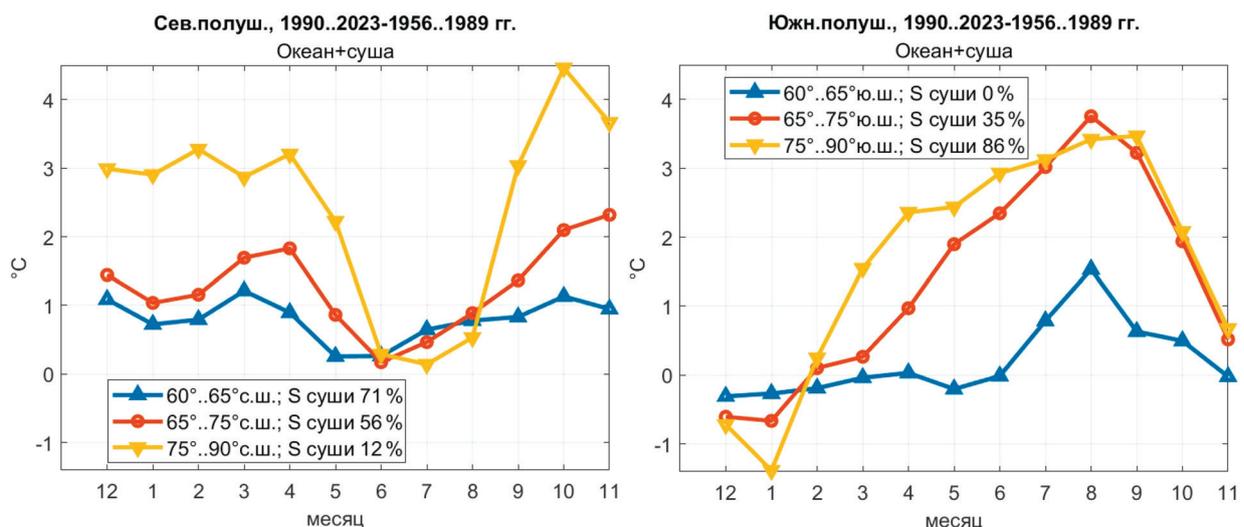


Рис. 1. Межпериодные разности норм среднемесячной температуры для различных широтных поясов Северного и Южного полушарий

Fig. 1. Inter-period differences of mean monthly temperature norms for different latitudinal belts of the Northern and Southern Hemispheres

широтная зона, где арктическое усиление потепления климата наиболее выражено [2]. Здесь величины изменений климатических норм температуры в период современного потепления климата (1990–2023 гг.) в холодное время года оказались на 2,5–3,0 °С выше по сравнению с субарктическими широтами (60–65° с. ш.), т. е. отмечается явный скачок в увеличении межпериодных разностей температуры при переходе в полярную шапку (75–90° с. ш.).

Меньшее разнообразие обнаружено в характере и величинах изменений межпериодных разностей температуры в Южном полушарии с его однородной подстилающей поверхностью, где океан занимает 81 % территории, а антарктическая, почти полностью покрытая льдом, высокоширотная континентальная зона является громадным холодильником. Его влияние на общую циркуляцию и термический режим делают изменения межпериодных разностей температуры в подавляющем числе месяцев года практически идентичными (рис. 1). Величины изменений межпериодных разностей температуры в подавляющем числе месяцев года возрастают с увеличением широты (рис. 1). Наибольшие изменения межпериодных разностей температуры особенно существенны в широтной зоне 65–90° ю. ш. Они начинают возрастать с конца антарктической осени (IV–V мес.) до антарктической весны (IX мес.), достигая максимальных значений в конце антарктической зимы (VIII) – начале весны (IX мес.).

В субантарктических широтах (60–65° ю. ш.), где начинает сказываться влияние Южного океана, разность климатических норм в подавляющем числе месяцев года близка к нулю и только во второй половине зимы – начале весны разность климатических норм находится в интервале 0,7–1,5 °С.

Анализ показал, что среднегодовое усиление потепления климата в высоких широтах Южного полушария слабее, чем в высоких широтах Северного полушария приблизительно в 1,5 раза. В теплые месяцы года (декабрь–январь) наблюдается даже уменьшение климатических норм температуры на 0,5–1,0 °С в период глобального потепления климата (1990–2023 гг.) по сравнению с предыдущим периодом такой же длительности (рис. 1). Усиление потепления в высоких широтах Южного полушария особенно выражено осенью, зимой и в начале весны (апрель–сентябрь). Этот вывод перекликается с результатами, полученными нами в работе [15], где показано, что изменения скорости потепления в полярной шапке океанического Западного полушария наиболее заметно, а характер изменений температуры в годовом ходе почти полностью повторяет изменения годового хода температуры во всей полярной шапке Антарктиды. Это свидетельствует о том, что термодинамические условия океанического Западного полушария, где моря Росса, Амудсена, Беллинсгаузена и Уэддэлла внедряются в высокие широты Южного полушария, определяют генеральные особенности скорости потепления полярной шапки Южного полушария в годовом ходе. В Восточной части Антарктиды в последние годы не наблюдается выраженного потепления климата.

Зависимость величины межпериодных разностей температуры от широты. Отдельного рассмотрения заслуживают результаты анализа величины межпериодных разностей температуры для отдельных широтных поясов Северного полушария и отдельных сезонов года (рис. 2).

Из рис. 2 следует, что наибольший рост межпериодных разностей температуры с широтой обнаружен для осени. Это свидетельствует о том, что максимальный рост скорости современного потепления климата (1990–2023 гг.) по сравнению с предшествующим периодом (1956–1989 гг.) с широтой характерен для осени. Наибольшие потоки явного и скрытого тепла в октябре–ноябре зарегистрированы в Северном Ледовитом океане [11; 15]. Следует также отметить, что модельные оценки притоков тепла из Северного Ледовитого океана в атмосферу для самого крайнего сценария RCP8.5 (конец XXI в.) в сентябре–октябре оказались более значительными по сравнению с притоками тепла зимой и весной в настоящее время [11].

Ранее было показано, что увеличивающиеся притоки тепла из океана в атмосферу в последние десятилетия являются одним из факторов арктического усиления потепления климата [15]. Приведенный в настоящей работе анализ межпериодных разностей температуры в различные месяцы года подтверждает этот вывод.

Наиболее выраженный рост межпериодных разностей температуры (климатических норм) характерен для осени и зимы, он слабее весной, особенно над океаническими акваториями. Летом

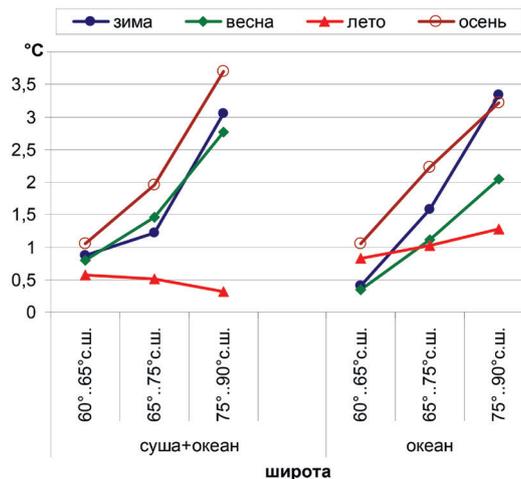


Рис. 2. Зависимость величины межпериодных разностей норм температуры от широты для различных сезонов года (Северное полушарие)

Fig. 2. Dependence of the magnitude of inter-period differences of temperature norms on latitude for different seasons of the year (Northern Hemisphere)

рост межпериодных разностей температуры с увеличением широты заметен лишь над океаническими акваториями и совершенно отсутствует над территориями, включающими сушу и океан.

Анализ разностей температуры «экватор–полюс» в Северном полушарии. Анализ результатов изменений разностей температуры «экватор–полюс» ($0...10^{\circ}$ с. ш. – $65...90^{\circ}$ с. ш.) для разных месяцев года показывает, что в период наиболее выраженного потепления климата (1990–2023 гг.) разность температуры во все месяцы года, кроме июня и июля, уменьшается по отношению к предшествующему периоду 1956–1989 гг. такой же длительности (табл. 1).

Таблица 1. Разности температуры «экватор–полюс» ($0-10^{\circ}$... $65-90^{\circ}$ с. ш.) и их разности для двух периодов времени (1956–1989 и 1990–2023 гг.)

Table 1. Equator-pole temperature differences ($0-10^{\circ}$ to $65-90^{\circ}$ N) and their differences for two time periods (1956–1989 and 1990–2023)

Период Period	Месяц Month												Год Year
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1990–2023	50,7	50,7	48,0	40,8	31,6	24,8	21,9	22,9	28,2	36,6	44,7	48,9	37,5
1956–1989	52,1	52,4	49,8	42,7	32,5	24,5	21,7	23,2	29,8	39,3	47,1	50,5	38,8
(1990–2023) – (1956–1989)	–1,5	–1,7	–1,8	–2,0	–0,9	0,3	0,1	–0,3	–1,6	–2,6	–2,4	–1,6	–1,3

В целом за год при переходе от первого ко второму периоду отмечается уменьшение среднегодовых разностей температуры на $1,3^{\circ}\text{C}$. Наибольшие межпериодные разности градиентов температуры характерны для весны и осени: в апреле – до -2°C , в октябре и ноябре – $-2,4...-2,6^{\circ}\text{C}$. Как показано в наших предыдущих работах [1; 15], на указанные месяцы года приходится наиболее сильное ускорение потепления климата. В октябре и ноябре, как показывают модельные оценки [11], отмечается рост потока явного и скрытого тепла для наиболее жесткого сценария RCP8.5. Максимум радиационного форсинга может наступить в конце XXI в. Уже в последние десятилетия максимум потепления в высоких широтах смещается на осень.

Уменьшение разностей температуры «экватор–полюс» в последние десятилетия почти во все месяцы года, кроме июня и июля, где изменения разностей близки к нулю, приводит к ослаблению зонального переноса атмосферного воздуха.

Проведенный нами дополнительный анализ изменений температуры в различных широтных зонах показал, что среднемесячные значения межпериодных разностей температуры в приэкваториальных широтах варьируют в интервале $0,36-0,54^{\circ}\text{C}$, тогда как в полярной шапке –

в интервале 0,24–3,15 °С. Это означает, что изменения разностей температуры «экватор–полюс» в основном регулируются изменениями температуры в полярной шапке, где, собственно, и наблюдается арктическое усиление потепления климата.

Наибольшее снижение разностей температуры «экватор–полюс» происходило вблизи дат весеннего (март–апрель) и, особенно, осеннего равноденствия (октябрь–ноябрь). Среднегодовое снижение разностей температуры «экватор–полюс» в период современного потепления составило –1,3 °С.

Анализ разностей температуры «экватор–полюс» в Южном полушарии. Разности температуры «экватор–полюс» (0–10°...65–90° ю. ш.) вместе с их разностями для двух периодов времени (1956–1989 и 1990–2023 гг.) представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Разности температуры «экватор–полюс» (0–10°...65–90° ю. ш.) и их разности для двух периодов времени (1956–1989 и 1990–2023 гг.)
 Table 2. Equator-pole temperature differences (0–10° to 65–90°S) and their differences for two time periods (1956–1989 and 1990–2023)

Период Period	Месяц Month												Год Year
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1990–2023	35,2	41,6	50,0	56,2	58,8	59,6	60,8	61,1	58,5	51,3	40,9	34,6	50,7
1956–1989	33,9	41,4	50,4	57,4	60,5	61,8	63,5	64,4	61,6	53,0	41,1	33,5	51,9
(1990–2023) – (1956–1989)	1,4	0,2	–0,4	–1,2	–1,7	–2,2	–2,7	–3,3	–3,1	–1,7	–0,2	1,1	–1,2

Из табл. 2 следует, что в Южном полушарии разности температуры «экватор–полюс» более, чем на 13 °С превосходят разности Северного полушария. Температурные градиенты в Южном полушарии во втором периоде (1990–2023 гг.) также уменьшились, за исключением градиентов температуры для трех летних месяцев. В изменении межпериодных разностей температуры отсутствует «двугорбость» – их значения плавно уменьшаются от середины лета в Южном полушарии (начало года) до конца зимы и затем возрастают вплоть до января. В Южном полушарии наибольшие межпериодные разности температуры характерны для зимних месяцев (июль–август) и начала осени (сентябрь) при среднегодовом уменьшении разности температуры, сравнимой с таковой в Северном полушарии (1,2 и 1,3 °С соответственно).

В Южном полушарии вблизи зимнего солнцестояния (декабрь–январь, теплое время года) межпериодная разность температуры составляет 1,2 °С, тогда как в Северном полушарии она летом (июнь–август) близка к нулю. Это означает, что в теплые месяцы года (декабрь–январь) градиент температуры «экватор–полюс» в период современного потепления климата в Южном полушарии стал выше более чем на 1 °С по сравнению с предыдущим периодом (1956–1989 гг.), а в Северном полушарии летом (июнь–июль) он практически не изменился (межпериодная разность температуры была близка к нулю).

Сравнительный анализ межпериодных разностей температуры как для Северного, так и для Южного полушарий показал, что для периода наиболее выраженного современного потепления климата (1990–2023 гг.) характерно уменьшение разностей температуры «экватор–полюс» по сравнению с предыдущим 34-летним периодом в подавляющем числе месяцев года. В то же время отмечается заметное различие характера годового хода изменений межпериодных разностей этих градиентов для Северного и Южного полушарий. Изменение термического режима высоких широт в последние десятилетия можно рассматривать в качестве генератора современных изменений общей циркуляции атмосферы и климата, таких как:

- с уменьшением межширотных контрастов температуры высоких и низких широт увеличиваются вероятности блокирования и создания междолготных контрастов увлажнения с формированием в отдельных районах в зависимости от сезона либо засух, либо суровых зим;

- при потеплении в полярных широтах происходит усиление муссонной циркуляции зимой и ослабление ее летом; в оба сезона могут создаваться условия для усиления циклоничности над океаном и антициклоничности над материком. В полярных и субполярных районах рост влаго-содержания является одной из причин увеличения осадков при потеплении в этих районах;

при арктическом усилении потепления климата траектории циклонов смещаются к северу. Подобное смещение траекторий циклонов уже наблюдалось при потеплении Арктики в 20-е – начале 40-х годов прошлого столетия [1].

Выводы

1. Величины норм среднемесячной температуры в различные месяцы года в период современного изменения климата (1990–2023 гг.) и предшествующий ему период равной продолжительности (1956–1989 гг.) зависят от широты; выявлен линейный рост межпериодных изменений норм температуры от субтропических широт до полярной шапки (75–90° с. ш.). Наибольший рост норм температуры с широтой в период современного потепления климата наблюдается осенью. Его уменьшение характерно для зимы, весны и лета. Летом зависимость величин изменений норм от широты обнаружена только для океанических акваторий. Среднегодовое усиление потепления в высоких широтах Южного полушария в 1,5 раза слабее, чем в северных широтах. Усиление потепления выражено в высоких широтах западной части Антарктики.

2. Возможные причины выявленных различий межпериодных разностей температуры (норм) в годовом ходе разных широтных зон Земного шара могут быть связаны с разными начальными условиями, на которые накладывается радиационный форсинг, определяемый в значительной мере ростом содержания в атмосфере парниковых газов антропогенного происхождения, а также изменением содержания в атмосфере аэрозолей вулканического и антропогенного происхождения и другими факторами. Величина и характер проявления форсинга в изменении межпериодных разностей температуры определяются площадью и пространственным распределением океанических акваторий и суши, а также характером общей циркуляции атмосферы в разных широтных зонах.

3. В Северном полушарии разности температуры «экватор–полюс» в период современного потепления климата уменьшились во все месяцы года, кроме июня и июля. Это означает, что уменьшение разности температуры «экватор–полюс» определяется главным образом арктическим усилением потепления климата. Указанное уменьшение разностей должно приводить к ослаблению зонального переноса атмосферного воздуха.

4. При общем среднегодовом снижении разностей температуры на 1,3 °С, особенно выраженное снижение произошло в осенние месяцы; на указанные месяцы года приходится наиболее сильное ускорение потепления климата, что согласуется с модельными оценками роста потока явного и скрытого тепла в октябре–ноябре в Северном Ледовитом океане при наблюдающемся усилении радиационного форсинга.

5. В Южном полушарии при более высоких разностях температуры «экватор–полюс» также произошло их уменьшение в период современного потепления климата за исключением трех летних месяцев. Однако характер изменений разностей температуры в годовом ходе отличается: наблюдается плавное уменьшение межпериодных разностей градиентов с начала года (середины лета) до конца зимы с последующим их увеличением в теплые месяцы в конце года, что свидетельствует о существенном различии характера изменений межпериодных разностей градиентов температуры по сравнению с Северным полушарием.

6. Уменьшения разностей температуры «экватор–полюс» приводят к ряду последствий в изменении общей циркуляции атмосферы и климата, таких как: ослабление зональных переносов воздушных масс, изменение повторяемости таких климатических экстремальных явлений, как засухи, наводнения, суровые и теплые зимы и др.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (грант X23РНФ-122).

Acknowledgments. The work was carried out with the financial support of the BRFFR (grant X23РНФ-122).

Список использованных источников

1. Логинов, В. Ф. Диагноз глобального климата / В. Ф. Логинов. – СПб., 2021. – 304 с.
2. Serreze, M. C. The Arctic amplification debate / M. C. Serreze, J. A. Francis // *Climatic Change*. – 2006. – Vol. 76. – P. 241–264. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-9017-y>
3. Алексеев, Г. В. Арктическое измерение глобального потепления / Г. В. Алексеев // *Лед и снег*. – 2014. – Т. 54, № 2. – С. 53–68.

4. Impact of atmospheric heat and moisture transport on the Arctic warming / G. Alekseev, S. Kuzmina, L. Bobylev [et al.] // *International Journal of Climatology*. – 2019. – Vol. 39, N 8. – P. 3582–3592. <https://doi.org/10.1002/joc.6040>
5. Enhanced wintertime greenhouse effect reinforcing Arctic amplification and initial sea-ice melting / Y. Cao, Sh. Liang, X. Chen [et al.] // *Scientific Reports*. – 2017. – Vol. 7. – Art. 8462. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08545-2>
6. Andry, O. Time-dependent variations in the Arctic's surface albedo feedback and the link to seasonality in sea ice / O. Andry, R. Bintanja, W. Hazeleger // *Journal of Climate*. – 2016. – Vol. 30, N 1. – P. 393–410. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-15-0849.1>
7. Bekryaev, R. V. Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern arctic warming / R. V. Bekryaev, I. V. Polyakov, V. A. Alexeev // *Journal of Climate*. – 2010. – Vol. 23, N 14. – P. 3888–3906. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3297.1>
8. Blackport, R. Insignificant effect of Arctic amplification on the amplitude of midlatitude atmospheric waves / R. Blackport, J. A. Screen // *Science Advances*. – 2020. – Vol. 6, N 8. – Art. aay2880. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay2880>
9. Evidence for ice-ocean albedo feedback in the Arctic Ocean shifting to a seasonal ice zone / H. Kashiwase, K. I. Ohshima, S. Nihashi, H. Eicken // *Scientific Reports*. – 2017. – Vol. 7, N 1. – Art. 8170. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08467-z>
10. Minimal influence of reduced Arctic sea ice on coincident cold winters in mid-latitudes / R. Blackport, J. A. Screen, K. Wiel, R. Bintanja // *Nature Climate Change*. – 2019. – Vol. 9. – P. 697–704. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0551-4>
11. On the increasing importance of air-sea exchanges in a thawing arctic: a review / P. C. Taylor, B. M. Hegyi, R. C. Boeke, L. N. Boisvert // *Atmosphere*. – 2018. – Vol. 9, N 2. – Art. 41. <https://doi.org/10.3390/atmos9020041>
12. Worby, A. P. Ocean-atmosphere energy exchange over thin, variable concentration Antarctic pack ice / A. P. Worby, I. Allison // *Annals of Glaciology*. – 1991. – Vol. 15. – P. 184–190. <https://doi.org/10.3189/1991AoG15-1-184-190>
13. Yu, L. Surface heat budget in the Southern Ocean from 42° S to the Antarctic marginal ice zone: four atmospheric reanalyses versus icebreaker Aurora Australis measurements / L. Yu, X. Jin, E. W. Schulz // *Polar Research*. – 2019. – Vol. 38. – Art. 3349. <https://doi.org/10.33265/polar.v38.3349>
14. Витинский, Ю. И. Солнце и атмосфера Земли / Ю. И. Витинский, А. И. Оль, Б. И. Сазонов; под ред. Э. Г. Мустеля. – Л., 1976. – 351 с.
15. Логинов, В. Ф. Современные изменения климата / В. Ф. Логинов. – СПб., 2024. – 267 с.

References

1. Loginov V. F. *Diagnosis of global climate*. St. Petersburg, 2021. 304 p. (in Russian).
2. Serreze M. C., Francis J. A. The Arctic amplification debate. *Climatic Change*, 2006, vol. 76, pp. 241–264. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-9017-y>
3. Alekseev G. V. Arctic dimension of global warming. *Led i sneg = Ice and Snow*, 2014, vol. 54, no. 2, pp. 53–68 (in Russian).
4. Alekseev G., Kuzmina S., Bobylev L., Urazgildeeva A., Gnatiuk N. Impact of atmospheric heat and moisture transport on the Arctic warming. *International Journal of Climatology*, 2019, vol. 39, no. 8, pp. 3582–3592. <https://doi.org/10.1002/joc.6040>
5. Cao Y., Liang Sh., Chen X., He T., Wang D., Cheng X. Enhanced wintertime greenhouse effect reinforcing Arctic amplification and initial sea-ice melting. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, art. 8462. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08545-2>
6. Andry O., Bintanja R., Hazeleger W. Time-dependent variations in the Arctic's surface albedo feedback and the link to seasonality in sea ice. *Journal of Climate*, 2016, vol. 30, no. 1, pp. 393–410. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-15-0849.1>
7. Bekryaev R. V., Polyakov I. V., Alexeev V. A. Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern arctic warming. *Journal of Climate*, 2010, vol. 23, no. 14, pp. 3888–3906. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3297.1>
8. Blackport R., Screen J. A. Insignificant effect of Arctic amplification on the amplitude of midlatitude atmospheric waves. *Science Advances*, 2020, vol. 6, no. 8, art. aay2880. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay2880>
9. Kashiwase H., Ohshima K. I., Nihashi S., Eicken H. Evidence for ice-ocean albedo feedback in the Arctic Ocean shifting to a seasonal ice zone. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, no. 1, art. 8170. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08467-z>
10. Blackport R., Screen J. A., Wiel K., Bintanja R. Minimal influence of reduced Arctic sea ice on coincident cold winters in mid-latitudes. *Nature Climate Change*, 2019, vol. 9, pp. 697–704. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0551-4>
11. Taylor P. C., Hegyi B. M., Boeke R. C., Boisvert L. N. On the increasing importance of air-sea exchanges in a thawing arctic: a review. *Atmosphere*, 2018, vol. 9, no. 2, art. 41. <https://doi.org/10.3390/atmos9020041>
12. Worby A. P., Allison I. Ocean-atmosphere energy exchange over thin, variable concentration Antarctic pack ice. *Annals of Glaciology*, 1991, vol. 15, pp. 184–190. <https://doi.org/10.3189/1991AoG15-1-184-190>
13. Yu L., Jin X., Schulz E. W. Surface heat budget in the Southern Ocean from 42° S to the Antarctic marginal ice zone: four atmospheric reanalyses versus icebreaker Aurora Australis measurements. *Polar Research*, 2019, vol. 38, art. 3349. <https://doi.org/10.33265/polar.v38.3349>
14. Vitinsky Yu. I., Ohl A. I., Sazonov B. I. *The Sun and the Earth's Atmosphere*. Leningrad, 1976. 351 p. (in Russian).
15. Loginov V. F. *Modern Climate Change*. St. Petersburg, 2024. 267 p. (in Russian).

Информация об авторе

Логинов Владимир Федорович – академик, д-р географ. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nature@ecology.basnet.by.

Information about the author

Loginov Vladimir F. – Academician, D. Sc. (Geography), Professor, Chief Researcher. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220076, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nature@ecology.basnet.by.