

## ГЕОГРАФИЯ. ГЕОЭКОЛОГИЯ GEOGRAPHY. GEOECOLOGY

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2025-1-5-14>

УДК 551.583

Поступила в редакцию 28.03.2025

Received 28.03.2025

### ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ ТРЕНДОВ И СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКИХ ОТКЛОНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В РАЗЛИЧНЫХ РЕГИОНАХ ЗЕМНОГО ШАРА ЗА ПЕРИОД С 1956 ПО 2023 г.

В. Ф. Логинов, В. С. Микуцкий, Ю. А. Бровка

*Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь*

**Аннотация.** Представлены результаты сравнительного анализа изменений величин линейных трендов и среднеквадратических отклонений температуры в различные месяцы года в разных широтных и долготных зонах Земного шара с привязкой к особенностям общей циркуляции атмосферы в период наиболее быстрого потепления климата (1990–2023 гг.) и предшествующий ему период такой же продолжительности (1956–1989 гг.).

Отдельному рассмотрению подвергнуты особенности изменений величин линейных трендов и среднеквадратических отклонений температуры в каждом из трех синоптических районов Северного полушария, а также регионе сезонного Сибирского максимума атмосферного давления.

С учетом арктического усиления потепления климата в последние десятилетия особое внимание было уделено исследованию изменений величины линейных трендов и изменчивости температуры в высоких широтах Земного шара с акцентом на анализ их различий в Северном и Южном полушариях.

Рассмотрены причины увеличения значений положительных трендов температуры в высоких широтах Северного полушария в период современного потепления климата (1990–2023 гг.) в связи с увеличением притоков явного и скрытого тепла в Северном Ледовитом океане в течение последних нескольких десятилетий при образовании льда в осенний период. Получено подтверждение выявленного ранее смещения максимальных скоростей роста температуры в северной полярной шапке на август – ноябрь.

**Ключевые слова:** линейный тренд; среднеквадратическое отклонение температуры; естественный синоптический район; широтный пояс.

**Для цитирования.** Логинов В. Ф., Микуцкий В. С., Бровка Ю. А. Оценка изменений трендов и среднеквадратических отклонений температуры в различных регионах Земного шара за период с 1956 по 2023 г. // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 5–14.

### ASSESSMENT OF CHANGES IN TRENDS AND STANDARD DEVIATIONS OF TEMPERATURE IN DIFFERENT REGIONS OF THE GLOBE FOR THE PERIOD FROM 1956 TO 2023

V. F. Loginov, V. S. Mikutsky, Yu. A. Brovka

*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

**Abstract.** A comparative analysis of changes in the linear trends and standard deviations of temperature in different months of the year in different latitudinal and longitudinal zones of the globe with reference to the peculiarities of the general atmospheric circulation during the period of the most rapid climate warming (1990–2023) and the preceding period of the same duration (1956–1989) had been carried out.

The peculiarities of changes in the linear trends and standard deviations of temperature in each of the three synoptic regions of the Northern hemisphere and in the region of the seasonal Siberian maximum of atmospheric pressure were considered separately.

Taking into account the Arctic increase in climate warming in recent decades, special attention was paid to the study of changes in the magnitude of linear trends and temperature variability in the high-latitude zones of the globe with a focus on analysing their differences in the Northern and Southern hemispheres.

The reasons for the increase in the positive temperature trends at high latitudes of the Northern hemisphere during the period of modern climate warming (1990–2023) due to the increase in the inflows of apparent and latent heat in the Arctic ocean during the last few decades during ice formation in the autumn period were considered. Confirmation of the previously revealed shift of the maximum rates of temperature growth in the north polar cap to August–November had been obtained.

**Keywords:** linear trend; standard deviation of temperature; natural synoptic region; latitudinal belt.

**For citation.** Loginov V. F., Mikutskiy V. S., Brovka Yu. A. Assessment of changes in trends and standard deviations of temperature in different regions of the globe for the period from 1956 to 2023. *Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 5–14.

**Введение.** Результаты исследований пространственно-временных изменений линейных трендов температуры (коэффициента  $\beta$  линейного тренда  $y = a + \beta x$ ) получали многократно [1–8]. Настоящая работа является логическим продолжением исследований, представленных в наших более ранних публикациях [1–5], а также работах других авторов [6–8]. Пространственно-временные особенности изменений среднеквадратических отклонений температуры ( $\sigma$ ) геопотенциала поверхности 1000 гПа в Северном полушарии представлены в нашей публикации [9]. Как правило, подавляющее число работ проводилось без привязки к географическим особенностям общей циркуляции атмосферы. В настоящей работе этот недостаток был частично устранен: особенности пространственно-временных изменений зональной и меридиональной циркуляции, а также широтный ход кинетической энергии вихрей (циклонов и антициклонов) на  $H_{500}$  в реальной атмосфере, в моделях сухой и влажной атмосферы принимались во внимание при анализе изменений  $\beta$  и  $\sigma$  в разных широтных зонах в различные временные периоды.

Еще в начале 1960-х годов Б. И. Сазоновым [10, 11] по 12 широтным кругам ( $20\text{--}75^\circ$  с. ш. через каждые  $5^\circ$ ) с ежедневных высотных барических карт  $H_{500}$  были сняты значения индекса возмущенности атмосферной циркуляции. Анализ среднемесячных значений индексов атмосферной возмущенности показал, что в экваториальных областях циклоны и антициклоны отсутствуют и напряженность меридиональной циркуляции здесь мала. В умеренных широтах (от  $30$  до  $55^\circ$  с. ш.) происходит примерно линейное нарастание напряженности меридиональной циркуляции и примерно линейное нарастание числа циклонов и антициклонов [10, 11]. Наибольшая интенсивность барических образований в умеренных широтах отмечается зимой, а наименьшая – летом. В высоких широтах ( $60\text{--}75^\circ$  с. ш.) рост интенсивности барических образований прекращается: в зависимости от сезона года здесь наблюдается чаще слабое падение интенсивности меридиональной циркуляции или «плато» в ее изменении (февраль – март). В приполярных широтах (широта более  $70^\circ$  с. ш.) просматривается весьма слабый рост интенсивности меридиональной циркуляции, особенно в теплые месяцы года. В этих широтах выявлено наличие полугодовых вариаций в интенсивности циклонов и антициклонов, а также напряженности меридиональной циркуляции. В июне – июле и феврале – марте здесь отмечается сильная возмущенность атмосферной циркуляции. Характерной особенностью тропосферной возмущенности является наличие максимума напряженности меридиональной циркуляции на широтах  $55\text{--}58^\circ$  с. ш.

Известно, что максимум напряженности меридиональной циркуляции не обнаруживает смещения в средней и верхней тропосфере по широте в течение года, он расположен постоянно в интервале широт  $50\text{--}55^\circ$  с. ш., тогда как максимум зональной циркуляции мигрирует по широте в течение года.

Широтный ход кинетической энергии на  $H_{500}$  в реальной атмосфере имеет максимум вблизи  $50^\circ$  с. ш., а в моделях сухой атмосферы – вблизи  $40^\circ$  с. ш. Минимумы широтного хода в обоих случаях расположены в высоких (полярных) и низких ( $0\text{--}15^\circ$  с. ш.) широтах. Введение влагооборота приближает модель к реальным условиям, но сильно занижает максимальную энергию вихрей и делает их широтный ход вялым: высокие значения кинетической энергии размыты и находятся в средних широтах, другой максимум находится вблизи экватора, минимум – в полярных широтах, а слабый (вторичный) минимум вблизи  $20^\circ$  с. ш. [11–14].

В нижнем 2–3-километровом слое атмосферы могут существовать свои источники и стоки кинетической энергии по сравнению с таковыми в верхней и средней тропосфере [11]. В этой работе сделан интригующий вывод о том, что основные долготные и широтные особенности общей циркуляции атмосферы формируются не у подстилающей поверхности (классические представления), а на высотах 8–12 км. По мнению авторов, они связаны с влиянием электромагнитного солнечного излучения и заряженных частиц солнечного и галактического происхождения.

С учетом вышеизложенного возникает необходимость рассмотреть широтные особенности изменений величин трендов температуры в различных широтных зонах и разные месяцы года для двух временных периодов: 1956–1989 и 1990–2023 гг. Проводимые нами в настоящее время исследования показали, что для этих двух периодов характерны отличающиеся друг от друга величины градиентов температуры «экватор – полюс». Для периода с 1990 по 2023 г. характерно уменьшение напряженности зональной циркуляции и рост напряженности меридиональной циркуляции и, как следствие, междуширотного воздухообмена. Поскольку максимум кинетической энергии барических образований (циклонов и антициклонов) и наибольшие значения коэффициентов макротурбулентной диффузии происходят около  $50^\circ$  с. ш., то в этой широтной зоне должен наблюдаться максимальный воздухообмен и, вероятно, наибольший рост величины линейных трендов температуры.

Однако, как установлено в работах [10, 11], наибольшая напряженность меридиональной циркуляции в средней тропосфере ( $H_{500}$ ) в различные месяцы года имеет место в широтной зоне  $55\text{--}58^\circ$  с. ш.,

а в высоких широтах ( $60\text{--}75^\circ$  с. ш.) два раза в год (июнь – июль и февраль – март) наблюдается сильная возмущенность атмосферной циркуляции: формируется квазиполугодовая цикличность в изменении напряженности меридиональной циркуляции.

**Материалы и методика исследований.** Предметом исследования в работе является годовой ход температуры атмосферы в Северном полушарии.

Использованы данные Национальных центров экологической информации (NCEI) (<https://www.ncei.noaa.gov>) о температуре по 5-градусным квадратам за период с 1956 по 2023 г. Проанализированы два подпериода, продолжительность которых близка к рекомендованному Всемирной метеорологической организацией (ВМО) 30-летнему периоду для вычисления норм и других статистических параметров: а) 1956–1989 гг. и б) 1990–2023 гг. Некоторое отклонение от рекомендаций ВМО связано со следующими причинами. С конца 1980-х – начала 1990-х годов отмечалось резкое увеличение температуры высоких широт Северного полушария, обусловившее такое же резкое снижение ледовитости Северного Ледовитого океана. Через два десятилетия скорость уменьшения ледовитости замедлилась [4].

Вышеизложенное послужило одним из аргументов при выборе границы двух подпериодов. Еще одним аргументом стала оценка повторяемости наиболее теплых лет за период инструментальных наблюдений: 15 наиболее теплых лет на Земном шаре за период (1850–2024 гг.) относятся к последнему периоду (1990–2024 гг.). Следует также отметить, что произошло увеличение до  $1 \text{ Вт}/\text{м}^2$  радиационного воздействия парниковых газов на климат к началу выбранного периода по сравнению с прединструментальным периодом (1750–1900 гг.). В конце этого периода радиационный форсинг парниковых газов и аэрозолей антропогенного происхождения превысил  $2,5 \text{ Вт}/\text{м}^2$ , что близко к пороговому значению первого из четырех сценариев изменений парниковых газов (RCP 2.6) [The IPCC's Fifth Assessment Report (AR5); [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/04/ipcc\\_ar5\\_leaflet.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/04/ipcc_ar5_leaflet.pdf)] и повышению температуры более чем на  $1^\circ\text{C}$ , по сравнению с доиндустриальным уровнем, при принятом Парижским соглашением пороговом значении потепления  $2^\circ\text{C}$  (Adoption of the Paris agreement, Paris, 2015; <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/I09r01.pdf>). Дополнительным аргументом в пользу выбора названных границ двух подпериодов послужила работа [15], в которой при расчетах величины линейных трендов температуры и вклада воздухообмена между полярной шапкой и остальными широтами ( $0\text{--}60^\circ$  с. ш.) начальными годами использованного периода наблюдений взяты 1989 и 1990 г.

Исследование годового хода температуры выполнено для отдельных широтных зон. Для анализа были выбраны следующие зоны:  $0\text{--}10^\circ$  с. ш.,  $30\text{--}40^\circ$  с. ш.,  $50\text{--}55^\circ$  с. ш.,  $55\text{--}60^\circ$  с. ш.,  $65\text{--}70^\circ$  с. ш.,  $75\text{--}90^\circ$  с. ш. (полярная шапка).

**Результаты и их обсуждение.** Рассмотрим тренды температуры для каждого месяца года для периода современного потепления климата (1990–2023 гг.) и предшествующего ему периода той же продолжительности (1956–1989 гг.) для различных широтных зон, выделенных с учетом особенностей изменений кинетической энергии вихрей (циклонов и антициклонов) и возмущенности меридиональной циркуляции в средней тропосфере ( $H_{500}$ ) в разных широтных зонах (см. таблицу).

Из рис. 1 видно, что величины линейных трендов возрастают с ростом широты, достигая максимальных значений в полярной шапке в холодное время года. Этим самым подтверждается установленное ранее арктическое усиление потепления климата.

Коэффициенты линейного тренда температуры в различных широтных поясах Северного полушария в годовом ходе для двух временных периодов представлены на рис. 1 (среднегодовые значения отмечены пунктирной линией). Коэффициенты линейного тренда температуры в полярной шапке (см. рис. 1, е) максимальны в период с октября по февраль и минимальны в июне и июле в период наибольшего роста температуры (1990–2023 гг.). В предыдущий временной период величины трендов температуры в различные месяцы года изменились незначительно: для теплого времени года (апрель – август) был характерен небольшой и размытый минимум в скорости изменения температуры (вплоть до слабого отрицательного тренда в апреле и июле), а в месяцы холодного времени года (сентябрь – март, исключая ноябрь) отмечался слабый положительный линейный тренд температуры.

В приполярных областях ( $65\text{--}70^\circ$  с. ш.) значения коэффициентов  $\beta$  заметно уменьшаются по сравнению с полярной шапкой, а в более южных широтных зонах значения коэффициентов линейного тренда температуры становятся существенно ниже. Следует отметить, что если в высоких широтах ( $65\text{--}90^\circ$  с. ш.) в последний период (1990–2023 гг.) максимум значений трендов в основном наблюдается в осенние месяцы года, а минимум – на июнь – июль, то для более южных зон максимум приходится чаще на конец лета – осень, захватывая иногда начало зимы. Отмеченный характер усиления потепления во втором полугодии кардинально отличается от картины потепления в первом периоде (1956–1989 гг.), когда на вторую половину года приходились наиболее низкие (отрицательные) значения трендов температуры; в средних широтах в начале и середине весны, наоборот, отмечалось заметное потепление.

**Коэффициенты линейных трендов температуры в широтных поясах Северного полушария  
для двух временных периодов (1956–1989 и 1990–2023 гг.)**

**Coefficients of linear trends in Northern Hemisphere latitudinal belt temperature  
for two time periods (1956–1989 and 1990–2023)**

Временной период, годы	Месяц												Средне- годовое значение
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
<i>0–10° с. ш.</i>													
1990–2023	0,013	0,013	0,014	0,015	0,016	0,014	0,019	0,019	0,020	0,022	0,021	0,019	0,017
1956–1989	0,012	0,011	0,013	0,013	0,013	0,015	0,013	0,013	0,015	0,015	0,014	0,012	0,013
<i>30–40° с. ш.</i>													
1990–2023	0,017	0,019	0,028	0,011	0,009	0,017	0,025	0,025	0,031	0,031	0,024	0,021	0,021
1956–1989	–0,013	–0,017	–0,013	–0,005	0,000	–0,001	–0,009	–0,008	–0,005	–0,009	–0,002	–0,012	–0,008
<i>50–55° с. ш.</i>													
1990–2023	0,023	0,001	0,019	–0,013	–0,008	0,019	0,029	0,036	0,044	0,037	0,040	0,023	0,021
1956–1989	0,002	–0,012	0,017	0,033	0,010	–0,001	0,009	0,011	0,003	–0,039	–0,021	0,014	0,002
<i>55–60° с. ш.</i>													
1990–2023	0,033	0,014	0,023	–0,004	–0,002	0,016	0,022	0,040	0,049	0,048	0,044	0,036	0,026
1956–1989	0,015	0,014	0,034	0,035	0,011	–0,010	–0,002	0,000	–0,008	–0,032	–0,001	0,012	0,006
<i>65–70° с. ш.</i>													
1990–2023	0,050	0,038	0,040	0,042	0,011	0,003	0,000	0,044	0,081	0,105	0,097	0,061	0,048
1956–1989	–0,014	0,018	0,011	0,000	0,010	–0,020	–0,021	–0,011	–0,059	–0,012	0,021	0,031	–0,004
<i>75–90° с. ш.</i>													
1990–2023	0,153	0,169	0,100	0,084	0,050	0,011	0,016	0,047	0,115	0,236	0,160	0,193	0,111
1956–1989	0,047	0,039	0,040	–0,009	0,019	0,001	–0,002	0,005	0,049	0,035	–0,015	0,034	0,020

Наиболее значительный прирост величин линейного тренда температуры (скорости роста потепления) в период современного потепления климата (1990–2023 гг.) от первого полугодия ко второму (июль – август) произошел для широтных зон вблизи максимума кинетической энергии на  $H_{500}$  в реальной атмосфере (50–55° с. ш.), вблизи максимума напряженности меридиональной циркуляции (55–60° с. ш.), а также в полярных широтах (65–90° с. ш.) (рис. 1, 2).

С учетом арктического усиления потепления климата в последние десятилетия, а также ввиду значительного роста значений коэффициентов линейного тренда температуры при переходе в области вблизи и выше полярных кругов Северного и Южного полушарий, более детально рассмотрим характер изменения линейных трендов в этих областях (65–90° с. ш. и ю. ш.) для каждого месяца года двух сравниваемых периодов времени (1956–1989 и 1990–2023 гг.). Годовая динамика коэффициентов линейных трендов температуры для двух сравниваемых периодов времени в обоих полушариях приведена на рис. 2, а, б.

Из рис. 2 следует, что для предшествующего интенсивному потеплению климата периода (1956–1989 гг.) коэффициенты линейного тренда ( $\beta$ ) температуры в приполярных областях колебались в пределах от –0,01 до +0,03 °C в Северном и от –0,02 до +0,08 °C в Южном полушарии.

При этом в Северной приполярной области отмечен прирост значений  $\beta$  для всех месяцев года (см. рис. 2, а). В Северном полушарии в период современного потепления климата значения  $\beta$  существенно увеличились во второй половине года (август – декабрь), достигнув максимальных значений в октябре. На это обстоятельство мы обращали внимание в предыдущих наших работах [4, 16] и приведенном в статье обзоре. В указанных работах рассмотрены и возможные причины изменения характера годового хода температуры.

В период современного потепления климата (1990–2023 гг.) в южной приполярной области в теплое (декабрь – февраль) и холодное (июнь – июль) время года наметилось снижение величин линейных трендов температуры, т. е. просматривается наличие квазиполугодового колебания в изменении  $\beta$ ; минимумы  $\beta$  приходятся на период летнего и зимнего солнцестояния.

Для северной полярной шапки характерна «одногорбая» кривая изменений  $\beta$  в годовом ходе с ярко выраженным осенним максимумом, природа которого, вероятно, связана с годовым циклом потоков явного и скрытого тепла в Северном Ледовитом океане, максимум которого приходится на осень [4, 16].

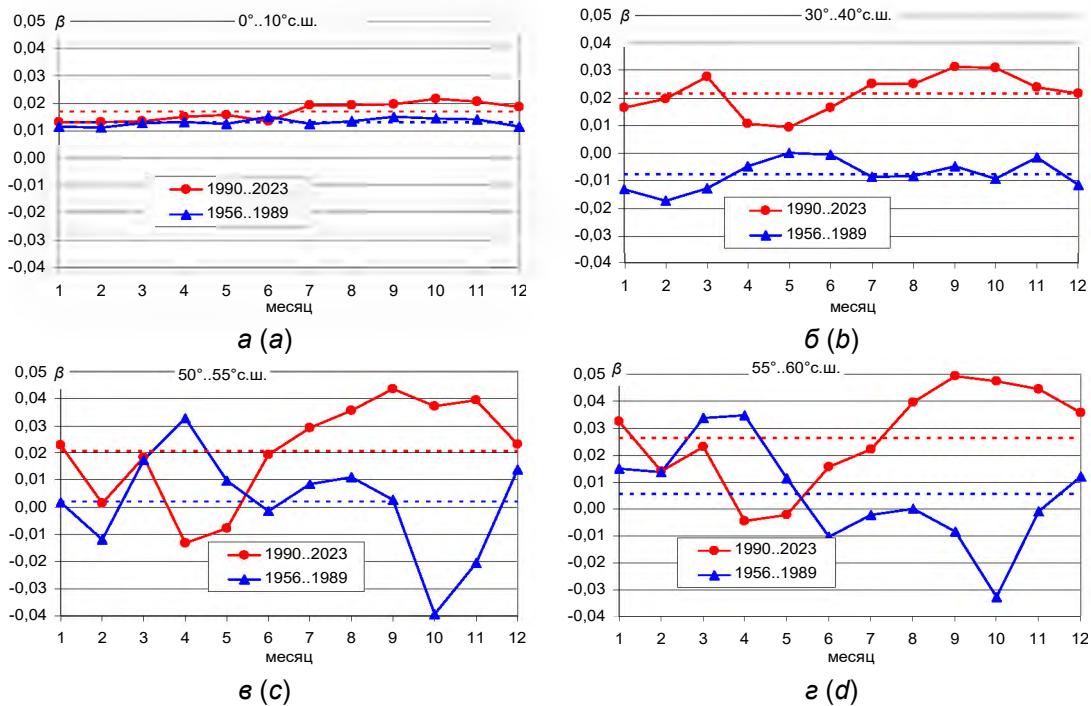


Рис. 1. Коэффициенты линейных трендов  $\beta$  температуры в различных широтных поясах низких и умеренных широт Северного полушария для двух временных периодов (1956–1989 и 1990–2023 гг.)

Fig. 1. Linear trends coefficients  $\beta$  of temperature in different latitudinal belt's of the low and temperate latitudes of the Northern Hemisphere for two time periods (1956–1989 and 1990–2023)

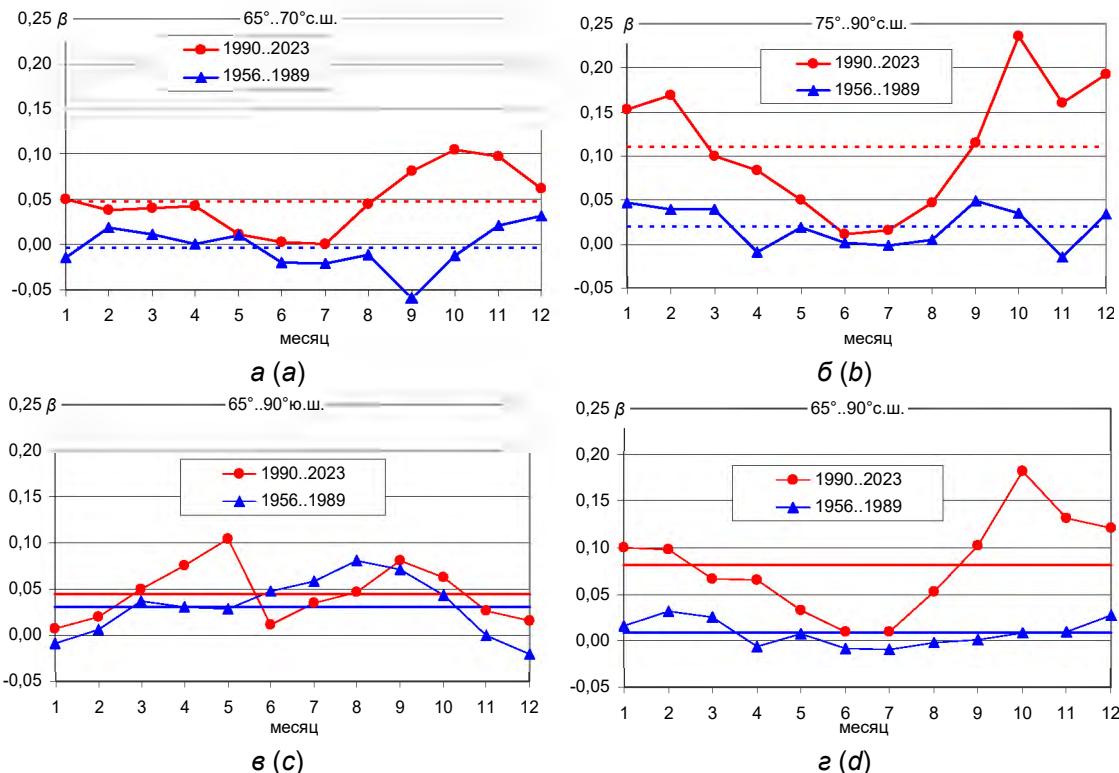


Рис. 2. Коэффициенты линейных трендов температуры  $\beta$  в приполярных широтных поясах Северного (а, б, г) и Южного (в) полушарий ( $65^{\circ}\text{--}90^{\circ}$  с. ш. и ю. ш.) и их среднегодовые значения для двух временных периодов (1956–1989 и 1990–2023 гг.)

Fig. 2. Linear trends coefficients  $\beta$  of temperature in the circumpolar latitudinal belt's of the Northern (a, b, d) and Southern (c) hemispheres for two time periods (1956–1989 and 1990–2023)

Отдельно анализу были подвергнуты пространственно-временные особенности изменений величин коэффициентов линейного тренда температуры ( $\beta$ ) и среднеквадратических отклонений ( $\sigma$ ) температуры для периода современного потепления климата (1990–2023 гг.) и предшествующего периода (1956–1989 гг.) для трех естественных синоптических районов севернее  $30^{\circ}$  с. ш. (ЕСР) [17]. Синоптические процессы в каждом из них обладают определенными особенностями и могут изучаться независимо от процессов, происходящих в других частях Земли. Известно также, что в границах ЕСР развертывается естественный синоптический сезон, в течение которого наблюдаются типичные или нетипичные для него синоптические процессы. Границы каждого из трех естественных синоптических районов простираются:

- 1) от Гренландии до Таймыра (приблизительно совпадает с 1-м ЕСР Б. П. Мультановского);
- 2) от Таймыра до Берингова пролива (Восточная Сибирь);
- 3) от Берингова пролива до Гренландии (Американский сектор).

Кроме того, отдельно рассмотрен район, где происходит формирование Сибирского максимума атмосферного давления в холодное время (СибМакс) с западной границей по меридиану  $70^{\circ}$  (восточная часть бассейна р. Обь) и восточной границей по меридиану  $125^{\circ}$  (р. Лена).

Прежде всего, рассмотрим пространственно-временные особенности изменений коэффициентов линейных трендов температуры ( $\beta$ ) для двух временных периодов (1990–2023 и 1956–1989 гг.). На рис. 3 приведены значения разностей коэффициентов линейных трендов температуры для указанных выше временных периодов для разных ЕСР Северного полушария и района формирования зимнего Сибирского максимума атмосферного давления.

Из рис. 3, а следует, что максимальные разности  $\beta$  приходятся на вторую половину года, особенно на осенний период года (сентябрь – ноябрь); наибольшие разности  $\beta$  отмечаются в полярной шапке ( $75$ – $90^{\circ}$  с. ш.) и вблизи полярного круга ( $65$ – $70^{\circ}$  с. ш.) в 1-м ЕСР (Атлантическом,  $20^{\circ}$  з. д. –  $105^{\circ}$  в. д.) и 3-м ЕСР (Американском,  $175$ – $50^{\circ}$  з. д.) – во вторую половину осени – начале зимы (октябрь – декабрь). Во 2-м ЕСР (Восточная Сибирь) наибольшие разности  $\beta$  пришлись на сентябрь – октябрь в умеренных и высоких широтах ( $45$ – $90^{\circ}$  с. ш.).

В годовом ходе во всех долготных секторах в конце зимы и весной (февраль – май) отмечаются либо наименьшие значения разностей скорости роста температуры, либо даже отрицательные их значения. Степень выраженности этих тенденций наиболее заметна в 1-м ЕСР, менее выражена во 2-м ЕСР и области формирования Сибирского максимума атмосферного давления. При общем сходстве интересно отметить наличие определенных отличий в широтном распределении разностей трендов температуры для последнего региона и от части перекрывающего его 2-го ЕСР. Это особенно заметно в холодное время года, когда формируется указанный максимум. Указанная особенность свидетельствует о важности проявления начальных барических условий на величину линейных трендов температуры, т. е. скорость потепления климата.

Из работы [4] следует, что скорость роста температуры в высоких широтах в период с 1990 до 2022 г. значительно изменяется в различные месяцы года. Так, среднее повышение температуры в полярной шапке ( $70$ – $90^{\circ}$  с. ш.) в октябре – апреле, когда Северный Ледовитый океан покрыт льдом, составило  $4,2^{\circ}$  С. Положительная альбедная связь обеспечивает около одной трети указанного повышения температуры, а остальная часть повышения температуры в период с 1990 по 2022 г. связана с ростом тепло- и влагообмена океана и атмосферы. Теоретические и экспериментальные оценки притоков явного и скрытого турбулентного тепла в Северном Ледовитом океане показали, что максимальные притоки явного и скрытого тепла приходятся на октябрь. Для этого месяца года, как показано в работе [4], характерны самые высокие скорости роста температуры в высоких широтах Северного полушария, то есть самое большое по величине арктическое усиление потепления климата. Выявлено смещение максимальных скоростей роста температуры в северной полярной шапке на август – ноябрь. Установлено, что максимальная скорость роста температуры в широтном поясе  $30$ – $65^{\circ}$  с. ш. сместилась в период современного потепления на осень (сентябрь – ноябрь), тогда как раньше наблюдалась в январе – апреле, что трудно объяснить исходя из парниковой теории климатических изменений.

Определенного внимания заслуживает рассмотрение изменений среднеквадратических отклонений температуры ( $\sigma$ ) для двух указанных выше временных периодов (1990–2023 и 1956–1989 гг.) (см. рис. 3, б).

В годовом ходе изменчивость температуры при потеплении климата стала меньше в феврале в большинстве широтных зон рассматриваемых секторов Северного полушария. Исключение составили южная граница региона расположения Сибирского максимума и умеренные широты 1-го ЕСР ( $45$ – $60^{\circ}$  с. ш.), как и в случае нормированных разностей коэффициентов тренда  $\beta$  (см. рис. 3, а). Из рис. 3, б следует в целом сохранение, хотя и меньших по величине, различий нормированных разностей среднеквадратических отклонений температуры между первой и второй половинами года. Сказанное особенно характерно для Американского сектора (3-го ЕСР).

В высоких широтах Восточной Сибири ( $65^{\circ}$ – $70^{\circ}$  с. ш. и  $70$ – $125^{\circ}$  в. д.) нормированные разности  $\sigma$  достигают больших значений почти во все месяцы года (исключение составляет ноябрь). Проведенный анализ изменений среднеквадратических отклонений температуры позволяет сделать вывод о существенных региональных отличиях в изменениях температуры в полярной шапке в Сибирском секторе – от р. Обь до Берингова пролива. В годовом ходе изменчивость температуры при потеплении климата стала меньше в феврале в большинстве широтных зон рассматриваемых секторов Северного полушария. Исключение составляют южная часть региона формирования Сибирского максимума атмосферного давления и район умеренных широт 1-го ЕСР ( $45$ – $60^{\circ}$  с. ш.). Таким образом, в целом изменения пространственно-временных особенностей среднеквадратических отклонений температуры сравниваемых периодов времени (1956–1989 и 1990–2023 гг.) оказались менее выраженными в годовом ходе по сравнению с изменениями величины линейных трендов температуры.

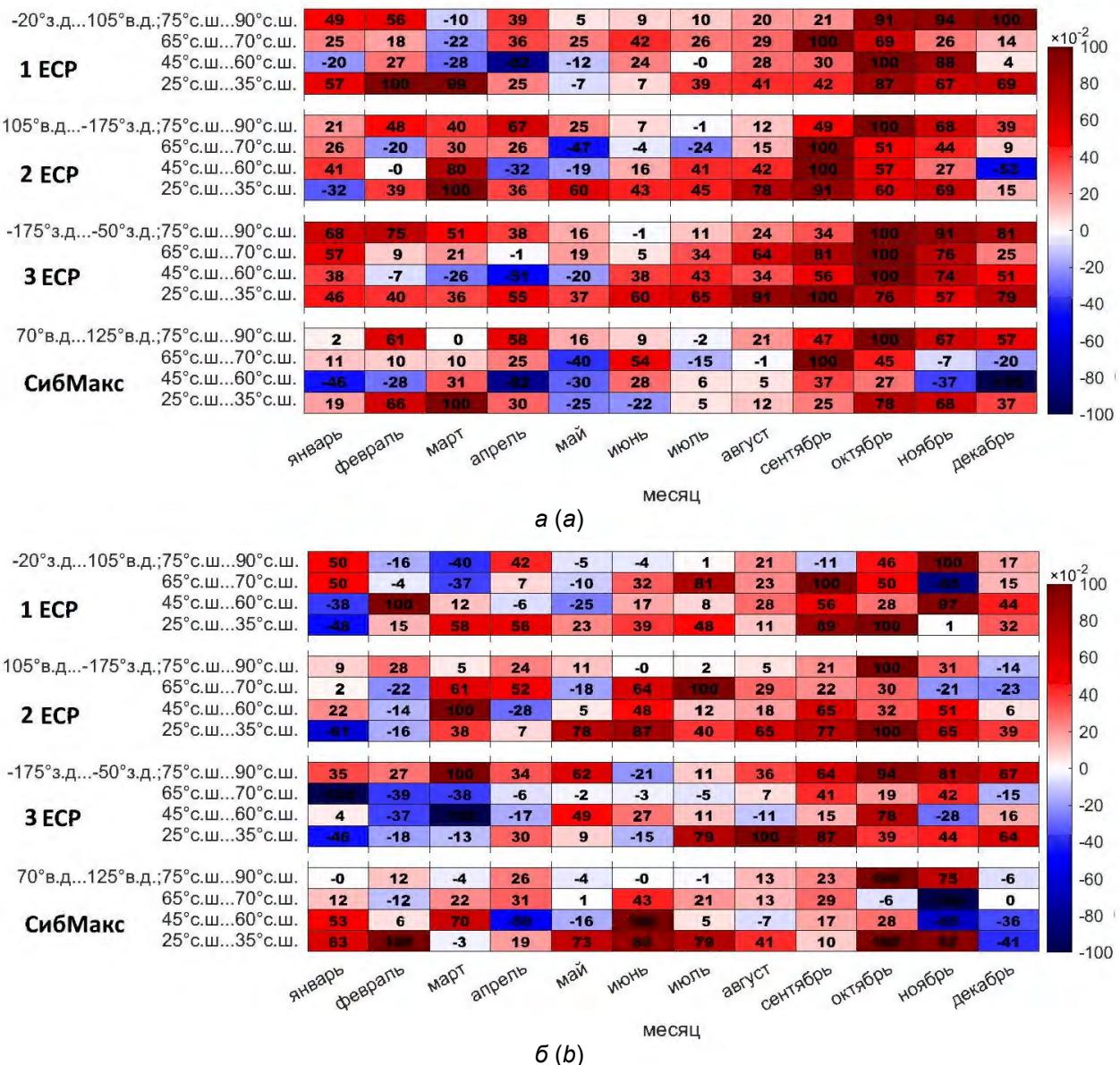


Рис. 3. Разности коэффициентов линейных трендов  $\beta$  (а) и среднеквадратических отклонений  $\sigma$  температуры (б) (нормализованных по каждому широтному поясу отдельно) в различных широтных поясах трех естественных синоптических районов и области Сибирского максимума атмосферного давления для двух временных периодов (1956–1989 и 1990–2023 гг.)

Fig. 3. Differences of linear trend coefficients  $\beta$  (a) and standard deviations  $\sigma$  of temperature (b) (normalised for each latitudinal belt separately) in different latitudinal belts of three natural synoptic regions (ECP) and the Siberian maximum atmospheric pressure region (СибМакс) for two time periods (1956–1989 and 1990–2023)

**Выводы.** Проведенное исследование позволило выявить ключевые особенности изменения температурных трендов и среднеквадратических отклонений температур в различных широтных зонах Земного шара за два периода: 1956–1989 гг. и 1990–2023 гг. Основные выводы работы можно сформулировать следующим образом:

1. Наблюдается значительное увеличение коэффициентов линейных трендов температуры с ростом широты, особенно в полярных регионах (арктическое усиление потепления). В период 1990–2023 гг. максимальные значения трендов зафиксированы в холодное время года (октябрь – февраль), что подтверждает феномен арктического усиления потепления. Скорость роста температуры в полярной шапке ( $75\text{--}90^{\circ}$  с. ш.) достигла максимальных значений, особенно в осенние месяцы. Отмеченный характер усиления современного потепления во втором полугодии кардинально отличается от картины потепления климата в первом периоде (1956–1989 гг.), когда на вторую половину года приходились наиболее низкие (отрицательные) значения трендов температуры, в то время как в средних широтах в начале и середине весны, наоборот, отмечалось заметное потепление.

2. В более южных широтах ( $30\text{--}60^{\circ}$  с. ш.) тренды температуры также демонстрируют ее рост, однако их значения существенно ниже, чем в полярных регионах. Внутригодовая динамика трендов в этих зонах характеризуется смещением максимумов трендов к теплым месяцам года.

3. Анализ изменений коэффициентов линейных трендов температуры  $\beta$  и среднеквадратических отклонений  $\sigma$  для различных естественных синоптических районов показал, что наибольшие изменения происходят в осенний период, особенно в Восточной Сибири и полярных регионах. Это может свидетельствовать о значительном влиянии начальных циркуляционных условий на пространственно-временные изменения линейных трендов температуры.

4. В Южном полушарии наблюдается менее выраженное потепление по сравнению с Северным, однако в приполярных областях Южного полушария также отмечается увеличение величины трендов температуры в период современного потепления климата, особенно в осенние и весенние месяцы. В то же время в зимние месяцы (июнь – август) в Южном полушарии наблюдается снижение величины трендов температуры. В период современного потепления (1990–2023 гг.) изменчивость температуры  $\sigma$  в полярных регионах Северного полушария увеличилась. Обнаружено наличие квазиполугодового колебания в изменении величины линейного тренда температуры (скорости потепления в годовом ходе).

Таким образом, результаты исследования подтверждают, что современные изменения носят различный сезонный и пространственный характер, что может свидетельствовать о некотором различии механизмов климатических изменений в разных пространственно-временных масштабах.

*Исследование проведено при поддержке Белорусского фонда фундаментальных исследований (грант № Х23РНФ-122).*

#### Список использованных источников

- Логинов, В. Ф. Изменения климата: тренды, циклы, паузы / В. Ф. Логинов, В. С. Микуцкий. – Минск : Беларус. наука, 2017. – 179 с.
- Логинов, В. Ф. Современные изменения глобального и регионального климата / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко. – Минск : Беларус. наука, 2019. – 315 с.
- Логинов, В. Ф. Диагноз глобального климата / В. Ф. Логинов. – СПб. : Лема, 2021. – 304 с.
- Логинов, В. Ф. Современные изменения климата / В. Ф. Логинов ; НАН Беларуси, Ин-т природопользования, НПО «Гидропроект». – СПб. : Лема, 2024. – 267 с.
- Логинов, В. Ф. Изменения величин коэффициентов линейных трендов температуры в Северном и Южном полушариях и их возможные причины / В. Ф. Логинов, В. С. Микуцкий, Ю. А. Бровка // Природные ресурсы. – 2021. – № 2. – С. 5–13.
- Панин, Г. И. Анализ климатических тенденций в высоких широтах Северного полушария / Г. И. Панин, Т. Ю. Выручалкина, И. В. Соломонова // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2008. – № 6. – С. 31–41.
- Кошельков, Ю. П. Температурные тренды в Антарктиде и смежных районах / Ю. П. Кошельков // Метеорология и гидрология. – 1990. – № 5. – С. 111–112.
- Trends '93: A compendium of data on global change / ed. by Thomas A. Boden, Paul Kanciruk, Michael P. Farrell. – Oak Ridge, Tennessee : Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, 1994. – XVIII, 984 р.
- Логинов, В. Ф. Циркуляционные особенности формирования холодных и теплых зим в Северном полушарии (на примере Беларуси) / В. Ф. Логинов, В. С. Микуцкий / Природопользование. – 2023. – № 2. – С. 499–507.
- Сазонов, Б. И. Высокие барические образования и солнечная активность / Б. И. Сазонов. – Л. : Гидрометеоиздат, 1964. – 130 с.
- Витинский, Ю. И. Солнце и атмосфера Земли / Ю. И. Витинский, А. И. Оль, Б. И. Сазонов ; под ред. Э. Г. Мустеля. – Л. : Гидрометеоиздат, 1976. – 351 с.

12. Манабе, С. Климат и циркуляция океана / С. Манабе, К. Брайен. – Л. : Гидрометеоиздат, 1972. – 192 с.
13. Кароль, И. Л. Радиактивные изотопы и глобальный перенос в атмосфере / И. Л. Кароль. – Л. : Гидрометеоиздат, 1972. – 336 с.
14. Smagorinsky, J. General circulation with the primitive equation / J. Smagorinsky // Monthly Weather Review. – 1963. – Vol. 91, № 3. – P. 99–164.
15. Алексеев, Г. В. Арктическое усиление: роль междущиротного обмена в атмосфере / Г. В. Алексеев, Н. Е. Харланенкова, А. Е. Вязилова // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2023. – Т. 9, № 1. – С. 13–32. – DOI: 10.21513/2410-8758-2023-1-13-32.
16. Логинов, В. Ф. Роль различных факторов в арктическом усилении потепления климата / В. Ф. Логинов // Гидросфера. Опасные процессы и явления. – 2023. – Т. 5, вып. 1. – С. 34–58.
17. Российский гидрометеорологический словарь / под ред. А. И. Бедрицкого. – СПб. ; М. : Летний сад, 2008. – Т. 1 : А–И. – 336 с.

#### References

1. Loginov V. F., Mikutsky V. S. *Izmeneniya klimata: trendy, tsikly, pauzy* [Climate Change: Trends, Cycles, Pauses]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2017, 179 p. (in Russian)
2. Loginov V. F., Lysenko S. A. *Sovremennye izmeneniya global'nogo i regional'nogo klimata* [Current global and regional climate changes]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2019, 315 p. (in Russian)
3. Loginov V. F. *Diagnoz global'nogo klimata* [Diagnosis of global climate]. St. Petersburg, Lema Publ., 2021, 304 p. (in Russian)
4. Loginov V. F. *Sovremennye izmeneniya klimata* [Contemporary climate changes]. Natsional'naya akademiya nauk Belarusi, Institut prirodopol'zovaniya, Nauchno-proizvodstvennoe ob'edinenie «Gidroproekt» [National academy of sciences of Belarus, Institute of nature management, Research and production association "Gidroproekt"]. St. Petersburg, Lema Publ., 2024, 267 p. (in Russian)
5. Loginov V. F., Mikutskiy V. S., Brovka Yu. A. *Izmeneniya velichin koefitsientov lineynykh trendov temperatury v Severnom i Yuzhnom polushariyakh i ikh vozmozhnye prichiny* [Changes in linear trend coefficients of temperature in the Northern and Southern hemispheres and their possible causes]. *Prirodnye resursy = Natural Resources*, 2021, no. 2, pp. 5–13. (in Russian)
6. Panin G. I., Vyrutchalkina T. Yu., Solomonova I. V. *Analiz klimaticeskikh tendentsiy v vysokikh shirotakh Severnogo polushariya* [Analysis of climate trends in high latitudes of the Northern hemisphere]. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*, 2008, no. 6, pp. 31–41. (in Russian)
7. Koshelkov Yu. P. *Temperaturnye trendy v Antarktide i smezhnykh rayonakh* [Temperature Trends in Antarctica and Adjacent Regions]. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*, 1990, no. 5, pp. 111–112. (in Russian)
8. Trends '93: A Compendium of Data on Global Change. Ed. by T. A. Boden, P. Kanciruk, M. P. Farrell. Oak Ridge, Tenn., Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, 1994, XVIII, 984 p.
9. Loginov V. F., Mikutskiy V. S. *Tsirkulyatsionnye osobennosti formirovaniya kholodnykh i teplykh zim v Severnom polusharii (na primere Belarusi)* [Circulation features of cold and warm winters in the northern hemisphere (case study of Belarus)]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2023, no. 2, pp. 499–507. (in Russian)
10. Sazonov B. I. *Vysokie baricheskie obrazovaniya i solnechnaya aktivnost'* [High-Pressure Systems and Solar Activity]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1964, 130 p. (in Russian)
11. Vitinskiy Yu. I., Ol A. I., Sazonov B. I. *Solntse i atmosfera Zemli* [The Sun and the Earth's Atmosphere]. Ed. by E. R. Mustel. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1976, 351 p. (in Russian)
12. Manabe S., Bryan K. *Klimat i tsirkulyatsiya okeana* [Climate and Ocean Circulation]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1972, 192 p. (in Russian)
13. Karol I. L. *Radioaktivnye izotopy i global'nyy perenos v atmosfere* [Radioactive Isotopes and Global Transport in the Atmosphere]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1972, 336 p. (in Russian)
14. Smagorinsky J. General Circulation with the Primitive Equations. Monthly Weather Review, 1963, vol. 91, no. 3, pp. 99–164.
15. Alekseev G. V., Kharlanenkova N. E., Vyazilova A. E. *Arkticheskoe usilenie: rol' mezhdushirotnogo obmena v atmosfere* [Arctic Amplification: The Role of Interlatitudinal Exchange in the Atmosphere]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and Applied Climatology*, 2023, vol. 9, no. 1, pp. 13–32. DOI: 10.21513/2410-8758-2023-1-13-32. (in Russian)
16. Loginov V. F. *Rol' razlichnykh faktorov v arkticheskem usilenii potepleniya klimata* [The Role of Various Factors in Arctic Amplification of Climate Warming]. *Gidrosfera. Opasnye protsessy i yavleniya = Hydrosphere. Hazardous Processes and Phenomena*, 2023, vol. 5, iss. 1, pp. 34–58 (in Russian)
17. Rossiyskiy gidrometeorologicheskiy slovar' [Russian Hydrometeorological Dictionary]. Ed. by A. I. Bedritsky. St. Petersburg, Moscow, Letny Sad Publ., 2008, vol. 1 : A–I, 336 p. (in Russian)

### Информация об авторах

*Логинов Владимир Фёдорович* – академик, доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

*Микуцкий Владимир Станиславович* – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: mvs@nature-nas.by

*Бровка Юлия Александровна* – кандидат географических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: brovka.yuliya@mail.ru

### Information about the authors

*Vladimir F. Loginov* – Academician, D. Sc. (Geography), Professor, Chief Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

*Vladimir S. Mikutsky* – Ph. D. (Physical and Mathematical), Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: mvs@nature-nas.by

*Yuliya A. Brovka* – Ph. D. (Geography), Assistant professor, Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: brovka.yuliya@mail.ru