

С. А. Лысенко, академик В. Ф. Логинов

Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ НАЧАЛЬНОЙ ФАЗЫ СОВРЕМЕННОГО ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА

Аннотация. Исследована начальная фаза современного потепления в разных районах Земного шара. Установлено, что в материковых районах потепление началось на 6–8 лет раньше, чем в океанических. В области субполярного циклонического круговорота в Северной Атлантике потепление началось лишь с наступлением положительной квази-30-летней фазы Атлантической мультидекадной осцилляции (АМО) – с 2000-х годов. На основе спектрального сингулярного анализа временного ряда температуры воздуха выделены материковые регионы, в которых летняя температура воздуха в масштабах десятилетий изменяется синхронно с АМО. В этих районах потепление также началось с запаздыванием на 10–15 лет от остальных материковых районов. Наиболее высокий уровень статистической значимости корреляции между квази-60-летними компонентами АМО и летней температуры воздуха отмечается для центральной и восточной Европы (35–60° с. ш., 10–45° в. д.). В Беларуси этим колебанием объясняется междесятилетняя изменчивость летней температуры в пределах $\pm(0,5-0,6)$ °С. На восходящей ветви АМО происходит усиление интенсивности потепления климата в летнее время года, а на нисходящей, наступившей примерно с 2010 г., – следует ожидать снижение скорости роста летних температур.

Ключевые слова: современное потепление, Атлантическая мультидекадная осцилляция, океан, квазишестидесятилетний цикл

Для цитирования. Лысенко, С. А. Пространственно-временные изменения начальной фазы современного потепления климата / С. А. Лысенко, В. Ф. Логинов // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2021. – Т. 65, № 5. – С. 618–627. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-5-618-627>

Sergey A. Lysenko, Academician Vladimir F. Loginov

Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

SPACE-TIME CHANGES IN THE INITIAL PHASE OF MODERN CLIMATE WARMING

Abstract. The initial phase of a temperature growth in different parts of the Earth has been examined. It is found that climate warming in the continental areas began 6–8 years earlier than in the oceanic areas. Climate warming in the sub-polar cyclonic circulation area in the North Atlantic has been started only after the beginning of the positive quasi-30-year phase of the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO), i. e. since 2000s. On the basis of the Singular Spectrum Analysis of the air temperature time series the continental areas are found, in which summer air temperature changes are synchronous with AMO on a decadal scale. In those regions, climate warming began with a 10–15 year lag in comparison to other continental areas. The highest level of statistical significance of the correlation between quasi-60-year AMO components and summer air temperatures is observed in Central and Eastern Europe (35–60° N, 10–45° E). This oscillation explains the decadal summer temperature changes within the range of $\pm(0.5-0.6)$ °C in Belarus. Climate warming intensifies in summer during the ascending AMO segment, while during the descending segment, which has started since around 2010, the decrease in the rate of growth of summer temperatures should be expected.

Keywords: modern warming, Atlantic Multidecadal Oscillation, ocean, quasi-60-year cycle

For citation. Lysenko S. A., Loginov V. F. Space-time changes in the initial phase of modern climate warming. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2021, vol. 65, no. 5, pp. 618–627 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-5-618-627>

Введение. Сам факт современного потепления глобального климата многократно и надежно установлен [1–7]. Предметом острой дискуссии продолжают оставаться такие вопросы, как время начала потепления климата и его причины. В наиболее обстоятельных работах, посвященных этому вопросу, принимается, что основным фактором современного изменения климата является изменение содержания в атмосфере парниковых газов антропогенного происхождения: углекислого газа, метана, закиси азота и некоторых других.

Наиболее отчетливый рост температуры Земного шара имеет место в последние 45–50 лет, однако время начала роста температуры в отдельных крупных регионах испытывает значительный разброс относительно средних значений, связанный, в том числе и с сезоном года.

До настоящего времени идет дискуссия не только о времени начала современного потепления, но и его пространственных особенностях в разных регионах на Земном шаре. Если исходить из парниковой теории, то наибольший рост температуры должен быть в высокоширотных регионах Северного полушария в холодное время года. Эта парадигма парниковой теории подтверждена результатами теоретических и экспериментальных исследований. Они показывают, что в изменении климата высоких широт (60–90° с. ш.) парниковая природа потепления климата выражена наиболее ярко, что обусловлено вкладом альбедной обратной связи и воздействием сильной гравитационной устойчивости, вызванной выхолаживанием возле земной поверхности, которое подавляет конвекцию и перенос длинноволнового излучения, приводя к обусловленному росту углекислого газа нагреванию в тонком приповерхностном слое. Эти процессы могут обеспечивать более яркое проявление парникового эффекта в изменении климата в холодное время года и суток.

Однако интенсивный рост температуры в высоких широтах Северного полушария в период с 1910–1915 до 1940–1945 гг., известный как потепление Арктики, сменился падением температуры, происходившим до середины 70-х годов прошлого столетия, что нельзя объяснить в рамках парниковой теории современных изменений климата.

Проведенные нами ранее исследования изменений температуры в высоких широтах Северного и Южного полушарий показали наличие противофазы квазишестидесятилетнего колебания в температуре Атлантического сектора Арктики и Антарктики [8]. Этот вывод подкреплен и результатами настоящего исследования (рис. 1). Имеется и другая точка зрения относительно времени начала современного потепления. Так, в [9–11] указывается, что первоначальным генератором современного потепления климата являются тропические широты, откуда тепло морскими течениями переносится на север, давая толчок глобальному потеплению климата.

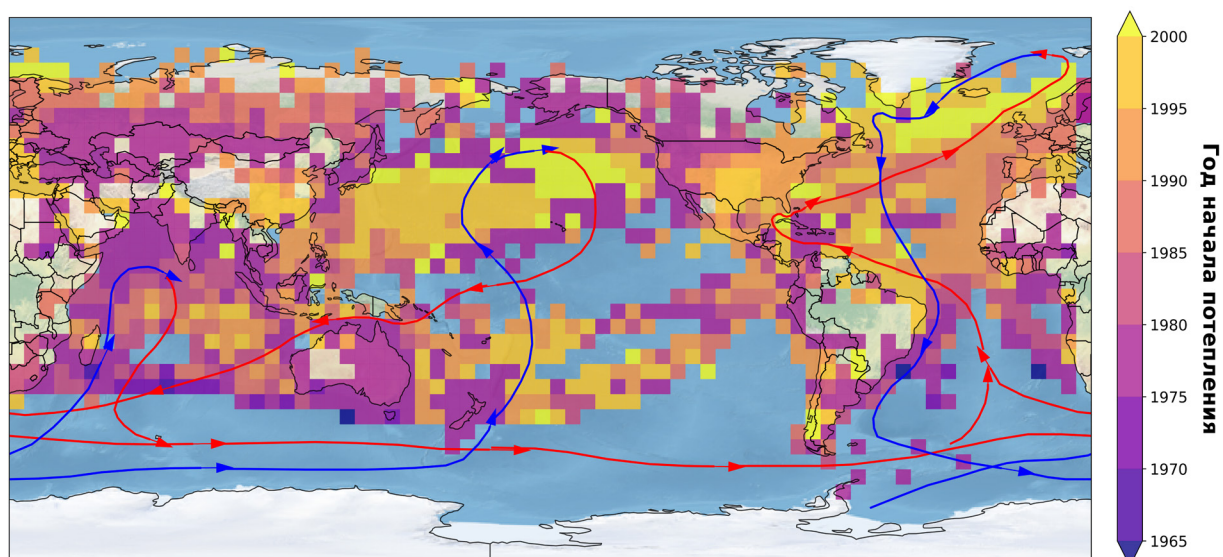


Рис. 1. Начальный год статистически достоверного роста температуры (при уровне значимости $\alpha = 0,01$), рассчитанный по данным HadCRUT с использованием теста Манна–Кендалла (при монотонном потеплении) и алгоритма CUSUM (при скачкообразном потеплении). Стрелками обозначены теплые течения, идущие около поверхности (красные), и холодные глубоководные течения (синие), обеспечивающие вертикальное перемешивание океанических вод

Fig. 1. Start year of the statistically significant temperature growth (at the significance level $\alpha = 0.01$) calculated by the HadCRUT data with the use of Mann–Kendall's test (at monotonic warming) and the CUSUM algorithm (at spasmodic warming). The arrows indicate warm current near the surface (red) and cold deep current (blue) that provide vertical mixing of ocean waters

Известно также, что потепление первоначально зарождается в центральной части материков. Это особенно заметно в Северном полушарии, материковость которого больше, чем Южного полушария. Кроме того, в Северном полушарии осуществляется более активная антропогенная деятельность, что дает основание предполагать более раннее начало современного потепления в Северном полушарии. Однако этот вопрос не столь очевиден. Проведенное нами ранее исследование изменений температуры в Северном и Южном полушариях Земли показало, что современное глобальное потепление в мае–октябре началось в Южном полушарии в середине 1940-х годов и продолжается до настоящего времени, тогда как в Северном полушарии оно проявило себя только с середины 1970-х годов [8]. В период времени с середины 1940-х годов до середины 1970-х годов здесь отмечалась пауза в изменении температуры, т. е. происходило падение температуры во все месяцы года, кроме марта.

Материалы и методы исследования. Использовалась база данных HadCRUT.4.6.0.0 Метеорологического центра Хэдли (Великобритания) со среднемесячными значениями приземной температуры воздуха на равномерной сетке географических координат ($5^\circ \times 5^\circ$). Среднемесячные значения температуры в узлах сетки предварительно нормализовались с целью их приведения к нормальному распределению со средним нулевым значением и единичным стандартным отклонением. Для этого среднемесячные значения температуры центрировались относительно нуля и делились на их стандартное отклонение. Такая процедура выравнивает вклад каждого месяца в среднегодовое значение температуры и упрощает сопоставление изменений температуры для различных регионов земного шара.

Для обнаружения монотонной, статистически значимой тенденции (тренда) во временном ряду среднегодовой температуры использовался непараметрический тест Манна–Кендалла [12–14]. Данный тест позволяет принимать или отвергать при заданном уровне значимости α нулевую гипотезу H_0 об отсутствии тренда во временном ряду на основании статистик, рассчитываемых как разность между увеличивающимися или уменьшающимися парами значений в исследуемом временном ряду. Данный тест использовался для нахождения возрастающего тренда среднегодовой температуры, соответствующего уровню статистической значимости $\alpha = 0,01$. Первая точка временного интервала, от которой отсчитывается найденный тренд, принималась за начало периода современного потепления.

Важно учесть, что во многих районах Земного шара в последние 3–4 десятилетия не наблюдалось монотонного роста температуры: рост среднегодовой температуры происходил в форме резкого (скачкообразного) изменения. В этом случае статистически значимый тренд во временном ряду температуры на основе теста Манна–Кендалла можно не обнаружить и поэтому для нахождения года-начала потепления необходимо использовать иные методы.

Высокую эффективность в обнаружении структурных сдвигов во временных рядах показывает метод кумулятивных сумм рекурсивных остатков, известный под англоязычной аббревиатурой как CUSUM [15]. Под структурным сдвигом понимается скачкообразное изменение вероятностных характеристик временного ряда (математического ожидания, ковариационной матрицы и функции распределения) на очень коротком по отношению к длине ряда временном интервале.

Тест Манна–Кендалла и метод CUSUM применялись независимо к каждой точке пространственных данных HadCRUT. За начало периода потепления принимался ранний из двух годов, найденных с использованием вышеотмеченных алгоритмов, т. е. год, с которого начался статистически достоверный рост приземной температуры, либо год, вблизи которого произошло скачкообразное повышение среднегодовой температуры с последующим ее сохранением на новом, более высоком уровне.

Помимо установления начала потепления важное значение для понимания его пространственно-временных особенностей имеют так называемые естественные квазициклические изменения температуры. Пожалуй, наиболее известным и изученным естественным колебанием температуры в масштабах десятилетий является квази-60-летний цикл, отчетливо проявляющийся в Атлантическом секторе Земного шара и в меньшей мере во многих других крупных регионах Земного шара. Этот цикл за период современного глобального потепления включал различные фазы колебаний: максимум, минимум, ветвь подъема и ветвь спада. Таким образом, он мог как

ускорять, так и замедлять потепление в различных регионах земного шара. В связи с этим очень важно оценить вклад этого цикла в долгопериодные изменения температуры и выявить регионы, наиболее подверженные влиянию этого цикла.

Такая оценка выполнялась на основе спектрального сингулярного анализа (SSA, Singular Spectrum Analysis), известного в русскоязычной литературе как метод «гусеницы» [16; 17]. Данный метод основан на получении из исходного временного ряда выборки скользящих отрезков заданной длины (сопоставимой с периодом выделяемой квазипериодической компоненты) и применении к ним метода главных компонент. SSA позволяет разложить временной ряд на элементарные составляющие (тренд, периодические компоненты и шум) без предварительного задания модели ряда. Период колебаний, описываемых сингулярными векторами и их парными суммами, оценивался путем применения к ним преобразования Фурье и анализа спектральной плотности мощности полученного спектра.

Результаты и их обсуждение. *Результаты анализа трендов, скачков и квазициклических изменений приземной температуры Земного шара.* Результаты расчетов года-начала современного потепления на пространственной сетке климатических данных HadCRUT приведены на рис. 1. Темный фон квадратов на карте соответствует более раннему началу потепления, светлый – более позднему.

На рис. 2 представлены гистограммы распределений года-начала потепления по площади материков и океана для всего земного шара, а также отдельно для западного и восточного секторов северного и южного полушарий.

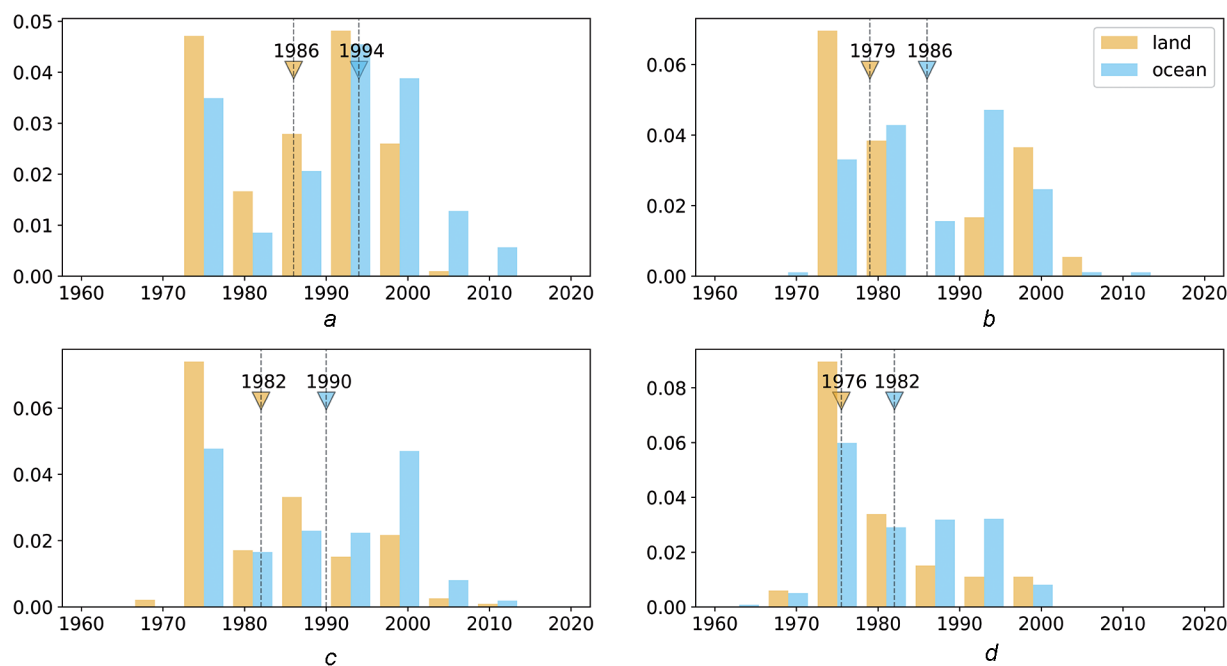


Рис. 2. Нормированная гистограмма распределения для года-начала потепления по площади суши и океана в западных (a, b) и восточных (c, d) частях Северного (a, c) и Южного (b, d) полушарий (вертикальные линии с пометками соответствуют медианам)

Fig. 2. Normalized distribution histogram for the warming start year for the land and ocean areas in the Western (a, b) and Eastern (c, d) areas of the Northern (a, c) and Southern (b, d) hemispheres (marked vertical lines correspond to meridians)

Одной из наиболее важных особенностей полученной карты «начала» глобального потепления является сравнительно позднее потепление Северной Атлантики и прилегающих к ней районов Северной Америки и Европы. Этот факт может найти объяснение в рамках предположения о естественном квази-60-летнем колебании температуры, отчетливо проявляющемся в Атлантическом океане и во многих других крупных регионах земного шара. Первая половина периода

современного глобального потепления совпала с нисходящей ветвью атлантической мультидекадной осцилляции (АМО) (1950–1970-е годы), что привело к некоторому замедлению антропогенного потепления в Северной Атлантике и прилегающих к ней материковых районах. Интересно отметить, что влияние АМО заметно отмечается и на территории всего Северного полушария: падение температуры Северного полушария с середины 1940-х до середины 1970-х годов отмечалось во все месяцы года, кроме марта [18].

Влияние суши и океана на пространственно-временные изменения начальной фазы современного потепления климата. Известно, что на материках создаются более благоприятные условия для усвоения длинноволновой радиации по сравнению с коротковолновой, поэтому потепление должно быть более интенсивным в центрах материков, особенно на высоких широтах зимой и ночью, когда ослабляется вертикальная конвенция. На океанах поглощение прямой солнечной радиации днем происходит в поверхностном слое воды, а длинноволновой – в поверхностной пленке, что стимулирует рост испарения, а следовательно, и снижение температуры воды поверхности океана.

На рис. 2 приведены нормированные гистограммы начального года потепления в различных полушариях отдельно для суши и океанических акваторий. Вертикальные линии соответствуют медианным годам начала современного потепления. Из рисунков можно сделать один общий вывод о более раннем начале потепления на суше. Полученные различия в начале потепления на суше и в океанических акваториях Земного шара составляют в среднем около 7–8 лет.

Рассмотрим этот вопрос более детально. Средние медианные годы начальной фазы современного потепления климата приведены в таблице.

Средние медианные годы начальной фазы современного потепления климата в различных районах Земного шара

Average median years of the initial phase of modern warming in different parts of the Earth

| | | | |
|---------------------|----------------|-------|------|
| Западное полушарие | Северная часть | Суша | 1986 |
| | Южная часть | Океан | 1994 |
| Восточное полушарие | Северная часть | Суша | 1979 |
| | Южная часть | Океан | 1986 |
| Земной шар | Северная часть | Суша | 1982 |
| | Южная часть | Океан | 1990 |
| | | Суша | 1976 |
| | | Океан | 1982 |
| | | Суша | 1982 |
| | | Океан | 1988 |

Из таблицы следует, что во всех случаях на суше начальная фаза современного потепления наступила на 6–8 лет раньше, чем на океанических акваториях. В более материковом восточном полушарии по сравнению с океаническим западным начальная фаза современного потепления наступила раньше на суше, чем на океанической акватории соответственно на 4 и 6 лет в северной части и на 3 и 4 года в южной части (см. также рис. 2–4).

Таким образом, в материковой части Земного шара потепление наступило раньше, что связано с различием термодинамических свойств подстилающей поверхности и особенностями усвоения радиации на суше и океане [5]. Это позволяет сделать вывод о том, что нестационарная реакция температуры на резкое увеличение поступающей радиации с учетом замедляющей термической инерции океана наступает через сравнительно короткое время (меньше 10 лет), а не многих десятков, как это иногда указывается в литературе [19]. Если запаздывание составляет около и меньше 10 лет, то реакция климатической системы близка к равновесной и тогда полученное увеличение температуры при задании реального увеличения концентрации углекислого газа за последние 100 лет, более чем в два раза отличается от реального увеличения температуры. С другой стороны, если бы запаздывание составляло сотни лет, то климатическая система еще далека от равновесия и климатические модели дают реалистический результат [20].

Как показано в ряде работ величина потепления климата за счет увеличения концентрации CO_2 составляет около половины того, что наблюдалось бы в отсутствие океана. Обусловленная термической инерцией океана задержка реакции температуры воздуха составляет от 6 до 23 лет и изменяется в соответствии с принятой оценкой роста температуры при двукратном увеличении концентрации CO_2 . Наши результаты свидетельствуют, что если основным фактором современного потепления климата являются парниковые газы, то задержка реакции температуры атмосферного воздуха близка к нижней границе указанной выше оценки.

Среднее восьмилетнее различие во времени наступления начальной фазы современного потепления климата на материковых и океанических территориях может инициировать квазивосьмилетние циклические колебания разностей давления и температуры «материк–океан» и, как следствие, послужить отправной точкой хорошо известных квазивосьмилетних колебаний гидрометеорологических характеристик. На наличие квазивосьмилетних колебаний в изменении повторяемости зим обратил внимание еще в начале XX в. знаменитый климатолог А. И. Воейков. Квазивосьмилетний цикл был обнаружен нами в изменении годового стока реки Неман (Смалнинкай) за период с 1812 по 1963 г. [21].

В северной части Северного Атлантического океана доминирующими долгопериодными циклами авторы работы [22] назвали 8- и 14-летние циклы. Восьмилетний цикл обнаружен ими в изменении параметров северо-атлантического колебания. В многолетних изменениях количества морозных дней в холодный период года и количества зимних дней с оттепелями, как показано в нашей работе, хорошо прослеживается квазивосьмилетний цикл [23]. Таким образом, ареалом распространения квазивосьмилетнего цикла в изменении гидрометеорологических характеристик является Атлантический сектор Северного полушария. С этим ареалом совпадает и ареал распространения квазিশестидесятилетнего колебания. Это может свидетельствовать об их общей природе, связанной с взаимодействием океана и атмосферы на частотах 8 и 60 лет, т. е. тесной когерентности параметров океана и атмосферы на указанных частотах.

Влияние 60-летнего цикла АМО на пространственно-временную структуру современного глобального потепления. Об амплитуде и пространственном проявлении квази-60-летнего цикла в изменении температуры поверхности океана за период инструментальных измерений (1860–2020 гг.) можно судить по рис. 3, *a*, на котором представлено распределение доли общей дисперсии температуры поверхности океана, приходящейся на квази-60-летнее колебание.

На рис. 3, *b* и 3, *c* приведены карты коэффициента корреляции и временного лага между квази-60-летними компонентами температуры поверхности океана и АМО при уровне статистической значимости корреляции $\alpha = 0,01$.

Как видно из рис. 3, квазিশестидесятилетнее колебание выбирает наибольшую часть дисперсии температуры в Северной Атлантике. Максимальные значения вклада квазিশестидесятилетнего колебания в изменчивость температуры достигают 27 % (рис. 3, *a*). Значения коэффициента корреляции АМО и температуры поверхности океана (рис. 3, *b*) варьируют в пространстве, оставаясь самыми высокими в Северной Атлантике, за исключением района антициклонического круговорота воды, где наблюдается вынос холодных поверхностных вод с северо-востока. Аналогичные термические условия складываются в умеренных широтах восточной части Тихого океана, где также статистически значимые связи АМО и температуры воды отсутствуют.

Обнаруженное среднее квазивосьмилетнее различие во времени наступления начальной фазы современного потепления климата на материках и океанических акваториях совпадает по времени и максимальным значениям коэффициентов корреляции температуры океана и АМО с 8-летним запаздыванием температуры поверхности океана и Атлантической мультидекадной осцилляцией в 60-летнем цикле. Первопричиной установленных связей рассмотренных в климатической системе процессов, вероятно, является изменение термохалинной глубоководной циркуляции холодной воды в петле Брокера.

Что касается приземной температуры воздуха на континентах, то квази-60-летний цикл особенно активно проявляется в зоне влияния Северной Атлантики (Северная Америка и Европа) преимущественно в летние месяцы. Амплитуду этого колебания можно оценить по данным на-

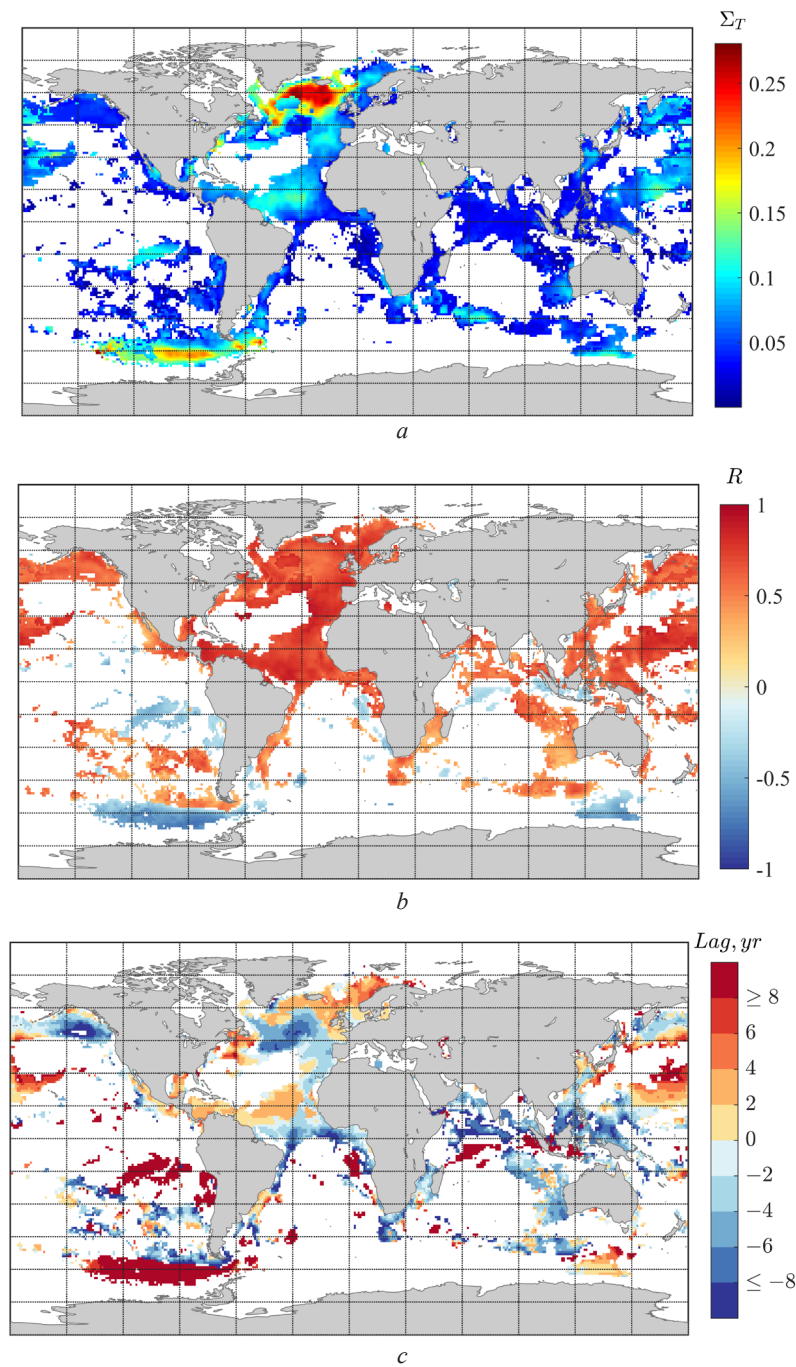


Рис. 3. Пространственные особенности проявления квази-60-летнего колебания температуры поверхности океана: *a* – доля общей дисперсии температуры поверхности океана, приходящаяся на квазициклическую компоненту с периодом от 50 до 70 лет; *b* и *c* – коэффициент корреляции и временной лаг между температурой поверхности океана и квази-60-летней атлантической мультидекадной осцилляцией (уровень статистической значимости $\alpha = 0,01$). Изменения временного лага между температурой поверхности океана и квазистецидесятилетней атлантической мультидекадной составляющей находятся в интервале ± 8 лет, наиболее тесная связь сопоставляемых характеристик находится на ± 8 лет

Fig. 3. Space features of manifestation of the quasi-60-year oscillation of the ocean surface temperature: *a* – share of total dispersion of the ocean surface temperature for a quasi-cyclic component with a period from 50 to 70 years; *b* and *c* – correlation coefficient and the time lag between the ocean surface temperature and the quasi-60-year Atlantic Multidecadal Oscillation (statistical significance level $\alpha = 0.01$). Time lag changes between the ocean surface temperature and the quasi-60-year Atlantic Multidecadal component are within an interval of ± 8 years; the closest relation of the compared characteristics is ± 8 years

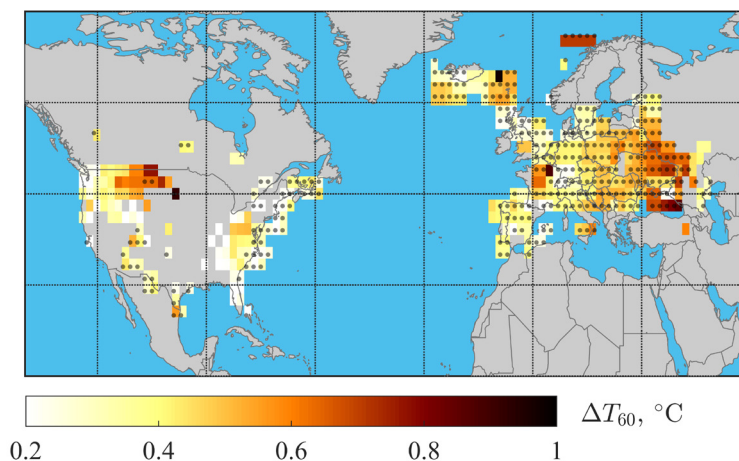


Рис. 4. Амплитуда квази-60-летнего цикла в изменениях летней приземной температуры воздуха на континентах северного полушария. Точками помечены регионы со статистически достоверной корреляцией между приземной температурой и АМО на временных масштабах около 60 лет (уровень значимости $\alpha = 0,01$)

Fig. 4. Amplitude of the quasi-60-year cycle in the surface air temperature changes on the continents of the Northern hemisphere. The points indicate the regions with the statistically significant correlation of the surface air temperature and AMO on the time scales of about 60 years (significance level $\alpha = 0.01$)

блюдений до начала современного глобального потепления. Соответствующие результаты представлены на рис. 4.

Из рис. 4 следует, что особенно велика роль квазишестидесятилетнего колебания в изменении летней температуры центральной и восточной части Европы, куда входит и территория Беларуси ($\varphi = 60\text{--}45^\circ$ с. ш., $\lambda = 20\text{--}45^\circ$ в. д.), а также западные и восточные районы США. В центральной части территории США вклад шестидесятилетнего колебания ослабляется, что еще раз указывает на его океаническую природу.

Заключение. С использованием статистических критериев Манна–Кендалла и метода кумулятивных сумм рекурсивных остатков (CUSUM) установлены статистически значимые ($p_{\text{случ}} \leq 1\%$) изменения времени начала современного потепления климата в различных районах Земного шара. Оно зависит от свойств подстилающей поверхности (суша, океан) и фазы квазишестидесятилетнего автоколебания в климатической системе. Последнее особенно выражено в Атлантическом секторе Земного шара в теплое время года.

Примерно с 2010 г. Атлантическая мультидекадная осцилляция вышла на нисходящую ветвь квази-60-летнего цикла. Последняя фаза этого цикла способна замедлить рост летних температур в Северной Америке, восточной и центральной Европе, что уже наблюдалось в начале глобального потепления. Можно предположить, что такая тенденция продолжится на протяжении ближайших двух десятилетий. Потенциальный эффект Атлантической мультидекадной осцилляции на летнюю температуру воздуха в Беларуси можно оценить величиной около $0,5\text{--}0,6^\circ\text{C}$, и он вряд ли способен «затушевать» летнее потепление в нашем регионе, идущее со скоростью около $0,6^\circ\text{C}/10$ лет. Тем не менее, учет фазы АМО позволяет уточнить прогнозы климата на основе известных моделей на ближайшие десятилетия.

Список использованных источников

1. Груза, Г. В. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха / Г. В. Груза, Э. Я. Ранькова. – М., 2012. – 194 с.
2. Кислов, А. В. Климат в прошлом, настоящем и будущем / А. В. Кислов. – М., 2001. – 351 с.
3. Кондратьев, К. Я. Глобальные изменения климата: данные наблюдений и результаты численного моделирования / К. Я. Кондратьев // Исследования Земли из космоса. – 2004. – № 2. – С. 61–96.
4. Логинов, В. Ф. Глобальные и региональные изменения климата: причины и следствия / В. Ф. Логинов. – Минск, 2008. – 496 с.
5. Логинов, В. Ф. Современные изменения глобального и регионального климата / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко. – Минск, 2019. – 315 с.

6. Переведенцев, Ю. П. Теория климата / Ю. П. Переведенцев. – Казань, 2009. – 504 с.
7. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds. T. F. Stocker [et al.]. – Cambridge, 2013. – 1535 p.
8. Логинов, В. Ф. Космические факторы климатических изменений / В. Ф. Логинов. – Минск, 2020. – 168 с.
9. Алексеев, Г. В. Арктическое измерение глобального потепления / Г. В. Алексеев // Лед и снег. – 2014. – Т. 54, № 2. – С. 53–68.
10. Алексеев, Г. В. Влияние низких широт на климатические условия на водосборах главных сибирских рек / Г. В. Алексеев, А. Е. Вязилова, Н. Е. Харланенкова // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2020. – Т. 4. – С. 54–67. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2020-4-54-67>
11. Логинов, В. Ф. О генезисе колебаний температурного режима Северного полушария / В. Ф. Логинов, Г. И. Сухомазова // Известия ВГО. – 1970. – Т. 102, вып. 4. – С. 374–375.
12. Mann, H. B. Non-parametric tests against trend / H. B. Mann // *Econometrica*. – 1945. – Vol. 13, N 3. – P. 245–259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
13. Kendall, M. G. Rank Correlation Methods, 4th ed. / M. G. Kendall. – London, 1975. – 272 p.
14. Gilbert, R. O. Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring / R. O. Gilbert. – New York, 1987. – 336 p.
15. Коепке, Л. Single and Multiple Change Point Detection in Spike Trains: Comparison of Different CUSUM Methods / L. Коепке, G. Ashida, J. Kretzberg // *Front. Syst. Neurosci.* – 2016. – Vol. 10. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2016.00051>
16. Голяндина, Н. Э. Метод «Гусеница»–SSA: анализ временных рядов / Н. Э. Голяндина. – СПб., 2004. – 76 с.
17. Multivariate and 2D Extensions of Singular Spectrum Analysis with the Rssa Package / N. Golyandina [et al.] // *J. Stat. Softw.* – 2015. – Vol. 67, N 2. – P. 1–78. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i02>
18. Логинов, В. Ф. Диагноз глобального климата / В. Ф. Логинов. – СПб., 2021. – 302 с.
19. Hansen, J. Radiative forcing and climate response / J. Hansen, M. Sato, R. Ruedy // *J. Geophys. Res.* – 1997. – Vol. 102, N D6. – P. 6831–6864. <https://doi.org/10.1029/96jd03436>
20. Schlesinger, M. E. Equilibrium and transient climatic warming induced by increased atmospheric CO₂ / M. E. Schlesinger // *Climate Dynamics*. – 1986. – Vol. 1, N 1. – P. 35–51. <https://doi.org/10.1007/bf01277045>
21. Сазонов, Б. И. Солнечно-тропосферные связи / Б. И. Сазонов, В. Ф. Логинов. – Л., 1969. – 116 с.
22. Skillful prediction of northern climate provided by ocean / A. Marius [et al.] // *Nature communication*. – 2017. – Vol. 8, N 1. – Art. 15875. <https://doi.org/10.1038/ncomms15875>
23. Логинов, В. Ф. Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, В. И. Мельник. – 2-е изд. – Минск, 2020. – 264 с.

References

1. Gruza G. V., Ran'kova E. Ya. *Observed and expected climate changes in Russia: air temperature*. Moscow, 2012. 194 p. (in Russian).
2. Kislov A. V. *Climate in the past, present and future*. Moscow, 2001. 351 p. (in Russian).
3. Kondratyev K. Ya. Global climate change: observational data and numerical simulation results. *Issledovaniya Zemli iz kosmosa = Earth and space exploration*, 2004, no. 2, pp. 61–96 (in Russian).
4. Loginov V. F. *Global and regional climate changes: causes and consequences*. Minsk, 2008. 496 p. (in Russian).
5. Loginov V. F., Lysenko S. A. *Modern changes of global and regional climate*. Minsk, 2019. 315 p. (in Russian).
6. Perevedencev Yu. P. *Climate theory*. Kazan, 2009. 504 p. (in Russian).
7. Stocker T. F. Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P. M., eds. *IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, 2013. 1535 p.
8. Loginov V. F. *Space factors of climate change*. Minsk, 2020. 168 p. (in Russian).
9. Alekseev G. V. Arctic dimension of global warming. *Led i sneg = Ice and snow*, 2014, vol. 54, no. 2, pp. 53–68 (in Russian).
10. Alekseev G. V., Vyazilova A. E., Kharlanenkov N. E. Impact of low latitudes on the climatic conditions in the main Siberian rivers catchment area. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and Applied Climatology*, 2020, vol. 4, pp. 54–67 (in Russian). <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2020-4-54-67>
11. Loginov V. F., Suhomazova G. I. On the genesis of fluctuations in the temperature regime of the Northern Hemisphere. *Izvestiya VGO = News of the All-Union Geographical Society*, 1970, vol. 102, no. 4, pp. 374–375 (in Russian).
12. Mann H. B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 1945, vol. 13, no. 3, pp. 245–259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
13. Kendall M. G. *Rank Correlation Methods, 4th ed.* London, 1975. 272 p.
14. Gilbert R. O. *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*. New York, 1987. 336 p.
15. Коепке Л., Ashida G., Kretzberg J. Single and Multiple Change Point Detection in Spike Trains: Comparison of Different CUSUM Methods. *Frontiers in Systems Neurosciences*, 2016, vol. 10. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2016.00051>
16. Golyandina N. E. *The “Caterpillar” method-SSA: time series analysis*. Saint-Petersburg, 2004. 76 p. (in Russian).
17. Golyandina N., Korobeynikov A., Shlemov A., Usevich K. Multivariate and 2D Extensions of Singular Spectrum Analysis with the Rssa Package. *Journal of Statistical Software*, 2015, vol. 67, no. 2, pp. 1–78. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i02>
18. Loginov V. F. *Diagnosis of the global climate*. Saint-Petersburg, 2021. 302 p. (in Russian).
19. Hansen J., Sato M., Ruedy R. Radiative forcing and climate response. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, vol. 102, no. D6, pp. 6831–6864. <https://doi.org/10.1029/96jd03436>

20. Schlesinger M. E. Equilibrium and transient climatic warming induced by increased atmospheric CO₂. *Climate Dynamics*, 1986, vol. 1, no. 1, pp. 35–51. <https://doi.org/10.1007/bf01277045>
21. Sazonov B. I., Loginov V. F. *Solar-tropospheric relations*. Leningrad, 1969. 116 p. (in Russian).
22. Marius A., Eldevik T., Viste E., Drange H., Furevik T., Johnson H. L., Keenlyside N. S. Skillful prediction of northern climate provided by the ocean. *Nature communication*, 2017, vol. 8, no. 1, art. 15875. <https://doi.org/10.1038/ncomms15875>
23. Loginov V. F., Lysenko S. A., Mel'nik V. I. *Climate changes in Belarus: reasons, consequences, possibilities of regulation*, 2d ed. Minsk, 2020. 264 p. (in Russian).

Информация об авторах

Лысенко Сергей Александрович – д-р физ.-мат. наук, профессор, директор. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lysenkorfe@gmail.com.

Логинов Владимир Федорович – академик, д-р географ. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nature@ecology.basnet.by.

Information about the authors

Lysenko Sergey A. – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Director. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lysenkorfe@gmail.com.

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., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nature@ecology.basnet.by.