

ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

С.А. Лысенко^{}, И.В. Буяков*

Государственное научное учреждение «Институт природопользования
Национальной академии наук Беларуси»,
Беларусь, 220076, г. Минск, ул. Ф. Скорины, д. 10;
адрес для переписки: * lysenko.nature@gmail.com

Реферат. На основе среднесуточных данных по приземной температуре воздуха и спектрального сингулярного анализа исследуются пространственно-временные особенности изменения климата в Беларуси за период с 1960 по 2019 гг. Рассматриваются главные компоненты и многолетние средние аномалии среднегодовой, зимней и летней температур воздуха, количества морозных дней в холодный период года и количества зимних дней с оттепелями, продолжительности и теплообеспеченности вегетационного периода, частоты и интенсивности волн тепла. Оцениваются скорости перемещения годовой суммы активных температур и продолжительности вегетационного периода с юга на север Беларуси в результате глобального потепления. По данным реанализа ERA5, оцениваются пространственно-временные изменения баланса между годовым количеством осадков и потенциальным испарением с 1979 по 2019 гг.

Показано, что среднегодовая температура воздуха в 2000-2019 гг. превысила норму на 1.8°C , а изменение ее трендовой компоненты с 1960 по 2019 гг. составило 2.5°C . Годовая сумма активных температур за 10 лет сдвигается на север примерно на 120 км, причем с ускорением. В последние 20 лет скорость этого смещения увеличилась в 2 раза по сравнению с периодом 1980-2000 гг. Продолжительность вегетационного периода продвигается с юга на север со скоростью ~ 110 км/10 лет.

Увеличение потенциального испарения в результате потепления воздуха при слабо изменяющейся годовой сумме атмосферных осадков приводит к аридизации климата Беларуси, а сокращение длительности холодного периода с одновременным увеличением числа оттепелей не способствует пополнению водных запасов в период снеготаяния. Дополнительный вред лесному и сельскому хозяйству наносят волны тепла, частота которых за 2000-2019 гг. возросла примерно в 4 раза по сравнению с предыдущим 20-летним периодом.

Ключевые слова. Региональные изменения климата, среднесуточные температуры воздуха, осадки, потенциальное испарение, тренды, главные компоненты, функция распределения, пространственные закономерности, аридизация климата.

Введение

Современное потепление климата в различных регионах выражено не одинаково и имеет различные социально-экономические последствия. В север-

ных странах потепление климата идет на пользу развитию земледелия и экономии энергоресурсов на отопление помещений в холодный период года. С другой стороны, некоторые южные страны, прибрежные территории и небольшие острова из-за повышения влажности, средней температуры воздуха, уровня океана и нехватки питьевой воды к концу текущего столетия могут стать практически непригодными для жизни (IPCC, 2018).

Республика Беларусь также испытывает на себе множество неблагоприятных последствий изменений климата. Анализ среднегодовых температур за весь период инструментальных наблюдений на территории Беларуси (с 1881 года) показывает, что из 20-ти наиболее теплых лет 15 приходится на текущее столетие. Среднегодовая температура в 2019 году составила 8.8°C и оказалась самой высокой за весь период инструментальных наблюдений (на 2.1°C выше климатической нормы). Предыдущий температурный рекорд был установлен в 2015 году, когда среднегодовая температура воздуха превысила норму на 1.8 °C.

Одновременно с ростом средней температуры воздуха увеличилась и повторяемость периодов с аномально жаркой погодой, так называемых «волн тепла», наносящих большой вред окружающей среде и здоровью людей (Клевец и др., 2015). Быстрый рост температуры воздуха при практически неизменяющейся годовой сумме осадков способствует увеличению повторяемости и продолжительности атмосферных и почвенных засух, причиняющих большой ущерб лесному и сельскому хозяйству (Логинов, 2010; Подгорная и др., 2015). Особенно остро эта проблема сейчас стоит для территории Белорусского Полесья (на юге Беларуси), которая на три четверти представлена почвами легкого гранулометрического состава – песчаными и супесчаными – с низкой влагоудерживающей способностью (не более 20 % от их массы).

Проблема засух в Белорусском Полесье достигла рекордных масштабов в 2015 году. Низкое количество осадков в 2014 и 2015 годах (примерно на 20% ниже нормы) наряду с аномально высокими температурами воздуха в 2015 году вызвали катастрофическое снижение водных ресурсов в южных регионах Беларуси. На многих гидрологических постах Гомельской области в 2015 г. были зафиксированы исторические минимумы уровней грунтовых вод: на 1-2 м ниже нормы. Средний уровень воды в реках Гомельской области стал примерно в 2 раза ниже нормы (Логинов и др., 2020). В эти и последующие годы сильно ухудшилась влагообеспеченность почв и условия произрастания сельскохозяйственных культур, началось массовое усыхание деревьев и их поражение короедом. По данным web-системы глобального мониторинга состояния леса Global Forest Watch общая площадь древесного покрова в Гомельской области с 2015 по 2018 годы сократилась примерно на 4.2%. В сельских населенных пунктах вследствие значительного снижения уровней грунтовых вод существенно ухудшились условия эксплуатации источников нецентрализованного водоснабжения – неглубоких скважин и колодцев, многие из которых пересохли.

Обострившиеся в последние годы проблемы засух в Беларуси потребовали пересмотра действующих представлений о темпах потепления климата на ее территории, скорости продвижения с юга на север границ агроклиматических зон и влиянии этих процессов на гидрологические условия региона.

В настоящей работе представлены пространственно-временные характеристики изменения климата в Беларуси, актуализированные с учетом последних лет и уточненные с использованием современных методов выделения трендовых и циклических компонент временных рядов. Рассматриваются следующие характеристики климата: среднегодовая, зимняя и летняя температуры воздуха, количество морозных дней в холодный период года и количество зимних дней с оттепелями, продолжительность и теплообеспеченность вегетационного периода, частота и интенсивность волн тепла, разница между количеством осадков и потенциальным испарением. Оцениваются скорости продвижения климатических условий вегетационного периода с юга на север в результате глобального потепления.

Используемые данные и методы исследования

Информационной базой исследования служили данные суточного разрешения по приземной температуре воздуха на 49 метеорологических станциях Беларуси за период с 1960 по 2019 год.

Для исследования временной структуры изменений температуры воздуха использовался метод спектрального сингулярного анализа (далее – ССА), в русскоязычной литературе называемый также «методом гусеницы» (Голяндина, 2004; Golyandina et al., 2015). Данный метод основан на получении из исходного временного ряда выборки из скользящих отрезков заданной длины и применении к ним метода главных компонент. Главным достоинством ССА является возможность разложения любого временного ряда на элементарные составляющие без предварительного задания их модели. За счет этого свойства ССА повышается достоверность выделения слабо выраженного тренда на фоне шума и периодического сигнала большой интенсивности, присутствующих во временных рядах метеорологических параметров. Периодичность составляющих временного ряда оценивалась путем применения к ним преобразования Фурье.

Самым не формализуемым шагом метода ССА является группировка главных компонент. Периодическую компоненту исходного временного ряда обычно описывают два собственных вектора, которым соответствуют близкие по значению собственные числа его сингулярного разложения. Такие собственные векторы, при их нанесении на двумерную диаграмму, как правило, описывают фигуры правильной геометрической формы, что упрощает группировку главных компонент.

Ширина скользящего окна в методе ССА не должна превышать половины исходного временного ряда, но при этом должна быть не меньше периода его выделяемой квазипериодической компоненты. В нашем случае ряды климатических характеристик охватывают 60-летний период, поэтому ширина окна ограничивалась сверху 30 годами, а, учитывая большую случайную составляющую анализируемых рядов, его нижний предел не представляло смысла брать меньше 20 лет. Выбор любой ширины окна из этого диапазона обеспечивал практически одинаковое сингулярное разложение

анализируемых временных рядов. Так, например, первая главная компонента среднегодовой температуры воздуха, вычисляемая при ширине окна от 20 до 30 лет, демонстрирует среднеквадратическое отклонение около 0.04°C , что на два порядка меньше абсолютной величины ее изменений за рассматриваемые годы.

Оценки изменений гидрологического режима на территории Беларуси в результате потепления климата выполнялись на основе реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды пятого поколения ERA5, отличающегося более высоким временным (3 часа) и пространственным (~ 31 км) разрешением по сравнению с другими современными реанализами.

Температура воздуха

Средняя температура воздуха зимой в Беларуси подвержена большой межгодовой изменчивости (рис. 1а). Первая (наиболее медленно меняющаяся) главная компонента (ГК) временного ряда зимней температуры объясняет лишь 18% его общей дисперсии за период с 1960 по 2019 гг. Две следующих по значимости ГК в совокупности описывают квазициклическое колебание с периодом около 8 лет, выбирающее примерно 26% дисперсии зимней температуры воздуха. Первая ГК практически совпадает с линейным трендом временного ряда зимней температуры, вычисленным методом наименьших квадратов (далее – МНК). Оценка зимнего потепления в Беларуси по изменению этой компоненты с 1960 по 2019 годы дает величину 4.2°C , тогда как аналогичная оценка по коэффициенту линейного тренда составляет 3.8°C при уровне значимости по t-критерию Стьюдента выше 99% ($p = 6.2 \times 10^{-4}$).

Зима 2019-2020 годов оказалась самой теплой за весь период метеорологических наблюдений в Беларуси: средняя температура воздуха составила $+1.5^{\circ}\text{C}$, что выше климатической нормы на 5.5°C . Этому способствовали активный и устойчивый перенос теплых воздушных масс из Атлантики и отсутствие вторжений холодного воздуха с Арктики.

Стоит заметить, что общая циркуляция атмосферы в регионе северной Атлантики оказывает значительное влияние на зимнюю температуру воздуха в Беларуси. Основная мода изменчивости этой циркуляции характеризуется индексом Северо-Атлантического колебания (САК), вычисляемым по разности давлений на уровне моря между Исландским минимумом и Азорским максимумом (Hurrell, Deser, 2010). В положительную фазу этого индекса усиливается меридиональный тип циркуляции в зоне $50\text{--}60^{\circ}$ с.ш., траектории циклонов смещаются на север, формируются положительные аномалии температуры воздуха на территории Европы (Нестеров, 1992). Существуют периоды, когда аномалии САК преимущественно одного знака сохраняются на протяжении нескольких лет. Такие аномалии могут поддерживаться более инерционными по сравнению с атмосферой процессами океанической циркуляции, связанными с САК через турбулентные потоки явного и скрытого тепла на поверхности океана (Полонский, Сухонос, 2019; Sun et al., 2015).

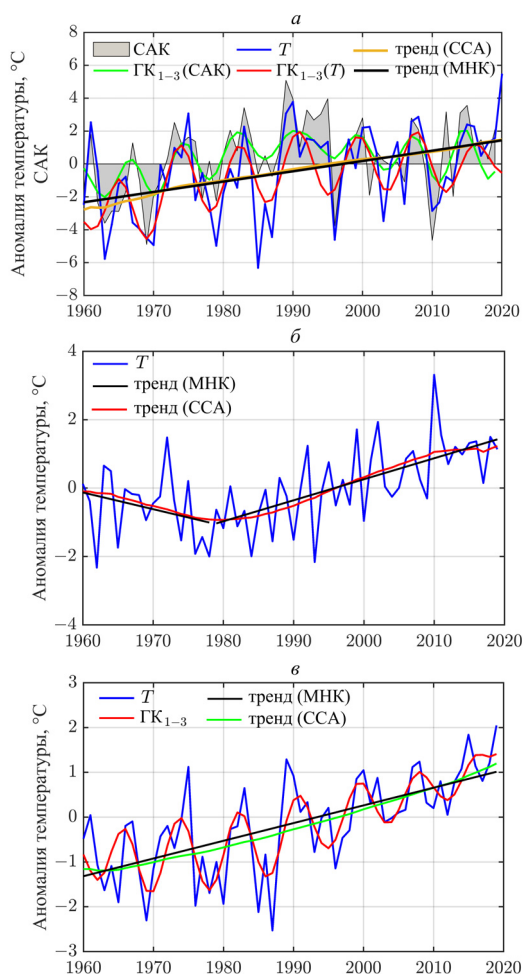


Рисунок 1. Временные ряды аномалий средних температур воздуха (T) зимой (а), летом (б) и в целом за год (в), индекса североатлантического колебания (далее - САК) с декабря по март (а), их трендовые и квазициклические компоненты, выделенные на основе спектрального сингулярного анализа (ССА) и метода наименьших квадратов (МНК) $ГК_{1-3}$ – суммы первых трех главных компонент сингулярного разложения временных рядов, включающие тренд и квазициклические компоненты с периодом около 8 лет; аномалии рассчитаны относительно периода 1981-2010 гг.

Figure 1. Time series of anomalies of average temperature of air (T) in winter (a) summer (b) and whole year (c), index, North Atlantic oscillation (hereafter NAO) from December to March (a), their trend and quasi-cyclic components are selected on the basis of spectral singular analysis (SSA) and least squares method (OLS)

$ГК_{1-3}$ – the sums of the first three principal component singular value decomposition of time series including trend and quasi-cyclic components with a period of about 8 years; anomalies calculated relative to the period 1981-2010 years

Спектральный сингулярный анализ всего доступного временного ряда индекса САК (с 1864 года), рассчитанного по станционным данным Национального центра атмосферных исследований США, показывает наличие в нем устойчивой квазициклической компоненты с периодом около 7.8 лет. На эту компоненту приходится примерно 12% общей дисперсии индекса САК, вычисляемого с его усреднением как для холодного периода года (декабрь-

март), так и в целом за год. Колебания САК с периодичностью 5-8 лет, обнаруживались ранее в работах (Полонский, Сухонос, 2019; Яковлева, Башмачников, 2019; Jackson et al., 2016), и, по мнению авторов этих работ, связаны с аномалиями солености вод в море Лабрадор и составляющих теплового баланса верхнего квазиоднородного слоя Северной Атлантики.

Отмеченная компонента САК практически синхронна квази-8-летней компоненте зимней температуры воздуха в Беларуси (рис. 1а). Коэффициент корреляции между ними составляет 0.67 при уровне значимости выше 99% ($p = 5.9 \times 10^{-9}$). Это позволяет предположить, что квази-8-летнее колебание зимней температуры воздуха в Беларуси носит неслучайный характер, а обусловлено изменениями в общей атмосферной циркуляции, связанными с САК.

Летняя температура воздуха в Беларуси начала демонстрировать отчетливый рост с конца 1970-х годов (рис. 1б). Ее первая главная компонента, ассоциируемая с трендом, с 1979 по 2019 годы увеличилась на 2.2 °C. В этот период летняя и зимняя температуры воздуха в Беларуси возрастали практически с одинаковой скоростью – 0.061 и 0.063°C/год соответственно. Самое жаркое лето в Беларуси было в 2010 году. С 2012 года наблюдается некоторое замедление темпов летнего потепления.

Временной ряд среднегодовой температуры воздуха содержит как трендовую, так и квазипериодическую компоненты, которые в совокупности объясняют ~66% его общей дисперсии (рис. 1в). Квазициклическая компонента (с периодом 8.4 года), на долю которой приходится 21% дисперсии среднегодовой температуры, проявляется за счет зимних месяцев. Ее амплитуда со временем убывает в связи с ускорением летнего потепления с конца 1970-х годов, которое происходит без каких-либо значимых колебаний указанной периодичности. Общий рост среднегодовой температуры с 1960 по 2019 годы, оцениваемый как по коэффициенту ее линейного тренда, так и по изменению ее первой главной компоненты, дает примерно одну и ту же величину – около 2.5°C.

Морозы и оттепели в холодный период года

За время потепления в Беларуси произошла существенная трансформация функции распределения температуры воздуха в холодный период года (ноябрь-март): существенно возросла вероятность положительных и снизилась вероятность низких отрицательных температур. В результате увеличилось количество дней с оттепелью и уменьшилось количество морозных дней. Основные изменения температурных условий холодного периода года произошли до начала 1990-х годов, когда в Беларуси отмечалось потепление зимнего типа.

В многолетних изменениях количества морозных дней в холодный период года и количества зимних дней с оттепелями прослеживаются тренды и квазициклические составляющие с периодом около 8 лет (рис. 2). Квазициклические компоненты их временных рядов тесно коррелируют с аналогичной компонентой САК. Наибольший коэффициент корреляции (~0.91) вполне ожидаемо достигается для продолжительности зимних оттепелей, формирующихся под влиянием циклонов с Атлантики.

Основное снижение количества морозных дней в холодный период года произошло до 1990 г. Так, суммарная продолжительность периода со среднесуточной температурой воздуха ниже 5-го и 10-го перцентилей ее распределения (далее – T_5 и T_{10}) с 1960 по 1990 гг. уменьшилась на 8 и 12 дней соответственно (рис. 2а, б). После 1990 г. эти периоды сократились еще на 2 и 3 дня соответственно. Среднее количество дней в году с температурами ниже T_5 и T_{10} в период 1960-1990 гг. составило 10.9 и 20.6 соответственно, а в период 1991-2019 гг. – 6.6 и 13.6 соответственно.

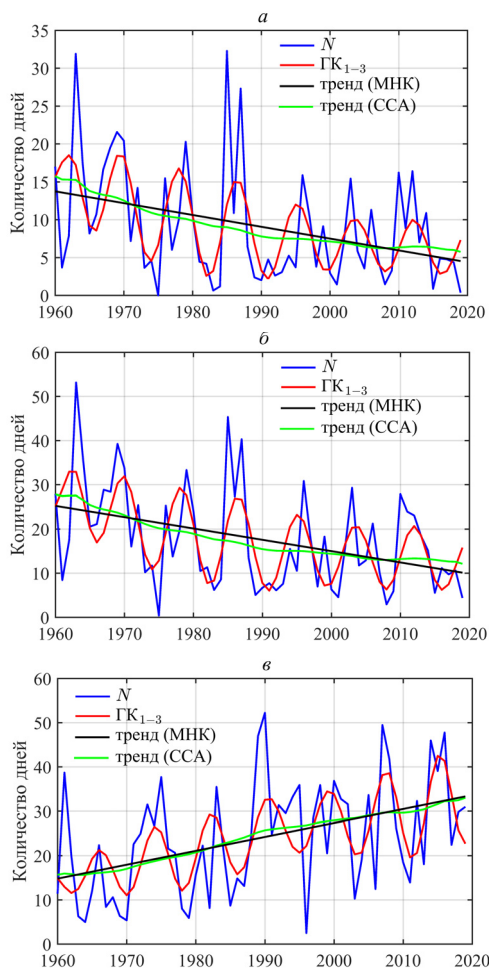


Рисунок 2. Временные ряды количества дней (N) в году со среднесуточными температурами воздуха ниже 5-го (а) и 10-го (б) перцентилей ее распределения для холодного периода года (ноябрь–март), количество зимних дней с оттепелями (в), их трендовые и квазициклические компоненты

Figure 2. Time series of the number of days (N) in a year with average daily air temperatures below the 5th (a) and 10th (b) percentile of its distribution for the cold period of the year (November–March), the number of winter days with thaws (C), their trend and quasi-cyclical components

Суммарная за зиму продолжительность оттепелей в периоды 1960-1990 гг. и 1991-2019 гг. составила 20.4 и 28.5 дней соответственно. В ее пространственном распределении присутствует юго-западный градиент, соответствующий направлению преимущественного переноса воздушных масс, приходя-

щих на Беларусь с Атлантики в зимние месяцы (рис. 3). С 1991 года максимальное количество дней с оттепелью (~40) отмечается на западе Брестской области, а минимальное (~20) – на востоке Витебской и Могилевской областей. Трендовая компонента средней по Беларуси продолжительности периода с оттепелями с 1960 по 2019 гг. увеличилась с 16 до 33 дней. Наибольший рост числа дней с оттепелями (до 22) произошел на юго-западе Беларуси, наименьший (около 12) – на юго-востоке.

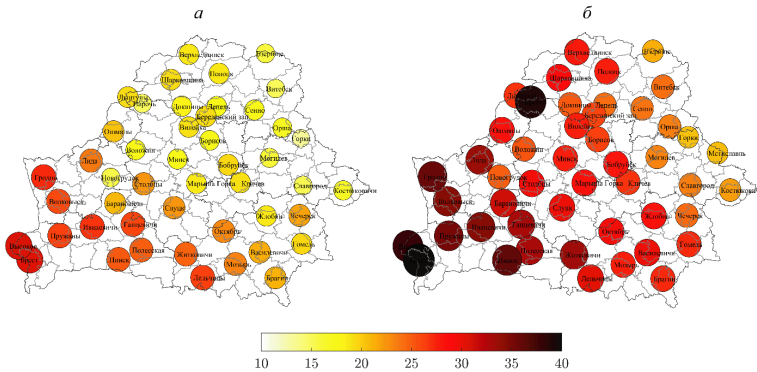


Рисунок 3. Среднее количество зимних дней с оттепелями в периоды 1960-1990 гг. (а) и 1991-2019 гг. (б)

Figure 3. Average number of winter days with thaws in the periods 1960-1990 (a) and 1991-2019 (b)

Продолжительность и теплообеспеченность вегетационного периода

В агрометеорологии условия обеспечения растений теплом в вегетационный период принято оценивать по годовой сумме активных температур, превышающих 10°C . С 1980 года среднее для Беларуси значение этой суммы увеличилось на 492°C (с 2239 до 2731°C). В результате произошло изменение границ агроклиматических зон (областей). Теплообеспеченность вегетационного периода, которая в 80-е годы была свойственна самым южным районам Беларуси, сейчас уже характеризует агрометеорологические условия Витебской (самой северной) области.

О скорости продвижения годовой суммы активных температур на север в результате глобального потепления можно судить по рис. 4. На данном рисунке значения этой суммы, полученные на метеорологической сети, расположены в зависимости от географической широты станции и аппроксимированы полиномом первой степени. Расчеты выполнены для четырех последовательных десятилетий, охватывающих период с 1980 по 2019 г.

Наклон всех прямых на рис. 4 примерно одинаков ($-126^{\circ}\text{C}/1^{\circ}\text{с.ш.}$), что говорит о постоянстве широтного градиента суммы активных температур на территории Беларуси в рассматриваемые годы. Однако абсолютные значения этой суммы продвигаются на север, причем с ускорением. В 1980-2000 гг. скорость этого продвижения была 72 км/10 лет, в 1990-2010 гг. – 122 км/10 лет, а в 2000-2019 гг. – 151 км/10 лет. Таким образом, тепловые ресурсы вегетационного периода в среднем за 10 лет смещаются с юга на север примерно на 120 км.

Несложно рассчитать, что при сохранении нынешних темпов потепления климата в ближайшие 30 лет, у северных границ Беларуси будет примерно такая же сумма активных температур, которая сейчас наблюдается у ее южных границ.

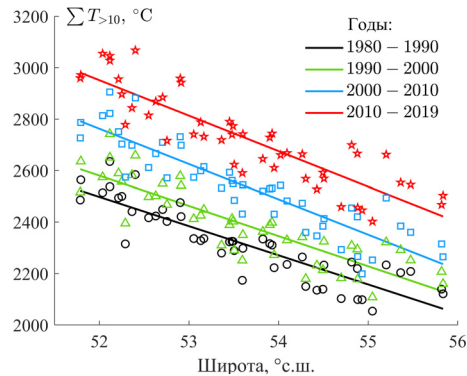


Рисунок 4. Широтная зависимость годовой суммы активных температур для четырех последних десятилетий
Символы – данные метеонаблюдений, прямые – их линейная аппроксимация
Figure 4. Latitudinal dependence of the annual sum of active temperatures for the last four decades
Symbols – data from meteorological observations, straight lines – their linear approximation

Средняя продолжительность вегетационного периода за последние 20 лет увеличилась на 9 дней. В настоящее время она изменяется от 159 дней на севере до 178 дней на юге Беларуси (в 1980-1999 гг. этот диапазон был 152-166 дней).

Продолжительность вегетации в Беларуси с 1960 по 2019 годы изменялась неравномерно: периоды ее увеличения (1978-1988, 1998-2008) чередовались с периодами уменьшения (1966-1977, 1989-1996, 2008-2016). Спектральный сингулярный анализ ее временного ряда показывает присутствие в нем 20-летней квазипериодической компоненты с амплитудой около 7 дней, объясняющей примерно 21% общей дисперсии ряда (рис. 5).

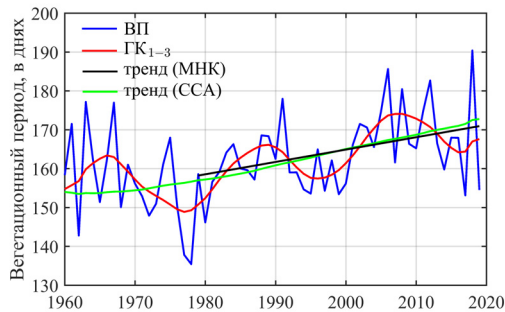


Рисунок 5. Временной ряд продолжительности вегетационного периода в Беларуси, его первые три главные компоненты ($ГК_{1-3}$) и тренды, выделенные на основе МНК и ССА
Figure 5. A time series of growing season duration in Belarus, its first three principal components (PC_{1-3}) and trends identified by LSM and SSA

Для оценки пространственных особенностей современных изменений продолжительности вегетационного периода на территории Беларуси ее значения, рассчитанные по станционным данным, расположены в зависимости от

широты местности (рис. 6) и аппроксимированы полиномами первой степени. Соответствующее уравнение имеет вид:

$$t_{VP} = -3.54\varphi + 349.7 \text{ для периода 1979-1999 гг.,}$$

$$t_{VP} = -4.73\varphi + 422.6 \text{ для периода 2000-2019 гг.,}$$

где t_{VP} – продолжительность вегетационного периода в днях, φ – широта местности в градусах. Из приведенных зависимостей следует, что продолжительность вегетационного периода за 2000-2019 гг. сместилась на север в среднем на 218 км и стала более контрастной по отношению между севером и югом по сравнению с предыдущим 20-летним периодом.

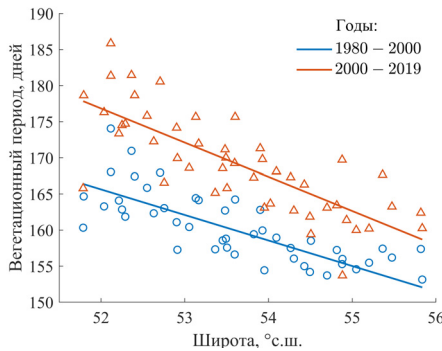


Рисунок 6. Широтные зависимости продолжительности вегетации в Беларуси для двух периодов

Символы – станционные данные, прямые – аппроксимации

Figure 6. Latitudinal dependences of the vegetation duration in Belarus for two periods

Symbols – station data, straight lines – approximations

Волны тепла

Волны тепла выделялись в данных метеонаблюдений как периоды, на протяжении которых среднесуточная температура воздуха более чем 5 последовательных суток превышает 90-й процентиль ее распределения для летних месяцев на данной местности. Средняя функция вероятности температуры рассчитывалась для периода 1981-2010 гг., рекомендованного ВМО для вычисления метеорологических норм.

Гистограмма распределения и функция вероятности среднесуточной температуры воздуха летом на метеостанциях Беларуси для двух 20-летних периодов до и после 2000 года сопоставлены на рис. 7. Гистограммы распределений температуры для обоих периодов хорошо описываются функцией Гаусса с практически одинаковым среднеквадратическим отклонением $\sim 3.5^\circ\text{C}$, но математическими ожиданиями, различающимися на 1.2°C . Таким образом, в результате глобального потепления функция распределения среднесуточной температуры воздуха летом на территории Беларуси равномерно смещается в сторону больших значений, практически не меняя своего вида. При этом вероятности наступления высоких и низких температур изменяются примерно в равной степени. Однако если повышение минимальных температур воздуха летом скорее является положительным фактором изменения кли-

мата, то увеличение вероятности наступления длительных эпизодов жары, так называемых «волн тепла», может крайне отрицательно сказываться на здоровье людей, качестве окружающей среды и условиях произрастания сельскохозяйственных культур.

Сравнение функций вероятности среднесуточной летней температуры для двух рассматриваемых периодов (рис. 7б) показывает, что с 2000 года резко возросла вероятность наступления высоких температур (выше 90-го процентиля): за 2000-2019 гг. эта вероятность увеличилась более чем в 2 раза по сравнению предыдущим 20-летним периодом – с 7.2% до 15.5%.

Частота возникновения волн тепла на метеостанциях Республики Беларусь в период 1980-1999 гг., не превышала 0.35 год^{-1} при среднем значении 0.21 год^{-1} (т. е. примерно раз в 5 лет). В текущем столетии волны тепла на этих же метеостанциях регистрировались с частотой $0.53\text{-}1.3 \text{ год}^{-1}$ и 0.83 год^{-1} в среднем по Беларуси. Таким образом, в настоящее время волны тепла в Беларуси возникают не реже 1 раза в 2 года, а на некоторых станциях, в особенности на юге Беларуси, они наблюдаются по несколько раз в год.

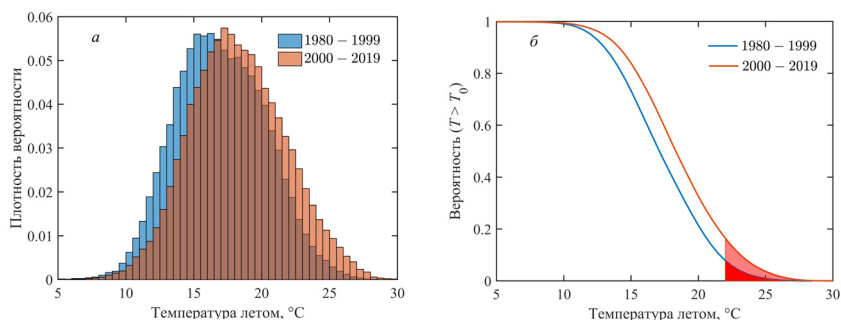


Рисунок 7. Гистограммы распределения и функции вероятности среднесуточной температуры воздуха на метеостанциях Беларуси для периодов 1980-1999 и 2000-2019 гг. Площади закрашенных областей под кривыми на рисунке б соответствуют вероятностям возникновения температур выше 90-го процентиля

Figure 7. Histograms of the distribution and probability functions of the average daily air temperature at weather stations in Belarus for the periods 1980-1999 and 2000-2019
The areas of the shaded areas under the curves in figure b correspond to the probabilities of temperatures above the 90th percentile

Количественными характеристиками волн тепла являются их средняя продолжительность и интенсивность. Интенсивность или кумулятивная температурная аномалия рассчитывалась как сумма разностей между суточной температурой воздуха на протяжении волны тепла и ее нормой для данной территории. Распределения этих характеристик по метеостанциям Беларуси для рассматриваемых периодов представлены на рис. 8.

Видно, что рост продолжительности и интенсивности волн тепла пришелся главным образом на восточную часть Беларуси. Средняя продолжительность волн тепла за последние 20 лет увеличилась с 6.4 до 7.9 суток, а их средняя интенсивность – с 39.5 до 53.9 °C. В восточных частях Гомельской и Могилевской областей наблюдается более чем двукратное увеличение интенсивности волн тепла, связанное с существенно возросшей там вероятностью наступления высоких значений температур.

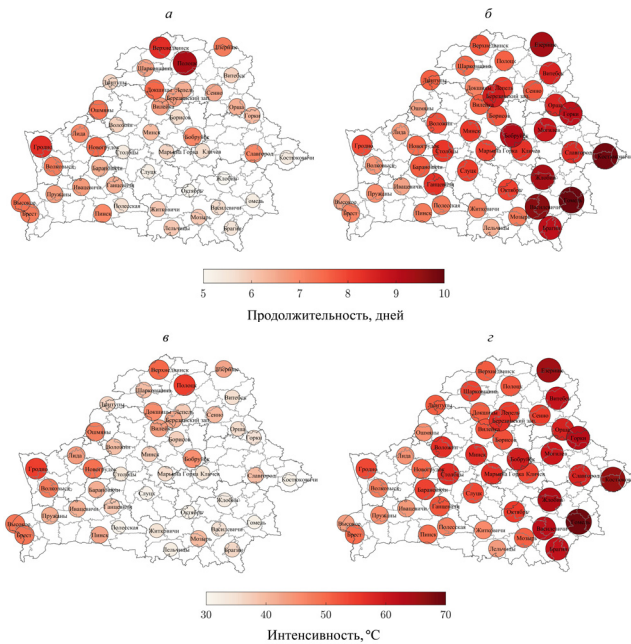


Рисунок 8. Средняя продолжительность (а, б) и интенсивность (в, г) волн тепла, зарегистрированных на метеостанциях Беларуси в периоды 1980-1999 гг. (а, в) и 2000-2019 гг. (б, г)

Figure 8. Average duration (a, b) and intensity (C, d) of heat waves recorded at weather stations in Belarus in the periods 1980-1999 (a, C) and 2000-2019 (b, d)

Изменение гидрологического режима

Наблюдаемые тенденции потепления климата в целом могут способствовать развитию земледелия на севере Беларуси. Проблемы засух здесь успешно нивелируются высокой влагоудерживающей способностью почв преимущественно тяжелого гранулометрического состава. Однако в Белорусском Полесье преобладают песчаные и супесчаные почвы, неспособные эффективно удерживать влагу. В связи с этим быстрый рост температуры воздуха без сопутствующего роста атмосферных осадков, а также увеличение повторяемости и интенсивности волн тепла наносят большой вред сельскому и лесному хозяйству в этом регионе.

О тенденциях в условиях влагообеспеченности территории Беларуси, складывающихся в результате изменения климата, можно судить по рис. 9, на котором представлены карты разностей годовых сумм осадков и потенциального испарения (испаряемости) для двух периодов – 1980-1999 и 2000-2019 гг.

Видно, что до 2000 г. годовое количество осадков превышало годовую испаряемость на всей территории Беларуси, причем в северных регионах это превышение доходило до 300 мм. За период 2000-2019 гг. соотношение между осадками и испаряемостью поменялось кардинальным образом: в настоящее время отрицательный баланс наблюдается на всей территории Брестской и Гомельской областей, нулевой баланс – на юге Гродненской, Минской и

Могилевской областей, а максимальное значение этого баланса в остальной части страны не превышает 150 мм. Такое снижение водного баланса вызвано быстрым потеплением воздуха, а вместе с этим и влагоемкости атмосферы при отсутствии роста годового количества атмосферных осадков.

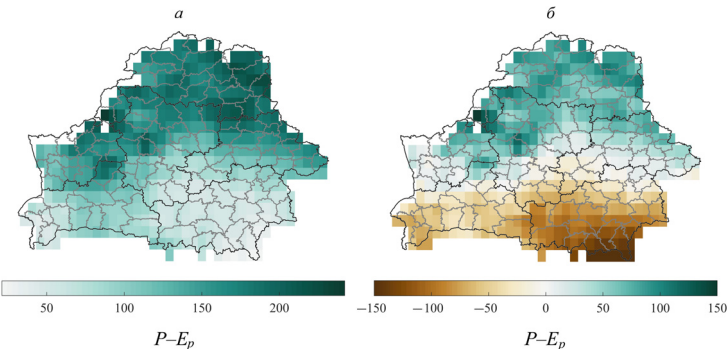


Рисунок 9. Разность годовых сумм атмосферных осадков (P) и потенциального испарения (E_p) в периоды 1980-1999 гг. (а) и 2000-2019 гг. (б)
Figure 9. Difference between annual precipitation (P) and potential evaporation (E_p) in the periods 1980-1999 (a) and 2000-2019 (b)

Таким образом, в настоящий период южные регионы Беларуси подвержены интенсивному процессу аридизации (иссушения) климата, представляющему серьезную проблему для лесного и сельского хозяйства и требующего своевременного принятия адаптационных мер.

Оценки трендов климатических характеристик

Для прогнозирования средних скоростей изменения рассмотренных выше климатических характеристик в ближайшие годы рассмотрим оценки их трендов, полученные применением к их временным рядам линейной модели регрессии. Достоверность модели оценивалась по стандартному алгоритму с привлечением t -критерия Стьюдента. Результаты расчетов сведены в таблице. Данные оценки в целом подтверждают выводы, сделанные на основе спектрального сингулярного анализа временных рядов климатических характеристик.

Таблица. Коэффициенты линейных трендов климатических характеристик с оценками их статистической значимости (p -значений)

Параметр	Период изменения	Коэффициент тренда	R^2	p -значение
T_{winter}	1960-2019	0.063 °C/год	0.17	9.3×10^{-4}
T_{summer}	1979-2019	0.061 °C/год	0.41	5.9×10^{-6}
T_{annual}	1960-2019	0.040 °C/год	0.42	2.0×10^{-8}
$N_{\text{cold}(5)}$	1960-2019	-0.16 дней/год	0.13	5.2×10^{-3}
$N_{\text{cold}(10)}$	1960-2019	-0.26 дней/год	0.15	2.1×10^{-3}
N_{thaw}	1960-2019	0.31 дней/год	0.18	6.2×10^{-4}

$\sum t_{HW}$	1980-2019	0.23 дней/год	0.20	3.6×10^{-3}
I_{HW}	1980-2019	1.1 °C/год	0.34	9.0×10^{-5}
$\sum T_{>10}$	1979-2019	12 °C/год	0.48	5.8×10^{-7}
t_{VP}	1979-2019	0.32 дней/год	0.16	0.01
$P - E$	1979-2019	-3.0 мм/год	0.25	1.1×10^{-3}
$P - E_p$	1979-2019	-5.7 мм/год	0.19	5.4×10^{-3}

Примечание: T_{winter} , T_{summer} и T_{annual} – средняя зимняя, летняя и годовая температура воздуха соответственно, $N_{\text{cold}(5)}$ и $N_{\text{cold}(10)}$ – количество дней в холодный период года с температурами воздуха ниже 5 и 10 процентилей соответственно, $\sum t_{HW}$ – суммарная продолжительность летних волн тепла, I_{HW} – средняя интенсивность волн тепла, $\sum T_{>10}$ – годовая сумма активных температур, t_{VP} – продолжительность вегетационного периода, P – годовая сумма осадков, E и E_p – годовая сумма фактического и потенциального испарения соответственно.

Заключение

Основные черты современного потепления климата в Беларуси сводятся к следующему.

1. Средняя температура воздуха в 2000-2019 гг. выросла на 2.1°C зимой и на 1.6°C летом по сравнению с климатической нормой за 1961-1990 гг. Если судить о потеплении климата по изменению трендовой компоненты временного ряда температуры воздуха, то рост зимней температуры с 1960 по 2019 годы в зависимости от метода оценивания тренда составил от 3.8 до 4.2°C, а рост летней температуры, начавшийся с 1979 года, – от 2.2 до 2.5°C. Среднегодовая температура воздуха в 2000-2019 гг. превысила норму на 1.8°C, а ее трендовая компонента с 1960 по 2019 годы приросла на 2.5°C.

2. Сократилось количество дней с низкими температурами воздуха. В холодный период года (ноябрь-март) среднесуточная температура воздуха ниже 5-го и 10-го процентилей в 1991-2019 гг. стала встречаться в среднем на 4 и 7 дней реже, чем в период 1961-1990 гг. Трендовые компоненты в изменении этих температур с 1960 по 2019 гг. уменьшились на 10 и 15 дней соответственно.

3. Средняя продолжительность оттепелей зимой в 2000-2019 гг. увеличилась на 8 дней по сравнению с климатической нормой, а ее трендовая компонента с 1960 по 2019 гг. выросла на 17 дней, достигнув величины около 33 дней.

4. Вероятность возникновения летом среднесуточной температуры выше 90-го процентиля в 2000-2019 гг. увеличилась до 15.5%, тогда как в предыдущий 20-летний период она составляла 7.2%. В связи с этим участились и усилились волны тепла. Средняя частота волн тепла на территории Беларуси в 1980-1999 гг. была не выше 0.35 год^{-1} , а в 2000-2019 гг. она увеличилась до $0.53\text{-}1.3 \text{ год}^{-1}$ при среднем значении 0.83 год^{-1} . Их средняя продолжитель-

ность увеличилась на 1.5 дня и в настоящее время составляет около 8 дней, а их средняя интенсивность, рассчитываемая по суммарной аномалии среднесуточной температуры на протяжении волны тепла, увеличилась на 14.4°C (36%) и в настоящее время составляет 53.9°C. На востоке Беларуси интенсивность волн тепла в текущем столетии увеличилась более чем в 2 раза по отношению к предыдущему 20-летнему периоду 1980-1999 гг.

5. Продолжительность вегетационного периода за 2000-2019 гг. сместилась на север на 218 км и стала составлять в среднем 169 дней, увеличившись на 9 дней по сравнению с предыдущим 20-летним периодом. На 4.8 дней увеличился контраст в продолжительности вегетационного периода между севером и югом Беларуси.

6. Годовая сумма активных температур, устойчиво превышающих 10°C, с 1980 по 2019 г. возросла на 492°C и в настоящее время она составляет 2420°C на севере и 2980°C на юге Беларуси, уменьшаясь на 126°C с каждым градусом северной широты. В результате глобального потепления годовая сумма активных температур за 10 лет смещается на север примерно на 120 км, причем с ускорением. В последние 20 лет скорость этого смещения увеличилась в 2 раза по сравнению с периодом 1980-2000 гг.

Таким образом, при сохранении наблюдаемых особенностей потепления климата в Беларуси уже через 30 лет на ней могут быть совершенно иные агрометеорологические условия с суммой активных температур от 3000 до 3500°C. Однако степень благоприятности таких условий для лесного и сельского хозяйства будет во многом определяться доступными водными ресурсами, необходимыми для обеспечения почв продуктивной влагой. Однако за период современного глобального потепления статистических значимой тенденции в изменении годовой суммы атмосферных осадков в Беларуси не выявлено. Кроме того, сокращение длительности холодного периода и увеличение числа оттепелей зимой уменьшают количество воды, поступающей в реки в период снеготаяния (поверхностный сток), и снижают практические возможности использования водных ресурсов для орошения в засушливые периоды.

Уже сейчас годовая испаряемость в атмосферу на юге Беларуси более чем на 100 мм превышает годовую сумму осадков, что свидетельствует об ухудшении общей гидрологической ситуации в регионе. Данная проблема усугубляется еще и тем, что на фоне глобального потепления увеличивается частота и интенсивность волн тепла, наносящих большой урон сельскому и лесному хозяйству, а также здоровью людей. Совершенно очевидно, что наблюдаемые изменения климата Беларуси без своевременной адаптации к ним могут иметь весьма негативные экономические и социальные последствия.

Принятие адаптационных мер в сельском хозяйстве потребует перехода к выращиванию более теплолюбивых и засухоустойчивых культур, смещения сроков посева сельскохозяйственных культур с целью максимального использования доступных ресурсов влаги в вегетационный период и использования методов агролесоводства. Применение защитных лесонасаждений будет способствовать обеспечению более влажного и благоприятного для урожая

микроклимата за счет снижения скорости ветра и транспирации в летние месяцы, а в зимний период – накоплению снега в зоне ветровой тени, а вместе с этим уменьшению промерзания почвы и ее увлажнению в период снеготаяния. Диверсифицированные агроэкологические системы в сравнении с монокультурами обладают большим потенциалом для борьбы с вредителями и болезнями, а также устойчивостью к засухам и другим экстремальным погодным явлениям. Однако для адаптации методов агролесоводства к условиям Беларуси необходимы дальнейшие научные исследования и натурные испытания, которые позволят оценить эффективность различных систем земледелия во взаимосвязи с изменением климата.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований по договору № X20-106".

Список литературы

Голяндина Н.Э. 2004. Метод «Гусеница»–SSA. анализ временных рядов. Учеб. пособие. – СПб., 76 с.

Клевец Н.Н., Мельник В.И., Комаровская Е.В. 2015. Волны тепла в Беларуси. – Труды гидрометцентра России, вып. 358, с. 59-66.

Логинов В.Ф. 2010. Изменения климата в Беларуси и их последствия для ключевых ситуаций экономики (сельское и водное хозяйство). – Минск, БелНИЦ «Экология», 151 с.

Логинов В.Ф., Лысенко С.А., Мельник В.И. 2020. Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования. – Минск, УП «Энциклопедикс», 218 с.

Нестеров Е.С. 1992. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. – М., Триада, 144 с.

Подгорная Е.В., Мельник В.И., Комаровская Е.В. 2015. Особенности изменения климата на территории Республики Беларусь за последние десятилетия. – Труды гидрометцентра России, вып. 358, с. 112-120.

Полонский А.Б., Сухонос П.А. Североатлантическое колебание и бюджет тепла верхнего слоя Северной Атлантики. 2019. Фундаментальная и прикладная климатология, № 4, с. 67-100.

Яковлева Д.А., Башмачников И.Л. 2019. Межгодовая изменчивость тепло-содержания и содержания пресной воды в куполе холодных вод моря Лабрадор. – Вестник СПбГУ. Науки о Земле, т. 64, вып. 1, с. 136-158.

Golyandina N., Korobeynikov A., Shlemov A., Usevich K. 2015. Multivariate and 2D Extensions of Singular Spectrum Analysis with the Rssa Package. – Journal of Statistical Software, vol.67, No. 2, pp. 1-78.

Hurrell, J.W., Deser, C. 2010. North Atlantic climate variability: the role of the North Atlantic Oscillation. – Journal of Marine Systems, vol. 79, No. 3-4, pp. 231-244.

Jackson L., Peterson K., Roberts C., Wood R.A. 2016. Recent slowing of Atlantic overturning circulation as a recovery from earlier strengthening. – *Nature Geosci.*, vol. 9, No. 7, pp. 518-522.

IPCC, 2018. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty (Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)). In Press.

Sun C., Li J., Jin F. 2015. A delayed oscillator model for the quasi-periodic multidecadal variability of the NAO. – *Clim. Dyn.*, vol. 45, No. 7, pp. 2083-2099.

Статья поступила в редакцию: 07.10.2020 г.

После переработки: 07.11.2020 г.

THE KEY FEATURES OF THE CURRENT CLIMATE CHANGE IN THE REPUBLIC OF BELARUS

S.A. Lysenko, I.V. Buyakov*

State scientific Institution "Institute for Nature Management
of the National Academy
of Sciences of Belarus",
10, F. Skorina str., 220076, Minsk, Belarus;
* Correspondence address: *lysenko.nature@gmail.com*

Abstract. This paper investigates spatial and temporal features of the climate change in the Republic of Belarus during the period from 1960 to 2019. To accomplish this, we used data on daily average surface air temperature and applied decomposing the time series of these data with singular-spectrum analysis.

We analyzed the principal components and long-term average anomalies of average annual, winter and summer air temperatures, the number of frosty days in the cold season and the number of winter days with thaws, the duration and heat supply of the growing season, as well as the frequency and intensity of heat waves.

We also estimated the rates of moving the annual sum of active temperatures and the duration of the growing season from the south to the north of Belarus as a result of global warming. The ERA5 reanalysis estimates the spatial and temporal changes in the balance between annual rainfall and potential evaporation from 1980 to 2019.

The average annual air temperature in 2000-2019 is shown to be exceeded the long-term average of this value by 1.8° C. The annual sum of active temperatures moves northward at an average speed of 120 km in 10 years with acceleration. Over the past 20 years, the rate of this displacement has doubled in comparison with the period 1980-2000. The length of the growing season moves from the south to the north at a speed of about 110 km per 10 years.

It is shown that an increase in potential evaporation due to air warming when slightly changing annual amount of precipitation leads to aridization of the climate of Belarus emitting a reduction in the duration of the cold period with a simultaneous increase in the number of thaws does not contribute to the replenishment of water reserves during snowmelt.

Additional damage to forestry and agriculture might be caused by heat waves, the frequency of which for 2000-2019 increased by a factor of 4 compared to the previous 20-year period. Additional damage to forestry and agriculture might be caused by heat waves, which frequency during last 19 years increased by a factor of 4 compared to the previous 20 years.

Keywords. Regional climate changes, daily air temperatures, precipitation, potential evaporation, trends, principal components, distribution function, spatial patterns, climate aridization.

References

Golyandina N.E. 2004. *Metod «Gusenica»–SSA. analiz vremennyh ryadov. Ucheb. Posobi* [The Caterpillar–SSA method: time series analysis. Textbook]. St. Petersburg, 76 p.

Klevec N.N., Mel'nik V.I., Komarovskaya E.V. 2015. Volny tepla v Belarusi [Heat waves in Belarus]. *Trudy gidrometcentra Rossii – Proceedings of the Russian Hydrometeorological Center*, issue 358, pp. 59-66.

Loginov V.F. 2010. *Izmeneniya klimata v Belarusi i ih posledstviya dlya klyuchevykh situatsiy jekonomiki (sel'skoe i vodnoe hozyajstvo)* [Climate change in Belarus and their implications for the key situations of the economy (agriculture and water resources)]. Minsk, 151 p.

Loginov V.F., Lysenko S.A., Mel'nik V.I. 2020. *Izmenenie klimata Belarusi: prichiny, posledstviya, vozmozhnost iregulirovaniya* [Climate change in Belarus: causes, consequences, and regulatory opportunities]. Minsk, 218 p.

Nesterov E.S. 1992. *Severoatlanticheskoye kolebaniye: atmosfera i okean* [North Atlantic Oscillation: Atmosphere and Ocean]. Moscow, Triad, 144 p.

Podgornaya E.V., Mel'nik V.I., Komarovskaya E.V. Osobennosti izmeneniya klimata na territorii Respubliki Belarus' za poslednie desyatiletia [Features of climate change in the Republic of Belarus over the past decades]. *Trudy gidrometcentra Rossii – Proceedings of the Russian Hydrometeorological Center*, issue 358, pp. 112-120.

Polonsky A.B., Sukhonos P.A. 2019. Severoatlanticheskoye kolebaniye i byudzhety tepla verkhney sloya Severnoy Atlantiki [North Atlantic Oscillation and the heat budget of the upper layer of the North Atlantic]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya – Fundamental and Applied Climatology*, no. 4, pp. 67-100.

Yakovleva D.A., Bashmachnikov I.L. 2019. Mezhhodovaya izmenchivost' teplosoderzhaniya i sodержaniya presnoy vody v kupole kholodnykh vod morya Labrador [Interannual variability in heat and fresh water in the cold water dome of the Labrador Sea]. *Vestnik SPbGU. Nauki o Zemle – Bulletin of St. Petersburg State University. Earth Sciences*, vol. 64, no. 1, pp. 136-158.

Golyandina N., Korobeynikov A., Shlemov A., Usevich K. 2015. Multivariate and 2D Extensions of Singular Spectrum Analysis with the Rssa Package. – *Journal of Statistical Software*, vol. 67, No. 2, pp. 1-78.

Hurrell, J.W., Deser, C. 2010. North Atlantic climate variability: the role of the North Atlantic Oscillation. – *Journal of Marine Systems*, vol. 79, No. 3–4, pp. 231-244.

Jackson L., Peterson K., Roberts C., Wood R.A. 2016. Recent slowing of Atlantic overturning circulation as a recovery from earlier strengthening. – *Nature Geosci.*, vol. 9, No. 7, pp. 518-522.

IPCC, 2018. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty / Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.). In Press.

Sun C., Li J., Jin F. 2015. A delayed oscillator model for the quasi-periodic multidecadal variability of the NAO. – *Clim. Dyn.*, vol. 45, No. 7, pp. 2083-2099.