

Современные изменения климата Беларуси

В.Ф. Логинов

Институт природопользования НАН Беларуси,
Беларусь, 220076, г. Минск, ул. Ф. Скорины, 10

Адрес для переписки: *info@nature-nas.by*

Реферат. Рассмотрены пространственно-временные изменения климата Беларуси за период инструментальных наблюдений (1881-2020 гг.). Особое внимание уделено исследованию температуры и осадков за период современного глобального потепления (1960-2019 гг.). Установлено смещение максимального роста температуры в текущем столетии на вторую половину года и, особенно, на июль-сентябрь, то есть потепление в последнее двадцатилетие приобретает черты летнего потепления. Подобная картина наблюдалась и в 20-40-е годы прошлого столетия (период потепления Арктики). Заметная особенность пространственно-временных изменений осадков в последние 15-20 лет состоит в увеличении осадков на большей части территории страны и, особенно, в ее северо-восточной части; на юго-западе отмечалось уменьшение количества осадков. В целом отмечаются незначительные изменения количества выпадающих осадков за период современного потепления. Представлены модельные оценки предстоящих региональных изменений температуры и осадков до конца текущего столетия.

Ключевые слова. Климат Беларуси, изменения температуры и осадков, тренды и циклы, потепление климата, прогностическая оценка климата.

Modern climate change in Belarus

V.F. Loginov

Institute of Environmental Management of the National Academy of Sciences of Belarus,
10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Republic of Belarus

Correspondence address: *info@nature-nas.by*

Abstract. The article provides an overview of spatiotemporal changes in climate of Belarus during the period of instrumental monitoring (1881-2020). Special attention was paid to research of changes in temperature and precipitation during the period of modern warming (1960-2020). It was determined that the largest increase in temperature during the current century shifted to the second half of the year, especially to July-September, that is warming in the last twenty years acquires features of summer-type warming. The similar pattern was observed in

1920s-1940s (Arctic warming period). The general feature of spatiotemporal changes in precipitation during the last 15-20 years is increase over the most of the country, especially in the northeastern part; in the southwestern part of the country decrease in amount of precipitation was registered. In total, changes in amount of precipitation during the period of modern warming are minor. The article gives model estimations of changes in temperature and precipitation for the period to the end of the current century.

Keywords. Climate of Belarus, changes in temperature and precipitation, trends and cycles, climate warming, predictive assessment of climate.

Введение

В работе рассмотрены все виды изменений климата Беларуси: тренды, разного рода колебания (периоды, циклы, флюктуации, скачки – быстрые изменения и паузы – и замедление скорости роста температуры).

Главное внимание было уделено анализу основных метеорологических элементов – температуры и осадков. Их временные изменения согласуются в значительной степени с изменениями характеристик климата глобального и макромасштабного уровня, но при этом отмечаются и региональные особенности, которые определяются географическим положением Беларуси, близостью ее территорий к Атлантическому океану, равнинным рельефом и большой лесистостью (около 40% территории), а также проведенной в 60-80-е годы прошлого столетия крупномасштабной мелиорацией южных Полесских регионов.

Среднегодовая температура в Европе в современный период превысила доиндустриальный уровень на 1.6-1.7°C (Statement on the Global Climate in 2018 WMO, 2019). Близкое по величине потепление климата отмечается и в Беларуси. Статистически значимый рост температуры в Беларуси зарегистрирован с 1988 года (Логинов и др., 2020), тогда как в других регионах Атлантического сектора начало потепления несколько отличалось от указанной даты.

Среднегодовое количество осадков в Европе в последние шестьдесят лет изменяется мало, однако, наблюдаются значительные внутрисезонные изменения, приводящие к формированию засух и наводнений. В бассейне Балтийского моря (Беларусь относится к бассейнам Черного и Балтийского морей) наблюдалось увеличение годового количества осадков более чем на 17 мм за десятилетие (BACC Author Team. Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin, 2015). В изменении режима осадков с 1950-х годов в Центральной и Южной Европе наблюдался рост засушливости летом, однако, на остальной части Европы не наблюдалось устойчивых тенденций (IPCC, 2014). Засухи стали реже формироваться в Северной Европе; Центральная и Восточная Европа, включая территорию Беларуси, является переходной зоной.

Нами была показана зависимость условий увлажнения Северной и Южной части Европы (которые изменяются в противофазе) от фазы квазишестидесятилетнего Атлантического колебания (Лысенко и др., 2020; Логинов, 2021).

Обнаружено также, что это колебание в изменении температуры наиболее выражено в средних широтах Восточной Европы ($\lambda = 20^\circ - 38^\circ$ в.д.).

В работе (Логинов и др., 2020 г.) показано, что в первую фазу потепления климата (1988-2000 гг.) наибольший рост температуры наблюдался в холодную часть года (январь-апрель), тогда как в текущем столетии произошло сезонное смещение наибольшей скорости роста температуры на вторую половину года. Более подробно этот вопрос будет рассмотрен в настоящей статье. Прогноз изменений климата Беларуси на основе результатов численного моделирования был разработан белорусскими исследователями в начале прошлого столетия (Логинов и др., 2000). В последующем более основательные работы в этом направлении были выполнены учеными России (Школьник и др., 2006 г.; Мохов, Елисеев, 2006 г.; Говоркова и др., 2008 г.; Мелешко и др., 2008 г.) и Беларуси (Данилович, Гайер, 2018 г.). В статье будут приведены результаты последнего исследования этого вопроса, выполненного в Институте природопользования НАН Беларуси (Данилович, Гайер, 2018 г.).

Материалы и методика исследования

Источником фактических данных о климате Беларуси являлись данные наблюдений месячного (1881-2020 гг.) и суточного (1960-2019 гг.) разрешения на 49 метеорологических станциях Белгидромета, достаточно равномерно размещенных на территории Беларуси. В разные годы число метеорологических станций изменялось, но всегда для оценок за последние 60 лет использовались данные по 42 или более станциям.

Использовались стандартные статистические методы обработки климатических данных для получения норм, среднеквадратических отклонений, гистограмм распределений и функций вероятности распределения величин.

Для исследования временной структуры рядов температуры за период с 1960 по 2019 гг. применялся метод анализа сингулярного спектра (Singular Spectrum Analysis), названный в русскоязычной литературе «методом гусеницы» (Голяндина, 2004 г.). Данный метод основан на получении из исходного временного ряда выборки из скользящих отрезков заданной длины и применении к ним метода главных компонент. Главным достоинством метода гусеницы является возможность разложения любого временного ряда на элементарные составляющие без предварительного задания их моделей. За счет этого свойства «метода гусеницы» повышается возможность выделения слабо выраженного тренда на фоне шума и периодического сигнала большой интенсивности, присутствующих во временных рядах метеорологических параметров (но невозможна проверка гипотез о наличии этих составляющих и оценка их статистической значимости). Периодичность составляющих временного ряда оценивалась путем применения к ним преобразования Фурье.

Оценки ожидаемых изменений климата Беларуси базировались на 92-х имитационных климатических моделях (Jacob et al., 2014; Kotlarski et al., 2014) и были получены И.С. Данилович (2018 г.).

Результаты

Изменение климата Беларуси за период инструментальных наблюдений (1880-2020 гг.)

Температура воздуха

Временной ход изменений среднегодовой температуры на территории Беларуси представлен на рис. 1. Из рисунка следует, что на территории Беларуси на протяжении почти всего XX века до конца восьмидесятых годов кратковременные периоды потеплений сменялись близкими по величине и продолжительности периодами похолоданий. Потепление, не имеющее себе равных по продолжительности и интенсивности, началось теплым 1988 г. (аномалия 0.4°C).

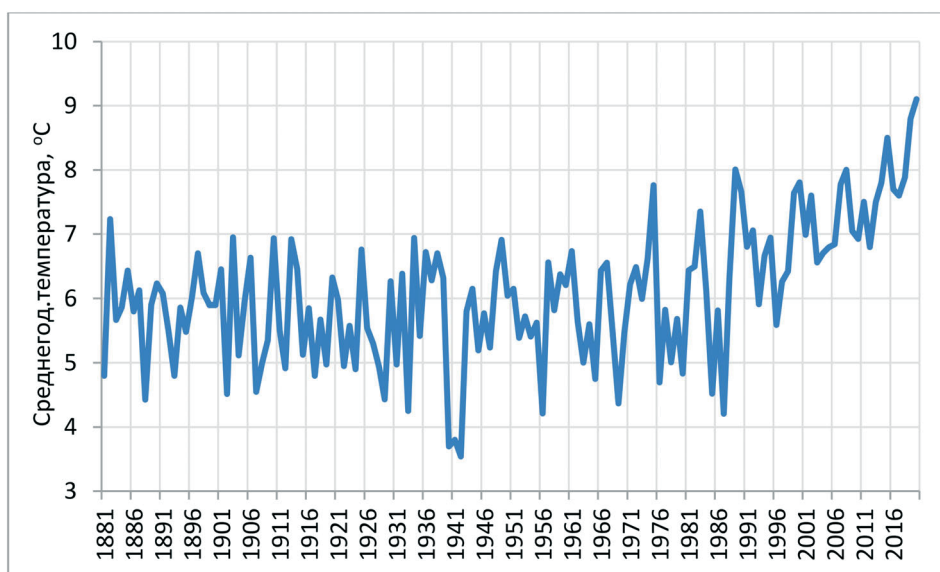


Рисунок 1. Изменение среднегодовой температуры на территории Беларуси за период с 1881 по 2020 гг.

Figure 1. Changes of average annual temperature in Belarus in 1881-2020

В 2015 г. (самый теплый по данным до 2019 г. включительно) средняя годовая температура воздуха, в среднем по территории Беларуси, составила $+8.5^{\circ}\text{C}$, что на 2.5°C выше климатической нормы ($+6.0^{\circ}\text{C}$), а сезоны вошли в первую десятку самых теплых сезонов. Летом 2015 г. отмечалось от 8 до 24 дней с максимальной температурой $\geq 30^{\circ}\text{C}$, тогда как обычно за сезон наблюдается не более 8 таких дней.

Самая мощная отрицательная аномалия температуры наблюдалась в январе-марте 1940-1942 гг. Указанные годы были самыми холодными за всю историю инструментальных наблюдений. Среднегодовая аномалия температуры в эти годы составляла около -2.5°C , а в январе и марте 1942 г. среднемесячная аномалия температуры соответственно составила около -10°C и -8°C .

В последние годы во все сезоны года аномалии температуры были положительными, однако зимы стали более прохладными по сравнению с предыдущим десятилетием (1988-1997 гг.). Важно отметить, что если в 1988-1997 гг. температура летом была только несколько выше нормы, а осенью даже ниже нормы, то в последние два десятилетия температура осенью и особенно летом была существенно выше нормы.

Изменчивость статических характеристик температуры Беларуси во времени является основным показателем нестабильности климата. В табл. 1 приведены многолетние средние среднемесячных и среднегодовых значений температуры их среднеквадратические отклонения для всего доступного ряда (1881-2020 гг.), последовательных тридцатилетних периодов и начала текущего столетия (2001-2020 гг.). Из таблицы следует, что среднегодовая температура в текущем столетии (2001-2020 гг.) на 1.2°C выше, чем за весь период наблюдений (1881-2020 гг.).

Таблица 1. Среднемесячная и среднегодовая температура и их среднеквадратические отклонения (σ) для различных периодов времени

Table 1. Average monthly and annual temperatures and their standard deviation (σ) for different time periods

Годы	Месяц												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
1881-2020	-6.3	-5.5	-1.2	6.3	13.1	16.4	18.1	16.9	12.1	6.2	0.7	-3.8	6.1
σ	3.7	3.6	2.9	2.0	1.9	1.6	1.5	1.5	1.4	1.8	2.2	2.8	1.0
1881-1910	-6.7	-5.5	-1.6	5.6	13.3	16.6	18.0	16.7	12.0	6.0	-0.3	-4.3	5.9
σ	3.4	2.6	1.7	1.9	2.1	1.9	1.2	1.4	1.5	1.9	2.1	2.8	0.7
1911-1940	-7.0	-6.9	-1.7	6.0	13.0	15.8	18.1	16.6	11.9	5.8	0.8	-4.7	5.6
σ	3.4	3.8	3.0	2.4	2.1	1.6	1.6	1.7	1.6	2.2	2.4	2.5	0.9
1941-1970	-7.5	-6.4	-2.5	6.1	12.4	16.3	17.7	16.7	12.0	6.2	0.4	-3.9	5.6
σ	4.0	3.5	2.8	1.9	1.8	1.5	1.2	1.1	1.2	1.6	2.0	2.3	0.8
1971-2000	-5.2	-4.5	-0.2	6.7	13.0	16.3	17.5	16.7	11.6	6.3	0.5	-3.1	6.3
σ	3.9	4.0	2.4	1.8	1.8	1.6	1.5	1.2	1.6	1.4	2.5	2.4	1.0
2001-2020	-4.7	-4.2	1.0	7.7	13.8	16.8	19.6	18.3	12.9	6.6	2.3	-2.2	7.3
σ	3.0	3.6	3.0	1.1	1.5	1.3	1.6	1.1	0.9	1.4	1.5	3.5	0.5

Атмосферные осадки

В среднем за год на большей части территории Беларуси выпадает около 600-700 мм осадков. Центральная возвышенность получает 650-700 мм, на отдельных ее возвышенностях – Новогрудской, Минской – количество осадков превышает 700 мм. Низменности, как южные, так и северные, получают в основном 600-650 мм. Минимальное многолетнее количество осадков отмечено на юго-востоке Республики (Логинов и др., 2020).

Изменение средних многолетних месячных и годовых сумм осадков, а также сумм осадков за теплое (IV-X) и холодное (XI-III) время года за различные временные периоды представлены в табл. 2. Там же отдельной строкой представлены соответствующие среднеквадратические отклонения (σ).

Таблица 2. Средние многолетние значения сумм осадков на территории Беларуси, их среднеквадратические отклонения (σ) для разных периодов времени – для каждого месяца, года в целом, теплого (IV-X) и холодного (XI-III) периодов

Table 2. Average monthly and annual precipitation, precipitation of warm (IV-X) and cold (XI-III) periods of the year, their standard deviations (σ) in Belarus for different time periods

Период	Месяцы												Год	Периоды года	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	I-XII	холодный XI-III	теплый IV-X
1891-2018	39.5	34.8	37.4	43.2	57.1	77.4	87.5	73.4	56.1	50.8	48.0	44.6	645	203	445.3
σ	17.0	12.9	18.1	16.6	20.6	26.3	30.9	30.4	24.6	25.9	20.5	20.2	100.7	43.8	77.0
1891-1910	43.4	38.6	38.3	46.1	57.8	84.6	96.3	74.0	49.5	48.0	47.2	49.6	673	217.0	456.2
σ	16.0	11.4	13.8	16.5	16.6	25.3	28.1	33.3	19.0	22.7	23.9	28.0	66.6	40.5	65.2
1911-1940	40.8	34.9	42.1	49.1	57.4	76.8	89.5	82.8	60.1	56.0	49.3	44.1	664	208.2	455.9
σ	21.0	15.4	26.1	18.7	23.9	28.1	26.9	27.7	23.4	22.8	22.2	23.7	120.8	53.3	107.4
1941-1970	35.8	34.3	33.6	41.7	58.4	73.4	79.1	81.5	55.0	46.3	52.6	40.0	609	189.3	435.3
σ	14.6	9.4	15.5	14.5	19.7	22.6	26.1	20.4	27.3	24.0	21.6	17.8	129.9	46.2	70.8
1971-2000	36.7	31.1	36.2	40.7	52.4	84.3	85.9	60.1	64.4	47.4	44.7	46.9	631	195.7	435.3
σ	15.8	13.7	14.8	15.6	18.0	26.7	38.5	28.2	27.0	24.8	14.8	13.9	65.3	28.0	65.2
2001-2018	45.3	38.9	37.9	39.4	64.9	69.3	94.4	71.3	47.4	60.6	47.1	44.8	661	214.1	447.2
Σ	15.0	12.7	14.1	16.4	24.2	27.6	31.9	40.3	20.2	35.8	20.8	16.4	79.6	43.6	56.9

Из табл. 2 следует, что максимальное количество осадков выпадало как в теплое, так и в холодное время года в конце XIX-го - начале XX-го столетий (1891-1910 гг.), а также в текущем столетии (2001-2018 гг.).

Схожие с современными условия увлажнения территории Беларуси наблюдались и в предыдущий период летнего потепления климата (см. 1911-1940 гг.). Самые жесткие условия пришлось на период с 1941 по 1970 г. Это было особенно заметно в холодный период года.

Статистически значимых различий между количеством осадков в одноименные календарные сроки разных периодов не отмечалось, что говорит о стабильности режима увлажнения территории Беларуси.

Однако в отдельные месяцы количество выпадающих осадков значительно отличается от приведенных в таблице значений. В такие периоды на территории Беларуси формировались атмосферные засухи или наводнения. Повторяемость засух в последний период (1992-2018 гг.) возросла. Засухи наблюдались либо через год, либо каждый год, и только в отдельные месяцы года формировались периоды с высокой увлажненностью территории.

Анализ осадков за теплый (IV-X) и холодный (XI-III) периоды, а также за год в целом (I-XII), показывает уменьшение годовых сумм осадков в период с 1950 по 1990 гг. по сравнению с периодом 1891-1935 гг. на юге страны на величину около 60 мм (Климат Беларуси, 1996). Снижение уровня осадков на севере страны менее выражено.

Таким образом, изменение осадков на территории Беларуси отличается большей пространственно-временной изменчивостью по сравнению с температурой.

Изменение климатических условий за период современного потепления климата (1960-2019 гг.)

Среднегодовая температура воздуха в Беларуси в текущем столетии превысила климатическую норму, относящуюся к периоду 1961-1990 гг., на 1.4°C. Анализ среднегодовых температур за весь период инструментальных наблюдений на территории Беларуси (1881-2019 гг.) показывает, что из 20-ти наиболее теплых лет 15 приходятся на текущее столетие. Среднегодовая температура в 2019 году составила 8.8°C и оказалась выше всех предшествующих значений с 1881 г. (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. Быстрый рост температуры воздуха при практически не изменяющейся годовой сумме осадков способствует также увеличению повторяемости и продолжительности атмосферных и почвенных засух, причиняющих большой ущерб лесному и сельскому хозяйству. Особенно остро эта проблема стоит сейчас для территории Белорусского Полесья (юг Беларуси), которая на три четверти представлена почвами легкого гранулометрического состава – песчаными и супесчаными – с низкой влагоудерживающей способностью (не более 20% от их массы). Особую остроту приобрела проблема засух на юго-востоке Беларуси. 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. По данным Белгидромета, на многих гидрологических постах Гомельской области в 2015 г. были зафиксированы исторические минимумы уровней грунтовых вод: на 1-2 м ниже нормы. Средний уровень рек Гомельской области стал существенно ниже нормы. 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.

В сложившихся условиях потребовался пересмотр существующих представлений о скоростях потепления климата на территории Беларуси, продвижения на север границ агроклиматических зон, а также темпах иссушения региона.

Температура воздуха

Для исследования временной структуры изменений температуры воздуха использовался метод анализа сингулярного спектра (Singular Spectrum Analysis), в русскоязычной литературе называемый «методом гусеницы». Информационной базой служили данные суточного разрешения по приземной температуре воздуха на 49 метеорологических станциях Беларуси за период с 1960 по 2019 год.

Средняя зимняя температура воздуха в Беларуси подвержена большой межгодовой изменчивости (рис. 2). Первая главная компонента (тренд) ее временного ряда объясняет лишь 19% его дисперсии. Две следующих по значимости главные компоненты в совокупности описывают компоненту с периодом около 8.3 лет, выбирающую около 30% дисперсии временного ряда зимней температуры (Лысенко, Буяков, 2020).

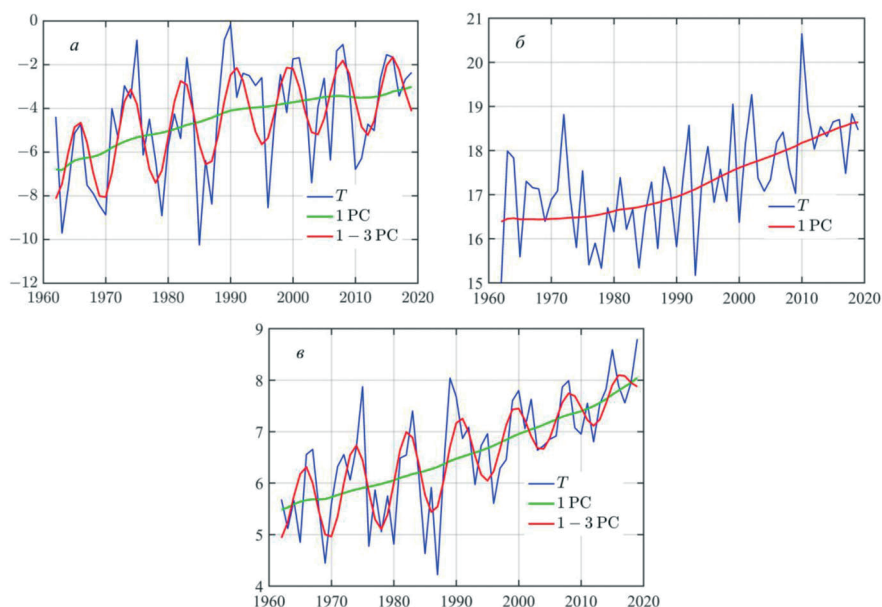


Рисунок 2. Временные ряды средней за зиму (а), лето (б) и год (в) температуры воздуха в Беларуси (T) и их главные компоненты (PC), выделенные на основе спектрального сингулярного анализа

Figure 2. Time series of average winter (a), summer (б) and annual (в) air temperature in Belarus (T) and their principal components (PC) founded the basis of singular spectral analysis

Первая главная компонента временного ряда средней за зиму температуры воздуха в среднем за период 1960-2019 гг. составляет $\sim 3.3^{\circ}\text{C}$. Основной рост зимней температуры воздуха пришелся на первую половину этого периода: с 1960 по 1990 г. она увеличилась на 2.3°C , после 1990 г. – на 1°C . Таким образом, скорость зимнего потепления с начала 1990-х замедлилась более чем в 2 раза (здесь и далее величина потепления оценивалась как разность значений первой главной компоненты на границах рассматриваемого периода).

Летняя температура воздуха в Беларуси начала демонстрировать отчетливый рост примерно с 1980 г. Ее трендовая компонента с 1960 по 2019 г. увеличилась на 2.1°C , причем главным образом за счет второй половины этого периода: на 0.49°C и 1.66°C соответственно до и после 1990 г.

В целом, в последние 30 лет скорость потепления летом примерно в 1.7 раза превосходит скорость потепления зимой.

Атмосферные осадки

В среднем для осадков на территории Беларуси в период последнего потепления не наблюдалось длительных серий положительных или отрицательных аномалий. Близкими к норме оказались и средние суммы осадков как теплого, так и холодного периодов года. Исключение составляет крупная положительная аномалия осадков в 1998 г.

Основной особенностью изменения осадков является тенденция к снижению их количества в послевоенное время. Особенно много осадков выпало в период с 1905 по 1935 гг. Оно было на 60-70 мм больше по сравнению с послевоенным периодом. Годовые суммы осадков в период современного потепления существенно не изменились, но значения месячных сумм осадков в январе-марте, мае, июле и октябре увеличились; в другие месяцы года изменения осадков менее существенные.

Схематически в изменении атмосферных осадков выделяются две зоны: северо-восточная зона с увеличением осадков и юго-западная зона с их уменьшением. Кроме того, выделены аномальные зоны: Лельчицкий, Житковичский и Костюковичский районы, где количество выпадающих осадков также увеличивается.

В последние 15-20 лет, в целом, на большей части территории страны отмечается тенденция к увеличению количества осадков. Исключение составляет Брестская область и небольшой район на северо-западе Витебской области (Шарковщина), где количество осадков уменьшается.

В теплом полугодии, в изменении и пространственно-временном распределении средних сумм осадков на станциях четко выраженные тенденции отсутствуют, но прослеживаются следующие особенности. С 1989 по 2000 г. отмечено наибольшее число экстремумов средних за этот период значений количества осадков: в западной Беларуси – минимум, в восточной – максимум. В течение 1977-1988 и 2001-2015 гг. пространственное распределение сумм осадков теплого периода на территории Беларуси более равномерно.

Максимальный рост осадков в период последнего потепления климата отмечается в феврале (28%) и октябре (17%). В первую половину года (I-VI

мес.) рост осадков составил около 10%, а во вторую половину года он был на 2% выше нормы (в основном за счет осадков октября). Существенное снижение количества осадков произошло в июне (8%). Число дней с осадками за период потепления уменьшилось с 175 до 167 дней (в основном, за счёт уменьшения числа дней с осадками интенсивностью от 0.1 до 0.4 мм). Это косвенно свидетельствует о незначительных изменениях выпадающих осадков в период потепления климата.

Пространственно-временная детализация изменений осадков на территории Беларуси

В 20% лет средняя сумма осадков по территории страны превышает 700 мм (например, 1958, 1998, 2009, 2017 гг.). В 11% лет выпадает 550 мм и менее (например, 1951, 1959, 1975, 2015 гг.). Наименее увлажненным за данный период был 1951 год на протяжении которого выпало 498 мм, наиболее – 1998 год – 817 мм. Наибольшее количество осадков выпадает в июле: 70-100 мм, наименьшее приходится на февраль: 28-43 мм.

Ежегодно отмечаются периоды, когда в течение 10 суток выпадет осадков 1 мм и менее. Максимальная продолжительность таких периодов отмечается преимущественно по юго-востоку страны и достигает двух месяцев. Сочетание роста температур воздуха и длительных периодов с небольшим количеством осадков приводит к возникновению атмосферных засух средней и сильной интенсивности.

За период потепления 1989-2015 гг. наибольшее увеличение осадков на территории Беларуси в холодное время года по сравнению с климатической нормой наблюдалось на большинстве станций Гомельской области, на отдельных станциях – Витебской, Могилевской и Брестской областей. В то же время на большинстве станций Брестской, Могилевской и Гродненской областей отмечен слабый рост или уменьшение осадков. Уменьшение осадков отмечается преимущественно в теплое время года.

На большей части территории страны отмечается увеличение числа дней с суммой осадков 0.5, 1.0, 10.0 мм и более. Интенсивные конвективные осадки быстро сбегает в водоприемники и являются малоэффективными для сельскохозяйственного производства.

Волны жары

Волны жары 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 в данной местности. “Средняя” функция вероятности температуры рассчитывалась для периода 1981-2010 гг., рекомендованного ВМО для вычисления метеорологических норм.

Гистограммы распределений и функции вероятности среднесуточной температуры летом на метеостанциях Беларуси для двух 20-летних периодов до и после 2000 г. сопоставлены на рис. 3 (Лысенко, Буяков, 2020).

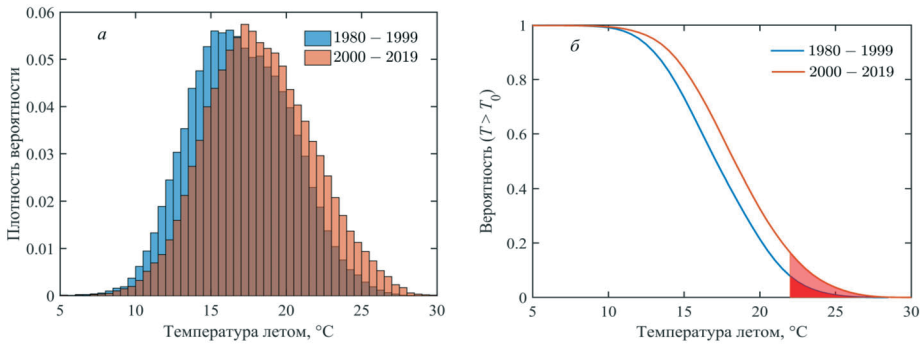


Рисунок 3. Гистограммы распределения среднесуточной температуры воздуха на метеостанциях Беларуси и функции вероятности превышения среднесуточной температуры заданного значения для двух периодов: 1980-1999 гг. и 2000-2019 гг.

Площади закрашенных областей под кривыми (б) пропорциональны вероятностям превышения среднесуточной температурой уровня 90-го процентиля

Figure 3. Histograms of average daily temperature distribution at weather stations of Belarus and excess probability functions of average daily temperatures of given values for 1980-1999 and 2000-2019

Areas of painted segments under the curves (b) are proportional to probability of daily temperature above 90-percentile

Гистограммы распределений температуры для обоих периодов хорошо описываются функцией Гаусса с практически одинаковой дисперсией $\sim 3.5^{\circ}\text{C}$, но с различающимися математическими ожиданиями – на 1.2°C . Таким образом, функция распределения среднесуточной температуры на территории Беларуси летом равномерно смещается в сторону больших температур, практически не изменяя свою форму.

Сравнение функций вероятности среднесуточной летней температуры для двух рассматриваемых периодов (рис. 3б) показывает, что с 2000 г. резко возросла вероятность наступления высоких температур (выше 90-го процентиля ее “среднего” распределения): за последние 20 лет эта вероятность увеличилась более чем в 2 раза – с 7.2% до 15.5%.

В настоящее время волны жары 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.

Рост продолжительности и интенсивности волн жары пришелся главным образом на юго-восточную часть Беларуси. Средняя продолжительность волн тепла в Беларуси 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 жары, что связано с возросшей там вероятностью возникновения высоких значений температур.

Продолжительность и теплообеспеченность вегетационного периода

С 1980 г. теплообеспеченность вегетационного периода увеличилась на 527°C (с 2240 до $2767^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$). В результате произошло изменение границ

агроклиматических областей. Теплообеспеченность вегетационного периода, которая в 80-е годы была свойственна самым южным районам Беларуси, сейчас уже характеризует агрометеорологические условия самой северной Витебской области.

Спектральный сингулярный анализ временного ряда продолжительности вегетационного периода (Лысенко, Буюков, 2020) показывает присутствие в нем 20-летней квазипериодической компоненты с амплитудой около 7 дней, объясняющей примерно 21% дисперсии всего ряда (рис. 4). Природа квазидвадцатилетнего цикла рассмотрена в работе (Логинов, Лысенко, 2020; Логинов, 2020, 2021). Наиболее быстрый рост продолжительности вегетационного периода приходится на восходящие фазы 20-летней осцилляции, накладывающийся на долгопериодный тренд.

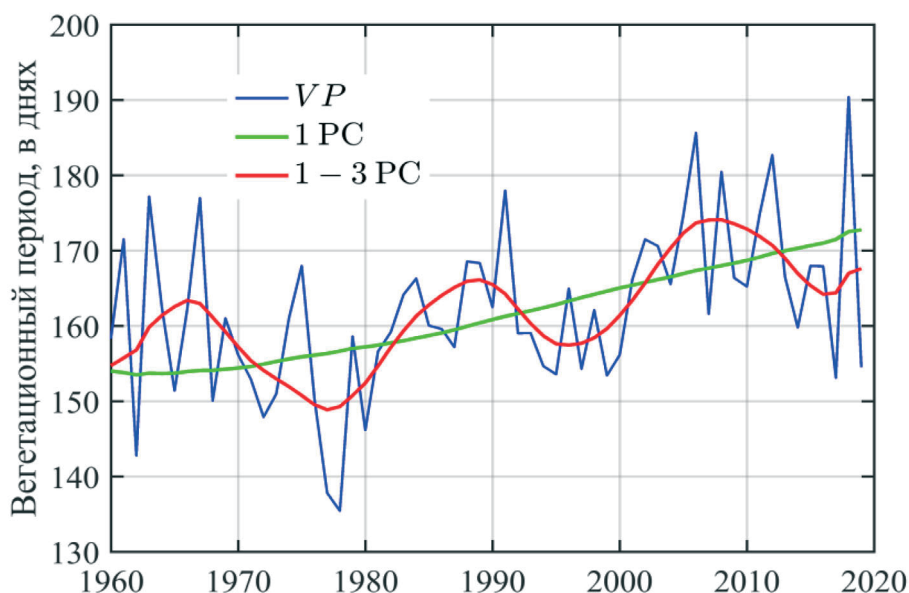


Рисунок 4. Временной ряд продолжительности вегетационного периода в Беларуси (*VP*) и его разложение по главным компонентам (*PC*)

Figure 4. Time series of vegetation period length in Belarus (*VP*) and its decomposition to principal components (*PC*)

По термическим ресурсам вегетационного периода, условиям обеспеченности его влагой территория Беларуси ранее делилась на три агроклиматические области: северную, центральную и южную (Шкляр, 1973). В.И. Мельником и Е.В. Комаровской была выявлена четвертая климатическая область (Мельник, Комаровская, 2006). Позже детализация границ агроклиматических областей была проведена в работе (Логинов, Табальчук, 2014). Для определения дат перехода через 10°C использован метод А.В. Фёдорова.

Для пространственного отображения результатов вычислений полученные данные обработаны в программе ArcGIS 10.5 и проинтерполированы на территории Беларуси. Построены карты и выделены районы с суммой активных

температур 2000-2200, 2200-2400, 2400-2600 и $> 2600^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$. Среди карт наиболее близкой к распределению агроклиматических областей, выделенных Шкляр, оказалась карта за период 1955-1987 гг., предшествующий современному потеплению климата. В период современного потепления климата (1988-2015 гг.) картина меняется.

Для того чтобы исключить влияние урбанизации на рост температуры, отдельно построены карты с использованием данных на станциях, приуроченных только к малым городам и сельской местности (рис. 5).

В период современного потепления климата место первой агроклиматической области занимает вторая, третья область вслед за второй продвигается к северу, а на юге большую часть Гомельской области и юг Брестской занимает четвертая агроклиматическая область. Для всего периода первая агроклиматическая область сохраняется только в северной и восточной части Витебской области.

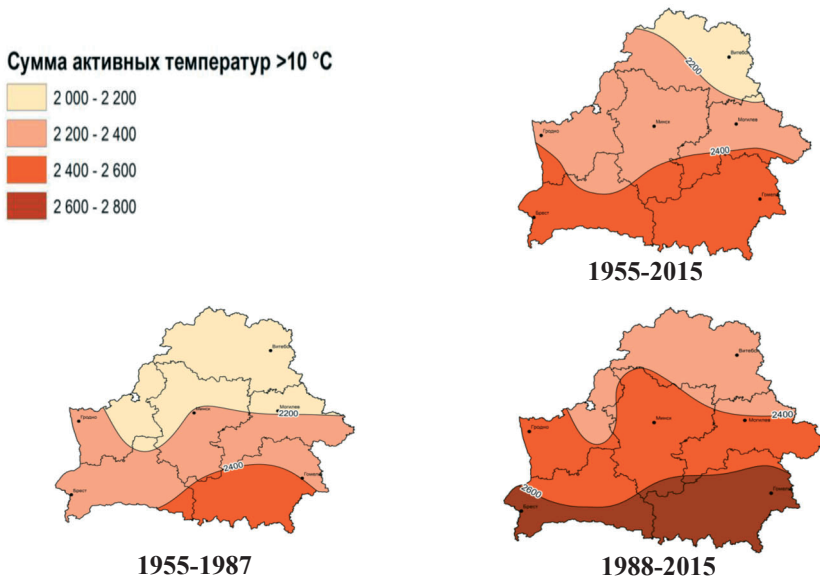


Рисунок 5. Карты распределения сумм активных температур ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$) с учетом данных только сельских метеостанций

Figure 5. Distribution maps of sums of active temperatures ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$) on the basis of data of the rural weather stations only

Анализ показал, что если средняя скорость роста температуры сохранится, то к 2030 году сумма температур $\geq 10^{\circ}\text{C}$ дополнительно увеличится ещё, как минимум, на 180°C . Общее дополнительное увеличение сумм активных температур $\geq 10^{\circ}\text{C}$, начиная с 1975 года, составит около $600^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$. Это означает, что четвёртая агроклиматическая область может занять большую часть территории Беларуси.

Число морозных дней и дней с оттепелями

В многолетних изменениях количества морозных дней в холодный период года и количества зимних дней с оттепелями прослеживаются тренды и квази-

циклические составляющие с периодом около 8 лет (Логинов, Лысенко, Мельник, 2020). Основное снижение количества морозных дней в холодный период года произошло до 1990 г.

Суммарная за зиму продолжительность оттепелей в периоды 1961-1990 и 1991-2019 гг. составила 20.4 и 28.5 дней соответственно. Максимальное количество дней с оттепелью (~40) отмечалось на западе Брестской области, а минимальное (~20) – на востоке Могилевской и Витебской областей.

Трендовая компонента средней по Беларуси продолжительности периода с оттепелями с 1961 по 2019 г. увеличилась с 16 до 33 дней. Наибольший рост числа дней с оттепелями (до 22) произошел в центральной и юго-западной частях Беларуси, наименьший (около 12) – на юго-востоке.

Холодные и теплые зимы: повторяемость и возможные причины

В расчет принимались зимы, которые как минимум на два градуса были холоднее или теплее «нормальной» зимы, средняя температура которой за период инструментальных наблюдений составила -5.5°C (Логинов, 2012).

Анализ показывает, что число холодных зим распределено неравномерно. Например, выделяется период с 1923 по 1968 год, на который приходится 11 из 18 холодных зим. Самые холодные зимы 1928-1929, 1939-1940, 1940-1941 и 1941-1942 отмечались в годы, когда потепление в высоких широтах Северного полушария, известное как «потепление Арктики», достигло максимальных значений. Эти факты не противоречат гипотезе о снижении интенсивности течений системы Гольфстрим во время продолжительных эпох потепления климата и, как следствие, наступлении фазы похолодания климата в Европе (Логинов, Лысенко, 2019). Часто холодные зимы связаны с распространением отрога Сибирского центра действия атмосферы на территорию Восточной Европы и развитием восточной формы циркуляции по Г.Я. Вангенгейму (Логинов, 2012).

Большее число теплых зим пришлось на период текущего потепления климата в Республике Беларусь и глобальном масштабе (13 из 20 случаев). На годы первого потепления климата, известного как потепление Арктики, пришлось только две теплые зимы (1913-1914, 1924-1925 гг.).

Четыре теплые зимы пришлось на холодный переходный период между первым и вторым потеплениями (1946-1975 гг.). Такое их количество, собственно, и должно быть при случайном распределении.

Полученные результаты свидетельствуют о неслучайном распределении зимних температур в эпоху текущего потепления климата. При случайном распределении на текущую эпоху потепления климата должно приходиться не более 4 теплых зим, а в реальности их наблюдалось в 3 раза больше.

Как и в случае холодных зим, основным предиктором теплых зим является интенсивность Северо-Атлантического колебания. Подавляющее число теплых зим за период с 1881 по 2005 г. отмечалось при высокой интенсивности Северо-Атлантического колебания; исключение составляет зима 1960-1961 гг.

В заключение этого раздела приведём экстремальные характеристики зим за период инструментальных наблюдений:

- абсолютный минимум температуры воздуха, -42.2°C , был зарегистрирован 17 января 1940 г. на метеостанции Славное (Толочин);
- абсолютный максимум температуры воздуха, $+17.2^{\circ}\text{C}$, был отмечен 21 февраля 1990 г. на метеостанции Брест;
- самой теплой была зима 2019-2020 гг. со средней по стране температурой воздуха за сезон $+1.5^{\circ}\text{C}$;
- самой холодной была зима 1939-1940 гг. со средней температурой -10.9°C .

Ожидаемые изменения климата на территории Беларуси

Температура воздуха

Ниже представлены модельные прогнозируемые изменения температуры за последовательные десятилетия для периода 2021-2099 гг. по отношению к норме 1971-2000 гг. для территории Беларуси для сценариев RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5 (Данилович, Гайер, 2018). В случае реализации каждого из сценариев ожидается повышение температуры воздуха.

Согласно сценарию RCP2.6, увеличение средней годовой температуры воздуха прогнозируется до $0.5-1.2^{\circ}\text{C}$. Наибольший рост предполагается зимой и весной от 0.5 до 2.0°C в течение текущего столетия в разные десятилетия; наименьший рост ожидается летом, сезонные отклонения не превысят 1.4°C . Зимой, весной и осенью ожидается повышение температуры до середины, а затем некоторое снижение до конца столетия. Летом прогнозируется постепенное повышение температуры воздуха от 0.5 до 1.4°C . Ожидается, что средняя годовая температура превысит климатическую норму 1971-2000 гг. от 1.0 до 2.8°C согласно сценарию RCP4.5. Прогнозируется, что зимнее повышение составит около $1.2-3.8^{\circ}\text{C}$, весной $0.9-3.2^{\circ}\text{C}$, летом $0.9-1.8^{\circ}\text{C}$ и осенью $1.2-2.3^{\circ}\text{C}$. Для сценария RCP8.5 прогнозируется рост средней температуры от 1.2°C в начале рассматриваемого периода до 5.2°C в конце столетия. Ожидается постепенный рост температуры зимой и весной на $1.5-6.3^{\circ}\text{C}$, в летне-осенний период на $0.8-4.5^{\circ}\text{C}$.

Атмосферные осадки

Изменение режима выпадения осадков в текущем столетии будет характеризоваться преимущественно постепенным увеличением. При реализации сценария RCP2.6 в зимний период ожидается небольшой рост в пределах 10 мм в ближайшие два десятилетия, затем снижение и к концу столетия стабилизация в пределах нормы. В весенний сезон ожидается рост сезонных сумм осадков на 10-25 мм. Летом осадки будут характеризоваться чередованием роста и снижения сезонных сумм осадков в пределах 20 мм. В осенний сезон ожидаются преимущественно положительные отклонения в пределах 6-17 мм. При реализации сценариев RCP4.5 и RCP8.5 положительные отклонения сезонных сумм осадков зимой будут составлять 8-26 мм, весной на 11-49 мм, летом до 20 мм, осенью на 9-46 мм.

Согласно выполненным расчетам ожидается, что дней с осадками будет больше климатической нормы 1971-2000 гг., при всех сценариях изменения концентрации парниковых газов в зимний период, их превышение составит 1-3 дня. В весенний сезон ожидается разброс отклонений числа дней с осадками, среди которых можно отметить отсутствие изменений до середины текущего столетия при сценарии RCP2.6, а затем чередования роста и снижения числа дней с осадками; при сценарии RCP4.5 число дней с осадками будет выше обычного в течение рассматриваемого периода. При сценарии RCP8.5 со второй половины текущего столетия ожидается превышение числа дней с осадками на 1-2 дня. Летом ожидается наибольший разброс числа дней с осадками.

Дискуссия

В современной климатологии в связи с наблюдаемым изменением климата, его потеплением, стал особенно актуальным вопрос об их причинах. В англоязычной литературе это обозначает термином «attribution», чему в русскоязычной литературе «атрибуция». Смысл этого понятия в разложении наблюдаемого изменения на составляющие, определяемые различными причинами, например, на естественную и антропогенную составляющие. Методология атрибуции еще проходит фазу своего становления. В данном разделе мы приведем некоторые первичные соображения о роли антропогенной и естественной причин изменения климата Беларуси, о структуре и драйверах естественной составляющей этих изменений. В будущем этому важному вопросу мы намерены посвятить отдельную публикацию.

По нашему мнению, в естественных изменениях климата Беларуси существенную роль играет квазишестидесятилетнее колебание. Квазишестидесятилетнее автоколебание в изменении температуры на территории Беларуси проявляется во вторую половину года и особенно в июле-сентябре.

Принимая во внимание особенности многолетних изменений температуры, выявленные в Атлантическом секторе умеренных широт (Логинов, Лысенко, Мельник, 2020; Логинов, 2021), разности среднемесячных значений температуры были вычислены для 23-летних временных интервалов (табл. 2) с учетом фаз Атлантического мультидекадного квазишестидесятилетнего колебания (АМО).

Проведенное осреднение температуры Беларуси по 23-летним отрезкам времени позволило нам в значительной степени отфильтровать короткопериодные колебания в ее изменении.

Анализ данных, приведенных в табл. 3, показывает, что наибольшая температура в Беларуси наблюдалась в годы, приходящиеся на высокие значения АМО (± 11 лет от максимума АМО) особенно летом (VI-VIII). Современное потепление климата в период с 1977 по 2000 гг. было ярко выражено в первую половину года (I-V мес.), а в текущем столетии – во второй половине года (VII-XII).

Таблица 3. Разность среднемесячных значений температуры для последовательных 23-летних периодов

Table 3. Difference of monthly mean temperatures for consecutive 23-year periods

Разности среднемесяч- ных температур	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
(1905-1928) минус (1881-1904)	-0.01	-0.75	0.24	0.64	-0.55	-0.42	-0.71	-0.71	-0.08	-0.56	0.32	0.23
(1929-1952) минус (1905-1928)	-0.88	-0.59	-0.90	-0.41	-0.06	-0.01	0.33 *	1.21	0.30	0.41	0.49	0.30
(1953-1976) минус (1929-1952)	0.57	0.64	0.57	0.00	-0.09	0.55	-0.22	-0.71	-0.33	0.52	0.07	0.62
(1977-2000) минус (1953-1976)	2.08	1.43	1.71	1.02	0.40	-0.12	-0.41	0.15	-0.23	0.13	-0.27	-0.04
(2001-2020) минус (1977-2000)	0.55	1.00	1.17	1.04	0.76	0.84	1.99	1.64	1.50	0.52	1.89	1.65

* Красным шрифтом выделены длительные (не менее 5 месяцев подряд) серии положительных разностей температуры.

Разности средних значений температуры для последовательных 23-летних периодов и отдельных пар месяцев на восходящей и нисходящей ветви годового хода температуры (июль-январь, август-февраль, сентябрь-март, октябрь-апрель, ноябрь-май, декабрь-июнь), равноотстоящих от месяца летнего солнцестояния (июнь), оказались наибольшими в обе максимальные фазы квазишестидесятилетнего колебания АМО (1929-1952 и 2001-2020) во вторую половину года и особенно в июле-сентябре. В другие фазы АМО разности температуры были чаще отрицательными.

Дополнительным аргументом в пользу снижения температуры при низких значениях АМО является большая повторяемость холодных осенних месяцев: все экстремально холодные сентябри и ноябри (исключение составляет ноябрь 2007 г.) отмечались при низких значениях АМО.

Близкая картина потепления климата характерна для широтной зоны Центральной и Восточной Европы, ограниченной параллелями 45° и 57° с.ш. Именно в этой широтной полосе квазишестидесятилетнее колебание в изменении температуры имеет наибольшую амплитуду и выбирает около 25% от общей изменчивости температуры в летний сезон (Лысенко и др., 2020; Логинов, 2021).

Если принять во внимание полученные нами ранее результаты о смещении максимальной и минимальной фазы квазишестидесятилетнего колебания в изменении температуры воды Атлантики от субтропических широт Южного полушария в северном направлении (Логинов, 2020 а, б) со скоростью 1-2 см/сек, то субтропический термический источник – теплое экваториальное течение в Южном полушарии – и его продолжение – Флоридское

течение в Северном полушарии – поставят теплую воду в Северную Атлантику ($55\text{--}60^\circ$ с.ш.) через 22-24 года.

Начало первого потепления климата, которое относится к потеплению летнего типа, близко совпадает с максимумом квазишестидесятилетнего колебания температуры воды в южных субтропиках Атлантики, который приходился на начало 20-х годов прошлого столетия (Логинов, 2020б); своего максимума температура воды в Северной Атлантике достигла к середине 40-х годов прошлого столетия, т.е. с запаздыванием на 22-23 года.

Второе потепление наиболее ярко проявилось в начале 80-х годов прошлого столетия. Сперва оно было хорошо выражено только в холодное время года (I-III мес.), а на рубеже столетий (1998-2003 гг.) потепление стало более значительным во втором полугодии (июль-сентябрь). Максимум потепления пришелся на 2014-2021 гг. В последующие годы на нисходящей ветви АМО (2023-2043 гг.) может наступить уменьшение температуры в теплое время года по сравнению с предыдущим десятилетием. Зимой, как это следует из теории парникового потепления климата, в результате усиления форсинга парниковых газов положительный тренд температуры может даже усилиться.

Механизм влияния Мирового океана на климат может реализоваться через морские течения (Алексеев, 2014, 2020; Логинов, 2020б). О распространении потепления из субтропиков в северном направлении указывалось и ранее (Логинов, Сухомазова, 1970).

Следует отметить, что в период с середины 90-х до 2012 г. происходило заглубление теплых вод в Атлантике вплоть до 1500 м. Это привело к формированию паузы в изменении температуры с 1998 по 2012 гг. и последующему быстрому росту температуры (Chen, Tung, 2014). Согласно гипотезе, выдвинутой в этой работе, повышение солёности в приполярной зоне Атлантики связано с усилением Атлантической меридиональной циркуляции (АМОЦ); в результате ее действия теплые солёные воды переносятся из тропиков на север и, охлаждаясь, погружаются на глубину. Параллельно с этим процессом происходит противоположный процесс опреснения и охлаждения вод Северной Атлантики в результате таяния ледников и морского льда. Когда этот процесс начинает превалировать, термохалинная циркуляция в Атлантическом океане вновь замедляется. Предложенный механизм может объяснить интенсивный рост температуры, особенно в последнее десятилетие, когда запасенное в глубинах океана тепло начало интенсивно разогревать атмосферу, тогда, как в период заглубления теплых вод в Северной Атлантике (1998-2012), наблюдалось падение температуры – наступила пауза в потеплении климата.

Проявление радиационного воздействия парниковых газов, как следует из теории парникового потепления климата, должно быть более заметно в холодное время года, что, собственно, и наблюдалось в период с середины 1970-ых до начала текущего столетия. Максимальная фаза Атлантического мультидекадного автоколебания, имеющего квазишестидесятилетнюю цикличность, усиливала парниковое потепление в теплое время года в конце второй четверти двадцатого столетия, а также первом десятилетии текущего столетия. Это позволяет предположить, что в последующий 30-летний период (эпоха

снижения АМО) скорость роста температуры в теплое время года должна уменьшиться по сравнению с 2009-2021 гг.

Скорость потепления климата в холодное время года продолжит увеличиваться, поскольку маловероятно, что условия Парижского соглашения по уменьшению выбросов парниковых газов и увеличению поглощающей способности биосферы, гидросферы и педосферы вряд ли будут выполнены большинством стран мира. Для такого вывода имеется достаточно оснований – за период действия Киотского протокола (1997-2012 гг.) выбросы парниковых газов увеличились почти на 50%.

Заключение

Главные особенности в изменении температуры и осадков в Беларуси состоят в следующем:

1. Увеличение среднегодовой температуры за период инструментальных наблюдений составляет около 1.3°C.

2. Сезонные особенности в развитии потепления климата состоят в следующем. Если в первую половину периода современного потепления (1988-2020 гг.) рост температуры отмечался в основном в зимний и весенний сезоны года, то в текущем столетии рост температуры наиболее выражен в июле-сентябре. Это означает, что произошло смещение потепления климата на вторую половину года. Подобные условия складывались и в период предыдущего потепления климата, известного как потепление Арктики, пришедшегося на 20-е – начало 40-х годов прошлого столетия.

3. Вероятность возникновения летом высокой среднесуточной температуры, превышающей 90-й процентиль ее распределения, в 2000-2019 гг. увеличилась до 15.5%, тогда как в предыдущий 20-летний период она составляла 7.2%. Средняя продолжительность волн жары в Беларуси за это время увеличилась с 6.4 до 7.9 суток, а их средняя интенсивность – с 39.5 до 53.9°C.

4. Уточнены границы агроклиматических областей на территории Беларуси и подтверждено увеличение площади четвертой агроклиматической области.

5. Пространственная особенность изменения осадков в период современного потепления климата состоит в незначительном росте осадков в северо-восточной и уменьшении осадков в юго-западной части Беларуси. В целом на территории страны отмечается небольшое увеличение осадков. Максимальный рост осадков в период последнего потепления климата отмечается в феврале (28%) и октябре (17%). Число дней с осадками за период потепления уменьшилось с 175 до 167 дней (в основном, за счёт уменьшения числа дней с осадками интенсивностью от 0.1 до 0.4 мм).

Список литературы

Алексеев, Г.В. (2014) Арктическое измерение глобального потепления, *Лед и снег*, № 2, с. 53-68.

Алексеев, Г.В., Вязилова, А.Е., Харланенкова, Н.Е. (2020) Влияние низких широт на климатические условия на водосборах главных сибирских рек, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 4, с. 54-67.

Говоркова, В.А., Катцов, В.М., Мелешко, В.П., Павлова, Т.В., Школьник, И.М. (2008) Оценка пригодности моделей общей циркуляции атмосферы и океана СМIP3 для расчетов будущих изменений климата России. Климат России в XXI веке, *Метеорология и гидрология*, ч. 2, № 8, с. 5-19.

Голяндина, Н.Э. (2004) *Метод «Гусеница»-SSA: анализ временных рядов: учеб. пособие*, СПб., 76 с.

Данилович, И.С., Гайер, Б. (2018) Оценка возможных будущих изменений температуры воздуха и осадков по декадам текущего столетия для территории Беларуси на основе результатов численного моделирования, *Природные ресурсы*, № 1, с. 102-114.

Климат Беларуси (1996) Минск, Институт геологических наук АН Беларуси, 234 с.

Логинов, В.Ф. (2012) *Радиационные факторы и доказательная база современных изменений климата*, Минск, Беларуская навука, 266 с.

Логинов, В.Ф. (2020 а) Изменения температуры воды в Атлантическом океане и их возможные причины, *Гидрометеорология и образование*, № 2, с. 39-54.

Логинов, В.Ф. (2020 б) *Космические факторы климатических изменений*, Минск, 167 с.

Логинов, В.Ф. (2021) *Диагноз глобального климата*, С.-Пб., Изд. «Лема», 302 с.

Логинов, В.Ф., Лысенко, С.А. (2019) *Современные изменения глобального и регионального климата*, Минск, Беларуская навука, 315 с.

Логинов, В.Ф., Лысенко, С.А., Мельник, В.И. (2020) *Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования*, 2-ое изд., Минск, УП «Энцыклапедыкс», 264 с.

Логинов, В.Ф., Микуцкий, В.С., Каждан, Е.Н. (2000) Использование моделей общей циркуляции для оценки климата в Беларуси, *Природопользование*, вып. 6, с. 30-31.

Логинов, В.Ф., Сухомазова, Г.И. (1970) О генезисе колебаний температурного режима Северного полушария, *Известия Всес. Географического общества*, № 4, с. 374-375.

Логинов, В.Ф., Табальчук, Т.Г. (2014) Изменение площадей агроклиматических областей на территории Беларуси, *Природопользование*, вып. 25, с. 47-52.

Лысенко, С.А., Буяков, И.В. (2020) Особенности современного изменения климата в Республике Беларусь, *Фундаментальная и прикладная климатология*, № 3, с. 22-41.

Лысенко, С.А., Логинов, В.Ф., Буяков, И.В. (2020) Влияние крупномасштабных мод общей изменчивости атмосферы и океана в Атлантико-Европейском регионе на климат Беларуси, *Докл. Нац. акад. наук Беларуси*, т. 64, № 5, с. 609-616.

Мелешко, В.П., Катцов, В.М., Говоркова, В.А., Спорышев, П.В., Школьник, И.М., Шнееров, Б.Е. (2008) Климат России в XXI веке. Часть 3. Будущие изменения климата рассчитываются с помощью ансамбля связанных моделей СМIP3 общей циркуляции атмосферы и океана, *Метеорология и гидрология*, № 33(9), с. 541-552.

Мельник, В.И., Комаровская, Е.В. (2008) Влияние современных изменений климата на ведение сельскохозяйственного производства в Белорусском Полесье, в сб.: *Прыроднае асяроддзе Палесся: асаблівасці і перспектывы развіцця: материалы Международной научной конференции*, т. 1., вып. 1., Брест: Альтернатива, с. 51-54.

Мохов, И.И., Елисеев, А.В. (2006) Моделирование глобальных климатических изменений в XX-XXIII веках при новых сценариях антропогенного воздействия (РГП), *Известия РАН*, № 443(6), с.732-736.

Шкляр, А.Х. (1973) *Климатические ресурсы Беларуси и их использование в сельском хозяйстве*, Минск, Вышэйшая школа, 430 с.

Школьник, И.М., Мелешко, В.П., Катцов В.М. (2006) Возможные изменения климата в европейской России и соседних странах к концу XXI века: расчет по региональной модели ГГО, *Метеорология и гидрология*, № 3, с. 2-10.

BACC Author Team. (2015) *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*, Springer International Publishing, 501 p.

Chen, X., Tung, K.K. (2014) Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration, *Science*, vol. 345 (6199), pp. 897-903.

IPCC (2014) *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, in R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.), IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.

Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O.B., Bouwer, L.M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M. and 30 more (2014) EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research, *Regional Environmental Change*, vol. 14, issue 2, pp. 563-578.

Kotlarski, S., Keuler, K., Christensen, O.B., Colette, A., Déqué, M., Gobiet, A., Goergen, K., Jacob, D., Lüthi, D., van Meijgaard, E., Nikulin, G., Schär, C., Teichmann, C., Vautard, R., Warrach-Sagi, K., Wulfmeyer, V. (2014) Regional climate modeling on european scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble, *Geosci. Model Dev.*, no. 7(4), pp. 1297-1333, doi: 10.5194/gmd-7-1297-2014.

Statement on the State of the Global Climate in 2018 (2019) World Meteorological Organization (WMO), 64 p.

References

Alekseev, G.V. (2014) Arkticheskoe izmerenie global'nogo potepleniya [The Arctic dimension of global warming], *Led i sneg*, no. 2, pp. 53-68.

Alekseev, G.V., Vyazilova, A.E., Harlanenkova, N.E. (2020) Vliyanie nizkikh shirot na klimaticheskie usloviya na vodosborah glavnkh sibirskih rek [The influence of low latitudes on climatic conditions in the catchments of the main Siberian rivers], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 4, pp. 54-67.

Govorkova, V.A., Kattsov, V.M., Meleshko, V.P., Pavlova, T.V., Shkol'nik, I.M. (2008) Ocenka prigodnosti modelej obshchej cirkulyacii atmosfery i okeana CMIP3 dlya raschetov budushchih izmenenij klimata Rossii. Klimat Rossii v XXI veke [Assessment of the suitability of CMIP3 models of the general circulation of the atmosphere and ocean for calculating future climate changes in Russia. The climate of Russia in the XXI century], *Meteorologiya i gidrologiya*, part 2, no. 8, pp. 5-19.

Golyandina, N.E. (2004) *Metod «Gusenica»-SSA: analiz vremennyh ryadov :ucheb. posobie* [The "Caterpillar" method-SSA: time series analysis: a textbook], St.-Petersburg, Russia, 76 p.

Danilovich, I.S., Gajer, B. (2018) Ocenka vozmozhnyh budushchih izmenenij temperatury vozduha I osadkov po dekadam tekushchego stoletiya dlya territorii belarusi na osnove rezul'tatov chislennogo modelirovaniya [Estimation of possible future changes in air temperature and precipitation over the decades of the current century for the territory of Belarus based on the results of numerical modeling], *Prirodnye resursy*, no. 1, pp. 102-114.

Klimat Belarusi [Climate of Belarus] (1996), Institut geologicheskikh nauk AN Belarusi, Minsk, Belarus, 234 p.

Loginov, V.F. (2020 a) Izmeneniya temperatury vody v Atlanticheskoy okeane i ih vozmozhnye prichiny [Changes in water temperature in the Atlantic Ocean and their possible causes], *Gidrometeorologiya i obrazovanie*, no. 2, pp. 39-54.

Loginov, V.F. (2020 b) *Kosmicheskie faktory klimaticheskikh izmenenij* [Space factors of climate change], Minsk, Belarus, 167 p.

Loginov, V.F. (2021) *Diagnoz global'nogo klimata* [Diagnosis of the global climate], Izd. «Lema», St.-Petersburg, Russia, 302 p.

Loginov, V.F., Brovka, Yu.A. (2014) Sezonnye osobennosti izmeneniya klimata Belarusi [Seasonal features of climate change in Belarus], *Prirodopol'zovanie*, issue 25, pp. 16-22.

Loginov, V.F., Lysenko, S.A. (2019) *Sovremennye izmeneniya global'nogo i regional'nogo klimata* [Modern changes in the global and regional climate], Belaruskaya navuka, Minsk, Belarus, 315 p.

Loginov, V.F., Lysenko, S.A., Mel'nik, V.I. (2020) *Izmenenie klimata Belarusi: prichiny, posledstviya, vozmozhnost iregulirovaniya*, 2-oe izd. [Climate change in

Belarus: causes, consequences, regulatory opportunities, 2nd edition], UP «Enciklopediks», Minsk, Belarus, 264 p.

Loginov, V.F., Mikuckij, V.S., Kazhdan, E.N. (2000) Ispol'zovanie modelej obshchej cirkulyacii dlya ocenki klimata v Belarusi [Using general circulation models to assess the climate in Belarus], *Prirodopol'zovanie*, issue 6, pp. 30-31.

Loginov, V.F., Suhomazova, G.I. (1970) O genezise kolebanij temperaturnogo rezhima Severnogo polushariya [On the genesis of fluctuations in the temperature regime of the Northern Hemisphere], *Izvestiya V ses. Geograficheskogo obshchestva*, no. 4, pp. 374-375.

Loginov, V.F., Tabal'chuk, T.G. (2014) Izmenenie ploshchadej agroklimaticheskikh oblastej na territorii Belarusi [Changes in the areas of agro-climatic regions on the territory of Belarus], *Prirodopol'zovanie*, issue 25, pp. 47-52.

Lysenko, S.A., Buyakov, I.V. (2020) Osobennosti sovremennogo izmeneniya klimata v Respublike Belarus'yu [Features of modern climate change in the Republic of Belarus], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, № 3, p. 22-41.

Lysenko, S.A., Loginov, V.F., Buyakov, I.V. (2020) Vliyanie krupnomasshtabnyh mod obshchej izmenchivosti atmosfery i okeana v Atlantiko-Evropejskom regione na klimat Belarusi [Influence of large-scale modes of general variability of the atmosphere and ocean in the Atlantic-European region on the climate of Belarus], *Dokl. Nac. akad. nauk Belarusi*, vol. 64, no. 5, pp. 609-616.

Meleshko, V.P., Kattsov, V.M., Govorkova, V.A., Sporyshev, P.V., Shkol'nik, I.M., Shneerov, B.E. (2008) Klimat Rossii v XXI veke. Chast' 3. Budushchie izmeneniya klimata rasschityvayutsya s pomoshch'yu ansamblya svyazannyh modelej CMIP3 obshchej cirkulyacii atmosfery i okeana [The climate of Russia in the XXI century. Part 3. Future climate changes are calculated using an ensemble of related CMIP3 models of the general circulation of the atmosphere and the ocean], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 33(9), pp. 541-552.

Mel'nik, V.I., Komarovskaya, E.V. (2008) Vliyanie sovremennyh izmenenij klimata na vedenie sel'skohozyajstvennogo proizvodstva v Belorusskom Poles'e [The impact of modern climate changes on agricultural production in the Belarusian Polesie], *Pryrodnaya sreda Polesya: aspekty razvitiya i perspektivy razviciya: materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii* [Materials of the International scientific conference "The natural environment of Polesie: features and prospects of development"], vol. 1, issue 1, *Alternativa*, Brest, Belarus, pp. 51-53.

Mohov, I.I., Eliseev, A.V. (2006) Modelirovanie global'nyh klimaticheskikh izmenenij v XX-XXIII vekah pri novyh scenariyah antropogennogo vozdeystviya (RGP) [Modeling of global climate changes in the XX-XXIII centuries under new scenarios of anthropogenic impact (RGP)], *Izvestiya RAN*, no. 443(6), pp. 732-736.

Shklyar, A.H. (1973) *Klimaticheskie resursy Belarusi i ikh pol'zovanie v sel'skom hozyajstve* [Climate resources of Belarus and their use in agriculture], Vyshejschaya shkola, Minsk, Belarus, 430 p.

Shkol'nik, I.M., Meleshko, V.P., Kattsov, V.M. (2006) Vozmozhnye izmeneniya klimata v evropejskoj Rossii i sosednih stranah k koncu XXI veka: raschet po regional'noj modeli GGO [Possible climate changes in European Russia and neighboring countries by the end of the XXI century: calculation based on the regional Main Geophysical Observatory model], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 3, pp. 2-10.

BACC Author Team. (2015) *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*, Springer International Publishing, 501 p.

Chen, X., Tung K.K. (2014) Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration, *Science*, vol. 345 (6199), pp. 897-903.

IPCC (2014) *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, in R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.), IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.

Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O.B., Bouwer, L.M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M. and 30 more (2014) EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research, *Regional Environmental Change*, vol. 14, issue 2, pp. 563-578.

Kotlarski, S., Keuler, K., Christensen, O.B., Colette, A., Déqué, M., Gobiet, A., Goergen, K., Jacob, D., Lüthi, D., van Meijgaard, E., Nikulin, G., Schär, C., Teichmann, C., Vautard, R., Warrach-Sagi, K., Wulfmeyer, V. (2014) Regional climate modeling on european scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble, *Geosci. Model Dev.*, no. 7(4), pp. 1297-1333, doi: 10.5194/gmd-7-1297-2014.

Statement on the State of the Global Climate in 2018 (2019) World Meteorological Organization (WMO), 64 p.

Статья поступила в редакцию (Received): 08.09.2021

Статья доработана после рецензирования (Revised): 23.10.2021

Принята к публикации (Accepted): 14.02.2022

Для цитирования / For citation:

Логинов, В.Ф. (2022) Современные изменения климата Беларуси, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 8, № 1, с. 51-74, doi:10.21513/2410-8758-2022-1-с. 51-74.

Loginov, V.F. (2022) Modern climate change in Belarus, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 8, no. 1, pp. 51-74, doi:10.21513/2410-8758-2022-1-с. 51-74.