

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)
УДК 535.37
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-5-609-616>

Поступило в редакцию 24.07.2020
Received 24.07.2020

С. А. Лысенко, академик В. Ф. Логинов, И. В. Буюков

*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск,
Республика Беларусь*

ВЛИЯНИЕ КРУПНОМАСШТАБНЫХ МОД ОБЩЕЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА В АТЛАНТИКО-ЕВРОПЕЙСКОМ РЕГИОНЕ НА КЛИМАТ БЕЛАРУСИ

Аннотация. Установлены связи квазипериодических компонент в изменении температуры воздуха и количества осадков на территории Беларуси с крупномасштабными модами общей изменчивости атмосферы и океана в Атлантико-Европейском регионе – Атлантической мультидекадной осцилляцией и Североатлантическим колебанием. В изменениях летней температуры воздуха в Беларуси и на территории Восточной Европы выделено квази-60-летнее колебание, совпадающее по фазе с Атлантической мультидекадной осцилляцией. Показано, что временные ряды зимней температуры воздуха в Беларуси содержат квази-8-летнюю компоненту, синхронизированную с аналогичной компонентой Северо-Атлантического колебания, а периоды ускорения и замедления зимнего потепления в Беларуси совпадают соответственно с восходящими и нисходящими квази-30-летними фазами Северо-Атлантического колебания. Последние также согласуются с колебаниями увлажненности территории Беларуси и Европы. Исходя из установленных закономерностей сделан вывод, что быстрый рост зимних температур, замедление темпов летнего потепления и ухудшение водообеспеченности южных регионов Беларуси, наблюдаемые в последнее десятилетие, являются частью естественного цикла длительностью около 30 лет, развивающегося на фоне долгосрочного тренда антропогенного глобального потепления.

Ключевые слова: изменение климата, циклы, Атлантическая мультидекадная осцилляция, Североатлантическое колебание

Для цитирования: Лысенко, С. А. Влияние крупномасштабных мод общей изменчивости атмосферы и океана в Атлантико-Европейском регионе на климат Беларуси / С. А. Лысенко, В. Ф. Логинов, И. В. Буюков // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 5. – С. 609–616. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-5-609-616>

Sergey A. Lysenko, Academician Vladimir F. Loginov, Ivan V. Buyakov

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

EFFECT OF LARGE-SCALE MODES OF TOTAL VARIABILITY OF THE ATMOSPHERE AND OCEAN IN THE ATLANTIC-EUROPEAN REGION ON THE CLIMATE OF BELARUS

Abstract. We have established the relationships of quasicyclic components in changes of air temperature and precipitation in Belarus with large-scale modes of general variability of the atmosphere and ocean in the Atlantic-European region. When the summer air temperature changes in Belarus and in Eastern Europe, a quasi-60-year oscillation is identified, which coincides in phase with the Atlantic multi-decadal oscillation. It is shown that the time series of winter air temperature in Belarus contain a quasi-8-year component synchronized with a similar component of the North Atlantic Oscillation. Moreover, the periods of acceleration and deceleration of winter warming in Belarus coincide with the upward and downward quasi-30-year phases of the North Atlantic Oscillation, respectively. The latter are also consistent with fluctuations in moisture content in Belarus and Europe. Based on the established patterns, we have concluded that the rapid rise in winter temperatures, slowing down of summer warming and deterioration in water supply in the southern regions of Belarus observed in the last decade are part of a natural cycle lasting about 30 years, developing against the background of a long-term trend of anthropogenic global warming.

Keywords: climate change, cycles, Atlantic Multidecadal Oscillation, North Atlantic Oscillation

For citation: Lysenko S. A., Loginov V. F., Buyakov I. V. Effect of large-scale modes of total variability of the atmosphere and ocean in the Atlantic-European region on the climate of Belarus. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 5, pp. 609–616 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-5-609-616>

Введение. Быстрое изменение климата на протяжении последних десятилетий привело к существенным трансформациям агрометеорологических ресурсов и условий жизнедеятельности населения Республики Беларусь. В результате глобального потепления годовая сумма активных среднесуточных температур (превышающих 10 °С) продвигается с юга на север Беларуси со средней

скоростью около 12 км/год. За последние 20 лет скорость этого продвижения увеличилась в 2 раза по сравнению с периодом 1980–2000 гг. [1]. При сохранении наблюдаемых темпов потепления климата максимальные суммы активных температур, наблюдаемые сейчас у южных границ Беларуси, уже через 30 лет могут переместиться к ее самым северным границам, что приведет к установлению на всей территории Беларуси принципиально новых агрометеорологических условий.

За счет роста температуры приземного слоя атмосферы годовая испаряемость на юге Беларуси в текущем столетии стала более чем на 100 мм превышать годовую сумму осадков, тогда как еще за 20 лет до этого на всей территории Беларуси сохранялся положительный водный баланс [1], что является свидетельством быстрой аридизации климата.

Средняя продолжительность оттепелей зимой с 1960 по 2019 г. возросла на 17 дней, достигнув величины около 33 дней, в результате чего существенно сократился период накопления снежного покрова и запасы почвенной влаги в начале вегетационного периода. Следствием этого стало раннее наступление весенних засух (в мае и даже в апреле) на территории Беларуси в последние годы.

Несмотря на неоспоримый факт быстрых изменений климата Беларуси в последние десятилетия, вопрос о причинности этих изменений по-прежнему остается дискуссионным. Колебания климата в масштабе десятилетий, наблюдаемые на фоне долгопериодного тренда глобального потепления, могут быть результатом перераспределения тепла и влаги в общепланетарной системе «атмосфера–океан» [2–4]. Даже небольшие изменения температуры вод в Мировом океане способны формировать значительные аномалии климата в различных регионах Земли, приводя как к ускорению, так и к замедлению роста температуры воздуха [2; 5–7].

Характер климата Беларуси и Европы во многом формируется под влиянием Северной Атлантики, температура поверхностного слоя которой испытывает естественные колебания с характерным масштабом от 50 до 70 лет [3; 8; 9]. Эти колебания обнаруживаются как в данных инструментальных наблюдений, проводимых со второй половины XIX в., так и в палеоклиматических реконструкциях для последнего более чем 8000-летнего периода [10]. Для количественной характеристики этого колебания используется индекс атлантической мультideкадной осцилляции (АМО), представляющий собой среднюю аномалию температуры поверхности океана в Северной Атлантике между 0 и 70° с. ш. [3].

Согласно современным представлениям, процесс перераспределения тепла в Северной Атлантике зависит от изменений температуры и солености вод в субарктическом регионе и, в частности, в море Лабрадор и море Ирмингера [4; 9; 11]. Изменчивость глубокой конвекции в этом регионе в масштабах нескольких десятилетий под влиянием разнонаправленных потоков теплых соленых вод из тропиков и холодных пресных вод из Арктики воздействуют на термохалинные процессы (связанные с температурой и соленостью) и интенсивность поверхностных и глубинных течений во всей Северной Атлантике. Аномалии температуры поверхности океана, формирующиеся в результате термохалинных процессов, сопровождаются изменениями потоков тепла на поверхности океана и режима циркуляции атмосферы. В свою очередь, атмосферная циркуляция, посредством создаваемой ею системы поверхностных течений и ветрового перемешивания деятельного слоя океана, приводит к смене фазы АМО и запуску термохалинных процессов противоположной направленности [12; 13].

В настоящем сообщении рассматривается связь климата Беларуси с крупномасштабными модами общей изменчивости атмосферы и океана в Атлантико-Европейском регионе. На основании полученных результатов даны объяснения причин современных изменений температуры воздуха и количества осадков на территории Беларуси в отдельные сезоны и составлены фоновые прогнозы их изменений на ближайшие десятилетия.

Циклические закономерности изменения температурно-влажностного режима в Атлантико-Европейском регионе. Квазициклические изменения температуры воздуха на территории Беларуси с периодом около 60 лет особенно отчетливо проявляются для летних месяцев. Это колебание в той или иной степени присутствует в данных инструментальных наблюдений температуры воздуха на всей территории Европы, однако в Восточной Европе его амплитуда дости-

гает максимальных значений. Здесь на это колебание приходится около 30 % общей дисперсии временного ряда летней температуры воздуха (рис. 1). Квазициклические изменения температуры в данном регионе с амплитудой около $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходят практически синхронно с АМО. Со второй половины 1970-х годов к этому естественному колебанию температуры добавился тренд потепления, связанный с антропогенной эмиссией парниковых газов [2]. Это потепление совпало по времени с восходящей фазой АМО, что способствовало быстрому росту летних температур в этот период. С 2011 г. АМО после достижения своего максимума перешла в фазу понижения, в результате чего рост летних температур в Беларуси в последние годы существенно замедлился.

Температурные характеристики зим на территории Беларуси и Европы в значительной степени определяются влиянием общей циркуляции атмосферы в регионе Северной Атлантики. Главной модой изменчивости этой циркуляции является Северо-Атлантическое колебание (САК), которое характеризуется по разности давлений на уровне моря между Исландским минимумом (область низкого давления) и Азорским максимумом (область высокого давления). В положительную фазу этого индекса усиливается меридиональный тип циркуляции в зоне $50\text{--}60^{\circ}$ с. ш., траектории циклонов смещаются на север примерно на $200\text{--}400$ км относительно их среднего положения, зимы на территории Европы становятся более теплыми, количество зимних осадков на севере Европы увеличивается, а на юге уменьшается [14]. В отрицательную фазу индекса САК развиваются противоположные атмосферные процессы.

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. Исходя из данных долгопериодных наблюдений АМО и САК можно сделать вывод, что изменение фазы АМО сопровождается перестройкой многолетнего режима атмосферной циркуляции (рис. 2). В положительную (отрицательную) фазу АМО наблюдается долгопериодная тенденция понижения (роста) индекса САК, в результате чего изменяются температурно-влажностные условия на территории Беларуси и Европы. Эти тенденции были четко выражены с 1860 по 1960 г., однако в последние десятилетия они существенно затухают антропогенным изменением климата.

В общей изменчивости индекса САК выделяются две основные квазициклические составляющие с периодами около 8 и 60 лет. Колебание САК с периодом около 8 лет, вероятно, связано с аномалиями солености вод в Лабрадорском море и составляющих теплового баланса верхнего квазиоднородного слоя Северной Атлантики [8; 13; 15]. Это колебание отчетливо проявляется

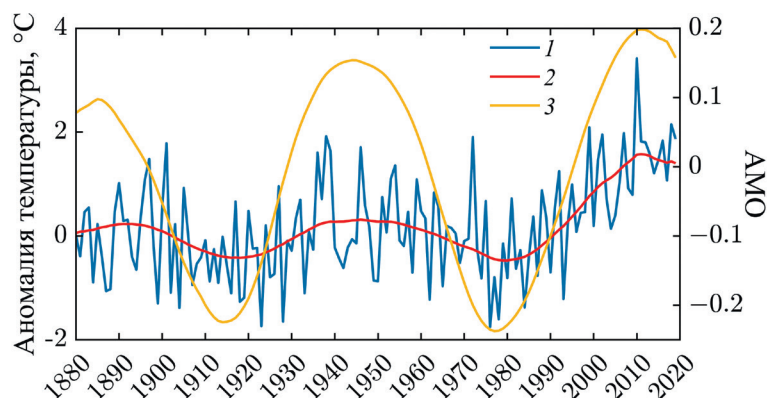


Рис. 1. Временной ряд средней аномалии температуры воздуха (1) летом в регионе с координатами $47\text{--}57^{\circ}$ с. ш., $20\text{--}38^{\circ}$ в. д. (включает территории Беларуси, Украины, Литвы, Латвии и Восточной Польши), квазициклическая компонента температуры воздуха в этом регионе с периодом около 60 лет (2) и аналогичная компонента АМО (3)

Fig. 1. Time series of average air temperature anomalies (1) in summer within $47\text{--}57^{\circ}$ N and $20\text{--}38^{\circ}$ E area (includes Belarus, Ukraine, Lithuania, Latvia and Eastern Poland), quasicyclic ~ 60 -year air temperature component in this region (2) and equivalent AMO component (3)

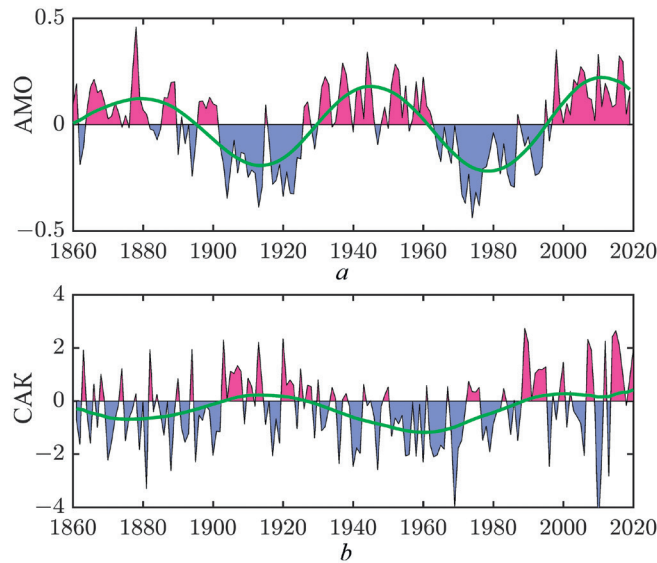


Рис. 2. Временные ряды индексов АМО (а) и САК (b) и их квази-60-летние компоненты

Fig. 2. Time series of AMO (a) and NAO (b) values and their quasy-60-year components

в зимней температуре воздуха на территории Беларуси (рис. 3), а периоды роста и понижения САК на восходящей и нисходящей ветвях его квази-60-летнего цикла совпадают с периодами ускорения и замедления зимнего потепления в Беларуси. С 2012 г. индекс САК находится преимущественно в положительной фазе, в результате чего в Беларуси в последние годы отмечается быстрый рост зимних температур, а количество зимних осадков, особенно на юге Беларуси, уменьшается.

Стоит заметить, что долгопериодные колебания количества зимних осадков на территории Беларуси и Европы, синхронизированные с индексом САК, наблюдались на протяжении всего прошлого столетия. Так, в годы систематического усиления САК (1962–1992 гг.) на восходящей ветви его квази-60-летнего цикла происходило увеличение количества зимних осадков на севере и понижение на юге Европы (рис. 4, а), а с 1992 по 2011 г. при ослаблении САК наблюдались про-

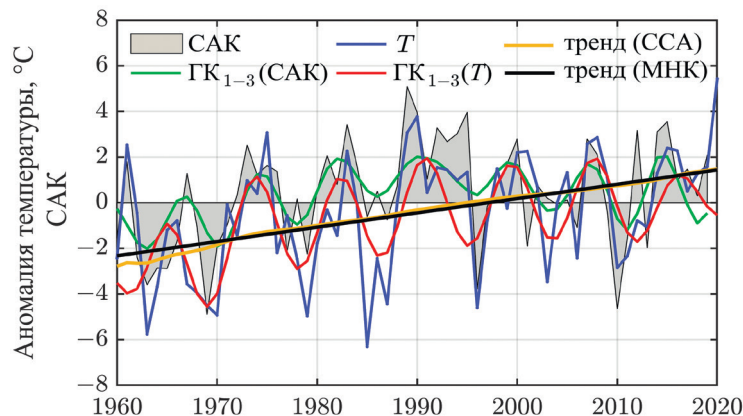


Рис. 3. Временные ряды средней аномалии зимней температуры воздуха в Беларуси (T), индекса североатлантического колебания (САК) с декабря по март, их трендовые и квазипериодические компоненты, выделенные на основе спектрального сингулярного анализа (ССА) и метода наименьших квадратов (МНК). $ГК_{1-3}$ – суммы первых трех главных компонент сингулярного разложения временных рядов, включающие тренд и квазипериодические компоненты с периодом около 8 лет; аномалии рассчитаны относительно периода 1981–2010 гг.

Fig. 3. Time series of average anomalies of winter air temperatures in Belarus (T), NAO values for December–March, their trend and quasicyclic components selected with Singular Spectral Analysis (SSA) and least-square method. $ГК_{1-3}$ are sums of the first three main component of singular time series decomposition, which include trends and quasicyclic ~8-year components; anomalies were calculated for 1981–2010 period

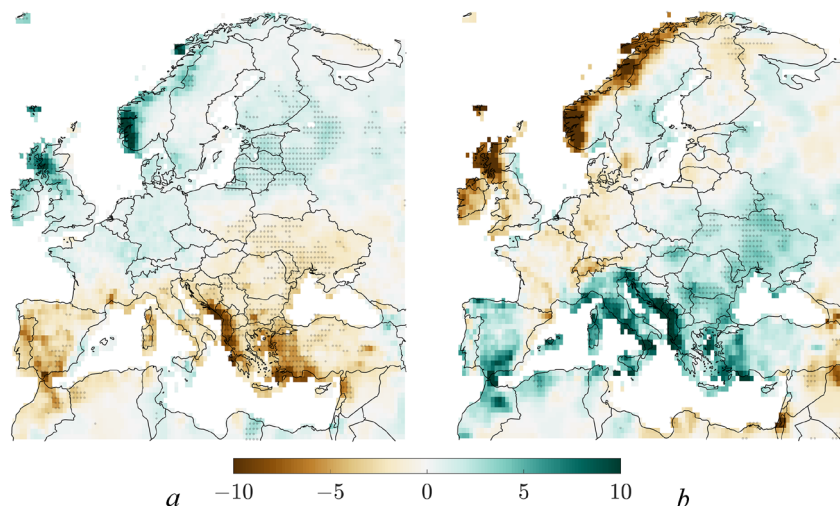


Рис. 4. Тренды сумм зимних осадков (в мм/год) на территории Европы в периоды, соответствующие восходящей (1962–1992 гг.) (а) и нисходящей (1992–2011 гг.) (б) фазам квази-60-летнего цикла индекса САК.

Точками отмечены регионы со статистически значимым трендом количества осадков при уровне значимости по *t*-критерию Стьюдента выше 95 %

Fig. 4. Winter precipitation trend (mm/year) on the territory of Europe in ascending phase (1962–1992) (a) and declining phase (1992–2011) (b) of quasi-60-year NAO cycle.

Dots mark the regions with statistically significant precipitation trend with >95 % level of significance according to Student's *t*-test

тивоположные тенденции (рис. 4, б). Наиболее отчетливая смена тенденции в изменении осадков в зависимости от фазы квази-60-летнего колебания САК свойственна горным и предгорным районам на севере и юге Европы (Скандинавские, Пиренейские, Альпийские).

В последние годы при максимально высоких из когда-либо наблюдаемых ранее температурах поверхностных вод в Северной Атлантике (максимум АМО) вновь активизируются центры действия атмосферы, связанные с САК. В результате этих процессов на территории Беларуси ускорился рост зимних температур, а рост летних температур, напротив, замедлился. В зимние месяцы на юге Беларуси наметилось понижение атмосферных осадков, что в совокупности с быстрым ростом средних температур воздуха, числа и продолжительности оттепелей приводит к снижению весеннего инфильтрационного питания подземных вод.

Результаты стационарных измерений уровня грунтовых вод и спутниковых гравитационных измерений аномалий общего водозапаса на территории Беларуси (включая поверхностные, подземные воды и влагу в почве) показывают устойчивое понижение водных ресурсов подземных и поверхностных вод с 2012 г. На юге Беларуси понижение уровня грунтовых вод лишь за несколько последних лет (с 2012 по 2019 г.) стало сравнимым по величине с их понижением за весь период осушительной мелиорации в Полесье (рис. 5).

Стоит заметить, что грунтовые воды, особенно на участках их неглубокого залегания (в т. ч. на мелиорируемых землях), являются важным фактором формирования почвенной влаги, степени водообеспеченности растительности и условий ее произрастания. Это особенно актуально для территории Полесья, которая примерно на три четверти представлена почвами легкого гранулометрического состава (песчаными и супесчаными) с низкой влагоудерживающей способностью. В современный период эти регионы Беларуси подвержены интенсивному процессу аридизации (иссушения) климата, представляющему серьезную проблему для лесного и сельского хозяйства. Из-за участвовавших засух песчаные почвы быстрее иссушаются, что отрицательно влияет на продуктивность возделываемых культур. Кроме того, при высокой скорости ветра на мелиорированных территориях (из-за низкой шероховатости подстилающей поверхности) чаще возникают песчаные бури.

Заключение. Таким образом, исходя из установленных закономерностей влияния крупномасштабных мод общей изменчивости атмосферы и океана в Атлантико-Европейском регионе

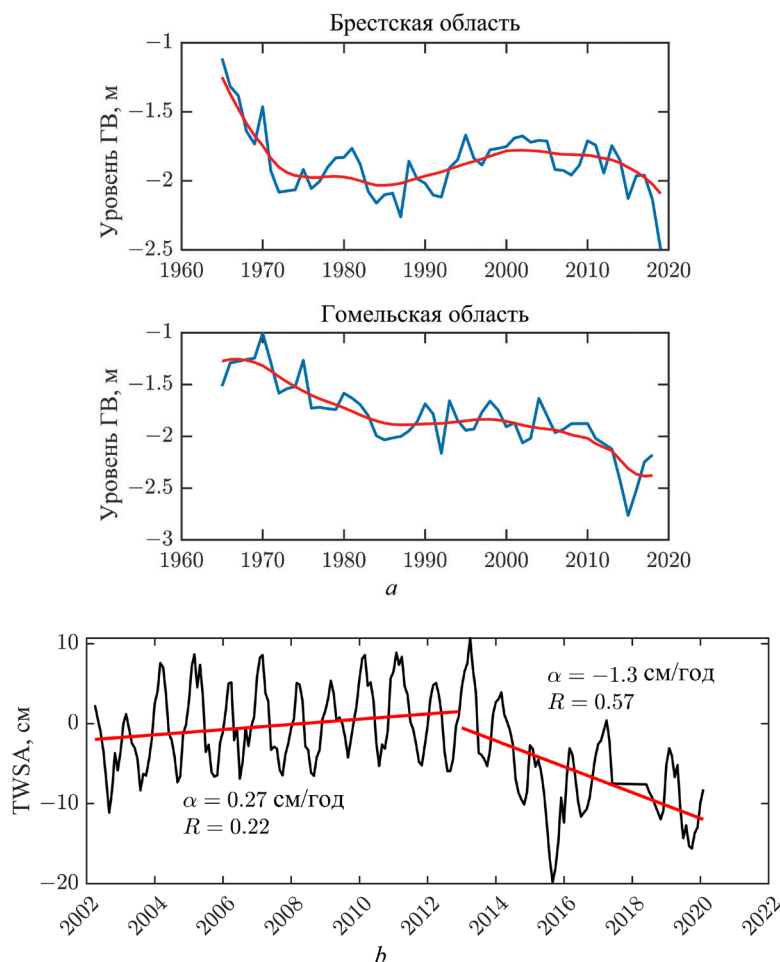


Рис. 5. Средний уровень грунтовых вод по гидрологическим постам на территориях Брестской и Гомельской областей (а), а также средняя аномалия эффективного слоя воды (см) на территории Беларуси, рассчитанная на основе данных спутникового эксперимента GRACE-FO (2002–2019 гг.) по исследованию гравитационного поля Земли (б)

Fig. 5. Average groundwater level on hydrological stations of Brest and Gomel regions (a) and average anomaly of effective water layer (cm) on the territory of Belarus calculated on the base of GRACE-FO (2002–2019) Earth gravity field research experiment (b)

на температурно-влажностные характеристики климата Беларуси, можно сделать вывод, что быстрый рост зимних температур, сравнительно медленное летнее потепление и устойчивое понижение водных ресурсов, наблюдаемые на территории Беларуси в последнее десятилетие, являются частью естественного цикла длительностью около 30 лет, который накладывается на долгосрочный тренд антропогенного глобального потепления. Причиной аридизации климата Беларуси, наблюдаемой в последние годы, является смена характера естественных изменений температуры поверхностных вод в регионе Северной Атлантики, сопровождающаяся перестройкой общей циркуляции атмосферы. С 2010 г. началась нисходящая фаза атлантической мультideкадной осцилляции, а вместе с ней и активизация центров действия атмосферы в Северной Атлантике. В результате этих процессов ускорился рост зимних температур воздуха, летнее потепление замедлилось, а на юге Беларуси наметилось понижение количества зимних осадков. Недобор зимних осадков и уменьшение весеннего стока талых вод приводят к понижению общих водозапаса территории Беларуси. Исходя из анализа естественных колебаний температурно-влажностных характеристик климата в Атлантико-Европейском регионе в предыдущем столетии, можно предположить, что отмеченные особенности изменения климата будут сохраняться на протяжении всей нисходящей фазы атлантической мультideкадной осцилляции, т. е. продлятся еще не менее 20 лет.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Логинов, В. Ф. Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, В. И. Мельник. – 2-е изд. – Минск, 2020. – 264 с.
2. Логинов, В. Ф. Современные изменения глобального и регионального климата / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко. – Минск, 2019. – 315 с.
3. North Atlantic climate variability: phenomena impact and mechanisms / J. Marshall [et al.] // *Int. J. Clim.* – 2001. – Vol. 21, N 15. – P. 1863–1898. <https://doi.org/10.1002/joc.693>
4. Rahmstorf, S. Ocean circulation and climate during the past 120,000 years / S. Rahmstorf // *Nature*. – 2002. – Vol. 419, N 6903. – P. 207–214. <https://doi.org/10.1038/nature01090>
5. Multi-decadal oscillations of the ocean active upper-layer heat content / V. I. Byshev [et al.] // *Pure Appl. Geophys.* – 2017. – Vol. 174, N 7. – P. 2863–2878. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1557-3>
6. Hu, S. The extreme El Niño of 2015–2016 and the end of global warming hiatus / S. Hu, A. V. Fedorov // *Geophys. Res. Lett.* – 2017. – Vol. 44, N 8. – P. 3816–3824. <https://doi.org/10.1002/2017gl072908>
7. Логинов, В. Ф. Оценка роли Тихого океана в изменениях современного климата / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко // *Изв. РАН. Сер. географ.* – 2019. – № 3. – С. 3–12. <https://doi.org/10.31857/S2587-5566201933-12>
8. Полонский, А. Б. Атлантическая мультидекадная осцилляция и ее проявления в Атлантико-Европейском регионе / А. Б. Полонский // *Мор. гидрофиз. журн.* – 2008. – № 4. – С. 69–80.
9. A mechanism for Atlantic multidecadal variability in the Kiel Climate Model / J. Ba [et al.] // *Clim. Dyn.* – 2013. – Vol. 41, N 7–8. – P. 2133–2144. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1633-4>
10. Tracking the Atlantic multidecadal oscillation through the last 8,000 years / M. F. Knudsen [et al.] // *Nat. Commun.* – 2011. – Vol. 2, N 1. <https://doi.org/10.1038/ncomms1186>
11. Transient response of the Atlantic Meridional Overturning Circulation to enhanced freshwater input to the Nordic Seas – Arctic Ocean in the Bergen Climate Model / O. H. Otterå [et al.] // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. – 2004. – Vol. 56, N 4. – P. 342–361. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v56i4.14421>
12. Sarafanov, A. On the effect of the North Atlantic Oscillation on temperature and salinity of the subpolar North Atlantic intermediate and deep waters / A. Sarafanov // *ICES J. Mar. Sci.* – 2009. – Vol. 66, N 7. – P. 1448–1454. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsp094>
13. Sun, C. A delayed oscillator model for the quasi-periodic multidecadal variability of the NAO / C. Sun, J. Li, F.-F. Jin // *Clim. Dyn.* – 2015. – Vol. 45, N 7–8. – P. 2083–2099. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2459-z>
14. Нестеров, Е. С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан / Е. С. Нестеров. – М., 2013. – 144 с.
15. Полонский, А. Б. Североатлантическое колебание и бюджет тепла верхнего слоя Северной Атлантики / А. Б. Полонский, П. А. Сухонос // *Фундаментальная и прикладная климатология*. – 2019. – № 4. – С. 67–100.

References

1. Loginov V. F., Lysenko S. A., Mel'nik V. I. *Climate changes in Belarus: reasons, consequences, possibilities of regulation*. 2nd ed. Minsk, 2020. 264 p. (in Russian).
2. Loginov V. F., Lysenko S. A. *Modern changes of global and regional climate*. Minsk, 2019. 315 p. (in Russian).
3. Marshall J., Kushnir Yo., Battisti D., Chang P., Czaja A., Dickson R., Hurrell J., McCartney M., Saravanan R., Visbeck M. North Atlantic climate variability: phenomena impact and mechanisms. *International Journal of Climatology*, 2001, vol. 21, no. 15, pp. 1863–1898. <https://doi.org/10.1002/joc.693>
4. Rahmstorf S. Ocean circulation and climate during the past 120,000 years. *Nature*, 2002, vol. 419, no. 6903, pp. 207–214. <https://doi.org/10.1038/nature01090>
5. Byshev V. I., Neiman V. G., Anisimov M. V., Gusev A. V., Serykh I. V., Sidorova A. N., Figurkin A. L., Anisimov I. M. Multi-decadal oscillations of the ocean active upper-layer heat content. *Pure and Applied Geophysics*, 2017, vol. 174, no. 7, pp. 2863–2878. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1557-3>
6. Hu S., Fedorov A. V. The extreme El Niño of 2015–2016 and the end of global warming hiatus. *Geophysical Research Letters*, 2017, vol. 44, no. 8, pp. 3816–3824. <https://doi.org/10.1002/2017gl072908>
7. Loginov V. F., Lysenko S. A. Estimation of the role of the Pacific in modern climate changes. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographic series], 2019, no. 3, pp. 3–12 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S2587-5566201933-12>
8. Polonskii A. B. Atlantic multidecadal oscillation and its manifestations in the Atlantic-European region. *Physical Oceanography*, 2008, vol. 18, no. 4, pp. 227–236. <https://doi.org/10.1007/s11110-008-9020-8>
9. Ba J., Keenlyside N. S., Park W., Latif M., Hawkins E., Ding H. A mechanism for Atlantic multidecadal variability in the Kiel Climate Model. *Climate Dynamics*, 2013, vol. 41, no. 7–8, pp. 2133–2144. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1633-4>
10. Knudsen M. F., Seidenkrantz M.-S., Jacobsen B. H., Kuijpers A. Tracking the Atlantic multidecadal oscillation through the last 8,000 years. *Nature Communications*, 2011, vol. 2, no. 1. <https://doi.org/10.1038/ncomms1186>
11. Otterå O. H., Drange H., Bentsen M., Kvamstå N. G., Jiang D. Transient response of the Atlantic Meridional Overturning Circulation to enhanced freshwater input to the Nordic Seas – Arctic Ocean in the Bergen Climate Model. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2004, vol. 56, no. 4, pp. 342–361. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v56i4.14421>
12. Sarafanov A. On the effect of the North Atlantic Oscillation on temperature and salinity of the subpolar North Atlantic intermediate and deep waters. *ICES Journal of Marine Science*, 2009, vol. 66, no. 7, pp. 1448–1454. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsp094>

13. Sun C., Li J., Jin F.-F. A delayed oscillator model for the quasi-periodic multidecadal variability of the NAO. *Climate Dynamics*, 2015, vol. 45, no. 7–8, pp. 2083–2099. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2459-z>
14. Nesterov E. S. *North Atlantic Oscillation: atmosphere and ocean*. Moscow, 2013. 144 p. (in Russian).
15. Polonsky A. B., Sukhonos P. A. North Atlantic oscillation and upper layer heat balance in the North Atlantic. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and Applied Climatology*, 2019, no. 4, pp. 67–100 (in Russian).

Информация об авторах

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

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

Буяков Иван В. – мл. науч. сотрудник. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: buyakov-ivan@mail.ru.

Information about the authors

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

Loginov Vladimir F. – Academician, D. Sc. (Geography), Professor, Chief researcher. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nature@ecology.basnet.by.

Buyakov Ivan V. – Junior researcher. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: buyakov-ivan@mail.ru.