

**НАУКИ О ЗЕМЛЕ****EARTH SCIENCES**

УДК 551.582, 551.583

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-338-347>

Поступило в редакцию 26.04.2022

Received 26.04.2022

**Академик В. Ф. Логинов<sup>1</sup>, И. С. Данилович<sup>1</sup>, Л. М. Китаев<sup>2</sup>, Е. М. Акентьева<sup>3</sup>**<sup>1</sup>*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*<sup>2</sup>*Институт географии Российской академии наук, Москва, Российская Федерация*<sup>3</sup>*Главная геофизическая обсерватория имени А. И. Воейкова, Санкт-Петербург, Российская Федерация***СОВРЕМЕННЫЕ И ОЖИДАЕМЫЕ ГИДРОКЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ  
В БАССЕЙНАХ БАЛТИЙСКОГО И АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ  
В ПРЕДЕЛАХ ТЕРРИТОРИЙ БЕЛАРУСИ И РОССИИ**

**Аннотация.** В работе представлена оценка современных изменений температуры воздуха, осадков, снега и речного стока на территории бассейнов Балтийского и Арктических морей в пределах территорий Беларуси и России. Показано, что наблюдаемые положительные тренды температуры воздуха зимой связаны с распределением давления в Северной Атлантике и индексами Северо-Атлантического колебания, летом – с Атлантической мультideкадной осцилляцией. Изменения в режиме увлажнения синхронизированы с повышением давления в бароклинно-активных зонах Атлантики и ростом осадков в Европе с XX в. Междекадные колебания осадков в регионе связаны с динамикой циркумполярного вихря и индексами Арктической осцилляции (АО). Повышение осадков зимой наблюдается в отрицательную фазу АО и обусловлено увеличением повторяемости южных циклонов. Летом при отрицательной фазе АО отмечается снижение циклонической активности, рост осадков связан с конвективными процессами. На фоне роста температуры воздуха снижаются запасы воды в снеге, которые формируют весенние половодья в регионе, их высота значительно уменьшилась в последние десятилетия. В ближайшие 30 лет ожидается снижение температуры воздуха зимой в Балтийском бассейне и увеличение в Арктическом. Летом повышение температуры воздуха замедлится на нисходящей ветви Атлантической мультideкадной осцилляции в ближайшие десятилетия. В режиме увлажнения прогнозируется увеличение сезонных и суточных сумм осадков.

**Ключевые слова:** температура воздуха, осадки, речной сток, климатические проекции, Атлантическая мультideкадная осцилляция, Арктическая осцилляция, циклоны

**Для цитирования.** Современные и ожидаемые гидроклиматические изменения в бассейнах Балтийского и Арктических морей в пределах территорий Беларуси и России / В. Ф. Логинов [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 3. – С. 338–347. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-338-347>

**Academician Vladimir F. Loginov<sup>1</sup>, Irina S. Danilovich<sup>1</sup>, Lev V. Kitaev<sup>2</sup>, Elena M. Akent'eva<sup>3</sup>**<sup>1</sup>*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*<sup>2</sup>*Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*<sup>3</sup>*Main Geophysical Observatory named after A. I. Voeikova, Saint Petersburg, Russian Federation***CURRENT AND PROJECTED HYDROCLIMATIC CHANGES IN THE BALTIC  
AND ARCTIC SEA BASINS IN THE TERRITORIES OF BELARUS AND RUSSIA**

**Abstract.** The article presents an assessment of current changes in air temperature, precipitation, snow and river runoff in the Baltic and Arctic Seas basins in the territories of Belarus and Russia. It is shown that the observed positive air temperature trends during the winter season are associated with the sea level pressure distribution in the North Atlantic and NAO indices. In summer, the temperature growth is correlated strongly with the Atlantic multi-decadal oscillation. Changes in the precipitation regime are synchronized with an increase in the sea level pressure in the baroclinic active zones of the Atlantic Ocean, which led to the precipitation increase in Europe since the second half of the 20th century. Interdecadal precipitation fluctuations in the study region are associated with the dynamics of the circumpolar vortex and Arctic oscillation (AO) indices. In winter, a precipitation increase is observed in the negative AO phase and is caused by an increase in the frequency of southern cyclones. In summer, when the AO phase is negative, the cyclonic activity decreases, and the

precipitation growth is associated with convective processes in the atmosphere. Snow precipitation and snow water equivalent are decreasing during recent decades due the air temperature significant growth. That led to the spring floods height decreasing in the region. In the next 30 years, a decrease in the winter air temperature in the Baltic Sea basin and its increase in the Arctic Sea are expected. In summer, the air temperature increase will slow down on the descending AMO branch in the coming decades. In the precipitation regime, the growth of seasonal and daily total precipitation is expected.

**Keywords:** air temperature, precipitation, river runoff, climate projections, Atlantic multidecadal oscillation, Arctic oscillation, cyclones

**For citation.** Loginov V. F., Danilovich I. S., Kitaev L. V., Akent'eva E. M. Current and projected hydroclimatic changes in the Baltic and Arctic sea basins in the territories of Belarus and Russia. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 3, pp. 338–347 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-338-347>

**Введение.** Современное потепление климата, которое отмечается в глобальном масштабе, характеризуется повсеместным ростом температуры воздуха, увеличением повторяемости опасных и неблагоприятных явлений погоды, повышением уровня Мирового океана, снижением площадей ледников и разнонаправленными изменениями в режиме увлажнения. Ранее изученные региональные изменения климата показывают, что отмечается повышение температуры воздуха: в северном полушарии рост среднегодовой температуры воздуха оценивается в 0,25 °C за десятилетие [1], на Европейской территории России (ЕТР) температура воздуха повышается на 0,48–0,55 °C за десятилетие [2], на территории Беларуси потепление составляет 0,4 °C за десятилетие [3]. В режиме увлажнения более ранние исследования выявили увеличение количества осадков в северной Европе со второй половины XX в. [4] и тенденцию к их уменьшению в южной части с увеличением повторяемости засух [5].

Большинство глобальных и региональных климатических моделей указывают на возрастание в будущем средних, максимальных и минимальных значений температуры воздуха, уменьшение числа морозных дней, рост количества случаев интенсивных осадков и уменьшение числа дней с малым количеством осадков для многих регионов суши. Некоторые выводы характерны для территории Беларуси и Европейской территории России, но имеются региональные особенности в текущих и будущих климатических изменениях, которые оценены в данном исследовании.

Цель работы заключалась в оценке текущих изменений гидроклиматических характеристик и расчете их прогнозных значений для Балтийского и Арктического бассейнов в пределах территорий Беларуси и России.

**Исходные данные и методология.** В работе представлены расчеты сезонных значений, трендов и экстремумов гидроклиматических характеристик: температуры воздуха, осадков, запасов воды в снеге и речного стока. Оценка текущих изменений проводилась по данным наблюдений 35 метеорологических станций Белгидромета и Росгидромета в Балтийском и Арктическом бассейнах в пределах территорий Беларуси и России. Будущие изменения климатических характеристик (температуры воздуха и осадков) вычислялись путем интерполяции данных в узлах регулярной сетки на координатные положения метеорологических станций.

Расчеты средних многолетних значений гидроклиматических характеристик выполнены за различные периоды:

(1) 1966–2020 гг. – период для расчета трендов сезонных значений температуры воздуха, сезонных сумм осадков, запасов воды в снеге и максимальных расходов воды весеннего половодья по данным наблюдательной сети Белгидромета и Росгидромета;

(2) 1981–2020 гг. – исторический период для сравнения модельных расчетов и материалов наблюдений;

(3) 2021–2050 гг. – период для оценки будущих изменений температуры воздуха и осадков.

Для оценки будущих изменений климата в исследуемом регионе использованы результаты численного моделирования консорциума EURO-CORDEX (Coordinated Downscaling Experiment – European Domain), который является подпроектом Всемирной климатической программы ВМО [6]. Пространственное разрешение расчетов климатических моделей составляет 0,11 градуса, что соответствует расстоянию между узлами регулярной сетки ~12 км. В работе оценивались ожидаемые изменения климата при двух сценариях концентраций парниковых газов семейства RCP (Representative Concentration Pathways) – RCP45 и RCP85 [1].

В исследовании представлены расчеты на основе результатов, полученных с использованием комбинации глобальной и региональной моделей: ICHEC-EC-EARTH+RACMO22E, поскольку они имели наименьшие расхождения (из ансамбля моделей) с материалами фактических наблюдений. Расхождения температуры воздуха в основном не превышали  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , годовая погрешность составляет  $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Отклонения сезонных сумм осадков в исследуемом регионе составляли от 6 % весной до 11–13 % в остальные сезоны, годовые суммы различаются на 7 %. Под изменением климатических параметров в будущем понимается разность осредненных характеристик за период 2021–2050 гг. по отношению к 1981–2020 гг.

**Результаты и их обсуждение. Современные изменения.** Климатические изменения в бассейнах Балтийского и Арктических морей в пределах территории Беларуси и России в последние десятилетия характеризуются повышением температуры воздуха во все сезоны. Наибольшие изменения характерны для зимнего сезона, тренды сезонных значений температуры воздуха зимой за период 1966–2020 гг. увеличиваются с юга на север и составляют от  $0,5$  до  $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  за десятилетие в южной части Балтийского бассейна (территория Беларуси),  $0,7$ – $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  за десятилетие в северной части Балтийского бассейна (территория России),  $0,9$ – $1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  за десятилетие в Арктическом бассейне.

Более интенсивный рост температуры воздуха в зимний сезон на севере связан с более быстрым потеплением в Арктическом бассейне. За последние полвека среднегодовая температура повысилась в регионе на  $3,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в то время как глобальная температура увеличилась примерно на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что связано с сокращением площади морского льда в Арктике, и как следствие уменьшением отражаемой солнечной радиации, ускоряя сокращение льдов и темпы потепления.

Изменение температурного режима в исследуемом регионе и в целом в Европе в зимний сезон связано с колебаниями температуры поверхности океана и давления в Северной Атлантике, которые прослеживаются в квазишестидесятилетних колебаниях Атлантической мультideкадной осцилляции (АМО) и Северо-Атлантических колебаниях (САК) [7; 8]. Для зимнего периода корреляционная связь температурного режима на территории Беларуси и АМО за декабрь–март оценивается в  $0,67$ , с Северо-Атлантическим колебанием за декабрь–март –  $0,57$ , полученные коэффициенты корреляции являются статистически значимыми ( $p_{\text{случ}} < 5\%$ ). На рис. 1, а представлена динамика изменения индексов САК и температуры воздуха в зимний период на севере и юге Балтийского бассейна. Рост температуры воздуха в 1980–1990-е годы синхронизирован с повышенными значениями индексов САК, указывающими на усиление зонального переноса в Атлантико-Европейском секторе и более интенсивное поступление относительно теплых и влажных воздушных масс с Атлантики в глубь континента.

В летний сезон отмечается обратное распределение величин трендов сезонной температуры воздуха, которые уменьшаются с юга на север. Наибольшие величины трендов отмечаются на

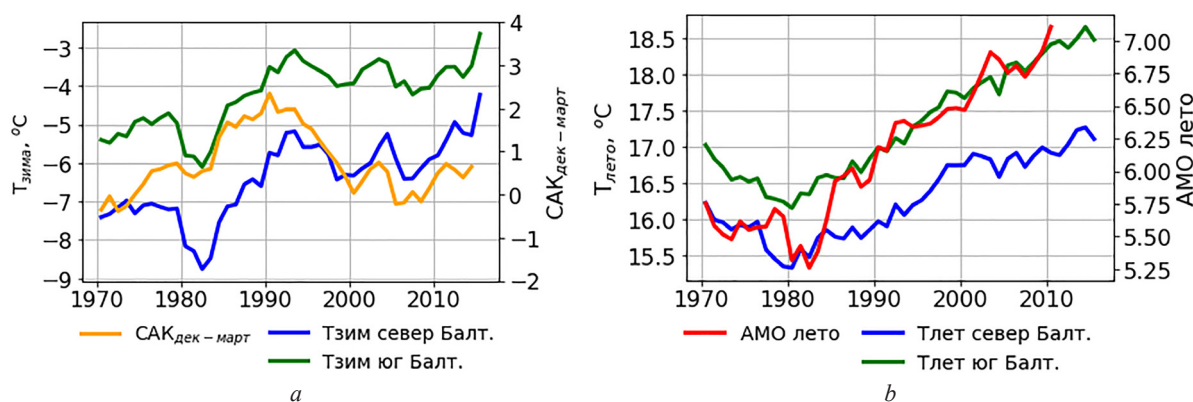


Рис. 1. Динамика средних значений температуры воздуха в зимний (а) и летний (б) сезоны, сезонных индексов САК и АМО, осредненных по скользящим 10-летним периодам за 1966–2020 гг.

Fig. 1. Dynamic of seasonal temperature means in winter (a), summer (b) and NAO, AMO seasonal indices, smoothed by 10 years periods for 1966–2020

юге исследуемого региона (территория Беларуси) и составляют 0,4–0,6 °C за десятилетие, в северной части Балтийского бассейна величина изменения составляет 0,3–0,4 °C за десятилетие, в Арктическом бассейне – 0,1–0,3 °C за десятилетие.

В [8] установлено, что изменение температуры воздуха в летний период на территории Восточной Европы (47–57° с. ш., 20–38° в. д.) связано с квазишестидесятилетними колебаниями АМО. Коэффициент корреляции между летней температурой в обозначенном регионе и АМО составляет 0,8, для летней температуры на территории Беларуси – 0,67, полученные коэффициенты корреляции являются статистически значимыми ( $p_{\text{случ}} < 5\%$ ). Рис. 1, *b* демонстрирует повышение температуры воздуха в северной и южной частях бассейна Балтики, синхронизированное с ветвью подъема квазишестидесятилетнего цикла АМО. На нисходящей ветви АМО ожидается снижение летней температуры воздуха, как это наблюдалось в 1970–1980 гг.

Изменения в режиме увлажнения в исследуемом регионе менее однородны. В зимний сезон отмечается увеличение положительных величин трендов сезонных сумм осадков с юга на север в пределах Балтийского бассейна от 3–5 мм за десятилетие на юге до 15 мм за десятилетие на севере бассейна. В Арктическом бассейне отмечаются незначимые тренды в западной части и отрицательные тренды 5–10 мм за десятилетие в более континентальной восточной части бассейна.

Изменение режима увлажнения в исследуемом регионе сопоставимо с динамикой давления в бароклинно-активной зоне Северной Атлантики (45–60° с. ш., 25–0° з. д.) и АМО, с которым коррелирует в противофазе. На фазах роста давления в бароклинно-активной зоне океана количество атмосферных осадков в северо-западной части Европы увеличивается, а в юго-восточной уменьшается [8]. Повышение барического поля в обозначенных участках в океане на фоне пониженных значений АМО объясняет положительные тренды осадков в северной Европе во второй половине XX в. Тесная корреляционная связь АМО и зимних осадков в период за декабрь–март на территории Беларуси оценивается в 0,75 и объясняет наличие долгопериодных колебаний в режиме увлажнения в рассматриваемом регионе.

Междекадные изменения в режиме осадков связаны с циклонической деятельностью. Результаты более ранних исследований [9; 10] показали увеличение частоты циклонов в северной и центральной Европе, особенно северо-атлантических циклонов в зимний сезон, что привело к увеличению количества осадков в Северной и снижению в Центральной Европе.

Проведенное исследование показало, что отмечаются статистически незначимые тренды северо-атлантических циклонов в полосе 56–60° с. ш. в период 1949–2019 гг., при этом установлено сокращение расстояния между центрами северо-атлантических циклонов и территорией Беларуси на 100–200 км.

Это связано с климатической эволюцией циркумполярного вихря, которую можно проследить через динамику Арктической осцилляции (АО). При положительной фазе АО преобладает зональный перенос в слабовыраженные волны в атмосфере. Перемещение воздушных потоков и барических образований происходит в направлении с запада на восток вдоль высотного струйного течения на границе циркумполярного вихря. В таких случаях северо-атлантические циклоны перемещаются севернее территории Беларуси и осадки связаны с прохождением фронтальных разделов. При отрицательной фазе АО и формировании более выраженных волн в атмосфере сокращается расстояние между центрами циклонов и территорией Беларуси.

Исследование показало, что при отрицательной фазе АО рост осадков на территории Беларуси зимой связан с преобладанием меридиональной циркуляции и увеличением повторяемости южных циклонов, которые приносят обильные осадки. В то же время теплый сектор северо-атлантических циклонов, смещенный ближе к территории Беларуси, оказывает отепляющее влияние и обуславливает более интенсивное повышение зимних температур с конца 1990-х годов. Вследствие этого сменилась преобладающая фаза осадков, что наиболее выражено на юге Балтийского бассейна в пределах территории Беларуси: значительно увеличилась продолжительность выпадения жидких осадков и соответственно возросли суммарные показатели осадков.

На рис. 2, *a* представлено изменение сезонных сумм осадков и значений индексов АО в зимний период. На фоне общего роста осадков в Европе во второй половине XX в., краткосрочные



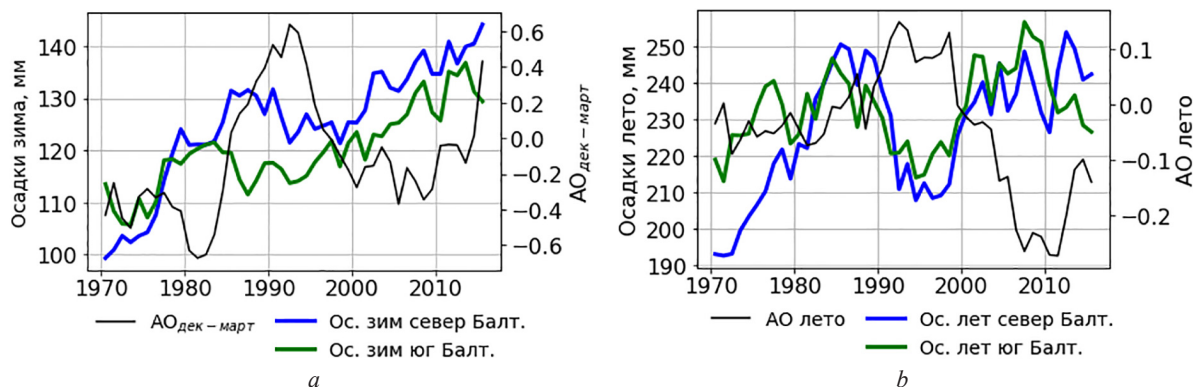


Рис. 2. Динамика сезонных сумм осадков в зимний (а) и летний (б) сезоны и сезонных индексов АО, усредненных по скользящим 10-летним периодам за 1966–2020 гг.

Fig. 2. Dynamic of seasonal precipitation totals in winter (a), summer (b) and seasonal AO indices, smoothed by 10 years periods for 1966–2020

периоды повышения осадков связаны с предшествующим понижением индексов АО. Летом (рис. 2, б) эта связь усиливается, коэффициент корреляции составляет  $-0,62$ , периоды роста/снижения осадков находятся в противофазе с АО. Полученные коэффициенты корреляции являются статистически значимыми ( $p_{\text{случ}} < 5\%$ ).

В пространственном отношении распределение трендов летних сумм осадков характеризуется постепенным увеличением с юга на север. В южной части Балтийского бассейна (на территории Беларуси) на некоторых станциях отмечены отрицательные тренды летних сумм осадков в пределах 5 мм за десятилетие, что можно объяснить снижением циклонической активности летом, уменьшением повторяемости циклонов и усилением засушливости климата во время отрицательной фазы АО и роста повторяемости меридиональных типов циркуляции. Общее повышение летних осадков на территории Беларуси связано с ростом суточных максимумов осадков, обусловленных конвективными процессами в атмосфере [3]. В северной части Балтийского бассейна (включая север Беларуси и Ленинградскую область РФ) положительные тренды летних осадков на большинстве станций составляют 5–10 мм за десятилетие и связаны с осадками малой интенсивности при прохождении северо-атлантических циклонов. В Арктическом бассейне положительные тренды летних осадков достигают 10–25 мм, с наибольшими значениями в восточной части бассейна.

Изменение твердых осадков характеризуется отрицательными трендами в южной части исследуемого региона и их повышением к северу, что также объясняется приближением теплого сектора северо-атлантических циклонов. Максимальные запасы воды в снеге, которые характеризуют условия формирования и залегания снежного покрова, в южной части Балтийского бассейна отмечаются отрицательными трендами в пределах 4–6 мм за десятилетие, что свидетельствует о заметном снижении снегонакопления. В северной части Балтийского бассейна и западной части Арктического отмечается отсутствие или слабые положительные тренды максимальных запасов воды в снеге (до 2–4 мм за десятилетие). На станциях, расположенных на берегах Финского залива и Онежского озера, получены наибольшие отрицательные тренды максимальных запасов воды в снеге, которые составляют 10–12 мм за каждое десятилетие и связаны с отепляющим влиянием водных объектов.

Изменения климатических параметров отразились на формировании стока весеннего половодья, которое происходит под влиянием естественных и антропогенных факторов. В южной части Балтийского бассейна (на территории Беларуси), как показано в [11], антропогенное воздействие (масштабная мелиорация в основном в 1960-е годы) в первую очередь повлияло на водосборы малых рек, в то время как режим крупных рек более стабилен и зависит, в первую очередь, от изменения климата. В северной части Балтийского и Арктического бассейнов антропогенное влияние выражается в высокой степени зарегулированности рек гидротехническими сооружениями.

Исследования режима рек в связи с климатом на территории Беларуси не выявили значимых трендов годового речного стока [11–14]. Между тем, внутригодовое распределение стока за последние десятилетия существенно изменилось. В частности, значительно увеличился сток в периоды зимней межени. Это увеличение связано с ростом повторяемости оттепелей вследствие вышеописанных процессов в атмосфере, что привело к частым зимним паводкам, приходящимся на период зимней межени, в то время как весенний сток и высота половодий уменьшались из-за истощения запасов воды в снеге перед началом весеннего снеготаяния.

Согласно работе [15] наибольшее количество катастрофических и выдающихся наводнений в результате прохождения весенних половодий было зарегистрировано в 1950–1970-х годах (1951, 1953, 1956, 1958, 1962–1968, 1970, 1979) и было связано с преобладанием меридионального типа атмосферной циркуляции в 1940–1960-х годов, частыми заточками Арктического воздуха, устойчивыми отрицательными температурами в зимний период и значительными снеготаяниями перед началом половодий. В последние десятилетия на реках Беларуси отмечаются небольшие по высоте половодья (1994, 1996, 1999, 2004 и 2010, 2013 гг.).

В настоящем исследовании установлено продолжающееся снижение максимальных расходов воды в период весеннего половодья. В южной части Балтийского бассейна зафиксированы наибольшие изменения. Отрицательные тренды модулей максимального стока рек колеблются от 5–6 л/с км<sup>2</sup> за десятилетие в бассейнах малых рек в связи с их большей чувствительностью к климатическим аномалиям, таким как экстремальные осадки или засухи, на остальных реках снижение максимального стока составляет до 1–3 л/с км<sup>2</sup> за десятилетие. В северной части Балтийского бассейна отрицательные тренды варьируют в пределах 1–2 л/с км<sup>2</sup> за десятилетие. В Арктическом бассейне тренды модулей стока весеннего половодья характеризуются положительными значениями, которые не превышают 1 л/с км<sup>2</sup> за десятилетие.

*Сценарии будущих изменений климата.* Практический интерес представляют расчеты изменения климата на близкую перспективу (2021–2050 гг.). Согласно проведенным расчетам в ближайшие 30 лет ожидается небольшое снижение сезонной температуры воздуха зимой в восточной части Балтийского и западной части Арктического бассейнов. На рис. 3 представлены величины трендов сезонной температуры воздуха в период 2021–2050 гг. при реализации сценария концентрации парниковых газов RCP45.

При реализации сценария RCP45 зимой на юге Балтийского бассейна (территория Беларуси) снижение предположительно составит –0,6 °C за десятилетие, на севере Балтийского бассейна

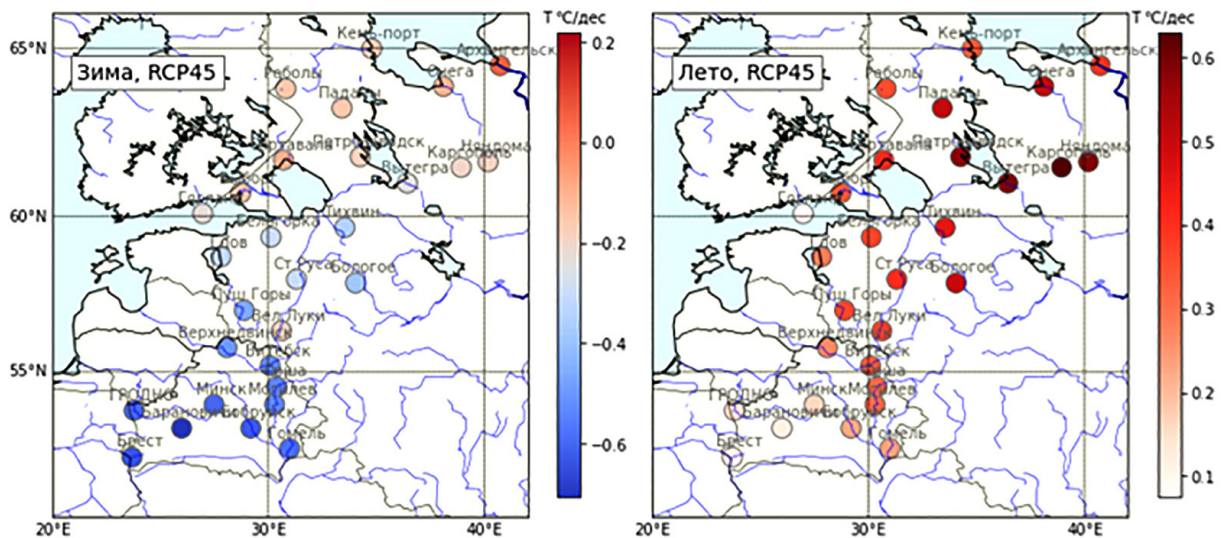


Рис. 3. Тренды сезонной температуры воздуха (2021–2050 гг.) согласно расчетам модели RACMO22E.ICHEC-EC-EARTH по сценарию RCP45

Fig. 3. Seasonal temperature trends (2021–2050) according to the model RACMO22E.ICHEC-EC-EARTH under RCP45 scenario

(Ленинградская область РФ)  $-0,4$  °C за десятилетие, в западной части Арктического бассейна (территория РФ) ожидается увеличение сезонной температуры воздуха на  $0,2$  °C за десятилетие. При реализации сценария RCP85 снижение температуры воздуха зимой ожидается на большей части рассматриваемой территории на  $0,05-0,1$  °C за десятилетие, за исключением юго-запада Беларуси и крайнего севера Арктики, где ожидается повышение на  $0,1-0,15$  °C за десятилетие.

Согласно сценарию RCP45 увеличение сезонной температуры воздуха летом предположительно составит от  $0,1$  °C за десятилетие на юге рассматриваемой территории до  $0,6$  °C за десятилетие на севере. В случае реализации сценария концентрации парниковых газов RCP85 рост сезонной температуры воздуха ожидается весной на  $0,2-0,35$  °C за десятилетие.

Изменения температуры воздуха возрастают с юга на север. Градиент изменения температур воздуха в зимний сезон при обоих сценариях концентрации парниковых газов составляет  $0,3$  °C на  $1400$  км. Летом изменения сезонной температуры воздуха ожидаются в пределах  $0,1$  °C при сценарии RCP45 и без значимых пространственных изменений при сценарии RCP85.

Изменения в режиме осадков характеризуются разнонаправленными тенденциями. В случае реализации сценария концентрации парниковых газов RCP45 прогнозируется увеличение сезонных сумм осадков в зимний сезон на  $10-20$  мм за десятилетие (рис. 4) на большей части исследуемой территории. Летом ожидается преимущественно рост сезонных сумм осадков на  $5-15$  мм за десятилетие. Но следует ожидать значимое снижение летних осадков в Арктическом бассейне до  $15-20$  мм за десятилетие.

Согласно расчетам по сценарию RCP85 ожидается повышение сезонных сумм осадков зимой до  $4-5$  мм за десятилетие (за исключением крайнего севера в бассейне Арктики со снижением до  $10$  мм за десятилетие), летом увеличение осадков в рассматриваемом регионе предположительно составит от  $5$  до  $15$  мм за десятилетие.

Пространственные изменения сезонных сумм осадков зимой характеризуются незначительным повышением с юга на север в зимний сезон, которые предположительно составят  $3$  мм на  $1400$  км. Летом пространственные изменения более выражены: при сценарии RCP45 ожидается нарастание засушливости с юга на север, снижение летних сумм осадков может составить  $10-15$  мм на  $1400$  км, при сценарии RCP85 ожидается обратное распределение, которое характеризуется ростом сезонных сумм осадков с юга на север в пределах  $20$  мм на  $1400$  км.

В южной части Балтийского бассейна прогнозируется увеличение суточных максимумов осадков на  $1,5-3$  мм в весенний сезон, в остальные сезоны значимых изменений не прогнозируется, несмотря на значимый рост суточных максимумов осадков летом на территории Беларуси

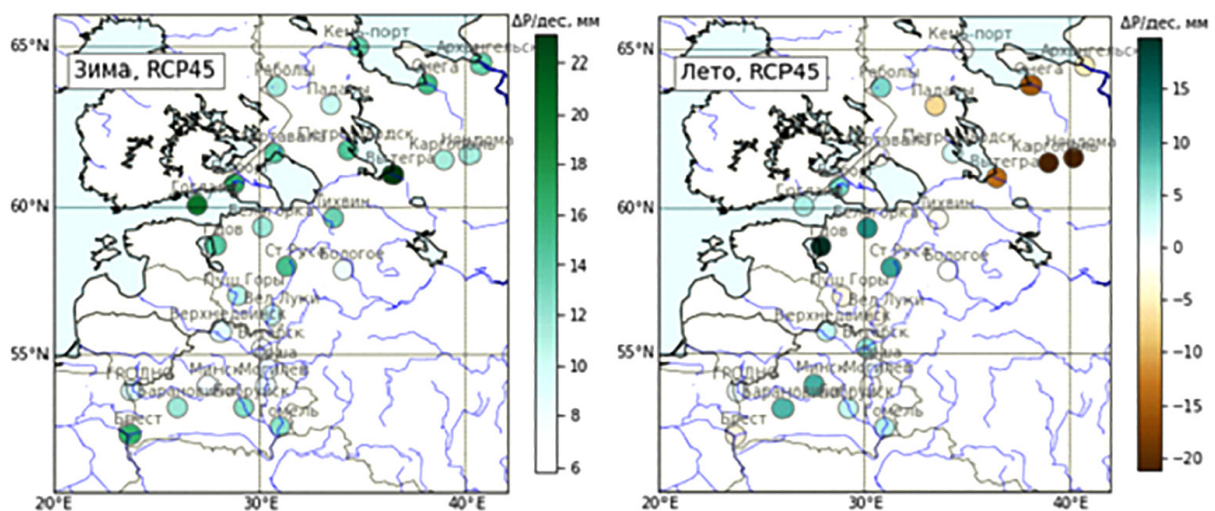


Рис. 4. Тренды сезонных сумм осадков (2021–2050 гг.) согласно расчетам модели RACMO22E.ICHEC-EC-EARTH по сценарию RCP45

Fig. 4. Seasonal precipitation trends (2021–2050) according to the model RACMO22E.ICHEC-EC-EARTH under RCP45 scenario



в период потепления. В северной части Балтийского бассейна ожидается увеличение максимумов осадков весной до 1,5 мм при сценарии RCP85. В бассейне Арктических морей зимой и весной ожидается увеличение до 1 мм, в летний сезон возможен рост на 1,5 мм при сценарии RCP85.

**Заключение.** Современные климатические изменения в бассейнах Балтийского и Арктических морей в пределах территории Беларуси и России характеризуются повышением температуры воздуха во все сезоны, но наибольшие изменения характерны для зимнего сезона с повышением в 2 раза с юга на север (от 0,6 °C на юге до 1,1 °C на севере). Более значимое повышение температуры воздуха на севере исследуемого региона зимой связано с более интенсивным потеплением Арктики вследствие сокращения площади морского льда более интенсивным прогревом. Изменения температурного режима в Балтийском бассейне зимой связаны с распределением давления в Северной Атлантике, которое хорошо описывается индексами Северо-Атлантического колебания и указывает на преобладание зонального типа циркуляции и более интенсивное поступление теплых и влажных воздушных масс с Атлантики.

Изменение температуры воздуха летом в рассматриваемом регионе тесно связано с динамикой температуры воды в океане, которую отражает Атлантическая мультideкадная осцилляция. Повышение температуры воздуха в Балтийском бассейне синхронизировано с ветвью подъема квазишестидесятилетнего цикла АМО с 1980-х годов. Величины трендов сезонной температуры воздуха летом составляют от 0,1 °C на севере до 0,5 °C за десятилетие в южной части Балтийского бассейна.

Изменения в режиме увлажнения обусловлены ростом давления в бароклинно-активной зоне Атлантического океана, с которым связан рост осадков в Европе со второй половины XX в. Долгопериодные тенденции роста осадков в Балтийском бассейне осложнены наложением междекадных изменений, которые связаны с динамикой циркумполярного вихря, колебанием индексов Арктической осцилляции и смещением траекторий циклонов. С начала 2000-х годов отмечается отрицательная фаза АО и преобладание меридионального типа циркуляции. Зимой повышение осадков связано с увеличением повторяемости влагонасыщенных южных циклонов и смещением на юг северо-атлантических циклонов. Летом повышение летних сумм осадков на юге Балтийского бассейна объясняется ростом конвективных осадков, на севере – прохождением северо-атлантических циклонов. Изменение твердых осадков характеризуется более значимым снижением снегонакопления в южной части исследуемого региона в связи с повышением температуры воздуха и их ростом к северу.

Годовой сток рек Балтийского бассейна изменился незначительно и увеличился в Арктическом бассейне. Максимальный сток весеннего половодья увеличился в Арктическом бассейне и снизился в Балтийском, особенно в его южной части.

Согласно расчетам климатической модели в ближайшие 30 лет ожидается снижение температуры воздуха зимой в Балтийском бассейне на  $-0,1...-0,6$  °C за десятилетие и увеличение в Арктическом до 0,2 °C за десятилетие. Летом ожидаются положительные тренды температуры воздуха на 0,2–0,6 °C, хотя наступление нисходящей фазы АМО может привести к снижению скорости роста температуры.

В режиме осадков при сценарии RCP45 прогнозируется увеличение сезонных сумм осадков на 10–20 мм за десятилетие зимой, на 5–15 мм за десятилетие летом. При сценарии RCP85 рост осадков зимой ожидается до 4–5 мм за десятилетие, летом от 5 до 15 мм за десятилетие. В Балтийском бассейне прогнозируется увеличение суточных максимумов осадков на 1,5–3 мм, а в Арктическом бассейне – на 1 мм.

**Благодарности.** Работа с белорусской стороны выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант X20P-353) и с российской стороны – Российского научного фонда (грант 20-55-00007, тема 0148-2019-0009).

**Acknowledgements.** The study of the Belarusian researches was supported by the Belarusian Foundation for Fundamental Research (grant X20P-353) and the study of the Russian researches was supported by the Russian Science Foundation (grant 20-55-00007, topic 0148-2019-0009).



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Pachauri, R. K. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: Synthesis Report / IPCC, Core Writing Team; R. K. Pachauri, L. A. Meyer. – Geneva, 2014. – 151 p.
2. Крышнякова, В. С. Особенности потепления климата на Европейской территории России в современных условиях / В. С. Крышнякова, В. Н. Малинин // Общество. Среда. Развитие: Природная среда. – 2007. – Вып. 2. – С. 115–124.
3. Данилович, И. С. Текущие и ожидаемые изменения климата на территории Беларуси / И. С. Данилович, В. Ф. Логинов // Центральноазиатский журн. географ. исслед. – 2021. – Вып. 1–2. – С. 35–48.
4. Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin / BACC Author Team. – Springer, 2015. – 504 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16006-1>
5. Long-term changes in drought indices in eastern and central Europe / J. Jaagus [et al.] // Intern. J. Climatology. – 2021. – Vol. 42, N 1. – P. 225–249. <https://doi.org/10.1002/joc.7241>
6. EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research / D. Jacob [et al.] // Regional Environmental Change. – 2014. – Vol. 14, N 2. – P. 563–578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
7. Логинов, В. Ф. Современные изменения глобального и регионального климата / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко. – Минск: Беларуская навука, 2019. – 315 с.
8. Логинов, В. Ф. Диагноз глобального климата / В. Ф. Логинов. – СПб., 2021. – 304 с.
9. Sepp, M. Long-term changes in the frequency of cyclones and their trajectories in Central and Northern Europe / M. Sepp, P. Post, J. Jaagus // Hydrology Research. – 2005. – Vol. 36, N 4–5. – P. 297–309. <https://doi.org/10.2166/nh.2005.0023>
10. Winter cyclone frequency and following freshet streamflow formation on the rivers in Belarus / I. Partasenok [et al.] // Environ. Res. Lett. – 2014. – Vol. 9, N 9. – Art. 095005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/9/095005>
11. Логинов, В. Ф. Водный баланс речных водосборов / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек. – Минск, 2006. – 160 с.
12. Гидрологический мониторинг Республики Беларусь / под ред. А. И. Полищука, Г. С. Чекана. – Минск, 2009. – 275 с.
13. Волчек, А. А. Водные ресурсы Беларуси и их прогноз с учетом изменения климата / А. А. Волчек, В. Н. Корнеев. – Брест, 2017. – 240 с.
14. Особенности формирования водности рек Беларуси в последние десятилетия / И. С. Данилович [и др.] // Природные ресурсы. – 2017. – № 2. – С. 5–12.
15. Стихийные гидрометеорологические явления на территории Беларуси: справочник / под ред. М. А. Гольберга. – Минск, 2002. – 132 с.

## References

1. Pachauri R. K., Meyer L. A. *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: Synthesis Report* / IPCC, Core Writing Team. Geneva, 2014. 151 p.
2. Kryshnyakova V. S., Malinin V. N. Features of climate warming in the European territory of Russia in modern conditions *Obshchestvo. Sreda. Razvitie: Prirodnaya sreda* [Society. Environment. Development: Natural environment], 2007, no. 2, pp. 115–124 (in Russian).
3. Danilovich I. S., Loginov V. F. Current and expected climate change in Belarus. *Tsentral'noaziatskii zhurnal geograficheskikh issledovaniy* [Central Asian Journal of Geographical Research], 2021, no. 1–2, pp. 35–48 (in Russian).
4. *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin* / BACC Author Team. Springer, 2015. 504 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16006-1>
5. Jaagus J., Aasa A., Aniskevich S., Boincean B., Bojariu R., Briede A., Danilovich I., Castro F. D., Dumitrescu A., Labuda M., Labudová L., Löhmus K., Melnik V., Mõisja K., Pongracz R., Potopová V., Řezníčková L., Rimkus E., Semenova I., Stonevičius E., Štěpánek P., Trnka M., Vicente-Serrano S. M., Wibig J., Zahradníček P. Long-term changes in drought indices in Eastern and Central Europe. *International Journal of Climatology*, 2022, vol. 42, no. 1, pp. 225–249. <https://doi.org/10.1002/joc.7241>
6. Jacob D., Petersen J., Eggert B., Alias A., Christensen O. B., Bouwer L. M., Braun A., Colette A., Déqué M., Georgievski G., Georgopoulou E., Gobiet A., Menut L., Nikulin G., Haensler A., Hempelmann N., Jones C., Keuler K., Kovats S., Kröner N., Kotlarski S., Kriegsmann A., Martin E., van Meijgaard E., Moseley C., Pfeifer S., Preuschmann S., Radermacher C., Radtke K., Rechid D., Rounsevell M., Samuelsson P., Somot S., Soussana J.-F., Teichmann C., Valentini R., Vautard R., Weber B., Yiou P. EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 2014, vol. 14, no. 2, pp. 563–578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
7. Loginov V. F., Lysenko S. A. *Modern changes in the global and regional climate*. Minsk, 2019. 315 p. (in Russian).
8. Loginov V. F. *Global climate diagnosis*. Saint Petersburg, 2021. 304 p. (in Russian).
9. Sepp M., Post P., Jaagus J. Long-term changes in the frequency of cyclones and their trajectories in Central and Northern Europe. *Hydrology Research*, 2005, vol. 36, no. 4–5, pp. 297–309. <https://doi.org/10.2166/nh.2005.0023>
10. Partasenok I., Groisman R., Chekan G., Melnik V. Winter cyclone frequency and following freshet streamflow formation on the rivers in Belarus. *Environmental Research Letters*, 2014, vol. 9, no. 9, art. 095005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/9/095005>
11. Loginov V. F., Volchek A. A. *Water balance of river catchments*. Minsk, 2006. 160 p. (in Russian).
12. Polishchuk A. I., Chekan G. S., eds. *Hydrological monitoring of the Republic of Belarus*. Minsk, 2009. 275 p. (in Russian).

13. Volchek A. A., Korneev V. N. *Water resources of Belarus and their forecast taking into account climate change*. Brest, 2017. 240 p. (in Russian).

14. Danilovich I. S., Zhuravovich L. N., Nagibina M. E., Kvach E. G. Features of the formation of the water content of the rivers of Belarus in recent decades. *Prirodnye resursy* [Natural resources], 2017, no. 2, pp. 5–12 (in Russian).

15. Golberg M. A., ed. *Natural hydrometeorological phenomena on the territory of Belarus: a reference book*. Minsk, 2002. 132 p. (in Russian).

### Информация об авторах

*Логонов Владимир Федорович* – академик, д-р географ. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, Минск, Республика Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by. ORCID: 0000-0002-0939-4160.

*Данилович Ирина Сергеевна* – канд. географ. наук, доцент, вед. науч. сотрудник. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, Минск, Республика Беларусь). E-mail: irina-danilovich@yandex.ru. ORCID: 0000-0002-6792-7279.

*Китаев Лев Михайлович* – канд. географ. наук, ст. науч. сотрудник. Институт географии РАН (Старомонетный пер., 29, 119017, Москва, Российская Федерация). E-mail: lkitaev@mail.ru. ORCID: 0000-0020-0618-9209.

*Акентьева Елена Марковна* – канд. географ. наук, вед. науч. сотрудник. Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова (ул. Карбышева, 7, 194021, Санкт-Петербург, Российская Федерация). E-mail: eakentyeva@mail.ru. ORCID: 0000-0002-3395-4754.

### Information about the authors

*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., 220076, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: info@nature-nas.by. ORCID: 0000-0002-0939-4160.

*Danilovich Irina S.* – Ph. D. (Geography), Associate Professor, Leading Researcher. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220076, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: irina-danilovich@yandex.ru. ORCID: 0000-0002-6792-7279.

*Kitaev Lev M.* – Ph. D. (Geography), Senior Researcher. Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences (29, Staromonetny bystr., 119017, Moscow, Russian Federation). E-mail: lkitaev@mail.ru. ORCID: 0000-0020-0618-9209.

*Akent'eva Elena M.* – Ph. D. (Geography), Leading Researcher. Voeikov Main Geophysical Observatory (7, Karbyshev Str., 194021, Saint Petersburg, Russian Federation). E-mail: eakentyeva@mail.ru. ORCID: 0000-0002-3395-4754.