

СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В АТЛАНТИКО-ЕВРОПЕЙСКОМ СЕКТОРЕ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА КЛИМАТ БЕЛАРУСИ

И.С. Данилович¹⁾, В.Ф. Логинов¹⁾

*¹⁾Институт природопользования НАН Беларуси,
г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: irina-danilovich@yandex.ru*

Проведено исследование повторяемости циклонов, формирующихся в Атлантико-Европейском секторе, и определяющих гидрометеорологические условия на территории Беларуси. Представлены расчеты осадков, выпадающие при разных типах циклонов для территории Европы и Беларуси. Установлено увеличение количества Северо-Атлантических и Средиземноморских циклонов в холодный период года, и снижение в теплый период. Показан рост числа дней с антициклональным характером погоды летом. Трансформация атмосферной циркуляции в Атлантико-Европейском секторе способствует росту осадков зимой и усилению засушливости на территории Беларуси в теплый период года в последние десятилетия.

Ключевые слова. Атмосферная циркуляция, циклоны, антициклоны, траектории, Атлантико-Европейский сектор, климат, осадки.

CURRENT CHANGES IN ATMOSPHERIC CIRCULATION OVER EUROPEAN-ATLANTIC SECTOR AND ITS IMPACT ON CLIMATE IN BELARUS

I.S. Danilovich¹⁾, V.F. Loginov¹⁾

*¹⁾Institute of Nature Management NAS of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus, e-mail: irina-danilovich@yandex.ru*

An article presents the cyclone`s frequency analysis, that originated over the Atlantic-European sector and determine the hydrometeorological conditions of the territory of Belarus. Calculations of cyclonic precipitation for different types of cyclones over the territory of Europe and Belarus are presented. It was established an increase in North Atlantic and Mediterranean cyclone`s number in the cold period, and a decrease in the warm period. A growth of anticyclonic days in summer is shown. The transformation of atmospheric circulation in the Atlantic-European sector correlates with precipitation increase in winter and dryness strengthening in warm season during last decades in Belarus.

Keywords. Atmospheric circulation, cyclones, anticyclones, trajectories, Atlantic-European sector, climate, precipitation.

Введение. Современные исследования указывают на то, что глобальное потепление сопровождается нарастанием экстремальности климата,

которое выражается в изменении количества осадков и усилении засушливых условий в большинстве регионов Земли. Происходящие изменения характерны и для Европейского региона, где отмечается тенденция увеличения осадков, в том числе интенсивных, в северной части Европы, при их снижении на юге, сопровождающееся одновременным ростом повторяемости и продолжительности засух. В последние годы эти тенденции распространяются на центральную и восточную части Европы, для которых долгое время были характерны незначимые тренды годовых сумм осадков.

Территория Беларуси, отражающая региональные особенности изменения климата в Восточной Европе, характеризуется преобладанием устойчивых трендов повышения температуры воздуха более, чем на 1 °С за последние 30-50 лет, и отсутствием значимых тенденций в изменении годовых сумм осадков. Однако в холодный период года на территории страны отмечается рост осадков на 3-5 мм за десятилетие, что соответствует общему увеличению количества осадков в Северной Европе. В летний сезон установлены разнонаправленные изменения показателей засушливости между северной и остальной частью Восточной Европы. В странах Балтии отмечено уменьшение засух, а для центральных и южных районов Восточной Европы установлено увеличение засушливости [1]. На фоне вышеотмеченных изменений, на территории Беларуси происходит интенсификация выпадения осадков, существенно возросли суточные максимумы осадков летом на 20-30%, особенно на юге страны. Но в тоже время происходит уменьшение продолжительности их выпадения на 15-20 % на большей части страны, что указывает на более частое формирование засушливых условий или атмосферных засух.

Результаты. Происходящие изменения в режиме увлажнения Европейского континента, и, в частности территории Беларуси, обусловлены аномалиями атмосферного давления и динамикой барических систем в Атлантико-Европейском секторе в последние десятилетия.

Аномалии давления. Одним из факторов изменения увлажненности в Европе выступают аномалии давления на уровне моря в бароклинно-активных районах Северной Атлантики, расположенные в 40-60° с.ш., 45-0° з.д. Сингулярный анализ рядов давления показал наличие квазициклической компоненты в 60 лет. Чередование периодов в ~30 лет роста и понижения давления обуславливает изменение климатических характеристик в Европе. В период 1940(50)-1980 гг. преобладала тенденция антициклональной завихренности воздуха в умеренных широтах Северной Атлантики, что коррелирует с убыванием летних сумм осадков в районе Северной Европы, а на остальной части Европы осадки возрастали. С конца 1970-х гг. завихренность воздуха стала приобретать циклональный характер, осадки

увеличились в северной части Европы и уменьшились в большинстве центральных и южных районах [2].

Количественные показатели циклонов. Наибольшее количество циклонов в рассматриваемом регионе формируется в Северной Атлантике. Среди Северо-Атлантических циклонов наибольшая повторяемость приходится на циклоны, с основным треком перемещения, проходящим через Северную Европу. Их повторяемость слабо варьирует от 16-17 циклонов зимой, весной и осенью до 18 циклонов за летний сезон, с преобладанием регенерированных на фронтах циклонов – 2/3 от их общего числа. Повторяемость Северо-Атлантических циклонов с основными траекториями в широтной полосе 50-55° с.ш. (центральная часть Европы) в среднем составляет 6-7 событий за сезон с наибольшей повторяемостью в зимний период. Повторяемость циклонов, которые формируются в районах Средиземного и Черного морей, колеблется в среднем от 7-9 циклонов осенью-зимой до 10-11 циклонов в весенне-летний сезон. Количество ныряющих циклонов (разновидности Северо-Атлантических) составляет около 1-2 события за сезон.

Повторяемость циклонов, оказывающий влияние на гидрометеорологические условия территории Беларуси меньше: только 8-9 Северо-Атлантических циклонов проходящих севернее границ Беларуси в осенне-зимний сезон и по 5-6 – в летний и осенний сезоны. Повторяемость Северо-Атлантических циклонов, перемещающихся через центральную часть Европы, составляет около 6 циклонов за сезон, среди которых число основных циклонов (с местом зарождения у восточного побережья Северной Америки) составляет 1-2 циклона за сезон, остальные циклоны формируются на фронтах основного циклона.

Повторяемость южных циклонов, определяющих погоду в Беларуси, составляет 4-5 событий за сезон. Среди южных циклонов более высокая повторяемость характерна для Средиземноморских циклонов и оценивается в 3-4 циклона за сезон, повторяемость Черноморских циклонов колеблется в пределах 1-2 циклонов за сезон. Наиболее редкие ныряющие циклоны в среднем отмечаются 1 раз в сезон и реже.

Среднегодовое число дней с влиянием на гидрометеорологические условия страны всех типов циклонов составляет 190-200 дней [3]. Наибольшее количество дней в году погоду обуславливают Северо-Атлантические циклоны, их суммарная продолжительность колеблется в пределах 135-140 дней. Южные циклоны формируют погодные условия страны в течение 45-50 дней и ныряющие 10-15 дней в году [4].

Показатели осадков, связанных с циклонами. Суточное количество осадков в Атлантико-Европейском секторе в 50% случаев составляет 2-7 мм в сутки и варьируют в зависимости от сезона и типа циклона. Северо-

Атлантические циклоны с основным треком в центральной части Европы, приносят 4-6 мм осадков в сутки. Наибольшие суммы осадков связаны с южными циклонами и достигают 5-7 мм в сутки. Эти циклоны формируются в более теплых и влажных воздушных массах Средиземноморья и Черного морей и переносят большие объемы влаги. Суточные суммы осадков южных циклонов самые высокие среди всех типов в весенне-летний период и составляют около 6-7 мм в сутки, в трети случаев осадки достигают 10-11 мм в сутки. Наименьшие суммы обусловлены ныряющими циклонами – 1-3 мм в сутки.

Абсолютные максимумы осадков за время жизни циклона наблюдаются в летний сезон и могут достигать 50-80 мм у южных циклонов. Летние максимумы Северо-Атлантических циклонов достигают 37-50 мм [5]. Аналогичная распределение экстремумов осадков в зависимости от типа циклона представлено в работе [6], наибольшие суммы осадков летом в Чехии и Восточной Австрии в 45% случаев приносят южные циклоны (типа Vb по классификации Ван Бебера), а в Западной Германии наибольшее количество осадков связано с прохождением Северо-Атлантических циклонов зимой.

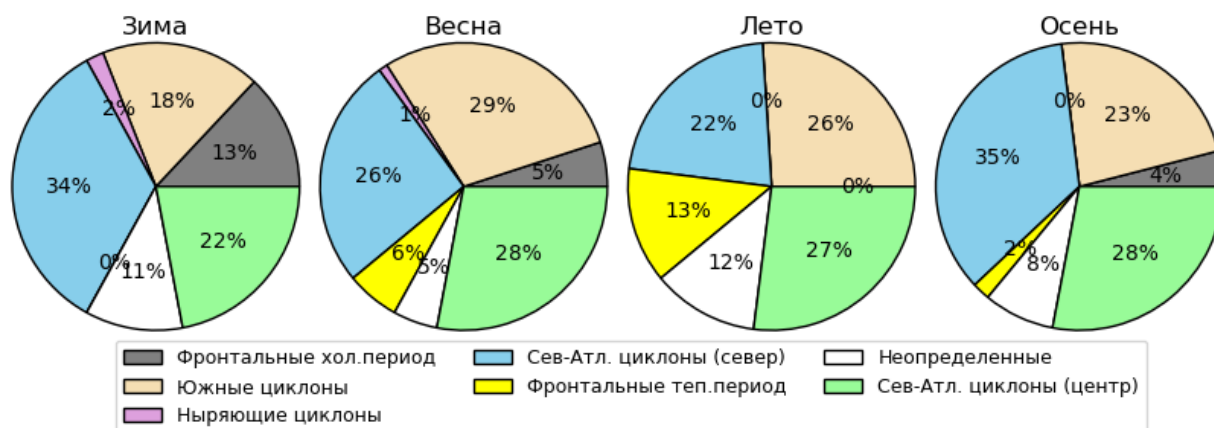
Исследования циклонических осадков на территории Беларуси на ранних этапах [7] показали, что Северо-Атлантические циклоны в целом дают немного осадков, их доля не превышает 11–17 % от годового количества. Однако, согласно выполненным нами расчетам, представленным на рисунке, Северо-Атлантические циклоны обуславливают около 55 % годового количества (рисунок). Циклоны, которые перемещаются зонально в полосе, ограниченной 50–56° с.ш. (севернее границ Беларуси) обеспечивают выпадение 25 % годового количества осадков. Северо-Атлантические циклоны с доминирующими траекториями в широтной зоне 56–60° с.ш. приносят 30 % осадков от годовой суммы.

Предшествующие исследования режима выпадения осадков при прохождении южных циклонов показывают, что на долю южных циклонов приходится 20–25 % всех выпадающих осадков за год [8]. Этот результат сопоставим с выполненными нами расчетами, которые подтверждают, что с выходом южных циклонов связано 24 % годовых сумм осадков, из них 18–23 % осенью и зимой, до 26–29 % весной и летом.

В связи с редкой повторяемостью ныряющих циклонов количественные показатели осадков ранее не оценивались, но расчеты показали, что их количество в годовом разрезе не превышает 1 %.

Ранее выполненные исследования не содержат выводов о величинах осадков, формирующихся на фронтальных разделах циклонов. Согласно проведенным нами расчетам, доля фронтальных осадков в зимний сезон

составляет 13 % от годового количества, весной – 11 %, летом – 13%, осенью – 6 %. На долю конвективных осадков приходится 6–12 % от годового количества осадков, выпадающих в основном в мае–августе [4].



Распределение выпадающих осадков на территории Беларуси в зависимости от типа барического образования, определяющего гидрометеорологические условия страны

Тренды числа циклонов и антициклонов. Современные оценки тенденций изменения повторяемости циклонов во внетропических широтах Северного полушария в период 1980–2010 гг. показывают большой разброс и сильные сезонные различия в количестве циклонов в зависимости от используемого реанализа метеорологических полей и периода обобщения. Большинство исследований указывает на слабую тенденцию увеличения количества циклонов зимой и летом в Северном полушарии [9]. В ряде работ показано увеличение повторяемости циклонов над Северной Европой, что приводит к увеличению количества осадков на севере и их снижению в Центральной Европе.

Экстремальные циклоны случаются чаще во время сильных положительных фаз Северо-Атлантического колебания (САК) и реже при отрицательных значениях САК [10]. В целом, в период 1960–2010 гг. общее количество таких циклонов уменьшилось на 10% над Северной Атлантикой, исключение составляют районы у Британских островов.

С середины 1960-х годов наблюдалась положительная фаза САК и тенденция к более зональной циркуляции с мягкими и влажными зимами и повышенной повторяемостью штормов в Центральной и Северной Европе. Однако с середины 1990-х годов наметилась тенденция к отрицательным значениям индексов САК, т.е. усилению роли меридиональных процессов в атмосфере и более холодным зимам, которые обусловлены воздушными массами восточного или северного направления. В целом, для территории Европы установлены отрицательные тренды Северо-Атлантических циклонов.

лонов (проходящих через Северную Европу) осенью и зимой на 3-6 события за сезон. Эти изменения статистически значимы при $P_{\text{случ}} < 5\%$. Положительные тренды в пределах 2-4 циклонов за последние 40 лет получены для весеннего периода [5].

Согласно расчетам для территории Беларуси, общие тенденции заключаются в увеличении на 20% числа дней зимой и весной, когда отмечается влияние Северо-Атлантических циклонов, перемещающихся преимущественно через центральную часть Европейского континента. При этом снижается влияние циклонов, проходящих севернее границ Беларуси. Это объясняется сменой преобладающей фазы Северо-Атлантического колебания во второй половине 1990-х гг. на отрицательную и усиление меридиональной циркуляции, а также изменения положения струйного течения, вдоль которого происходит перемещение циклонов. Кроме того, установлено сокращение расстояния между центрами Северо-Атлантических циклонов и территорией Беларуси на 90-150 км в зимний сезон (декабрь-март). Вследствие этого теплый сектор циклонов, сместился ближе к территории страны и оказывает обогревающее влияние, что обуславливает более интенсивное повышение температур в зимний сезон, особенно в период 1990-2000-х гг. Результатом этого смещения стал рост осадков в северной части Беларуси. Значительно увеличилась продолжительность выпадения жидких осадков и соответственно возросли их суммарные показатели.

Анализ циклонов, сформированных в районе Средиземного моря, представленный в ряде работ показал уменьшение их количества. Близкие выводы получены нами по данным современного реанализа ERA5: осенью и зимой отмечается увеличение числа южных циклонов с 2000-х гг., положительные тренды за период 1980-2020 гг. составляют 2-3 события за сезон, но этот результат статистически незначим при $P_{\text{случ}} < 5\%$. Положительные тренды числа дней с влиянием южных циклонов на погоду Беларуси зимой и весной в пределах 1-2 дня. Однако несмотря на незначительность трендов, их повторяемость, как и число южных циклонов, увеличилось вдвое в последние 20 лет по сравнению с аналогичным предшествующим периодом.

В летний период отмечается преимущественно обратная тенденция, которая выражается в снижении повторяемости циклонов всех типов. Установлены статистически значимые отрицательные тренды Северо-Атлантических циклонов (следующих через Центральную Европу) на 3-4 события за сезон в последние 40 лет, а Средиземноморских циклонов – на 2-3 события или 10-20% от их общего количества. Для территории Беларуси отмечается уменьшение числа дней с влиянием Северо-Атлантических и южных циклонов до 3 дней за рассматриваемый период, что составляет 20-

30% от средних показателей. Указанные тенденции указывают на возрастание роли блокирующих процессов в атмосфере в последние десятилетия. Блокирование вызывается установлением обширного антициклона над Европейским континентом, вследствие чего нарушается западный перенос в средних широтах и смещаются траектории циклонов. Это приводит к отрицательным аномалиям осадков в районе блокирующего антициклона и их положительным аномалиям в прилегающих районах.

Для территории Беларуси отмечается увеличение числа дней с влиянием антициклонов на гидрометеорологические условия в каждый из месяцев теплого периода в последние ~40 лет. Изменения не превышают 1 дня в месяц в апреле и мае и являются статистически незначимыми при $P_{случ} < 5\%$. В летние месяцы увеличение повторяемости дней с антициклональным характером погоды заметно возросло и составляет в июне и июле по 3-4 дня/месяц за ~40 лет (при средних показателях 4-13 дней в июне и 7-18 дней в июле), в августе на 7-8 дней (в среднем 8-20 дней в месяц), эти изменения статистически значимы ($P_{случ} < 5\%$). В сентябре также сохраняется тенденция увеличения числа дней с влиянием антициклонов на погоду – на 2 дня за период 1980-2020 гг. (среднее значение 3-9 дней в месяц). Увеличение частоты антициклонов коррелирует со снижением повторяемости циклонов, определяющих погодные условия на территории Беларуси в летний сезон. Вышеописанные тенденции подтверждают наличие изменений осадков и усиление экстремальности климата на территории Европы, и в том числе Беларуси, в последние десятилетия.

Библиографические ссылки

1. Jaagus J., Aasa A., Aniskevich S., Boincean B., Wojariu R., Briede A., Danilovich I., Castro, F.D., Dumitrescu A., Labuda M., et al. Long-term changes in drought indices in eastern and central Europe. *International Journal of Climatology*. 2022. № 42(1). P. 225–249.
2. Логинов В.Ф. Диагноз глобального климата. Санкт-Петербург: ЛЕМА; 2021. 304 с.
3. Логинов В.Ф., Лысенко С.А., Мельник В.И. Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования. Минск: Энциклопедикс; 2020. 264 с.
4. Данилович И.С., Логинов В.Ф., Беганский А.В. Влияние циклогенеза в Атлантико-Европейском секторе на пространственно-временное распространение атмосферных осадков в Беларуси. *Природные ресурсы*. 2023. № 1. С. 3-15.
5. Данилович, И.С., Акперов, М.Г., Беганский, А.В., Дембицкая, М.А. Пространственно-временные изменения циклогенеза и режима осадков в Атлантико-Европейском секторе в 1979-2019 гг. *Метеорология и Гидрология*. 2023. №.12. С. 15–26.
6. Hofstatter M., Lexer A., Homann M., Blochl G. Large-scale heavy precipitation over central Europe. *International Journal of Climatology*. 2018. No.38. P.497–517.
7. Амельченко А.В., Николаева В.И. Осадки в БССР, связанные с перемещением циклонов с северо-запада и запада. Сборник работ Минской гидрометеорологической обсерватории. 1961. Вып. 3. С.158–166.

8. Юбочникова О.И. Осадки в Беларуси, связанные с перемещением циклонов с юга. Сборник работ Минской гидрометеорологической обсерватории. 1962. Вып. 4. С. 43–52.
9. Ulbrich U., Leckebusch G.C., Pinto J.G. Extra-Tropical Cyclones in the Present and Future Climate: A Review. *Theoretical and Applied Climatology*. 2009. No. 96. P. 117–131.
10. Pinto J.G., Zacharias S., Fink A.H., Leckebusch G.C., Ulbrich U. Factors contributing to the development of extreme North Atlantic cyclones. *Climate Dynamic*. 2009. No. 32. P. 711-737.