

СВЯЗЬ МЕЖДУ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ И НЕБЛАГОПРИЯТНЫМИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМИ ЯВЛЕНИЯМИ НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ В ПЕРИОД ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

И. С. ДАНИЛОВИЧ^{1), 2)}, Е. С. БЕРЕЖКОВА²⁾

¹⁾Институт природопользования НАН Беларуси, ул. Франциска Скорины, 10, 220114, г. Минск, Беларусь

²⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Представлены результаты оценки связи между индексами (модами) атмосферной циркуляции в Атлантико-Европейском секторе (индекс Северо-Атлантического колебания, индекс Арктического колебания и индекс Скандинавского блокирования) и числом дней с неблагоприятными явлениями погоды (интенсивные осадки, метели и грозы). Получены статистически значимые коэффициенты корреляции. Показано, что выпадение интенсивных осадков зимой на территории Беларуси сопряжено с преобладанием положительной фазы Северо-Атлантического и Арктического колебаний, а также с перемещением североатлантических циклонов. Повторяемость метелей, напротив, является более высокой при установлении отрицательной фазы Северо-Атлантического и Арктического колебаний. Летом интенсивные осадки частично связаны с доминированием отрицательной фазы Северо-Атлантического и Арктического колебаний, а также с выходами южных циклонов. Наибольшая повторяемость гроз отмечается при установлении положительной фазы Скандинавского блокирования.

Ключевые слова: интенсивные осадки; метели; грозы; опасные явления; индексы (моды) атмосферной циркуляции; циклоны.

Образец цитирования:

Данилович ИС, Бережкова ЕС. Связь между атмосферной циркуляцией и неблагоприятными метеорологическими явлениями на территории Беларуси в период изменения климата. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2023;2:49–57.
EDN: MCNOAM

For citation:

Danilovich IS, Berezhkova KS. Relationship between atmospheric circulation and natural hazards over the territory of Belarus during the period of climate change. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2023;2:49–57. Russian.
EDN: MCNOAM

Авторы:

Ирина Сергеевна Данилович – кандидат географических наук, доцент; ведущий научный сотрудник лаборатории климатических исследований Центра геоэкологии и климатологии¹⁾, доцент кафедры общего землеведения и гидрометеорологии факультета географии и геоинформатики²⁾.
Екатерина Сергеевна Бережкова – старший преподаватель кафедры общего землеведения и гидрометеорологии факультета географии и геоинформатики.

Authors:

Irina S. Danilovich, PhD (geography), docent; leading researcher at the laboratory of climate research, Center of Geoecology and Climatology^a, associate professor at the department of general geography of the Earth and hydrometeorology, faculty of geography and geoinformatics^b.
irinadanilovich@yandex.ru
<https://orcid.org/0000000267927279>
Katsiaryna S. Berezhkova, senior lecturer at the department of general geography of the Earth and hydrometeorology, faculty of geography and geoinformatics.
katarina0704@tut.by

RELATIONSHIP BETWEEN ATMOSPHERIC CIRCULATION AND NATURAL HAZARDS OVER THE TERRITORY OF BELARUS DURING THE PERIOD OF CLIMATE CHANGE

I. S. DANILOVICH^{a, b}, K. S. BEREZHKOVA^b

^a*Institute for Nature Management, National Academy of Sciences of Belarus,
10 Francyska Skaryny Street, Minsk 220114, Belarus*

^b*Belarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus*

Corresponding author: K. S. Berezhkova (katarina0704@tut.by)

The study presents an assessment of the relationship between atmospheric circulation indices (modes) in the Atlantic-European sector (North Atlantic Oscillation index, Arctic Oscillation index, and Scandinavian Blocking index) and natural hazards, such as heavy precipitation, blizzards and thunderstorms. Statistically significant correlation coefficients were detected for these modes and events. It is shown that the intense precipitation over the territory of Belarus in winter is associated with the positive phase of the North Atlantic and Arctic Oscillations and North Atlantic cyclones tracks. However, snowstorms frequency is higher at the negative phase of the North Atlantic and Arctic Oscillations. In summer, intense precipitation is partly associated with the negative phase of North Atlantic and Arctic Oscillations and the southern cyclones outlets. The greatest frequency of thunderstorms is observed with positive phase of the Scandinavian Blocking.

Keywords: heavy precipitation; blizzards; thunderstorms; natural hazards; atmospheric circulation indices (modes); cyclones.

Введение

В условиях изменения климата, повышения температуры и влажности воздуха в последние десятилетия отмечается увеличение числа неблагоприятных явлений погоды. С 1980 г. их повторяемость на территории Европы выросла вдвое [1]. Возникновение экстремальных метеорологических явлений связано с циркуляцией атмосферы. Увеличение количества водяного пара усиливает адиабатический нагрев и способствует повышению интенсивности внетропических циклонов [2]. Например, за 1958–2009 гг. в Северном полушарии над Северной Атлантикой возросла активность интенсивных циклонов зимой [3]. Северная Европа чаще других регионов страдает от экстремальных зимних явлений, таких как снегопады, залоги холодного воздуха, зимние бури и сильные снегопады. Сильные ветры и метели наиболее распространены над Атлантикой и в прибрежных районах.

Еще одним фактором формирования метеорологических экстремумов выступает атмосферное блокирование, которое сопряжено с установлением обширного антициклона над территорией Европы, что нарушает западный перенос воздушных масс в средних широтах. Атмосферное блокирование приводит к отрицательным аномалиям осадков в районе антициклона и их положительным аномалиям на фронтальных разделах барических систем [4]. Вместе с тем повышение температуры и влажности воздуха способствует возникновению положительных трендов конвективных процессов в атмосфере над Южной, Центральной и Северной Европой [5], с которыми связаны наиболее интенсивные опасные метеорологические явления.

Среди неблагоприятных атмосферных явлений наиболее заметный рост показателей, зафиксированный на территории Европы в последние десятилетия, характерен для гроз (увеличиваются число и интенсивность летних гроз [6], особенно над Центральной и Южной Европой [7]). Интенсивность града в этом регионе отличается отсутствием значимых трендов за 30-летний период, уменьшается число случаев выпадения града большого размера, но одновременно с этим увеличивается диаметр крупинки града [8]. На территории Польши возросло число дней с туманом (на 5 дней за 10 лет) и грозами (на 2 дня за 10 лет), однако отсутствуют значимые тенденции в отношении количества дней с градом и гололедом [9]. Результаты анализа данных о горизонтальной видимости показывают, что в Европе частота возникновения условий плохой видимости (0–8 км) при таких явлениях, как туман, мгла и дымка, снизилась за последние 30 лет. Это обусловлено изменениями в аэрозольной нагрузке и облачности [10].

Сильные ветры в Северной и Центральной Европе в основном связаны с циклонами, возникающими над Северной Атлантикой и Северным морем [11], а циклоны, зарождающиеся над Средиземным морем, могут вызывать сильные ветры над Южной Европой [12]. На большей части территории Европы отмечается уменьшение среднегодовых значений ветра [13; 14] в результате более частого установления блокирующих антициклонов над Северо-Восточной Атлантикой и снижения зонального переноса. Но несмотря на падение скорости ветра в Центральной и Восточной Европе [15; 16], возрастает повторяемость шквалов и смерчей в Украине [16] и Польше [17].

На территории Беларуси в период потепления климата, который пришелся на 1989–2020 гг., увеличилась повторяемость числа дней с гололедом, грозами, градом и интенсивными осадками [18; 19]. В летний период на большинстве метеорологических станций страны было зафиксировано, что суточные максимумы осадков, обусловленные в основном конвективными процессами, возросли на 20–25 % [20]. Снижается повторяемость числа дней с туманом, метелями, низкой видимостью и сильным ветром [18]. На фоне общего падения скорости ветра на территории Беларуси максимальный порыв ветра сократился на 1–5 м/с в зимний период, но увеличился на 1–3 м/с в летний сезон, что было зарегистрировано на большинстве метеорологических станций. Это объясняется усилением в теплое время года конвективных процессов в атмосфере [21].

В связи с необходимостью анализа разнонаправленных трендов повторяемости неблагоприятных явлений погоды в Беларуси и различных условий их формирования целью работы выступает установление связи между атмосферной циркуляцией в Атлантико-Европейском секторе и повторяемостью отдельных метеорологических явлений (грозы, град, интенсивные осадки, туман, гололед, метели, видимость менее 1 км, ветер со скоростью 14 м/с и более) на территории страны в период трансформации климата.

Материалы и методы исследования

В работе использованы данные о повторяемости случаев интенсивных осадков (более 15 мм за 12 ч), гроз, града, тумана, сильного ветра (14 м/с и более), низкой видимости (менее 1 км), гололеда и метелей, отмеченных на территории Беларуси. Исходные сведения представлены в виде числа дней с каждым перечисленным явлением за месяц, зарегистрированных на 42 метеорологических станциях наблюдательной сети Белгидромета, за период с 1975 по 2022 г.

Связь между атмосферной циркуляцией и повторяемостью неблагоприятных явлений погоды на территории Беларуси установлена на основании месячных значений индексов (мод) атмосферной циркуляции в Атлантико-Европейском секторе: индекса Северо-Атлантического колебания (далее – индекс NAO), индекса Арктического колебания (далее – индекс АО) и индекса Скандинавского блокирования (далее – индекс SCAND) – за период с 1975 по 2022 г.

В качестве основного метода исследования применен корреляционный анализ. Для всех анализируемых показателей по данным за соответствующие месяцы вычислены коэффициенты корреляции (r) между значениями индексов атмосферной циркуляции и осредненным по стране числом дней с неблагоприятными метеорологическими явлениями, зафиксированных на каждой станции. В целях оценки уровня статистической значимости (p) коэффициентов корреляции использован t -критерий Стьюдента. Статистические расчеты и подготовка графического материала выполнены с помощью библиотек pandas, NumPy, SciPy, Matplotlib языка программирования Python (3.11).

Результаты и их обсуждение

Атмосферная циркуляция в Атлантико-Европейском секторе играет важную роль для регионального климата Европы. Индексы атмосферной циркуляции – показатели глобальной изменчивости атмосферы, которые характеризуют трансформации региональных процессов. Основным фактором изменения регионального климата является Северо-Атлантическое колебание [22], определяющее интенсивность западного переноса воздушных масс в зависимости от градиента давления между Азорским антициклоном и Исландским циклоном. Долгосрочные тенденции Северо-Атлантического колебания, которые проявлялись в 1899–2018 гг., отличаются непостоянством и высокой межгодовой и междекадной изменчивостью. С середины 1960-х гг. наблюдается положительная тенденция к более зональной циркуляции с мягкими и влажными зимами и повышенной повторяемостью штормов в Центральной и Северной Европе [23]. Однако после середины 1990-х гг. наметилась тенденция к более меридиональной циркуляции и более холодным периодам зимой, что обусловлено движением воздушных масс восточного или северного направления (отрицательные значения индекса NAO).

Для Беларуси прослеживается статистически значимая связь между значениями индекса NAO и температурой воздуха с декабря по март, при этом величины r составляют 0,45–0,55 [24; 25]. Преобладание положительной фазы Северо-Атлантического колебания в 1960–90-х гг. коррелирует с более заметным ростом (на 2,4 °C) температуры в зимнее время года на территории страны по сравнению с летним сезоном. Но с 2000-х гг. прослеживается обратная тенденция: более интенсивно повышается температура воздуха летом [26]. В режиме увлажнения в зимний сезон увеличиваются (на 3–5 мм за 10 лет) положительные величины трендов сезонных сумм осадков [27]. Однако в мае, августе и сентябре отмечается тенденция к уменьшению количества осадков [28]. Выпадение осадков, в том числе осадков интенсивного характера, связано с циклонической деятельностью, а в теплый период года оно

сопряжено и с конвекцией в атмосфере. С 1970-х гг. повышается частота возникновения циклонов в Северной и Центральной Европе [29; 30], особенно повторяемость североатлантических циклонов в зимний сезон, что привело к увеличению количества осадков в Северной Европе и их снижению в Центральной Европе.

На рис. 1, *а*, представлен график связи между значениями индекса NAO и осредненным по стране числом случаев выпадения интенсивных осадков, зафиксированных на 42 метеорологических станциях Беларуси, в зимний период. Величина r составляет 0,60 (при $p < 5\%$). Зимой при положительных значениях индекса NAO длинные волны в атмосфере (господствующий западный поток воздушных масс в средних широтах, который является волнообразным) характеризуются малой амплитудой. Пути циклонов, перемещающихся вдоль длинных волн, пролегают практически прямолинейно с запада на восток, они блокируют заток холодных воздушных масс на территорию Европы и обуславливают выпадение осадков на всем пути следования. В холодное время года в основном именно мощные североатлантические циклоны, сформированные у восточных побережий Северной Америки, приносят обильные осадки на территорию Беларуси [31]. При отрицательных значениях индекса NAO увеличивается амплитуда волн и преобладает меридиональный тип атмосферной циркуляции, для которого характерны как выходы южных циклонов, способных принести обильные осадки на территорию страны, так и затoki холодного арктического воздуха с антициклоном и отсутствие осадков.

В летний сезон связь между значениями индекса NAO и числом дней с интенсивными осадками является более слабой, чем в зимний период (рис. 1, *б*). Величина r составляет $-0,43$ (при $p < 5\%$). Отрицательные значения индекса NAO и их менее тесная связь с анализируемыми показателями объясняются увеличением интенсивности выпадения осадков летом. Это обусловлено прохождением южных циклонов (25 % (без учета фронтальных разделов) от общего объема выпадающих осадков) и конвективными явлениями в атмосфере (10–12 % от общего объема осадков, выпадающих в теплый сезон, а именно с мая по август) [31].

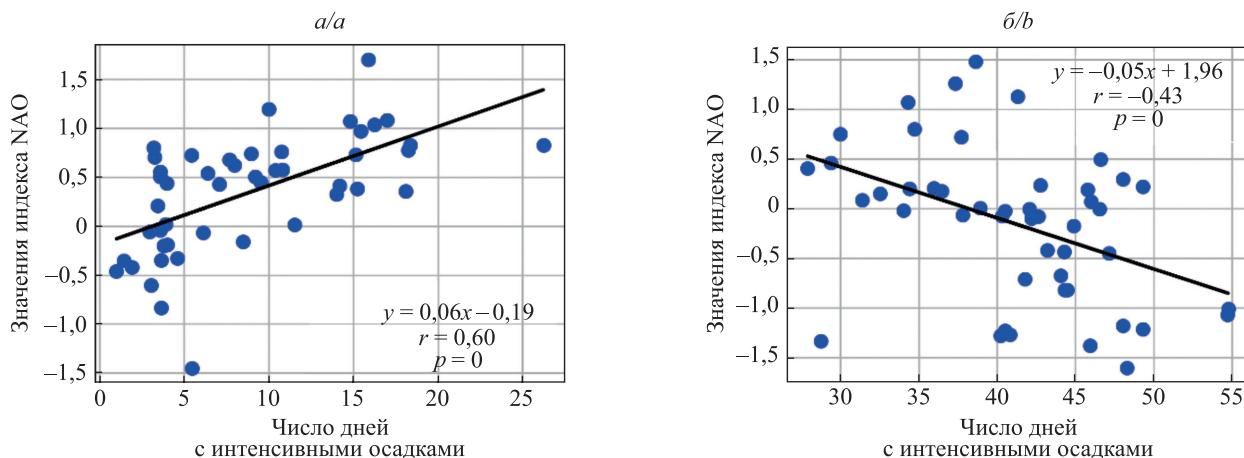


Рис. 1. График связи между значениями индекса NAO и числом дней с интенсивными осадками с декабря по март (*а*) и с июня по август (*б*)

Fig. 1. Graph of the relationship between NAO index values and the number of days with heavy precipitation from December to March (*a*) and from June to August (*b*)

Арктическое колебание представляет собой разнонаправленное смещение атмосферного давления между Арктикой и средними широтами северной части Тихого океана и Атлантики. При установлении положительной фазы Арктического колебания ведущий поток средних широт направлен на север, тем самым количество вторгаемого в средние широты холодного воздуха уменьшается, тогда как при доминировании отрицательной фазы струйное течение сдвигается на юг, что позволяет арктическому воздуху проникать в средние широты [32].

С начала 2000-х гг. преобладают отрицательная фаза Арктического колебания и меридиональный тип циркуляции в Атлантико-Европейском секторе. Зимой увеличение количества осадков на территории Беларуси связано с повышением повторяемости возникновения южных циклонов, которые приносят обильные осадки [31]. Величина r между значениями индекса АО и осредненным числом случаев интенсивных осадков составляет 0,71 (при $p < 5\%$) (рис. 2, *а*).

В теплый сезон на территории Беларуси зафиксированы отрицательные тренды летних сумм осадков в отдельные месяцы, что можно объяснить снижением циклонической активности летом, уменьшением частоты возникновения циклонов и усилением засушливости климата во время установления отрицательной фазы Арктического колебания и роста повторяемости меридиональных типов циркуляции. Величина r между значениями индекса АО и числом случаев интенсивных осадков составляет $-0,46$ (при $p < 5\%$) (рис. 2, б). Однако на территории Беларуси отмечается рост суточных максимумов осадков, обусловленный конвективными процессами в атмосфере [20].

Возникновение метелей вызвано преобладанием отрицательной фазы Северо-Атлантического и Арктического колебаний и установлением меридионального типа атмосферной циркуляции, при котором отмечаются выходы южных циклонов. С южными циклонами связана наибольшая повторяемость метелей на территории страны [33]. На рис. 3 представлены графики связи между значениями индекса NAO (рис. 3, а) и индекса АО (рис. 3, б) и числом дней с метелями. Величины r составляют $-0,54$ и $-0,43$ соответственно (при $p < 5\%$) и указывают на высокую повторяемость дней с метелями при низких значениях индексов NAO и АО.

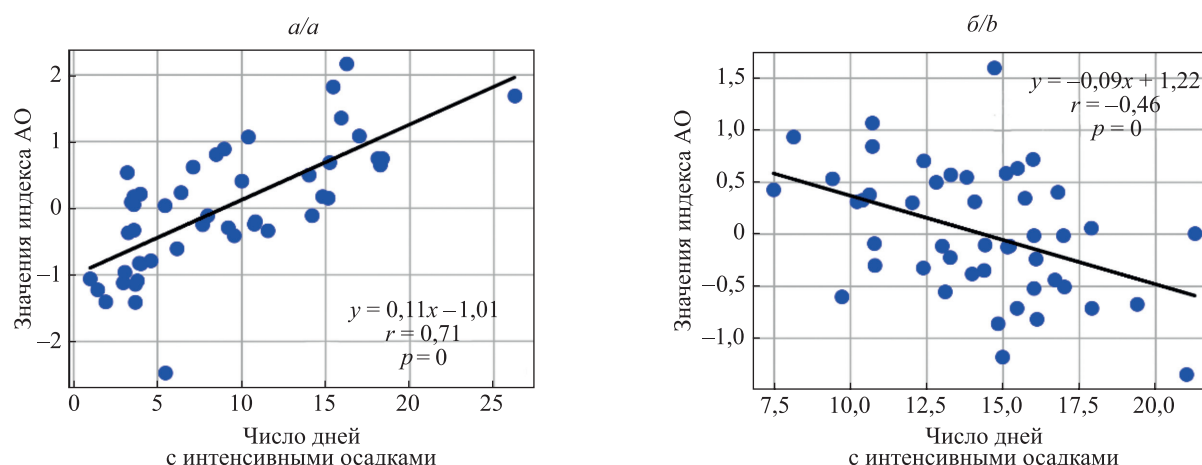


Рис. 2. График связи между значениями индекса АО и числом дней с интенсивными осадками с декабря по март (а) и с июня по август (б)

Fig. 2. Graph of the relationship between AO index values and the number of days with heavy precipitation from December to March (a) and from June to August (b)

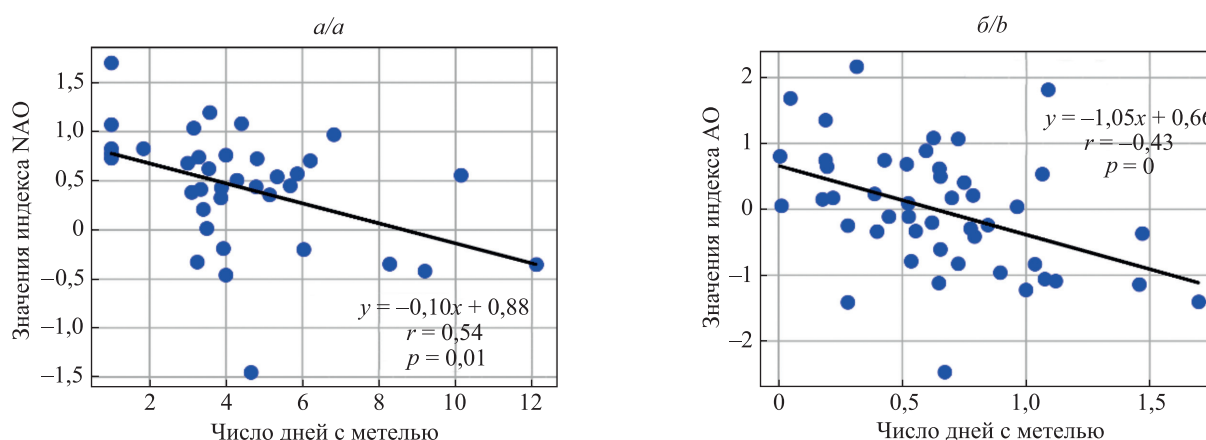


Рис. 3. График связи между значениями индексов NAO (а) и АО (б) и числом дней с метелями с декабря по март

Fig. 3. Graph of the relationship between NAO (a) and AO (b) index values and the number of days with blizzards from December to March

Но в последние десятилетия эта связь ослабевает за счет изменения в режиме выпадения твердых осадков и характеризуется значимым снижением продолжительности выпадения осадков в твердой фазе из-за устойчивого повышения температуры воздуха.

С помощью индекса SCAND можно описать погоду в Европе и выделить характерные закономерности, наблюдаемые в разное время года. Он в значительной степени определяется диполем давления между Южной Европой и Скандинавией. Влияние атмосферного блокирования на повторяемость неблагоприятных явлений на территории Беларуси в основном прослеживается в теплый период года, оно связано с установлением засушливых погодных условий.

При доминировании отрицательной фазы Скандинавского блокирования область низкого давления сосредоточена в Северной Европе, а область высокого давления – на большей части Центральной и Южной Европы. Сухая погода фиксируется во многих регионах Европы вплоть до северной части Северо-Европейской равнины, а более влажная, чем обычно, погода отмечается только на крайнем севере континента. Такое распределение давления свидетельствует о возникновении в Европе обширного антициклона, с которым связаны продолжительные периоды дефицита осадков. Как показано в публикации [4], с антициклонами сопряжены засухи, повторяемость которых в Беларуси растет в последние десятилетия. На территории страны эта тенденция выражается в сокращении продолжительности выпадения осадков летом на 15–20 % за последние 30 лет, что было зафиксировано на большинстве метеорологических станций. В то же время суточные максимумы осадков летом выросли на 20–25 % [27].

На рис. 4 представлены графики связи между значениями индекса SCAND и осредненным по стране числом дней с грозами, которые сопровождаются интенсивными осадками. Величины r составляют 0,42; 0,44 и 0,34 в мае (рис. 4, а), июне (рис. 4, б) и июле (рис. 4, в) соответственно (при $p < 5\%$). Иными словами, при высоких значениях индекса SCAND наблюдается большое количество дней с грозами на территории Беларуси.

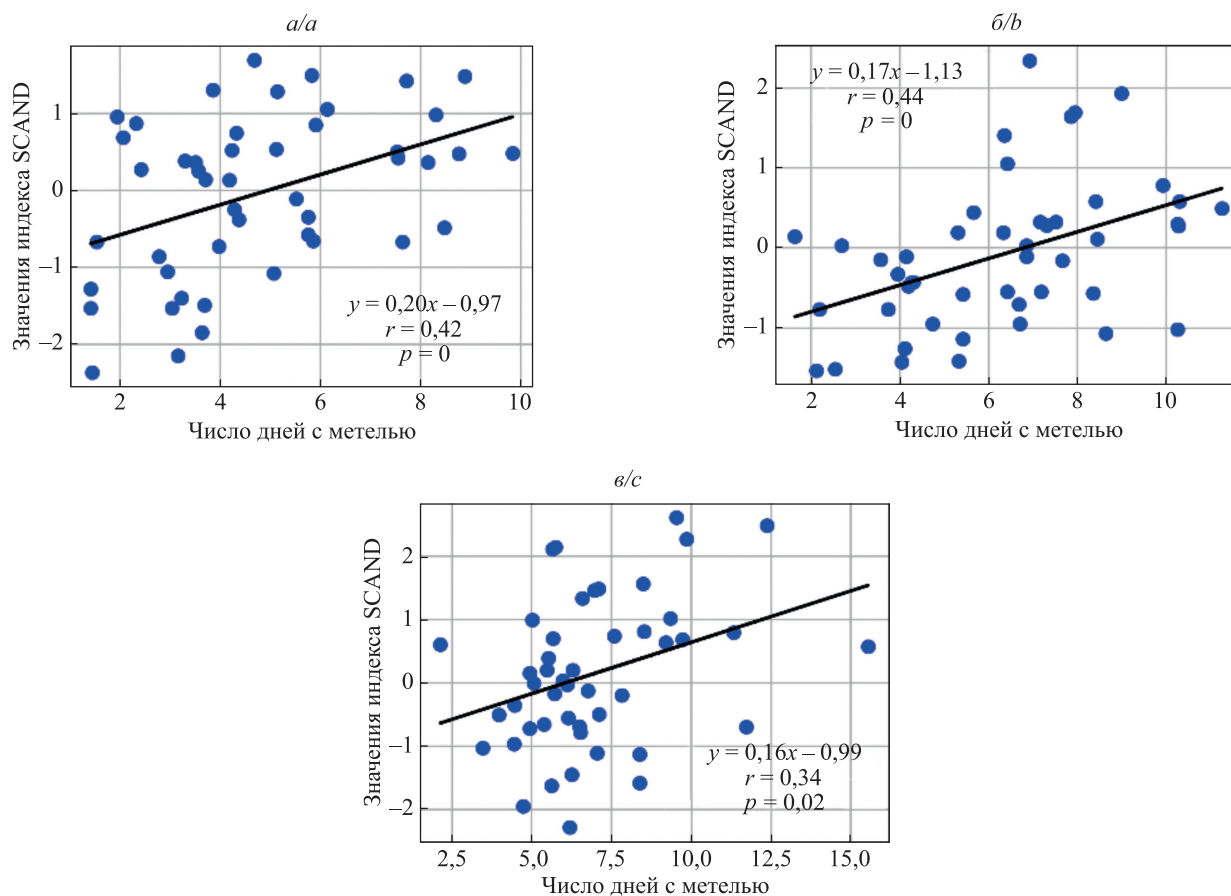


Рис. 4. График связи между значениями индекса SCAND и числом дней с грозами в мае (а), июне (б) и июле (в)

Fig. 4. Graph of the relationship between SCAND index values and the number of days with thunderstorms in May (a), June (b) and July (c)

Невысокая, но статистически значимая связь между атмосферным блокированием и числом гроз объясняется распространением области высокого давления на большей части Европы. Она характеризуется низкими величинами индекса SCAND и высокой частотой установления длительных антициклонов (продолжительностью не менее 5 дней), влияющих на погоду летом в Беларуси [21] и способствующих усилению засушливых условий. При положительных значениях индекса SCAND в теплый сезон над территорией Европы преобладает область низкого давления, отмечается более влажная погода и в условиях высоких температур и неустойчивой стратификации в атмосфере формируются интенсивные осадки в сопровождении грозовой деятельности.

Заключение

В результате оценки корреляции между величинами индексов атмосферной циркуляции (NAO, AO и SCAND) и количеством дней с неблагоприятными явлениями погоды на территории Беларуси установлена статистически значимая связь первых с повторяемостью случаев интенсивных осадков, метелей и гроз, т. е. явлений, формирующихся преимущественно вследствие циклонической деятельности. Туман, град, низкая видимость, дымка и сильный ветер сопряжены с более локальными условиями их возникновения – неустойчивой стратификацией атмосферы, инверсиями, которые не могут быть описаны с помощью показателей изменчивости крупномасштабной циркуляции.

Выпадение интенсивных осадков зимой на территории Беларуси отмечается при установлении положительной фазы Северо-Атлантического и Арктического колебаний и перемещении мощных североатлантических циклонов через Европу. Повторяемость метелей, напротив, является более высокой при доминировании отрицательной фазы Северо-Атлантического и Арктического колебаний, когда формируются условия для выходов южных циклонов. Летом установлена обратная связь между значениями индексов NAO и AO и числом дней с интенсивными осадками, что обусловлено преобладанием меридиональных типов циркуляции и отрицательных фаз Северо-Атлантического и Арктического колебаний и вызвано более высокой повторяемостью южных циклонов, приносящих осадки на территорию Беларуси. Повторяемость гроз во многом связана с частотой блокирования ведущего потока в атмосфере в результате установления обширных и длительных антициклонов. При доминировании положительной фазы Скандинавского блокирования и преобладании области низкого давления на значительной части территории Европы отмечается более высокая повторяемость гроз в Беларуси.

Библиографические ссылки

1. European Academies' Science Advisory Council. *Extreme weather events in Europe* [Internet]. 2018 [cited 2023 January 12]. Available from: https://easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Extreme_Weather/EASAC_Extreme_Weather_2018_web.pdf.
2. Shaw TA, Baldwin M, Barnes EA, Caballero R, Garfinkel CI, Hwang Y-T, et al. Storm track processes and the opposing influences of climate change. *Nature Geoscience*. 2016;9(9):656–664. DOI: 10.1038/ngeo2783.
3. Lehmann A, Getzlaff K, Harlas J. Detailed assessment of climate variability in the Baltic Sea area for the period 1958 to 2009. *Climate Resources*. 2011;46(2):185–196. DOI: 10.3354/cr00876.
4. Sousa PM, Trigo RM, Barriopedro D, Soares PMM, Ramos AM, Liberato MLR. Responses of European precipitation distributions and regimes to different blocking locations. *Climate Dynamic*. 2017;48(3–4):1141–1160. DOI: 10.1007/s00382-016-3132-5.
5. Taszarek M, Allen JT, Brooks HE, Pilgij N, Czernecki B. Differing trends in the United States and European severe thunderstorm environments in a warming climate. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2021;102(2):296–322. DOI: 10.1175/BAMS-D-20-0004.1.
6. Skultety F, Jarosova M, Rostas J. Dangerous weather phenomena and their effect on en-route flight delays in Europe. *Transportation Research Procedia*. 2021;59:174–182. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.11.109.
7. Taszarek M, Kendzierski S, Pilgij N. Hazardous weather affecting European airports: climatological estimates of situations with limited visibility, thunderstorm, low-level wind shear and snowfall from ERA5. *Weather and Climate Extremes*. 2020;28:100243. DOI: 10.1016/j.wace.2020.100243.
8. Hulton F, Schultz DM. Climatology of Large Hail in Europe: characteristics of the European Severe Weather Database. *EGU-sphere* [Internet]. 2023 [cited 2023 April 30]. Available from: <https://egusphere.copernicus.org/preprints/2023/egusphere-2023-176>. DOI: 10.5194/egusphere-2023-176.
9. Arazny A, Laszyca E. Selected meteorological phenomena posing a hazard to aviation: a case study on Bydgoszcz airport, central Poland. *Bulletin of Geography. Physical Geography Series*. 2020;18:61–71. DOI: 10.2478/bgeo-2020-0005.
10. Vautard R, Yiou P, van Oldenborgh GJ. Decline of fog, mist and haze in Europe over the past 30 years. *Nature Geoscience*. 2009;2(2):115–119. DOI: 10.1038/ngeo414.
11. Donat MG, Renggli D, Wild S, Alexander LV, Leckebusch GC, Ulbrich U. Reanalysis suggests long-term upward trends in European storminess since 1871. *Geophysical Research Letters*. 2011;38(14):L14703. DOI: 10.1029/2011GL047995.
12. Nissen KM, Leckebusch GC, Pinto JG, Renggli D, Ulbrich S, Ulbrich U. Cyclone causing wind storms in the Mediterranean: characteristics, trends and links to large-scale patterns. *Natural Hazards, Earth System Science*. 2010;10:1379–1391. DOI: 10.5194/nhess-10-1379-2010.
13. von Storch H, Lehmann A, Maraun D, editors. *Second assessment of climate change for the Baltic Sea Basin*. Cham: Springer; 2015. 501 p. DOI: 10.1007/978-3-319-16006-1.

14. Copernicus Climate Change Service. *European state of the climate – 2019* [Internet]. 2020 [cited 2023 February 15]. Available from: https://climate.copernicus.eu/sites/default/files/2020-04/ESOTC2019_summary.pdf.
15. Ministry of the Environment of the Republic of Latvia. *Fourth National Communication of the Republic of Latvia to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. Riga: Ministry of the Environment of the Republic of Latvia; 2006. 160 p.
16. Balabukh V, Lavrynenko O, Bilaniuk V, Mykhnovych A, Pylypovych O. Extreme weather events in Ukraine: occurrence and changes. In: Sallis PJ, editor. *Extreme weather* [Internet]. 2018 [cited 2022 September 9]. Available from: <https://www.intechopen.com/chapters/61828>. DOI: 10.5772/intechopen.77306.
17. Kozuchowski K, Zmudzka E. Ocieplenie w Polsce: skala i rozkład sezonowy zmian temperatury powietrza w drugiej połowie XX wieku. *Przegląd Geofizyczny*. 2001;46(1–2):81–90.
18. Бережкова ЕС, Лопух ПС. Трендовые риски, связанные с опасными метеорологическими явлениями, в гражданской авиации на территории Беларуси. *Географія*. 2023;1:3–7.
19. Переведенцев ЮП, Лопух ПС, Гледко ЮА, Бережкова ЕС, Ван Хао, Шлендер ТВ. Особенности климатических изменений на европейской территории Союзного государства России и Беларуси в начале XXI в. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2022;2:69–87. DOI: 10.33581/2521-6740-2022-2-69-87.
20. Данилович ИС, Логинов ВФ. Текущие и ожидаемые изменения климата на территории Беларуси. *Центральноазиатский журнал географических исследований*. 2021;1–2:35–48.
21. Данилович ИС, Костюченко ИВ. Трансформация ветрового режима на территории Беларуси в условиях изменяющегося климата. *Географія*. 2023;2:8–16.
22. Hurrell JW, Kushnir Y, Ottersen G, Visbeck M. An overview of the North Atlantic Oscillation. In: Hurrell JW, Kushnir Y, Ottersen G, Visbeck M, editors. *In the North Atlantic Oscillation: climatic significance and environmental impact*. Washington: American Geophysical Union; 2003. p. 1–35. DOI: 10.1029/134GM01.
23. Gillett NP, Fyfe JC. Annular mode changes in the CMIP5 simulations. *Geophysical Research Letter*. 2013;40:1189–1193. DOI: 10.1002/grl.50249.
24. Логинов ВФ, редактор. *Изменения климата Беларуси и их последствия*. Минск: Тонпик; 2003. 330 с.
25. Логинов ВФ, Данилович ИС, Китаев ЛМ, Актеньева ЕМ. Современные и ожидаемые гидроклиматические изменения в бассейнах Балтийского и Арктических морей в пределах территорий Беларуси и России. *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. 2022;66(3):338–347. DOI: 10.29235/1561-8323-2022-66-3-338-347.
26. Логинов ВФ, Лысенко СА, Мельник ВИ. *Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования*. Минск: Энциклопедикс; 2020. 264 с.
27. Данилович ИС, Пискунович НГ. Экстремальные проявления в режиме увлажнения на территории Беларуси в условиях трансформации климата. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2021;2:32–44. DOI: 10.33581/2521-6740-2021-2-32-44.
28. Мельник ВИ, Буяков ИВ, Чернышов ВД. Изменения количества и вида атмосферных осадков в холодный период на территории Беларуси в условиях современного потепления климата. *Природопользование*. 2019;2:44–51.
29. 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;36(4):297–309. DOI: 10.2166/nh.2005.0023.
30. Partasenok IS, Groisman Pya, Chekan GS, Melnik VI. Winter cyclone frequency and following freshet streamflow formation on the rivers in Belarus. *Environmental Research Letters*. 2014;9(9):095005. DOI: 10.1088/1748-9326/9/9/095005.
31. Данилович ИС, Логинов ВФ, Беганский АВ. Влияние циклогенеза в Атлантико-Европейском секторе на пространственно-временное распространение атмосферных осадков в Беларуси. *Природные ресурсы*. 2023;1:5–11.
32. Thompson DW, Wallace JM. Regional climate impacts of the Northern Hemisphere annular mode. *Science*. 2001;293:85–89. DOI: 10.1126/science.1058958.
33. Сумах ЕН, Семёнова ИГ. Циклоническая активность и повторяемость опасных явлений погоды над территорией Беларуси. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2019;2:79–93. DOI: 10.33581/2521-6740-2019-2-79-93.

References

1. European Academies' Science Advisory Council. *Extreme weather events in Europe* [Internet]. 2018 [cited 2023 January 12]. Available from: https://easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Extreme_Weather/EASAC_Extreme_Weather_2018_web.pdf.
2. Shaw TA, Baldwin M, Barnes EA, Caballero R, Garfinkel CI, Hwang Y-T, et al. Storm track processes and the opposing influences of climate change. *Nature Geoscience*. 2016;9(9):656–664. DOI: 10.1038/ngeo2783.
3. Lehmann A, Getzlaff K, Harlas J. Detailed assessment of climate variability in the Baltic Sea area for the period 1958 to 2009. *Climate Resources*. 2011;46(2):185–196. DOI: 10.3354/cr00876.
4. Sousa PM, Trigo RM, Barriopedro D, Soares PMM, Ramos AM, Liberato MLR. Responses of European precipitation distributions and regimes to different blocking locations. *Climate Dynamic*. 2017;48(3–4):1141–1160. DOI: 10.1007/s00382-016-3132-5.
5. Taszarek M, Allen JT, Brooks HE, Pilguy N, Czernecki B. Differing trends in the United States and European severe thunderstorm environments in a warming climate. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2021;102(2):296–322. DOI: 10.1175/BAMS-D-20-0004.1.
6. Skultety F, Jarosova M, Rostas J. Dangerous weather phenomena and their effect on en-route flight delays in Europe. *Transportation Research Procedia*. 2021;59:174–182. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.11.109.
7. Taszarek M, Kendzierski S, Pilguy N. Hazardous weather affecting European airports: climatological estimates of situations with limited visibility, thunderstorm, low-level wind shear and snowfall from ERA5. *Weather and Climate Extremes*. 2020;28:100243. DOI: 10.1016/j.wace.2020.100243.
8. Hulton F, Schultz DM. Climatology of Large Hail in Europe: characteristics of the European Severe Weather Database. *EGU-sphere* [Internet]. 2023 [cited 2023 April 30]. Available from: <https://egusphere.copernicus.org/preprints/2023/egusphere-2023-176>. DOI: 10.5194/egusphere-2023-176.
9. Arazny A, Laszyca E. Selected meteorological phenomena posing a hazard to aviation: a case study on Bydgoszcz airport, central Poland. *Bulletin of Geography. Physical Geography Series*. 2020;18:61–71. DOI: 10.2478/bgeo-2020-0005.

10. Vautard R, Yiou P, van Oldenborgh GJ. Decline of fog, mist and haze in Europe over the past 30 years. *Nature Geoscience*. 2009;2(2):115–119. DOI: 10.1038/ngeo414.
11. Donat MG, Renggli D, Wild S, Alexander LV, Leckebusch GC, Ulbrich U. Reanalysis suggests long-term upward trends in European storminess since 1871. *Geophysical Research Letters*. 2011;38(14):L14703. DOI: 10.1029/2011GL047995.
12. Nissen KM, Leckebusch GC, Pinto JG, Renggli D, Ulbrich S, Ulbrich U. Cyclone causing wind storms in the Mediterranean: characteristics, trends and links to large-scale patterns. *Natural Hazards, Earth System Science*. 2010;10:1379–1391. DOI: 10.5194/nhess-10-1379-2010.
13. von Storch H, Lehmann A, Maraun D, editors. *Second assessment of climate change for the Baltic Sea Basin*. Cham: Springer; 2015. 501 p. DOI: 10.1007/978-3-319-16006-1.
14. Copernicus Climate Change Service. *European state of the climate – 2019* [Internet]. 2020 [cited 2023 February 15]. Available from: https://climate.copernicus.eu/sites/default/files/2020-04/ESOTC2019_summary.pdf.
15. Ministry of the Environment of the Republic of Latvia. *Fourth National Communication of the Republic of Latvia to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. Riga: Ministry of the Environment of the Republic of Latvia; 2006. 160 p.
16. Balabukh V, Lavrynenko O, Bilaniuk V, Mykhnovych A, Pylypovych O. Extreme weather events in Ukraine: occurrence and changes. In: Sallis PJ, editor. *Extreme weather* [Internet]. 2018 [cited 2022 September 9]. Available from: <https://www.intechopen.com/chapters/61828>. DOI: 10.5772/intechopen.77306.
17. Kozuchowski K, Zmudzka E. Ocieplenie w Polsce: skala i rozkład sezonowy zmian temperatury powietrza w drugiej połowie XX wieku. *Przegląd Geofizyczny*. 2001;46(1–2):81–90.
18. Berezhkova ES, Lopuch PS. [Trend risks associated with hazardous meteorological phenomena in civil aviation on the territory of Belarus]. *Географія*. 2023;1:3–7. Russian.
19. Perevedentsev YuP, Lopuch PS, Hledko YA, Berezhkova KS, Van Khao, Schlender TV. Features of climate change in the European territory of the Union State of Russia and Belarus of the beginning of the 21st century. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology*. 2022;2:69–87. Russian. DOI: 10.33581/2521-6740-2022-2-69-87.
20. Danilovich IS, Loginov VF. Current and expected climate changes over the territory of Belarus. *Central Asian Journal of the Geographical Researches*. 2021;1–2:35–48. Russian.
21. Danilovich IS, Kostyuchenko IV. [Transformation of the wind regime on the territory of Belarus in a changing climate]. *Географія*. 2023;2:8–16. Russian.
22. Hurrell JW, Kushnir Y, Ottensen G, Visbeck M. An overview of the North Atlantic Oscillation. In: Hurrell JW, Kushnir Y, Ottensen G, Visbeck M, editors. *In the North Atlantic Oscillation: climatic significance and environmental impact*. Washington: American Geophysical Union; 2003. p. 1–35. DOI: 10.1029/134GM01.
23. Gillett NP, Fyfe JC. Annular mode changes in the CMIP5 simulations. *Geophysical Research Letter*. 2013;40:1189–1193. DOI: 10.1002/grl.50249.
24. Loginov VF, editor. *Izmeneniya klimata Belarusi i ikh posledstviya* [Climate changes in Belarus and their consequences]. Minsk: Tonpik; 2003. 330 p. Russian.
25. Loginov VF, Danilovich IS, Kitaev LM, Akent'eva EM. Current and projected hydroclimatic changes in the Baltic and Arctic Sea basins in the territories of Belarus and Russia. *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2022;66(3):338–347. Russian. DOI: 10.29235/1561-8323-2022-66-3-338-347.
26. Loginov VF, Lysenko SA, Melnik VI. *Izmenenie klimata Belarusi: prichiny, posledstviya, vozmozhnosti regulirovaniya* [Climate change in Belarus: causes, consequences, possibilities for regulation]. Minsk: Entsiklopediks; 2020. 264 p. Russian.
27. Danilovich IS, Piskunovich NG. Precipitation extremes over territory of Belarus under current climate change. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology*. 2021;2:32–44. Russian. DOI: 10.33581/2521-6740-2021-2-32-44.
28. Melnik VI, Buyakov IV, Chernyshev VD. Changes in the amount and type of precipitation in the cold period in the territory of Belarus under conditions of modern climate warming. *Nature Management*. 2019;2:44–51. Russian.
29. 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;36(4):297–309. DOI: 10.2166/nh.2005.0023.
30. Partasenok IS, Groisman Pya, Chekan GS, Melnik VI. Winter cyclone frequency and following freshet streamflow formation on the rivers in Belarus. *Environmental Research Letters*. 2014;9(9):095005. DOI: 10.1088/1748-9326/9/9/095005.
31. Danilovich IS, Loginov VF, Begansky AV. Influence of cyclogenesis in the Atlantic-European sector on the spatial and temporal distribution of atmospheric precipitation in Belarus. *Natural Resources*. 2023;1:5–11. Russian.
32. Thompson DW, Wallace JM. Regional climate impacts of the Northern Hemisphere annular mode. *Science*. 2001;293:85–89. DOI: 10.1126/science.1058958.
33. Sumak KM, Semenova IG. The cyclonic activity and frequency of dangerous weather phenomena over the territory of Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology*. 2019;2:79–93. Russian. DOI: 10.33581/2521-6740-2019-2-79-93.

Получена 27.04.2023 / принята 19.06.2023.
Received 27.04.2023 / accepted 19.06.2023.