

OPADY ATMOSFERYCZNE NA STACJI ŁÓDŹ-LUBLINEK PODCZAS ADWEKCJI ARKTYCZNYCH MAS POWIETRZA

Precipitation at the Łódź-Lubliniek station during the advection of Arctic air masses

PIOTR PIOTROWSKI¹ 

Zarys treści. Do analizy warunków opadowych na stacji Łódź-Lubliniek podczas adwekcji arktycznych mas powietrza (AAMP) wykorzystano zmodyfikowaną metodę wyznaczania arktycznych mas powietrza Geba. W opracowaniu sprawdzono wpływ adwekcji arktycznych mas powietrza na opady atmosferyczne na stacji Łódź-Lubliniek. Opadom atmosferycznym podczas AAMP najczęściej sprzyjała cyrkulacja cyklonalna z północnego zachodu. Adwekcja arktycznych mas powietrza z tego kierunku była najczęściej związana z układem niżowym zlokalizowanym na północny wschód od granic Polski. Największa liczba incydentów z opadem podczas AAMP w latach 1966–2022 w odniesieniu do wszystkich incydentów opadowych wystąpiła w listopadzie i grudniu oraz w marcu i kwietniu, natomiast najmniejsza od maja do sierpnia. Sześciogodzinne sumy opadów atmosferycznych podczas AAMP we wszystkich miesiącach były niższe w porównaniu z opadami podczas pojawiania się nad centrum Polski pozostałych mas powietrza. Przyczyną tego jest mała zawartość wody w atmosferze wynikająca z niskiej temperatury arktycznych mas powietrza we wszystkich porach roku. Niska temperatura arktycznych mas powietrza wpływa również na niską zawartość wody opadowej nad środkową częścią Europy. Najmniejsze odchylenia zawartości wody opadowej w atmosferze oraz temperatury powietrza w ciągu roku podczas incydentów opadowych związanych z AAMP wystąpiły zimą.

Słowa kluczowe: arktyczne masy powietrza, opady atmosferyczne, cyrkulacja atmosferyczna, temperatura powietrza, zawartość wody opadowej w atmosferze

Abstract. To analyse the precipitation conditions at the Łódź-Lubliniek station during Arctic air-mass advection (AAMA), a modified Geb method for determining Arctic air masses was used. This study examined how AAMA affects precipitation at Łódź-Lubliniek station. The precipitation during AAMA is favoured by cyclonic circulation from a north-western direction. The Arctic air-mass advection from this direction is most often associated with a low-pressure system located north-east from the borders of Poland. The highest number of precipitation incidents during AAMA, in comparison to all cases, was observed from November to December and March to April, while the lowest was from May to August. The 6-hour precipitation during AAMA was lower in all months compared to precipitation that occurred under other air-masses types. This is due to the low water content in the relatively colder Arctic air masses in all seasons of the year. The low temperature of Arctic air masses also affects low precipitable water over central Europe. Among all precipitation cases related to AAMA, the lowest deviations in the precipitable water in the atmosphere and temperature were found in winter.

Key words: Arctic air masses, precipitation, atmospheric circulation, air temperature, precipitable water

Wstęp

Arktyczne masy powietrza (AMP) relatywnie rzadko napływają nad obszar Polski. Częstość mas powietrza arktycznego określona w oparciu o dane z map synoptycznych PIHM/IMGW-PIB jest różna w zależności od branych pod uwagę lat. W la-

tach 1965–1990 według Bucherta (2006) częstość AMP w Poznaniu wynosiła 14,3%. Podobną częstość stwierdzono na Lubelszczyźnie w latach 1951–2010 – 13,4% (Kaszewski i in. 2017). Dla tego samego okresu częstość arktycznych mas powietrza nad południową Polską według Kotasa i in. (2013) jest mniejsza i wynosi około 8,0%. Najmniejsza średnia roczna częstość adwekcji

¹ Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych, Instytut Klimatologii i Hydrologii, Zakład Meteorologii i Klimatologii, ul. Narutowicza 88, 90-139 Łódź; e-mail: piotr.piotrowski@geo.uni.lodz.pl, ORCID: 0000-0003-2168-1645

arktycznych mas powietrza (5,4%) występowała na Podlasiu w latach 2001–2010 (Kierkło 2012). Największa roczna częstość mas powietrza arktycznego w oparciu o dane z lat 1971–2005 wyniosła 20,1% w Bydgoszczy (Więclaw 2009). Z wymienionych przykładów wynika, że częstość pojawiania się mas powietrza arktycznego nad Polską waha się w dość szerokim zakresie nawet dla takiego samego okresu. Mając na uwadze problemy wynikające z subiektywnej typologii mas powietrza, w opracowaniu do detekcji arktycznych mas powietrza wykorzystano zmodyfikowaną metodę Geba (1979), która jest oparta na ocenie trajektorii wstecznych mas powietrza oraz kryteriach termiczno-wilgotnościowych w miejscu docelowym napływu mas powietrza.

Opady atmosferyczne podczas adwekcji arktycznych mas powietrza sprzyjają pojawianiu się pokrywy śnieżnej zimą i w przejściowych porach roku. Obfite opady śniegu w centrum Polski, które powodują dobowy przyrost grubości pokrywy śnieżnej ≥ 10 cm, są najczęściej powiązane z północnym i północno-zachodnim przepływem powietrza w środkowej troposferze, natomiast w niższych warstwach troposfery napływa wówczas powietrze ze wschodu i północnego wschodu (Bednorz 2014). Trzy z wymienionych kierunków przepływu powietrza sprzyjają adwekcji arktycznych mas powietrza. Według autorki kontakt w środkowej Europie zimnych mas powietrza w niskiej troposferze z ciepłym wilgotnym powietrzem z południa w środkowej troposferze sprzyja formowaniu się ciepłego frontu, któremu towarzyszą wysokie sumy opadów w postaci śniegu. Oprócz opadów śniegu wiosną i wczesnym latem mogą pojawiać się również w Europie Środkowej opady gradu podczas napływu zimnych mas powietrza (Suwała 2014). W przypadku Łodzi i jej okolic wysokie opady (≥ 10 mm) są w 70% związane z cyrkulacją cyklonalną, najczęściej z adwekcją z południowego zachodu, północy, południowego wschodu i zachodu. W punkcie pomiarowym w Ciosnach koło Łodzi w latach 2010–2013 najwyższe średnie dobowe sumy opadów podczas cyrkulacji cyklonalnej były związane z adwekcją z północnego wschodu i północy, natomiast na punktach pomiarowych w Łodzi z północnego-wschodu (Jędruszkiewicz, Zieliński 2016).

Wpływ zawartości wody opadowej (ZWO) w atmosferze na sumy opadów atmosferycznych w Polsce nie jest jednoznaczny. Wysokie sumy opadów mogą pojawiać się nawet przy niezbyt dużej zawartości wody opadowej w atmosferze (Malinowska, Miętus 2010; Bernas, Kolendowicz

2013; Świątek 2013). Wyniki uzyskane przez Kożuchowskiego (2016) sugerują, iż zawartość wody opadowej w atmosferze nie spełnia głównego predyktora wysokości opadów atmosferycznych. Pomimo tego przesłania postanowiono sprawdzić rozkład przestrzenny zawartości wody opadowej w atmosferze i temperatury powietrza w trakcie i przed pojawieniem się opadu atmosferycznego.

Obserwowane kurczenie się pokrywy lodowej na obszarze źródłowym arktycznych mas powietrza (Johannessen i in. 2004; Walsh i in. 2016) może mieć istotne znaczenie dla cech termiczno-wilgotnościowych mas powietrza docierających nad obszar Polski z Arktyki. Konsekwencją tego mogą być zmiany sum i częstości opadów atmosferycznych oraz ich charakteru na obszarze Polski podczas AAMP. Utrata arktycznego lodu morskiego została przez Bailey i in. (2021) powiązana z zimnymi i śnieżnymi zimami w umiarkowanych szerokościach geograficznych. Jednak mechanizmy i bezpośredni związek pozostają nieuchwytnie ze względu na ograniczone dowody obserwacyjne. Procesy termodynamiczne (np. sprzężenie zwrotne topnienia lodu morskiego i pary wodnej) są według Yu i Zheng (2021) odpowiedzialne za ponad 85% całkowitych trendów opadowych w Arktyce, a reszta trendów wyjaśniona jest przez procesy dynamiczne (np. zmiany wzorców cyrkulacji atmosferycznej) oraz interakcje między procesami dynamicznymi i termodynamicznymi. W chłodnej połowie roku arktyczne wzmocnienie zarówno zmian temperatury, jak i wilgotności jest najsilniejsze. W półroczu tym przychodzące promieniowanie słoneczne jest niskie lub zerowe, a bilans energetyczny Arktyki jest zdominowany przez adwekcję ciepła z niższych szerokości geograficznych, uwalnianie ciepła z powierzchni oceanu i wychłodzenie radiacyjne do przestrzeni kosmicznej (Serreze, Barry 2011). Wymienione czynniki kształtujące bilans energetyczny w Arktyce mają istotne znaczenie dla kształtowania się cech termiczno-wilgotnościowych mas powietrza arktycznego.

Cyrkulacja atmosferyczna odgrywa istotną rolę w kształtowaniu warunków sprzyjających pojawianiu się opadów atmosferycznych. W opracowaniu postanowiono sprawdzić zmiany warunków termicznych i wilgotnościowych w poszczególnych porach roku podczas incydentów opadowych na stacji Łódź-Lublinek związanych z adwekcją arktycznych mas powietrza oraz przedstawić podstawowe charakterystyki statystyczne związane z opadem atmosferycznym występującym podczas napływu wymienionych mas powietrza, w tym także w powiązaniu z cyrkulacją atmo-

sferyczną. Występowanie opadów atmosferycznych uwarunkowane jest nie tylko dostateczną zawartością wody opadowej w atmosferze, ale przede wszystkim układem cyrkulacyjnym, który zapewnia ciągły dopływ i kondensację pary wodnej, a w konsekwencji umożliwia powstawanie opadów atmosferycznych (Kozuchowski 2016). Mając to na uwadze, postanowiono wyróżnić przestrzenne wzorce rozkładu ciśnienia na poziomie 850 hPa sprzyjające incyidentom opadowym podczas adwekcji arktycznych mas powietrza w oparciu o metodę empirycznych funkcji własnych (EOF).

Dane i metodyka

Metodyka wyznaczania arktycznych mas powietrza

Opracowania dotyczące mas powietrza nad obszarem Polski (Bołaszewska, Reutt 1962; Warakomski 1969; Kaszewski 1977; Szychta 2002; Buchert 2006; Więclaw 2009; Kotas i in. 2013) bazują na dolnych mapach synoptycznych PIHM/IMGW-PIB. Metoda wyznaczania mas powietrza na mapach synoptycznych ma charakter subiektywny, przez co może być obciążona potencjalnym błędem interpretacji synoptycznej mas powietrza. Ponadto zdarzają się również przypadki, kiedy brak jest sygnatury wskazującej na rodzaj masy powietrza znajdującej się nad obszarem Polski. W celu zminimalizowania błędów oceny sytuacji synoptycznej do wyznaczenia arktycznych mas powietrza w latach 1966–2022 postanowiono wykorzystać metodę Geba (1979), którą zmodyfikowano, aby zwiększyć stopień jej obiektywizmu. Określanie masy powietrza w metodzie Geba opiera się na wyznaczeniu trajektorii wstecznej oraz ocenie zmian właściwości termodynamicznych masy powietrza wzdłuż jej trajektorii. W oryginalnej metodzie do wyznaczenia wstecznej trajektorii masy powietrza wykorzystano mapy synoptyczne z różnych poziomów izobarycznych i szereg kryteriów mających na celu określenie właściwości termiczno-wilgotnościowych masy powietrza w punkcie docelowym.

Metodyka wyznaczania trzech rodzajów mas powietrza arktycznego według Geba została nieco zmodyfikowana, aby poprawić metodę określania trajektorii wstecznej masy powietrza i zmniejszyć liczbę kryteriów wspomagających detekcję masy powietrza. Modyfikacja dotyczy zastosowania modelu Hysplit (Stein i in. 2015) zamiast analizy map synoptycznych w celu wyznaczenia trajektorii

wstecznych oraz ograniczenia kryteriów termiczno-wilgotnościowych. Niezmienione zostały kryteria dotyczące temperatury powietrza i temperatury pseudopotencjalnej na poziomie 850 hPa w punkcie, do którego dociera masa powietrza. Temperatura pseudopotencjalna jest definiowana według słownika meteorologicznego (Niedźwiedź 2003) jako umowna temperatura, otrzymana po przeprowadzeniu procesu adiabatycznego, w którym początkowo cała zawarta w powietrzu para wodna ulega kondensacji wskutek nieograniczonego spadku ciśnienia i wypada, a ciepło jawne kondensacji ogrzewa powietrze, które następnie jest doprowadzone do ciśnienia standardowego.

Trajektorie wsteczne w modelu Hysplit zostały ustawione do 240 godzin wstecz i na wysokości powierzchni izobarycznej 850 hPa dla punktu początkowego odpowiadającemu położeniu geograficznemu stacji Łódź-Lubliniek (51,72°N, 19,38°E). Trajektorie wsteczne były obliczane dla warstwy powietrza od 0 m n.p.g. do 10 000 m n.p.g. Czasowy punkt początkowy modelu był ustawiony dla czterech terminów (00:00, 06:00, 12:00 i 18:00 UTC). Do obliczenia trajektorii wstecznych wykorzystano dane pochodzące z bazy danych NCEP/NCAR Reanalysis 1, głównie ze względu na długą serię danych. Temperatura powietrza na poziomie 850 hPa, która posłużyła do określenia cech termicznych masy powietrza w punkcie docelowym, pochodzi z bazy danych reanalizy ERA5 (Hersbach i in. 2020). Dane z reanalizy ERA5 są dostarczane przez Copernicus Climate Change Service (C3S) w European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Dane z tego samego źródła posłużyły do obliczenia temperatury pseudopotencjalnej na poziomie 850 hPa. Parametr ten został obliczony na podstawie wzoru podanego przez Geba (1971), do którego zaistniała konieczność wykorzystania wilgotności względnej i temperatury powietrza na poziomie 850 hPa.

Typologia mas powietrza arktycznego Geba (1979) nieco różni się od typologii stosowanej do charakterystyki mas powietrza na mapach synoptycznych PIHM/IMGW-PIB. W przypadku arktycznej masy powietrza Geb (1979) wydzielił trzy jej rodzaje: kontynentalną (Ac), morską (Am) oraz pośrednią (przetransformowaną; Ax). Obszarem źródłowym masy powietrza Ac jest rosyjska część Arktyki. Cechy mas powietrza Ax kształtują się nad obszarem północnej części europejskiej Arktyki i nad Svalbardem, natomiast mas powietrza Am – nad wschodnimi wybrzeżami Grenlandii lub jej obszarem. Nieco generalizując, można stwierdzić, że masy powietrza Am najczęściej napły-

wają nad Polskę z północnego-zachodu, masy powietrza Ax z północy, natomiast Ac z północnego-wschodu. Masa powietrza Ax ma cechy termiczno-wilgotnościowe pośrednie pomiędzy masą powietrza arktycznego morskiego i kontynentalnego, co wynika z jej transformacji głównie nad Skandynawią podczas jej wędrówki znad Oceanu Arktycznego do centrum Polski.

Pozostałe dane

Kierunek przepływu powietrza oraz charakter cyrkulacji atmosferycznej na stacji Łódź-Lublinek podczas incydentów opadowych związanych z adwekcją AMP został wyznaczony w oparciu o zmodyfikowaną metodę Jenkinsona i Collisona (1977) z punktem centralnym siatki punktów gridowych znajdującym się w miejscu położenia stacji Łódź-Lublinek (Piotrowski 2023).

Dane odnoszące się do temperatury powietrza na poziomie 850 hPa i zawartości wody opadowej w atmosferze pochodzą z reanalizy ERA5 (Hersbach i in. 2020). Dane z reanalizy ERA5 są powszechnie wykorzystywane w wielu opracowaniach klimatologicznych, a ich dokładność w porównaniu z danymi ze stacji meteorologicznych można uznać za wystarczającą do przeprowadzenia analiz klimatologicznych (Ssenyunzi i in. 2020; Eiras-Barca i in. 2022).

Sezonowe odchylenia temperatury powietrza na poziomie 850 hPa zostały obliczone dla każdego miesiąca oddzielnie, natomiast odchylenia zawartości wody opadowej w atmosferze dla każdego sezonu z osobna. W celu określenia dominujących wzorców przestrzennych zmienności pola wysokości geopotencjalnej poziomu izobarycznego 850 hPa podczas opadów atmosferycznych związanych z AAMP wykorzystano analizę bazującą na empirycznych funkcjach własnych (EOF). Wyróżniono trzy wektory własne dla każdej pory roku oddzielnie. Dane dotyczące wysokości geopotencjalnej poziomu 850 hPa pochodzą z reanalizy ERA5.

Wszystkie wyżej wymienione dane zostały wyznaczone dla czterech kroków czasowych: 00:00, 06:00, 12:00 i 18:00 UTC dla wielolecia 1966–2022.

Wykorzystane w opracowaniu sześciogodzinne sumy opadów atmosferycznych ze stacji Łódź-Lublinek pochodzą z homogenicznej bazy danych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego (IMGW-PIB).

Wyniki

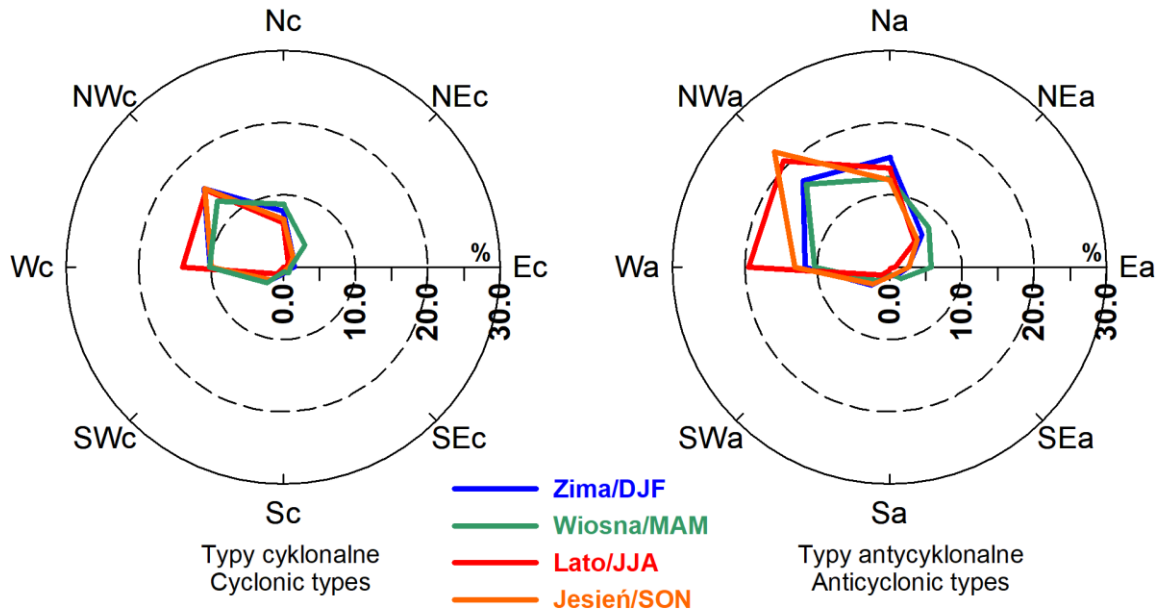
Częstość adwekcji arktycznych mas powietrza

Na podstawie zmodyfikowanej metodyki wyznaczania arktycznych mas powietrza według Geba (1979) arktyczne masy powietrza w latach 1966–2022 stanowiły 8,8% wszystkich przypadków w oparciu o dane z czterech terminów w ciągu doby, z czego 7,14% to masy powietrza Am, 1,57% masy powietrza Ax i zaledwie 0,07% masy powietrza Ac. Największy udział przypadkał na masy powietrza Am (81,3%), które mogą pojawiać się we wszystkich miesiącach roku. Masy powietrza Ax nie pojawiały się tylko latem, natomiast masy Ac nie stwierdzono w analizowanym wieloleciu od kwietnia do grudnia. Masy powietrza arktycznego najczęściej napływają z północnego zachodu i zachodu (szczególnie latem i jesienią) (rys.1). Kierunek zachodni bardziej sprzyja adwekcji mas powietrza polarne, ale trzeba mieć na uwadze kształt trajektorii mas powietrza, który nie jest prostoliniowy, tylko krzywoliniowy, i trajektorie wsteczne w początkowych odcinkach sięgają obszaru źródłowego arktycznych mas powietrza, a dopiero końcowe odcinki przyjmują zachodni kierunek. Ta uwaga odnosi się również dla innych kierunków „nietypowych” w odniesieniu do położenia obszarów źródłowych arktycznych mas powietrza. Napływ AMP we wszystkich porach roku jest najczęściej związany z cyrkulacją antycyklonalną, od 58,0% wiosną do 62,0% latem.

Opady atmosferyczne podczas adwekcji arktycznych mas powietrza

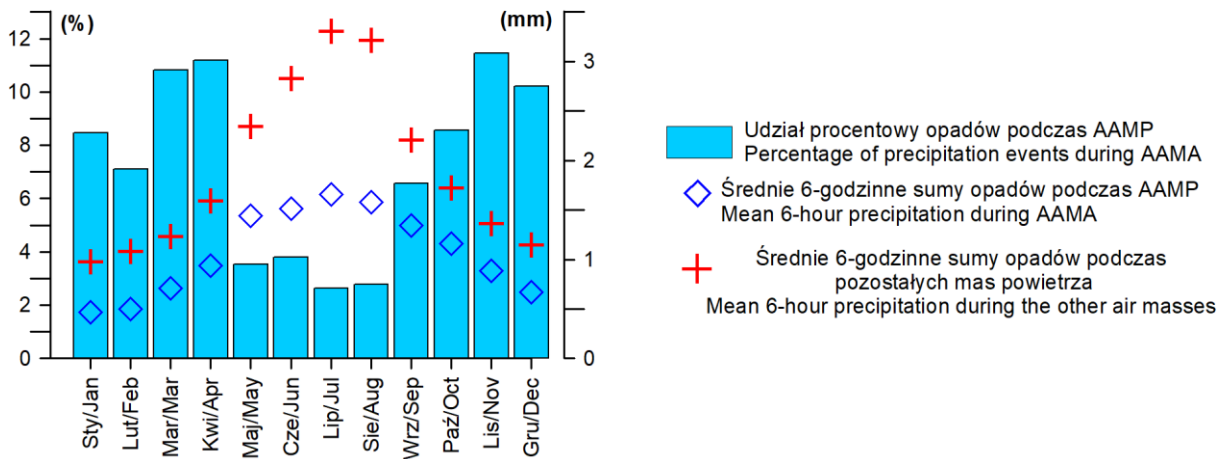
Ze względu na terminy wyznaczania arktycznych mas powietrza incydenty opadowe były analizowane w oparciu o 6-godzinne sumy opadów na stacji Łódź-Lublinek. Analiza opadów atmosferycznych ma za zadanie znalezienie odpowiedzi, jak często pojawiają się opady atmosferyczne podczas AAMP i jaki jest ich wpływ na ich wielkość opadów atmosferycznych. Za istotne uznano też sprawdzenie kierunków i charakteru cyrkulacji atmosferycznej sprzyjających opadom atmosferycznym podczas AAMP.

Incydenty opadowe podczas AAMP stanowiły ogółem 10,24% wszystkich 6-godzinnych incydentów opadowych na stacji Łódź-Lublinek.



Rys. 1. Częstość adwekcji arktycznych mas powietrza na stacji Łódź-Lublinek w zależności od typu cyrkulacji atmosferycznej i pory roku

Seasonal frequency of Arctic air masses at Łódź-Lublinek station in relation to atmospheric circulation types



Rys. 2. Udział procentowy 6-godzinnych incydentów z opadem podczas adwekcji arktycznych mas powietrza (AAMP) w odniesieniu do wszystkich incydentów opadowych oraz średnie 6-godzinne sumy opadów atmosferycznych podczas AAMP i pozostałych sytuacji synoptycznych

Percentage of 6-hour precipitation events during Arctic air-mass advection (AAMA) in relation to all precipitation events and average 6-hour precipitation total during AAMA and other synoptic situations

Przeciętnie opady atmosferyczne były niższe we wszystkich porach roku podczas AAMP w porównaniu ze średnimi sumami opadów podczas pozostałych incydentów opadowych. Latem i zimą 6-godzinne sumy opadów były dwukrotnie niższe, natomiast wiosną i jesienią – były odpowiednio niższe o 1,7 i 1,6 razy (rys. 2).

Najniższe 6-godzinne sumy opadów atmosferycznych podczas AAMP wystąpiły w styczniu

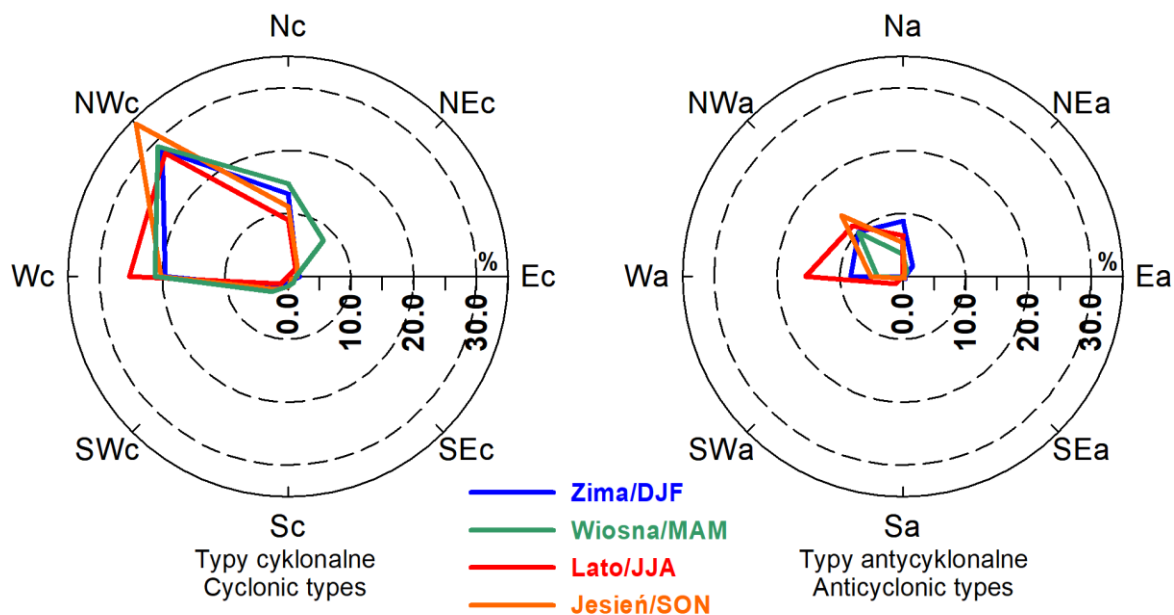
(0,46 mm) i były o 2,1 razy niższe w porównaniu z pozostałymi 6-godzinnymi incydentami opadowymi, natomiast najwyższe odnotowano w lipcu – 1,76 mm (rys. 2). Przebieg roczny 6-godzinnych sum opadów atmosferycznych podczas AAMP wykazuje synchroniczność z przebiegiem sum opadów w pozostałych przypadkach.

Udział procentowy incydentów z opadem podczas AAMP największy był w listopadzie,

kwietniu, marcu i grudniu, natomiast najmniej od maja do sierpnia (rys. 2). Opady podczas AAMP najczęściej występowały zimą, a najrzadziej latem.

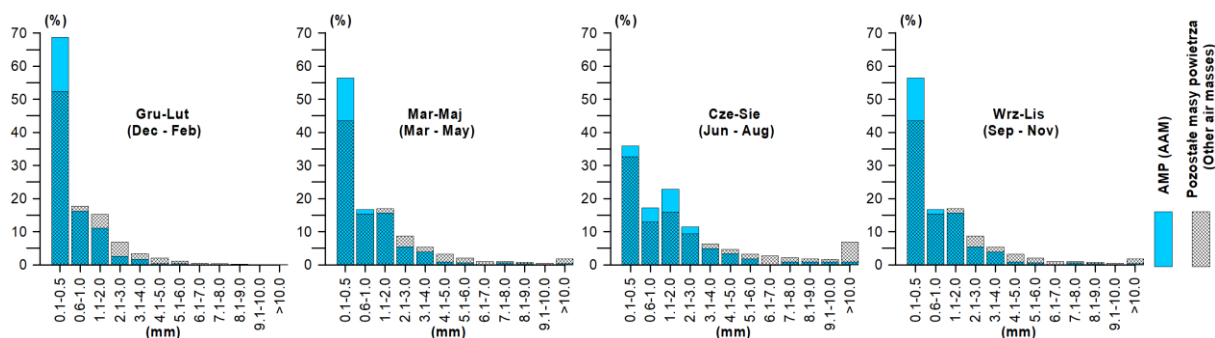
Opady atmosferyczne podczas AAMP najczęściej były związane z napływem mas powietrza z północnego zachodu – najczęściej jesienią (rys. 3). Opadom atmosferycznym sprzyjała najbardziej cyrkulacja cyklonalna. Podczas cyrkulacji antycyklonalnej opady odnotowano tylko w 27,5% przypadków.

Rozkład częstości adwekcji arktycznych mas powietrza (rys. 4) wskazuje na częste pojawianie się niskich 6-godzinnych sum opadów atmosferycznych (0,1–0,5 mm) we wszystkich porach roku w porównaniu z pozostałymi masami powietrza. Od wiosny do jesieni częściej też pojawiały się opady w przedziale 0,6–1,0 mm, a latem i jesienią także w przedziale 1,1–2,0 mm. Ponadto 6-godzinne sumy opadów zimą podczas AAMP nie przekraczały 6 mm.



Rys. 3. Częstość arktycznych mas powietrza podczas opadów atmosferycznych na stacji Łódź-Lublinek w zależności od typu cyrkulacji atmosferycznej i pory roku

Seasonal frequency of Arctic air-mass advection during precipitation events at Łódź-Lublinek station in relation to atmospheric circulation types



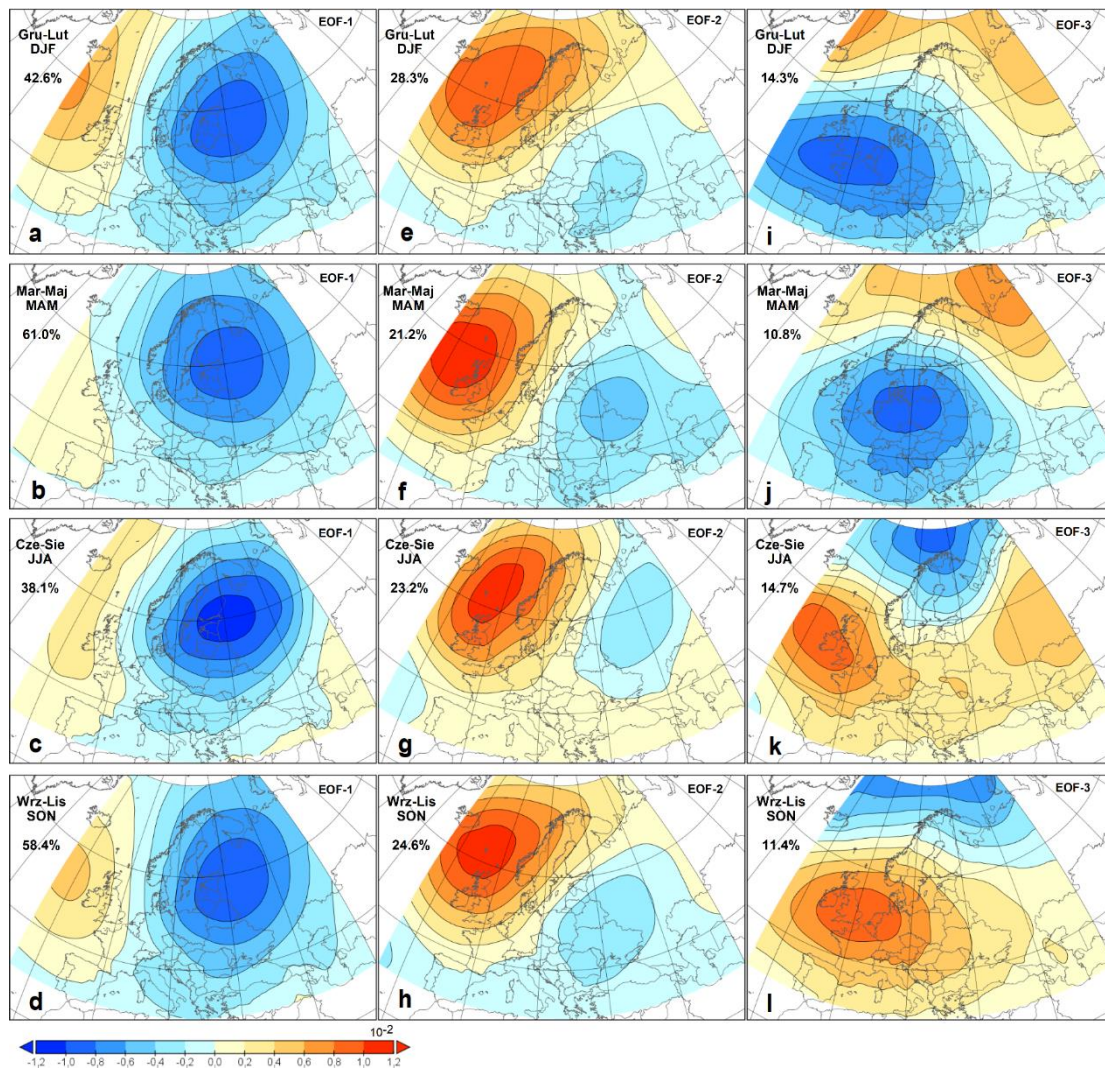
Rys. 4 Histogram 6-godzinnych sum opadów atmosferycznych podczas adwekcji arktycznych mas powietrza (AAMP) i w pozostałych przypadkach

Histogram of 6-hour precipitation total during Arctic air masses advection (AAMA) and other cases

Wzorce przestrzenne układów barycznych sterujących adwekcją arktycznych mas powietrza podczas incydentów opadowych

Dwie pierwsze empiryczne funkcje własne (EOF-1 i EOF-2; rys. 5a–d i rys. 5e–h) wysokości powierzchni izobarycznej 850 hPa dość dobrze oddają rozkład przestrzenny ośrodków barycznych sprzyjających napływowi arktycznych mas powietrza nad centrum Polski we wszystkich porach roku. Pierwszy wektor własny (rys. 5a–d) jest bardzo podobny we wszystkich porach roku. Niż sterujący napływem powietrza arktycznego zlokalizowany jest na północny wschód od Polski. Najwięcej całkowitej wariancji wyjaśnia pierwszy wektor EOF jesienią (61%). Dość duże podobieństwo przestrzenne we wszystkich porach roku wykazuje również drugi wektor własny (rys. 5e–h).

Obszar Polski wówczas znajduje się albo na krańcu niżu (wiosną i jesienią), albo w sytuacji pośredniej pomiędzy cyrkulacją cyklonalną i antycyklonalną (zimną i latem). Każdy z tych rozkładów przestrzennych sprzyja napływowi mas powietrza z północnego wschodu. Bardziej zróżnicowane wzorce rozkładu anomalii wysokości powierzchni 850 hPa są widoczne w przypadku trzeciego wektora własnego (rys. 5i–l) zimną i wiosną. Obszar Polski obejmuje wówczas swym zasięgiem ośrodek niskiego ciśnienia warunkujący napływ powietrza z południowego wschodu, które może pochodzić z obszarów arktycznych, ale może mieć charakter powietrza przetransformowanego nad kontynentem azjatyckim. Latem obszar Polski znajduje się pod wpływem cyrkulacji antycyklonalnej sprzyjającej napływowi powietrza arktycznego z Grenlandii (rys. 5k). Jesienią rozkład



Rys. 5. Przestrzenne wzorce EOF sezonowych anomalii wysokości powierzchni izobarycznej 850 hPa podczas opadów związanych z adwekcją arktycznych mas powietrza (AAMP)

Spatial patterns of the EOF mode for seasonal anomalies of geopotential height of 850 hPa isobaric surface during precipitation associated with Arctic air masses advection (AAMA)

przestrzenny wzorca (rys. 5I) trudny jest do jednoznacznej interpretacji ze względu na niewzględnięcie w analizie EOF obszaru Grenlandii i obszarów Kanady. Należy też mieć na uwadze, że wygenerowany wzorec może słabo nawiązywać do rzeczywistych rozkładów przestrzennych ciśnienia.

Łączna ilość wyjaśnianej przez funkcje własne wariancji wynosi: zimą – 85,2%, wiosną – 93,0%, latem – 76,0%, jesienią – 94,4%.

Rozkład przestrzenny i czasowy temperatury powietrza na poziomie 850 hPa oraz zawartości pary wodnej w atmosferze

Do oceny warunków termicznych związanych z incydentami opadowymi podczas adwekcji arktycznych mas powietrza morskiego wykorzystano odchylenia temperatury powietrza na wysokości powierzchni izobarycznej 850 hPa (OTP850). Wybór masy powietrza arktycznego morskiego do bardziej szczegółowej analizy wynika z jego dużej częstości oraz odmiennych cech termiczno-wilgotnościowych tej masy powietrza w porównaniu z pozostałymi rodzajami mas powietrza arktycznego. Za istotne uznano sprawdzenie w poszczególnych porach roku zmian w czasie rozkładu przestrzennego przeciętnych odchyżeń temperatury powietrza przed wystąpieniem opadu (6, 12 i 24 godziny wstecz), jak i w terminie jego potencjalnego początku (rys. 6). Celem tej analizy było ewentualne sprawdzenie istnienia większych kontrastów termicznych oraz zróżnicowania odchyżeń temperatury powietrza w poszczególnych porach roku.

Wtargnięcie zimnych mas powietrza arktycznego morskiego wywołuje duże ochłodzenie na większości obszaru Europy aż do basenu Morza Śródziemnego (rys. 6) we wszystkich porach roku z najwyższymi ujemnymi anomaliami temperatury w centrum Europy. W żadnej z pór roku nie stwierdzono istnienia dużych kontrastów termicznych nad obszarem Polski i w jej pobliżu (rys. 6). Największe średnie OTP850 wystąpiły jesienią, natomiast najmniejsze zimą. Zimą oraz w przejściowych porach roku można zaobserwować stopniowy spadek OTP850 wraz ze zbliżaniem się terminu potencjalnego początku opadu, oraz przyrost obszaru objętego najniższymi OTP850.

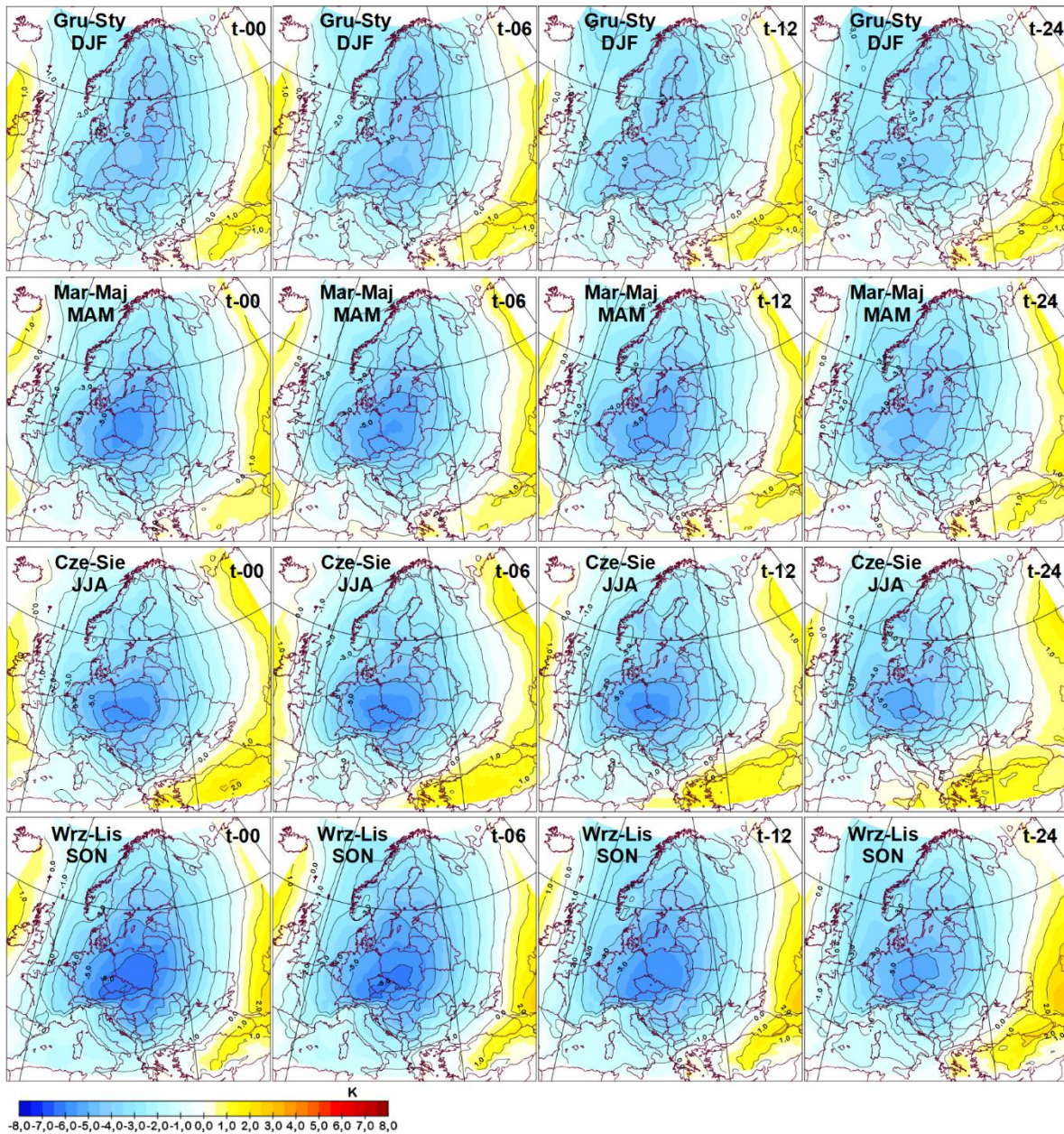
Kolejnym czynnikiem mogącym mieć wpływ na pojawienie się opadów atmosferycznych i ich wielkość jest dostępna ilość wody w atmosferze na obszarze Polski lub w jej pobliżu. Latem widoczny jest nieznaczny wzrost ZWO, począwszy

od 12 godzin wstecz przed wystąpieniem opadu nad centrum niżu lub jego pobliżu, sterującego napływem mas powietrza arktycznego morskiego (rys. 5 i 7). W tej porze roku we wszystkich analizowanych terminach można zauważyć również duże różnice ZWO pomiędzy zachodnią i wschodnią częścią Europy. We wszystkich porach roku anomalie ZWO podczas AAMP i 24 godziny wstecz są ujemne w całej Europie Środkowej (rys. 7). Niewielki wzrost ZWO nad Polską można zauważyć w terminie początkowym (t-00; rys. 7) w porównaniu z terminami 6 i 12 godzin wstecz (t-06, t-12; rys. 7) niemal we wszystkich porach roku oprócz jesieni.

Dyskusja i wnioski

Opady atmosferyczne związane z AAMP nie są zbyt wysokie, ale odgrywają ważną rolę w tworzeniu i utrzymywaniu pokrywy śnieżnej. Arktyczne masy powietrza sprzyjają utrzymywaniu się temperatury powietrza w Łodzi poniżej zera w zdecydowanej większości przypadków. Świadczą o tym wartości temperatury powietrza na 2 m zimą na stacji Łódź-Lublinek z czterech terminów w ciągu doby z lat 1959/60–2017/18 podczas AAMP. W okresie tym odnotowano tylko 12,3% przypadków z dodatnią temperaturą powietrza (Piotrowski 2019).

Obszar źródłowy arktycznych mas powietrza jest obszarem, na którym tempo przyrostu temperatury powietrza jest najwyższe na świecie. Konsekwencje tego mogą być również widoczne w zmianie cech termiczno-wilgotnościowych mas powietrza arktycznego napływających nad Polskę. To z kolei może wpływać na wielkość, częstość oraz charakter opadów atmosferycznych związanych z adwekcją arktycznych mas powietrza. Należy pamiętać, że istotna jest również transformacja mas powietrza arktycznego poza obszarem źródłowym. Pewną rolę w kształtowaniu rozkładu przestrzennego i wysokości opadu atmosferycznego ma także ukształtowanie terenu i wysokość n.p.m. pojezierzy oraz wyżyn i gór w Polsce. Masy powietrza arktycznego morskiego, najczęściej pojawiającego się spośród wyróżnionych rodzajów mas powietrza arktycznego, w większości przypadków docierają do Polski znad obszaru źródłowego z północnego-zachodu poprzez północną część Atlantyku oraz Morze Północne. W trakcie swojej wędrówki masy powietrza Am są przez pewien czas pod wpływem oddziaływania podłoża morskiego, co sprzyja wymianie ciepła i wilgoci pomiędzy tymi ośrodkami fizycznymi. Przewi-

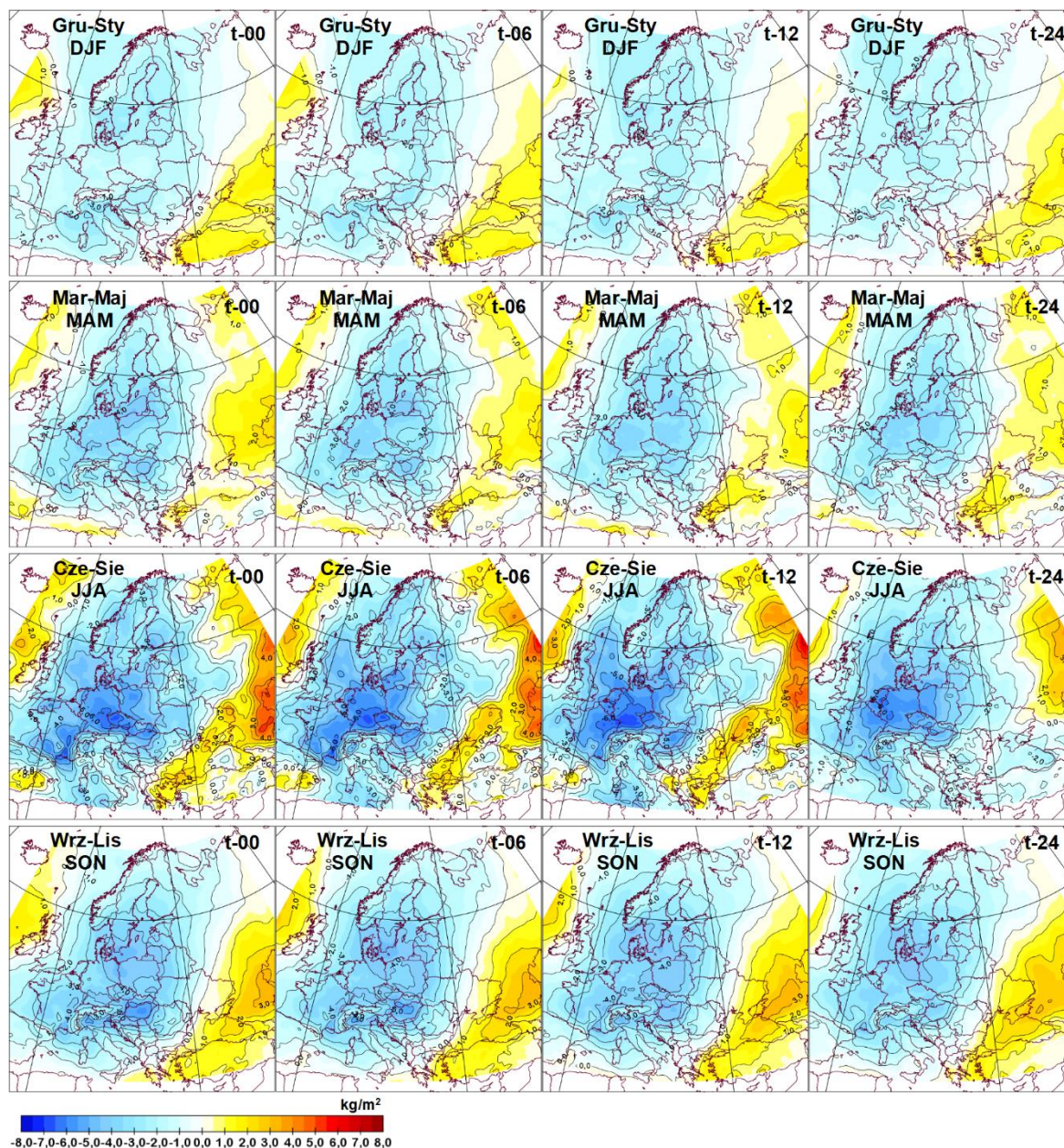


Rys. 6. Zmiany rozkładu czasowo-przestrzennego średnich odchyień temperatury powietrza na wysokości powierzchni 850 hPa podczas incydentów opadowych związanych z adwekcją arktycznych mas powietrza morskiego w poszczególnych porach roku

Spatial and temporal variability of distribution of mean deviations in air temperature at the 850 hPa level height during precipitation events associated with advection of maritime Arctic air masses

duje się, że strumienie ciepła jawnego i utajonego w zimnych, suchych masach powietrza opuszczających Arktykę wzrosną w XXI wieku. Wpłyną na to głównie zimne, suche masy powietrza powstające nad arktycznym lodem morskim lub lądem, które są transportowane nad otwarty ocean, gdzie odbierają ciepło i wilgoć, co z kolei wpływa na pojawianie się opadów atmosferycznych (Papritz, Sodemann 2018; Pithan, Mauritsen 2018).

Opady atmosferyczne podczas AAMP we wszystkich porach roku są zazwyczaj powiązane z układami cyklonalnymi, co potwierdza pierwszy wektor własny odchyień wysokości powierzchni geopotencjalnej 850 hPa. Według Bengtssona i in. (2009) skumulowane opady wzdłuż torów cyklonów szerokości umiarkowanych wzrastają o około 11% na tor, czyli około dwukrotnie więcej niż globalne opady, podczas gdy ekstremalne opady są



Rys. 7. Zmiany rozkładu czasowo-przestrzennego średnich odchyleń zawartości wody opadowej w atmosferze podczas incydentów opadowych związanych z adwekcją arktycznych mas powietrza morskiego w poszczególnych porach roku

Spatial and temporal variability of distribution of mean deviations in precipitable water during precipitation events associated with advection of maritime Arctic air masses

zbliżone do uśrednionego globalnie wzrostu kolumny pary wodnej. Opierając się na analizie autorów, można więc spodziewać się podobnych zależności w przypadku większości incydentów opadowych związanych z AAMP. Aby mieć jednak pewność, konieczne jest sprawdzenie tego założenia.

Wzorce przestrzenne wygenerowane metodą EOF podczas pojawiania się opadów atmosferycznych nad analizowaną stacją pozwoliły na sku-

teczną identyfikację układów barycznych sprzyjających adwekcji arktycznych mas powietrza, oprócz trzeciego wektora własnego jesienią.

Podczas incydentów opadowych związanych z adwekcją arktycznych mas powietrza nie stwierdzono wysokiej zawartości wody opadowej na obszarze Polski i w jej pobliżu, co nie oznacza, że w takiej sytuacji nie może dochodzić do pojawiania się wysokich sum opadów atmosferycznych. Z analizy przeprowadzonej przez Bernasa i Kolen-

dowicza (2013) wynika, że wysokie opady mogą również pojawiać się przy niezbyt dużej zawartości wody opadowej w powietrzu. Opady mogą nawet wielokrotnie przewyższać aktualną zawartość wody opadowej w atmosferze (Świątek 2013; Kozuchowski 2016). Większą rolę w formowaniu się opadów należy raczej przypisać sprzyjającym warunkom do kondensacji pary wodnej podczas napływu zimnych arktycznych mas powietrza nad cieplejsze podłoże.

Opracowanie zostało wykonane w ramach grantu NCN 2019/33/B/ST10/01136.

Literatura

- Bailey H., Hubbard A., Klein E.S., Mustonen K.R., Akers P.D., Marttila H., Welker J.M. 2021. Arctic sea-ice loss fuels extreme European snowfall. *Nature Geoscience* 14(5): 283-288.
- Bednorz E. 2014. Wybrane przypadki obfitych opadów śniegu w Poznaniu. *Badania Fizjograficzne – Seria A – Geografia Fizyczna* 65: 23-37.
- Bengtsson L., Hodges K.I., Keenlyside N. 2009. Will extratropical storms intensify in a warmer climate? *Journal of Climate* 22(9): 2276-2301.
- Bernas M., Kolendowicz L. 2013. Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na występowanie ekstremalnych opadów atmosferycznych w Poznaniu w latach 1920–2010. *Badania Fizjograficzne 4 – Seria A – Geografia Fizyczna*: 7-27.
- Bołaszevska J., Reutt F. 1962. Częstotliwość występowania poszczególnych mas powietrza w Polsce w okresie 10 lat 1946–1956. *Prace PIHM* 66: 16-32.
- Buchert L. 2006. Częstość występowania mas powietrznych w rejonie Poznania w latach 1965–1990. *Przegląd Geofizyczny* 51(3–4): 237-243.
- Eiras-Barca J., Algarra I., Nieto R., Schröder M., Hegglin M.I., Gimeno L. 2022. Analysis of the main source regions of moisture transport events with the new ESA CCI/CM-SAF total column water vapour climate data record (v2). *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 148(748): 3272-3286.
- Geb M. 1971. Neu Aspekte und Interpretationen zum Luftmassen- und Frontkonzept. *Meteorologische Abhandlungen der FU-Berlin* 109(2).
- Geb M. 1979. Prognose der Tageshöchsttemperatur im Sommerhalbjahr aufgrund einer Luftmassenstatistik für Berlin. Beilage zur Berliner Wetterkarte des Instituts für Meteorologie der Freien Universität Berlin.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.N. 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146: 1999-2049.
- Jenkinson A.F., Collison F.P. 1977. An initial climatology of gales over the North Sea. *Synoptic Climatology Branch Memorandum* 62. Bracknell, Meteorological Office.
- Jędruszkiewicz J., Zieliński M. 2016. Zróżnicowanie wysokich dobowych sum opadów w Łodzi i okolicach na tle cyrkulacji atmosferycznej. *Acta Geographica Lodziensia* 104: 201-211.
- Johannessen O.M., Bengtsson L., Miles M.W., Kuzmina S.I., Semenov V.A., Alekseev G.V., Nagurnyi A.P., Zakharov V.F., Bobylev L.P., Pettersson L.H., Hasselmann K., Cattle H.P. 2004. Arctic climate change: observed and modelled temperature and sea-ice variability. *Tellus A* 56: 328-341.
- Kaszewski B.M. 1977. Warunki synoptyczne napływu powietrza arktycznego i zwrotnikowego nad środkowowschodni makroregion Polski (1961–1970). *Przegląd Geofizyczny* 22(1):49-54
- Kaszewski B.M., Bartoszek K., Gluza A. 2017. Synoptyczne uwarunkowania napływu mas powietrza arktycznego i zwrotnikowego nad Lubelszczyznę. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska, Sectio B – Geographia, Geologia, Mineralogia et Petrographia* 72(2): 7-26.
- Kierklo K. 2012. Variability of air masses over Podlasie (NE Poland) in the years 2001–2010. *Bulletin of Geography – Physical Geography* 5: 87-113.
- Kotas P., Twardosz R., Nieckarz Z. 2013. Variability of air mass occurrence in southern Po-

- land (1951–2010). *Theoretical and Applied Climatology* 114: 615-623.
- Kożuchowski K.M. 2016. Zawartość wody opadowej w atmosferze i opady w Polsce. *Przegląd Geofizyczny* 3–4: 151-169.
- Malinowska M., Miętus M. 2010. Opady o dużym natężeniu w Gdyni i ich uwarunkowania atmosferyczne. W: T. Ciupa, R. Suligowski (red.) *Woda w badaniach geograficznych*. Instytut Geografii Uniwersytetu Jana Kochanowskiego, Kielce: 49-58.
- Niedźwiedź T. 2003. Słownik meteorologiczny 496. Polskie Towarzystwo Geofizyczne, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa.
- Papritz L., Sodemann H. 2018. Characterizing the local and intense water cycle during a cold air outbreak in the Nordic seas. *Monthly Weather Review* 146(11): 3567-3588.
- Piotrowski P. 2019. Zastosowanie zmodyfikowanego schematu klasyfikacji mas powietrza do wyznaczenia arktycznych mas powietrza nad centrum Polski. Ogólnopolska Konferencja Naukowa z okazji 50-lecia Zakładu Klimatologii w Poznaniu pt. „Zmienność klimatu Polski i Europy oraz jej cyrkulacyjne uwarunkowania”, 21–23 listopada 2019 roku (niepublikowane).
- Piotrowski P. 2023. The variability of atmospheric circulation over Poland in the years 1950–2021. *Acta Geographica Lodziensia* 113: 77-88.
- Pithan F., Mauritsen T. 2014. Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models. *Nature Geoscience* 7: 181-184.
- Serreze M.C., Barry R.G. 2011. Processes and impacts of arctic amplification: A research synthesis. *Global and Planetary Change* 77 (1–2): 85-96.
- Ssenyunzi R.C., Oruru B., D’ujanga F.M., Reali E., Barindelli S., Tagliaferro G., von Engel A., van de Giesen N. 2020. Performance of ERA5 data in retrieving precipitable water vapour over East African tropical region. *Advances in Space Research* 65(8):1877-1893.
- Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D., Stunder B.J.B., Cohen M.D., Ngan F. 2015. NOAA’s HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System”. *Bulletin of the American Meteorological Society* 96 (12): 2059-2077.
- Suwała K. 2014. Synoptic conditions of the occurrence of hail in central Europe. Niepublikowana praca doktorska. Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Poznań.
- Szychta M.A. 2002. Częstość występowania mas powietrza nad Polską w 25-leciu 1970–1995. W: Z. Górka, A. Jelonek (red.) *Geograficzne uwarunkowania rozwoju Małopolski*. Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Jagielloński, Kraków: 239-243.
- Świątek M. 2013. Advection of air masses responsible for extreme rainfall totals in Poland, and exemplified by catastrophic floods in Raciborz (July 1997) and Dobczyce (May 2010). *Acta Agrophysica* 20(3): 481-494.
- Walsh J.E., Fetterer F., Stewart J.S., Chapman W.L. 2016. A database for depicting Arctic sea ice variations back to 1850. *Geographical Review* 107(1): 89-117.
- Warakomski W. 1969. Częstość występowania dni i okresów z poszczególnymi typami mas powietrza nad Polską (1951–1960). *Przegląd Geofizyczny* 14(1): 67-77.
- Więclaw M. 2009. Roczna i wieloletnia zmienność częstości występowania mas powietrza w Bydgoszczy. W: Z.B. Babiński (red.) *Środowisko przyrodnicze w badaniach geografii fizycznej* 4. Uniwersytet Kazimierza Wielkiego, Bydgoszcz: 105-118.
- Yu L., Zhong S. 2021. Trends in Arctic seasonal and extreme precipitation in recent decades. *Theoretical and Applied Climatology* 145: 1541-1559.

Summary

Precipitation at the Łódź-Lublinek station from 1966 to 2022 during Arctic air-mass advection (AAMA) in all seasons is usually associated with cyclonic circulation. The first EOF mode indicate favourable conditions for AAMAs when locating the low-pressure system north-east of the borders of Poland. The spatial patterns of pressure distribution at 850 hPa generated by the EOF method make it possible to effectively identify baric systems that favour the advection of Arctic air masses over the centre of Poland. Precipitation during AAMA most often occurs during the inflow of air masses from the north-west – most often in autumn. Mean six-hour precipitation totals during

AAMA in all seasons are slightly lower than average precipitation totals during other precipitation events. AAMA, due to their thermal conditions, favour the persistence of snow cover and snowfall during precipitation events. The percentage of precipitation during AAMA in relation to all six-hour precipitation events ranges from 2.6% in July to 11.5% in November, while average precipitation ranges from 0.47 mm/6 hours in January to 11.45 mm/6 hours in November. Precipitable water during AAMA is relatively low in all seasons. Precipitable water is a factor that allows precipitation to form during the AAMA, but not the most important one. Of greater importance seem to be the conditions that favour condensation that occur when cold Arctic air masses are in contact with warmer air masses.