



Robert Twardosz, Ewa Łupikasza, Tadeusz Niedźwiedź

Zmienność i uwarunkowania cyrkulacyjne występowania postaci i typów opadów atmosferycznych na przykładzie Krakowa

**Temporal variability in the form and type
of precipitation in Kraków in relation
to circulation patterns**

Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego

**Zmienność i uwarunkowania cyrkulacyjne
występowania postaci i typów opadów
atmosferycznych na przykładzie Krakowa**

Temporal variability in the form and type
of precipitation in Kraków in relation
to circulation patterns

Robert Twardosz, Ewa Łupikasza, Tadeusz Niedźwiedź

Zmienność i uwarunkowania cyrkulacyjne występowania postaci i typów opadów atmosferycznych na przykładzie Krakowa

**Temporal variability in the form and type
of precipitation in Kraków in relation
to circulation patterns**

Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego

Praca naukowa finansowana przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach Projektu Badawczego o numerze N N306119936 zrealizowanego we współpracy między Zakładem Klimatologii Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego i Katedrą Klimatologii Wydziału Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego w latach 2009–2011

RECENZENCI

dr hab. Bogusław Michał Kaszewski, prof. UMCS
prof. dr hab. Janina Trepińska

PROJEKT OKŁADKI

Paweł Bigos

© Copyright by Robert Twardosz, Ewa Łupikasz, Tadeusz Niedźwiedz & Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego
Wydanie I, Kraków 2011
All rights reserved

Niniejszy utwór ani żaden jego fragment nie może być reprodukowany, przetwarzany i rozpowszechniany w jakikolwiek sposób za pomocą urządzeń elektronicznych, mechanicznych, kopiujących, nagrywających i innych oraz nie może być przechowywany w żadnym systemie informatycznym bez uprzedniej pisemnej zgody Wydawcy

ISBN 978-83-233-3177-3, e-ISBN (wersja elektroniczna) 978-83-233-8939-2



www.wuj.pl

Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego
Redakcja: ul. Michałowskiego 9/2, 31-126 Kraków
tel. 12-631-18-80, tel./fax 12-631-18-83
Dystrybucja: tel. 12-631-01-97, tel./fax 12-631-01-98
tel. kom. 0506-006-674, e-mail: sprzedaz@wuj.pl
Konto: PEKAO SA, nr 80 1240 4722 1111 0000 4856 3325

SPIS TREŚCI

CZĘŚĆ I

1. WSTĘP	7
1.1. Wprowadzenie	7
1.2. Klasyfikacje postaci i typów opadów atmosferycznych	10
1.3. Zagadnienie postaci i typów opadów w literaturze	11
1.4. Materiał badawczy	13
1.4.1. Dane opadowe	13
1.4.2. Typologia układów cyrkulacyjnych według T. Niedźwiedzia	17
1.5. Metody badań	19
2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA OPADÓW ATMOSFERYCZNYCH W KRAKOWIE	23
2.1. Liczba dni z opadem	23
2.2. Sumy opadów	27
3. CYRKULACJA ATMOSFERYCZNA W POLSCE POŁUDNIOWEJ	33
3.1. Typy cyrkulacji	33
3.2. Masy powietrzne	34
3.3. Fronty atmosferyczne	36

CZĘŚĆ II

4. OPADY CIEKŁE	37
4.1. Występowanie i sumy opadów ciekłych	37
4.2. Związek opadów ciekłych z temperaturą powietrza	42
4.3. Zmienność wieloletnia liczby dni i sum opadów ciekłych	44
4.4. Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na opady ciekłe	52
4.4.1. Związek opadów ciekłych z typami cyrkulacji	52
4.4.2. Związek opadów ciekłych z masami powietrznymi i frontami atmosferycznymi	57
4.4.3. Związek opadów ciekłych ze wskaźnikami cyrkulacji	63
5. OPADY ŚNIEGU	69
5.1. Okres występowania opadów śniegu	69
5.2. Występowanie i sumy opadów śniegu	72

5.3. Zmienność wieloletnia liczby dni i sum opadów śniegu.....	75
5.4. Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na opady śniegu.....	85
5.4.1. Związek opadów śniegu z typami cyrkulacji.....	85
5.4.2. Związek opadów śniegu z masami powietrznymi i frontami atmosferycznymi	90
5.4.3. Związek opadów śniegu ze wskaźnikami cyrkulacji.....	95
6. OPADY MIESZANE.....	99
6.1. Występowanie i sumy opadów mieszanych	99
6.2. Zmienność wieloletnia liczby dni i sum opadów mieszanych	102
6.3. Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na opady mieszane	111
6.3.1. Związek opadów mieszanych z typami cyrkulacji	111
6.3.2. Związek opadów mieszanych z masami powietrznymi i frontami atmosferycznymi	114
6.3.3. Związek opadów mieszanych ze wskaźnikami cyrkulacji.....	121
7. OPADY BURZOWE I GRADY.....	125
7.1. Występowanie i sumy opadów burzowych	125
7.2. Zmienność wieloletnia liczby dni i sum opadów burzowych	130
7.3. Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na opady burzowe.....	135
7.3.1. Związek opadów burzowych z typami cyrkulacji	135
7.3.2. Związek opadów burzowych z masami powietrznymi i frontami atmosferycznymi	138
8. OPADY MARZNĄCE	143
9. ZMIENNOŚĆ LICZBY DNI Z OPADEM W LATACH 1812–1855	147
9.1. Przebieg roczny	147
9.2. Przebieg wieloletni	151
10. PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....	157
LITERATURA.....	163

CZĘŚĆ I

1. WSTĘP

1.1. Wprowadzenie

Praca zawiera wyniki badań dotyczących zmienności rocznej i wieloletniej oraz uwarunkowań cyrkulacyjnych postaci i typów opadów atmosferycznych. Podstawę opracowania stanowi sekularna seria obserwacji opadów przy dawnym Obserwatorium Astronomicznym Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie. Przeprowadzone bardzo szczegółowe badania opadów były możliwe dzięki finansowemu wsparciu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach Projektu Badawczego o numerze **NN306119936**, realizowanego we współpracy między Zakładem Klimatologii Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego i Katedrą Klimatologii Wydziału Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego w latach 2009–2011.

Z czwartego raportu Międzyrządowego Zespołu ds. Zmian Klimatu (IPCC, 2007) dowiadujemy się, że średnia globalna temperatura powietrza w latach 1906–2005 wzrosła o około $0,74^{\circ}\text{C}$, a największa koncentracja lat ciepłych wystąpiła na przełomie XX i XXI wieku. W świetle oceny współczesnych zmian klimatu w Europie (Klein Tank i in., 2002) potwierdza się bezprecedensowy wzrost temperatury w ostatnich latach. Wzrost ten jest szczególnie silnie zaznaczony w zachodniej i środkowej Europie, gdzie trendy wzrostowe przekraczają $0,5^{\circ}\text{C}$ na 10 lat (rys. 1.1). Ocieplenie przybrało duże rozmiary w pierwszym dziesięcioleciu XXI wieku; temperatura średnia roczna była wyższa od średniej wieloletniej, np. w Krakowie średnia temperatura w roku 2000 i 2008 osiągnęła aż $11,0^{\circ}\text{C}$ i była najwyższa w całym okresie prowadzonych pomiarów instrumentalnych 1792–2008 (rys. 1.2). Wyjątkowo wysokie wartości temperatury powietrza występowały w sezonach letnich 2003 i 2006 roku (Twardosz, 2009), a na skutek silnego stresu gorąca śmierć poniosło wielu mieszkańców Europy Zachodniej.

Mówiąc o współczesnych zmianach klimatu, mamy na myśli przede wszystkim zmiany temperatury. O ile w przebiegu wieloletnim temperatury powietrza stwierdza się istotny statystycznie trend wzrostowy, to w przypadku opadów atmosferycznych trendy zmian nie są już tak jednoznaczne. Jak stwierdził K. Kożuchowski (2004), w przypadku opadów mamy do czynienia raczej z nieregularnymi fluktuacjami i przemieszczaniem się nadmiarów i niedoborów opadów aniżeli z trwałym ich trendem. Scenariusze zmian opadów uzyskiwane z modeli klimatycznych są obciążone znacznie większym błędem niż temperatury powietrza (Bradley i in., 1987; Kożuchowski,

2004). Przewidywanie opadów na dalszą przyszłość jest trudne ze względu na ich dużą zmienność czasową i przestrzenną. Trzeba pamiętać także o tym, że o występowaniu opadów decyduje nie tylko temperatura, ale także wiele innych czynników.

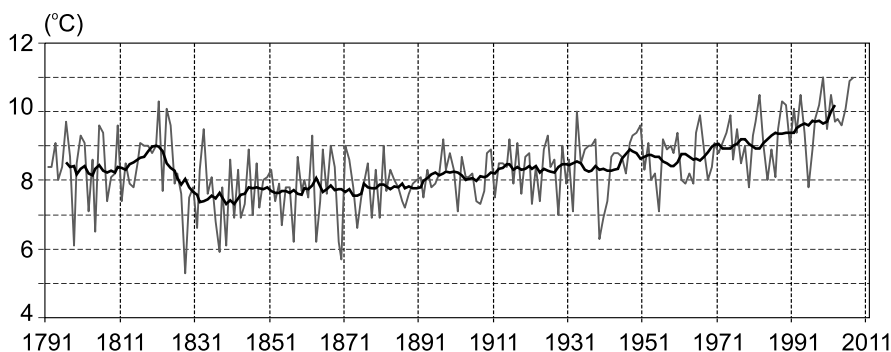
Opady atmosferyczne można opisywać ze względu na różne cechy. Badania zmian i zmienności opadów najczęściej opierają się na ich podstawowej charakterystyce – sumach, co wynika z faktu, że większość pomiarów opadu, np. z deszczomierzy, dotyczy tylko ilości spadłej wody w określonym przedziale czasu, najczęściej doby lub miesiąca. Jest też wiele innych, chociaż rzadziej stosowanych charakterystyk opadu, takich jak częstość występowania, natężenie czy postać i typ opadów.

Postać opadów zależy od stanu skupienia wody docierającej do podłoża. Jeśli woda dociera do podłoża w stanie ciekłym, to mówimy wtedy o opadach ciekłych, np. deszczu, jeśli zaś dociera w stanie stałym, to mówimy o opadach stałych, np. śniegu. Ze względu na fakt, że do opadów stałych zaliczane są także opady gradu, które omawiane są łącznie z burzami, w dalszej części pracy jako przeciwieństwo opadów ciekłych będą traktowane opady śnieżne (patrz rozdział 5). Różne postacie opadu mogą występować razem, np. deszcz i śnieg – opad mieszany. Gdy podczas opadu występują zjawiska atmosferyczne, np. burza, to możemy mówić o określonym typie opadu, np. opadzie burzowym, burzy z gradem itd. Typ opadu możemy traktować jako pojęcie bardziej ogólne. Na przykład, wydzielając opady ze względu na ich pochodzenie, mówimy o typie genetycznym opadu – frontowym lub wewnątrzmasowym. Należy tu zaznaczyć, że w literaturze anglosaskiej na określenie pochodzenia opadu nie stosuje się pojęcia *typ genetyczny opadu*, tylko typ opadu.

Charakterystyka dotycząca postaci i typów opadów jest rzadko stosowana w opracowaniach klimatologicznych, głównie ze względu na fakt, że w wielu bazach danych i publikacjach rocznikowych pomija się szczegółowe informacje o rodzaju opadu. Kodowanie rodzajów opadów wymaga bowiem dokładnych informacji o zjawiskach meteorologicznych, których uzyskanie jest możliwe tylko w przypadku całodobowych obserwacji wizualnych. Dlatego też niewiele jest stacji meteorologicznych na świecie, w których dysponuje się sekularnymi ciągami danych o postaci i typie opadu.

Klasyfikacja postaci opadów atmosferycznych może być także dokonana w sposób pośredni. Polega ona na wykorzystaniu empirycznej zależności postaci opadu od temperatury dolnej warstwy atmosfery (Kupczyk, 1997). Ta automatyczna klasyfikacja wykazuje jednak wiele niedoskonałości. Jak podkreśliła E. Kupczyk (1997), w porach przejściowych, zwłaszcza w strefie umiarkowanych szerokości geograficznych, występują duże wahania temperatury powietrza i warunków tworzenia się opadów w ciągu doby.

Badania postaci i typów opadów, zwłaszcza opadów śnieżnych i burzowych, mają duże znaczenie klimatyczne. Wielu klimatologów podkreśla, że śnieg i pokrywa śnieżna są ważnym komponentem systemu klimatycznego, który może być dobrym wskaźnikiem sprawdzania i monitoringu zmian globalnych (Namias, 1985; Dobrowolny, 1993; Jaagus, 1997; Hantel i in., 2000; Huntington i in., 2004; Twardosz, 2010). Jeśli następuje istotny wzrost temperatury powietrza, to wydaje się słuszne założenie, że można oczekiwać w zimie spadku częstości opadów śnieżnych na korzyść opadów ciekłych oraz wzrostu częstości opadów konwekcyjnych w lecie. Tak



Rys. 1.2. Przebieg wieloletni średniej rocznej temperatury powietrza w Krakowie; wartości wygładzone 11-letnim filtrem Gaussa (1792–2008)

Fig. 1.2. Long-term variation in mean annual temperature in Kraków; values are smoothed by the 11-year Gaussian low pass filter (1792–2008)

postawiona hipoteza badawcza jest jednak tylko pozornie prosta. Występowanie opadów atmosferycznych, bez względu na ich postać i typ, zależy bowiem nie tylko od temperatury powietrza. Istnieje wiele innych czynników decydujących o opadach, spośród których duże znaczenie ma zawartość pary wodnej w powietrzu, a także uwarunkowania lokalne, związane np. z rodzajem podłoża. Ponadto, jak stwierdził H. Ye (2008), złożoność systemu klimatycznego oraz sprzężenia zwrotne w nim występujące między poszczególnymi jego komponentami powodują, że zrozumienie relacji między typem opadu a jego częstotliwością nie jest łatwe, zwłaszcza w wysokich szerokościach geograficznych, gdzie w porze chłodnej temperatura powietrza często osiąga wartość poniżej punktu zamarzania. Jak podkreślili R.E. Davis i in. (1999), relacje między opadem a temperaturą powietrza są słabo rozpoznane i udokumentowane. Z kolei badanie zmian opadów burzowych może być przydatne do weryfikacji często prezentowanej w literaturze klimatologicznej hipotezy o rosnącej częstotliwości występowania silnych opadów, a także o prognozowanym wzroście natężenia opadów w strefie umiarkowanej. Opady śnieżne, jak i burzowe są istotnym ogniwem w obiegu wody (Changnon, 2001). Badanie postaci i typów opadów jest zatem przydatne nie tylko w aspekcie badań współczesnych zmian klimatycznych, ale także oceny ich wpływu na cykl hydrologiczny. Potencjalne korzyści lub straty wynikłe z prognozowanego wzrostu opadów w Polsce pod wpływem ocieplania klimatu są zależne od tego, w jakiej postaci opady będą występować oraz jakie będą osiągać natężenie. Podobne pytanie sformułował H. Ye (2008) w odniesieniu do przewidywanych zmian opadów w wysokich szerokościach geograficznych.

Należy także wskazać na praktyczny aspekt badań postaci i typów opadów. Istnieje wiele niedogodności, zwłaszcza w miastach oraz transporcie drogowym i lotniczym, powstających na skutek występowania silnych opadów śnieżnych (Spreitzhofer, 1999a) i opadów marznących (Gay i Davis, 1993; Changnon i Creech, 2003;

Changnon i Karl, 2003; Changnon i Changnon, 2006; Houston i Changnon, 2007). Opady śnieżne, w odpowiednich warunkach termicznych, tworzą pokrywę śnieżną, z którą mogą być związane groźne zdarzenia i zjawiska; szybkie jej topnienie może wywołać gwałtowne wezbrania i w konsekwencji powódź na znacznym obszarze (Kossowska-Cezak i Bajkiewicz-Grabowska, 2008). Ponadto występowanie pokrywy śnieżnej o znacznej grubości może być przyczyną katastrof budowlanych. Warto w tym miejscu wspomnieć o największej katastrofie budowlanej, jaka zdarzyła się w Polsce 28 stycznia 2006 roku. Podczas trwania wystawy gołębi pocztowych zawalił się dach hali Międzynarodowych Targów Katowickich, w wyniku czego zginęło 65 osób, a ponad 170 zostało rannych, w tym 13 cudzoziemców. Bezpośrednią przyczyną tej tragedii była zalegająca na dachu gruba warstwa lodu i śniegu. W porze letniej występują również utrudnienia w komunikacji i transporcie spowodowane przez opady burzowe o dużym natężeniu. W miastach często dochodzi do niedrożności sieci kanalizacji burzowej, co skutkuje lokalnymi podtopieniami i zalewaniem terenów niżej położonych. Takie zdarzenia zwykle powodują duże straty finansowe, np. w USA sięgają one miliardów dolarów (Changnon i Creech, 2003).

1.2. Klasyfikacje postaci i typów opadów atmosferycznych

Światowa Organizacja Meteorologiczna (WMO, 1988) przy obserwacjach i w depeszach synoptycznych wyróżnia aż 100 kodów „ww” (00–99), którym są przypisane zjawiska występujące w czasie obserwacji bądź w ciągu godziny poprzedzającej obserwację (ww = 20–29), oraz dziesięciocyfrowe kody „W1” i „W2” (0–9) w celu określenia najważniejszych zjawisk atmosferycznych, jakie występowały między kolejnymi terminami obserwacji (tzw. pogoda ubiegła). W większości tych kodów są zawarte informacje o opadzie. Tak rozbudowana, bardzo szczegółowa skala zjawisk jest uniwersalna, tzn. przystosowana do różnych typów klimatu. W związku z tym niektóre z tych zjawisk w umiarkowanych szerokościach geograficznych występują rzadko lub w ogóle się nie pojawiają. Dlatego też w opracowaniach klimatologicznych znalazła zastosowanie klasyfikacja postaci i typów opadów zaproponowana przez T. Niedźwiedzia (tab. 1.1), wykorzystana np. w pracy R. Twardosza (2007a) oraz R. Twardosza i in. (2010a), a także w bazach danych opadowych. W klasyfikacji tej każdemu opadowi dobowemu przypisuje się tylko jeden kod postaci i typu według 10-stopniowej skali (w której uwzględniono także dni bezopadowe, ale z burzą oraz dni z opadem śladowym z burzą). Numer kodu informuje o postaci opadu, tj. ciekłym lub śnieżnym, a także jednocześnie o występujących opadach mieszanych oraz dodatkowo o zjawiskach burzowych. Do opadów burzowych zalicza się tylko te, którym towarzyszyły zjawiska akustyczne (grzmoty) i elektryczne (błyskawice). Burze oznaczono numerami 6, 7, 8 i 9. Numery od 7 do 9 dotyczą tylko opadów burzowych o różnej postaci; numer 6 dotyczy dni z burzą odległą, ale bez opadów w miejscu obserwacji. Zatem suma przypadków kodów opadów od 6 do 9 daje informację o liczbie dni z burzą.

Tabela 1.1. Kody typów opadów atmosferycznych i towarzyszące im zjawiska atmosferyczne (opracowane przez T. Niedźwiedzia) oraz odpowiadające im kody zjawisk WMO: ww oraz W1–W2

Table 1.1. Codes of precipitation types with accompanying weather phenomena (according to T. Niedźwiedź) and corresponding ww and W1–W2 WMO weather codes

Numer kodu Code number	Charakterystyka zjawisk Phenomena characteristic	ww	W1–W2
0	Dzień bez opadu i burzy Day without precipitation and thunderstorm	00–16, 30–39	0–3
1	Deszcz, mżawka (opad ciekły) Rain, drizzle (liquid precipitation)	20–21, 24, 25, 50–59, 60–67, 80–82	5, 6, (8)
2	Deszcz ze śniegiem (opad mieszany) Rain with snow (mixed precipitation)	23, 68–69, 83–84	
3	Śnieg – różne postacie (śnieg, śnieg ziarnisty, igły lodowe, krupa śnieżna) Snow – different forms (also diamond dust, snow crystals, snow grains, ice pellets)	22, 26–27, 70–78, 85–88	7 (8)
4	Brak opadów, w deszczomierzu woda z osadu, mgły No precipitation, water in rain-gauge from deposits or fog with rime	28, 40–49	4
5	Grad bez burzy Hail without thunderstorm	90–91	
6	Burza odległa, bez opadu na stacji lub z opadem śladowym na stacji Distant thunderstorm, no precipitation at the station or trace precipitation	17	
7	Burza z opadem śniegu lub śniegu z deszczem Thunderstorm with snow or mixed precipitation	93–94	
8	Opad burzowy (tylko deszcz, bez śniegu i gradu) Thunderstorm with rain (without snow and hail)	29, 91–95, 97–98	9
9	Burza z opadem gradu Thunderstorm with hail (hailstorm)	96, 99	

1.3. Zagadnienie postaci i typów opadów w literaturze

W Polsce, jak i na świecie najczęściej uwagi – jak dotychczas – poświęcano opadom w postaci śnieżnej, a zwłaszcza opadom śnieżnym. Wynika to stąd, że obecnie dużą wagę przywiązuje się do rozpoznania reakcji opadów śnieżnych na współczesne ocieplenie klimatu (Davis i in., 1999; IPCC, 2007; Ye, 2008), co zostało omówione we wprowadzeniu.

Starsze opracowania opadów śnieżnych w Polsce dotyczyły głównie ich rozkładu przestrzennego. Do pionierskich opracowań w tym zakresie należy praca R. Merckiego (1915). Badacz ten określił udział opadów w postaci śnieżnej w ogólnej sumie opadów. Opis rozkładu przestrzennego udziału opadów stałych w ogólnej su-

mie opadów w Polsce znajdujemy w pracy L. Bartnickiego (1955), L. Bartnickiego i Z. Wierzbickiego (1962) oraz Z. Wierzbickiego (1959). A. Kosiba (1954) scharakteryzował przestrzenne zróżnicowanie opadów śnieżnych na Śląsku. Charakterystykę warunków śniegowych w Karpatach polskich przedstawił R. Madany (1961) na podstawie danych z lat 1951–1955. J. Moszczyńska (1969) wykazała wpływ krawędzi Wyżyny Łódzkiej na częstość i sumy opadów w postaci stałej.

W Polsce, jak i w całej Europie Środkowej słabo rozpoznana i udokumentowana jest zmienność czasowa opadów śnieżnych. Z tego zakresu badania prowadził R. Twardosz na podstawie serii z Krakowa z lat 1863–2000 (Twardosz, 2003a) oraz Pogórza Karpackiego (Twardosz, 2002–2003, 2003b). M. Laternser i M. Schneebeli (2003) zbadali trendy zmian wieloletnich (1931–1999) liczby dni z opadem śniegu w Alpach Szwajcarskich. Więcej uwagi poświęcono badaniu zmienności i uwarunkowań cyrkulacyjnych występowania silnych opadów śnieżnych, m.in. w Krakowie (Twardosz, 2003c, 2005a), w Austrii i wschodnich Alpach (Spreitzhofer, 1999a, b, 2000), w Stanach Zjednoczonych (Birkeland i Mock, 1966; Goree i Younkin, 1966; Younkin, 1968; Brandes i Spar, 1971; Mote i in., 1997; McGinnis, 2000; Kocin i Uccellini, 2004).

Duży wkład do poznania rozkładu przestrzennego postaci i typów opadów na świecie wniosły badania A. Dai (2001), który zajmował się rozkładem przestrzennym ich występowania w ujęciu globalnym w latach 1975–1997. Rozkład przestrzenny liczby dni z burzą został udokumentowany w publikacji WMO (1956).

Badania wieloletnich zmian opadów śnieżnych najczęściej były prowadzone w górach, ze względu na ich znaczenie w formowaniu się lawin (Fitzharris, 1981; Butler, 1986; Mock i Kay, 1992; Birkeland i Mock, 1996; Spreitzhofer 2000), lub w obszarach położonych w wysokich szerokościach geograficznych (Bromwich, 1988; Suckling i Kimsey, 1988; Przybylak, 2002; Førland i Hansen-Bauer, 2003; Łupikasza, 2007, 2008), czyli tam, gdzie śnieg stanowi dominującą postać opadu, oraz w USA (Harrington i in., 1987; Harrington i Cervený, 1988; Karl i in., 1993; Leathers i in., 1993; Huntington i in., 2004; Kunkel i in., 2007). Wyniki tych badań pokazały, że np. w Arktyce Kanadyjskiej istotnie wzrosły sumy opadów śniegu, nie zaobserwowano natomiast istotnych zmian stosunku opadów śniegu do ogólnych sum opadowych w okresie 1950–1995 (Przybylak, 2002). Spadek udziału opadów śniegu w ogólnych sumach opadów stwierdzono natomiast w Arktyce Norweskiej w okresie od początku XX wieku do 2001 roku (Førland i Hanssen-Bauer, 2003), w Nowej Anglii w okresie 1949–2000 (Huntington i in., 2004) oraz w południowej Kanadzie w okresie 1891–1990 (Karl i in., 1993). P.Y. Groisman i D.R. Easterling (1994) stwierdzili wzrost sum opadów śniegu w okresie 1951–1990 w obszarach Ameryki Północnej na północ od 55°N. W północnej części Kanady zaobserwowano wzrostową tendencję częstości silnych opadów śniegu zimą i na wiosnę, które mają związek z anomaliami makroskalowej cyrkulacji atmosfery (Zhang i in., 2001).

Wyniki najnowszych badań zmian częstości i sum opadów śnieżnych prowadzonych w różnych częściach świata pokazują różną wielkość trendów i kierunków ich zmian, które nie zawsze osiągają istotność statystyczną (Kunkel i in., 2007; Ke i in., 2009). A zatem nie ma prostej zależności zmian opadów śnieżnych od temperatury powietrza.

W dotychczasowych opracowaniach podkreślano istotny wpływ cyrkulacji atmosferycznej na opady śnieżne i pokrywę śnieżną, szczególnie w umiarkowanych szerokościach geograficznych półkuli północnej. Dobrze jest udokumentowany wpływ NAO na opady śnieżne w północno-wschodniej części USA (Hartley, 1996; Hurrell, 1996; Hurrell i van Loon, 1997; Hartley i Keables, 1998; Durkee i in., 2007), ale też w Krakowie (Łupikasa i in., 2010), oraz na liczbę dni z pokrywą śnieżną we wschodniej Europie (Bednorz, 2004) i w Polsce (Falarz, 2007; Bednorz, 2008). Na uwagę zasługują także badania K.E. Kunkela i J.R. Angela (1999) oraz M.C. Serreze'a i in. (1998), dowodzące istnienia związku między opadami śniegu w USA i PNA (Pacific-North American teleconnection pattern) i EP (East Pacific), szczególnie w okresie od listopada do lutego.

Spośród innych typów opadów dużą wagę przywiązuje się do opadów marnych, jako jednego z niebezpiecznych zjawisk meteorologicznych dla gospodarki, a zwłaszcza dla komunikacji. Opracowania z tego zakresu zostały wykonane w odniesieniu do obszaru Rosji (Bezrukova i in., 2006), Stanów Zjednoczonych (Gay i Davis, 1993; Bernstein, 2000; Cortinas, 2000; Rauber i in., 2001; Robbins i Cortinas, 2002; Kocin i Uccellini, 2004; Houston i Changnon, 2007) oraz Arktyki Kanaadyjskiej (Stewart i Isaac, 1999; Roberts i Stewart, 2008).

Innym niebezpiecznym zjawiskiem atmosferycznym są opady burzowe, w tym także burze gradowe. Przykładem opracowań na ten temat w odniesieniu do dużych obszarów są prace S.A. Changnona (2001), A. Dai (2001) oraz E. Morina i in. (2006). W Polsce pionierskie opracowanie o burzach gradowych w b. Królestwie Polskim opublikował J. Sapalski (1852), a w pierwszej monografii klimatu ziem polskich R. Merecki (1915) przedstawił także rozmieszczenie szkód gradowych w b. Królestwie Polskim. Bogata historia obserwacji gradu w Polsce została opublikowana we wcześniejszym opracowaniu autorów (Twardosz i in., 2010b). Wiele opracowań z zakresu występowania gradów wykonano w Europie Południowej (Vinet, 2001; Giaiotti i in., 2003; Sioutas i Flocas, 2003; Dimitrova i in., 2009; Sioutas i in., 2009) i Australii (np. Schuster i in., 2005).

Wiele publikacji dotyczyło wyłącznie występowania burz w Polsce (m.in. Stopa, 1962; Bielec-Bąkowska, 2001, 2002; Kolendowicz, 2005; Bielec-Bąkowska i Łupikasa, 2009). Badania występowania opadów burzowych w Krakowie i ich uwarunkowania cyrkulacyjne szczegółowo zostały udokumentowane w pracach R. Twardosza (2005b, 2010b).

1.4. Materiał badawczy

1.4.1. Dane opadowe

W badaniach zmian i zmienności klimatu konieczne jest użycie wieloletnich serii obserwacji, które spełniają warunek jednorodności. Do znanych i wyjątkowych miejsc w świecie zalicza się Kraków, który ma wiarygodny i nieprzerwany ciąg ob-

serwacji meteorologicznych od 1 maja 1792 roku. Od założenia stacji, czyli od 1 maja 1792 roku, obserwacje były prowadzone przez wykwalifikowanych obserwatorów; wykonywali je astronomowie, a od lat 50. XX wieku po dziś meteorolodzy, co stanowi gwarancję dużej ich wartości. Ponadto w archiwum stacji zachowały się *metadane*, na podstawie których poznajemy historię badań meteorologicznych nie tylko w Krakowie, ale także dawnej Galicji (Twardosz, 2007b; Twardosz i Cebulska, 2010). Ma to bardzo ważne konsekwencje dla wiarygodności zgromadzonych danych ze względu na możliwość weryfikacji ich jednorodności w odniesieniu m.in. do przyrządów, jednostek pomiarowych, czasu obserwacji itp. (Twardosz, 1997; Twardosz 2005b).

Szczególnie duże znaczenie z punktu widzenia współczesnych zmian klimatu zyskują obserwacje ilościowe i jakościowe opadów prowadzone w Krakowie, które – jak dotąd – nie były w całości opracowane, a są podstawą tej pracy. Jak wykazano we wcześniejszych badaniach (np. Niedźwiedź i in., 2009), wahania opadów w Krakowie dobrze korelują z opadami w innych stacjach we wschodniej i zachodniej części Europy Środkowej. Tak więc uzyskane wyniki badań opadów odnoszą się nie tylko do samego miasta, ale wykraczają poza Polskę południową.

Regionalnym seriom czasowym P. Jones i M. Hulme (1996) przypisują duże znaczenie w badaniach zmienności klimatu. Duża zmienność przestrzenna opadów, a także efekty działania innych czynników komplikują próby wyjaśnienia związku między ociepleniem klimatu a zmianami ogólnej ilości opadów. Dlatego też wskazuje się na potrzebę badań opadów śnieżnych (IPCC, 2007).

Obserwacje jakościowe opadów w Krakowie prowadzi się w całym okresie działalności stacji. Chociaż, jak podaje J. Hanik (1972), na liście przyrządów meteorologicznych zamówionych do Obserwatorium był wyszczególniony deszczomierz „...udometr, czyli instrument do mierzenia wilgoci spadłej w deszczach i potrzebnej do utrzymywania roślinności, zapisany z Londynu, ale cena jego nie znana...”, to jednak przyrządu tego nie zakupiono i tym samym pomiarów nie rozpoczęto. Do sierpnia 1849 roku prowadzono tylko obserwacje wizualne występowania opadów. Na podstawie zachowanych dzienników codziennych spostrzeżeń meteorologicznych zebrano informację o wystąpieniu opadu, jego postaci i zjawiskach, które towarzyszyły opadowi. Notowano także inne informacje o opadzie, np. o jego natężeniu (drobny deszcz, silny deszcz, ulewa, burza itd.). Zapisy te były umieszczane w osobnej kolumnie dziennika obserwacyjnego „Stan atmosfery”, a przykład zapisu zilustrowano na rysunku 1.3. Obserwacje opadów w Krakowie prowadzono zgodnie z instrukcją „Prawidła do zachowania w zapisywaniu Obserwacji Meteorologicznych”, spisanej przez J. Śniadeckiego (z zachowaniem oryginalnej pisowni): „Jeżeli w który dzień deszcz lub śnieg padnie, lecz nie w czasie obserwacji pamiętać koniecznie potrzeba, aby go przy zapisywaniu drugiej obserwacji napisać; napisać go zaś należy przy tej obserwacji, po której padał, to jest jeżeli padał przed Południem przy ranniejszej, jeżeli po Południu lub wieczór przy Popołudniowej; jeżeli w nocy padał przy wieczornej, ażeby tym sposobem rozróżnić można dni suche od dni wilgotnych. Jeżeli pada grad lub grzmoty z błyskawicą słyszeć się dażą, te zapisywać należy podług tej samej reguły, która służy na zapisywanie deszczu lub śniegu”. Dzięki tej instrukcji zapisy obserwacji opa-

Nad stroną metodyczną obserwacji opadów w Krakowie czuwali pracownicy Obserwatorium Astronomicznego UJ, przy którym obserwacje te były prowadzone. Szczególne zasługi w tym zakresie należy przypisać prof. Franciszkowi Karlińskiemu oraz dr. Danielowi Wierzbickiemu, którzy obserwacje te prowadzili i je opracowywali. Wyniki badań publikowali w Sprawozdaniach Komisji Fizjograficznej (Haniak, 1972; Twardosz, 2007b).

Na podstawie obserwacji jakościowych i ilościowych opadów w Krakowie utworzono wiarygodną bazę danych obejmującą dobowe sumy opadów od 1863 do 2008 roku oraz informację o postaci i typie opadu zakodowaną zgodnie z klasyfikacją T. Niedźwiedzia, zamieszczoną w tabeli 1.1. Z lat wcześniejszych zgromadzono dane tylko jakościowe z następujących okresów: 01.05.1792–18.05.1794; 01.09.1803–09.08.1804; 01.04.1805–05.10.1805; 01.10.1811–15.12.1821; 01.01.1822–30.09.1823; 01.01.1824–31.12.1844; 01.01.1849–31.12.1855; 01.12.1862–31.12.1862. Informację o postaci opadów weryfikowano z wartością temperatury powietrza, co jest istotne w przypadku występowania opadów śnieżnych i mieszanych. Cała utworzona seria opadowa zachowuje warunek jednorodności pomiarowej. Wcześniejsze badania jednorodności statystycznej tej serii (Twardosz, 2005b) również pokazały, że można uznać ją za homogeniczną, na przyjętym poziomie istotności 0,05.

1.4.2. Typologia układów cyrkulacyjnych według T. Niedźwiedzia

W umiarkowanej strefie geograficznej cyrkulacja atmosferyczna odgrywa istotną rolę w kształtowaniu klimatu, co wynika z częstej zmiany układów barycznych sterujących wymianą mas powietrznych. Do wyjaśnienia przyczyn zmienności poszczególnych elementów klimatu w skali lokalnej najczęściej stosuje się typologię mezoskalową, sporządzoną dla niewielkich obszarów. Do takich typologii cyrkulacji atmosferycznej należy subiektywna typologia T. Niedźwiedzia (1981, 2011) wykonana w odniesieniu do południowej Polski. Wzorowana ona była z pewnymi modyfikacjami na klasyfikacji typów cyrkulacji H.H. Lamba (1972) dla Wysp Brytyjskich. Stosowana jest często do wyjaśnienia zmienności poszczególnych elementów klimatu nie tylko w Polsce Południowej, ale także na obszarach przylegających (np. Niedźwiedź i in., 2009).

W tej pracy do określenia związku występowania opadów atmosferycznych w Krakowie z cyrkulacją atmosferyczną wykorzystano całą dokumentację cyrkulacji zestawioną przez T. Niedźwiedzia (1981, 2011). Obejmuje ona katalog typów cyrkulacji od września 1873 roku do czasów obecnych oraz katalog mas powietrznych i frontów atmosferycznych od 1951 roku, subiektywnie wydzielonych w każdym dniu. Podstawę sporządzenia katalogów stanowiły mapy synoptyczne dolnej Europy z godzin 00 i 12 UTC (ostatnio z godzin 00, 06, 12 i 18 UTC) Niemieckiej Służby Meteorologicznej (Deutsche Wetterdienst). Najważniejszymi elementami wydzielonych typów cyrkulacji są kierunek adwekcji lub jej brak oraz rodzaj układu barycznego. Te 2 elementy cyrkulacji występują w większości znanych klasyfikacji mezoskalowych. T. Niedźwiedź wydzielił łącznie 21 typów cyrkulacji, w tym 16 typów adwek-

cyjnych, do których wprowadził powszechnie stosowane w meteorologii oznaczenia literowe kierunku adwekcji z indeksem „a” do układów antycyklonalnych – Na, NEa, Ea, SEa, Sa, SWa, Wa i NWa oraz z indeksem „c” do układów cyklonalnych – Nc, NEc, Ec, SEc, Sc, SWc, Wc i NWc. Pozostałe 4 typy stanowią sytuacje bezadwekcyjne lub sytuacje o zróżnicowanych kierunkach adwekcji, a więc:

- Ca – sytuacja centralna antycyklonalna, brak adwekcji, centrum wyżu nad południową Polską,
- Ka – klin antycyklonalny, czasem kilka niewyraźnych ośrodków lub rozmyty obszar podwyższonego ciśnienia, oś wału wysokiego ciśnienia,
- Cc – sytuacja centralna cyklonalna, centrum niżu nad południową Polską,
- Bc – bruzda cyklonalna, rozmyty obszar niskiego ciśnienia lub oś bruzdy niżowej z różnymi kierunkami adwekcji i systemem frontów oddzielających różne masy powietrzne.

Symbolem X (numer kodowy 21) zostały oznaczone siodła baryczne i sytuacje niedające się zaklasyfikować.

Wydzielone przez T. Niedźwiedzia typy mas powietrznych nawiązują do klasyfikacji powszechnie przyjętej w służbie meteorologicznej (Bołaszewska i Reutt, 1962; *Glossary of Meteorology*, 2000; Niedźwiedź, 2003), według obszaru źródłowego masy (tzw. geograficzna klasyfikacja mas powietrznych) oraz jej cech termicznych i wilgotnościowych (m – morskie, k – kontynentalne) opartej na klasyfikacji T. Bergerona (1928). Autor wyróżnił 6 typów mas powietrznych:

- arktyczna – PA,
- polarna morska świeża – PPm,
- polarna morska stara – PPms,
- polarna morska ciepła – PPmc,
- polarna kontynentalna – PPk,
- zwrotnikowa – PZ.

Osobno wydzielił przypadki, kiedy pojawił się więcej niż jeden typ masy w ciągu doby. W klasyfikacji frontów atmosferycznych nad południową Polską T. Niedźwiedź uwzględnił 4 rodzaje frontów:

- ciepły,
- chłodny,
- okluzji,
- stacjonarny.

Ponadto Autor wydzielił dni, w których przechodziły przynajmniej 2 różne rodzaje frontów (różne fronty) oraz dni bezfrontowe. W przypadku frontu okluzji T. Niedźwiedź nie wprowadził szczegółowego rozróżnienia co do charakteru okluzji.