

10.2478/bfpz-2013-0014

SYNOPTYCZNE UWARUNKOWANIA WYSTĘPOWANIA OPADÓW GRADU WE FREUDENSTADT

KATARZYNA SUWAŁA

Zakład Klimatologii, Instytut Geografii Fizycznej i Kształtowania Środowiska Przyrodniczego,
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych,
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznania, ul. Dziegiełowa 27, 61-680 Poznań

Abstract: Weather maps were analysed to identify the types of synoptic conditions which are conducive to hail development in Freudenstadt. They were established on the basis of the data obtained from Deutscher Wetterdienst database (daily occurrence of hail) and Daily Meteorological Bulletins published by IMGW (The Institute of Meteorology and Water Management), which covered warm seasons during the years 1981–2010. It was found that hail in the studied area was connected with large negative anomalies in sea level pressure over Germany and, consequently, a western and south-western direction of air mass influx. Furthermore, 6 types of synoptic situations were distinguished, each of which was characterized by different number of cases. The vast majority of hail cases were connected with the presence of a cold front over the southern regions of Germany (type 1) and with anticyclone, or without any distinct pressure system or front. The least numerous types were those associated with a warm or occluded front (about 14% of instances). Additionally, the temporal and seasonal variability of hail occurrence was established, which led to the conclusion that the peak month for hail in Freudenstadt was May and the general tendency of hail frequency is decreasing. Moreover, it appeared that some synoptic types are connected with particular months or parts of the warm season.

Keywords: hail, Freudenstadt, Germany, synoptic conditions

WSTĘP

Opady gradu należą do niezwykle rzadkich, ale jednocześnie niszczycielskich zjawisk pogodowych. Ich nieciągły charakter, gwałtowność i krótki czas trwania samego opadu sprawiają, że nie sposób określić z dużym prawdopodobieństwem ani czas, ani miejsce, w którym się pojawią. Dodatkowym utrudnieniem w wychwyceniu zjawisk gradowych jest mała gęstość sieci pomiarowo-obszernościowej i brak obserwatorów gradowych. Jednakże, jak wskazuje Kunz i współpracownicy (2009), sposobem na poradzenie sobie z niewystarczającą liczbą danych może być powiązanie występowania burz i opadów gradu z cyrkulacją atmosfery, która obok czynników radiacyjnych czy obiegu wody wywiera wyraźny wpływ na kształtowanie pogody oraz klimat (Woś 2010). Oprócz czynników stricte meteorologicznych, jak podkreślali Zinkiewicz i Michna (1965), Koźmiński (1968) czy Sioutas (2009), wystąpienie tego

zjawiska jest silnie uzależnione także od czynników pozameteorologicznych, takich jak: ukształtowanie terenu i ekspozycja stoków, odległość od cieków, rodzaj gleb i pokrycia terenu. Dla przykładu, najczęściej nawiedzanym przez nawałnice i burze gradowe obszarem Polski jest pas ciągnący się wzdłuż wyżyn i u podnóża gór (Koźmiński 1964).

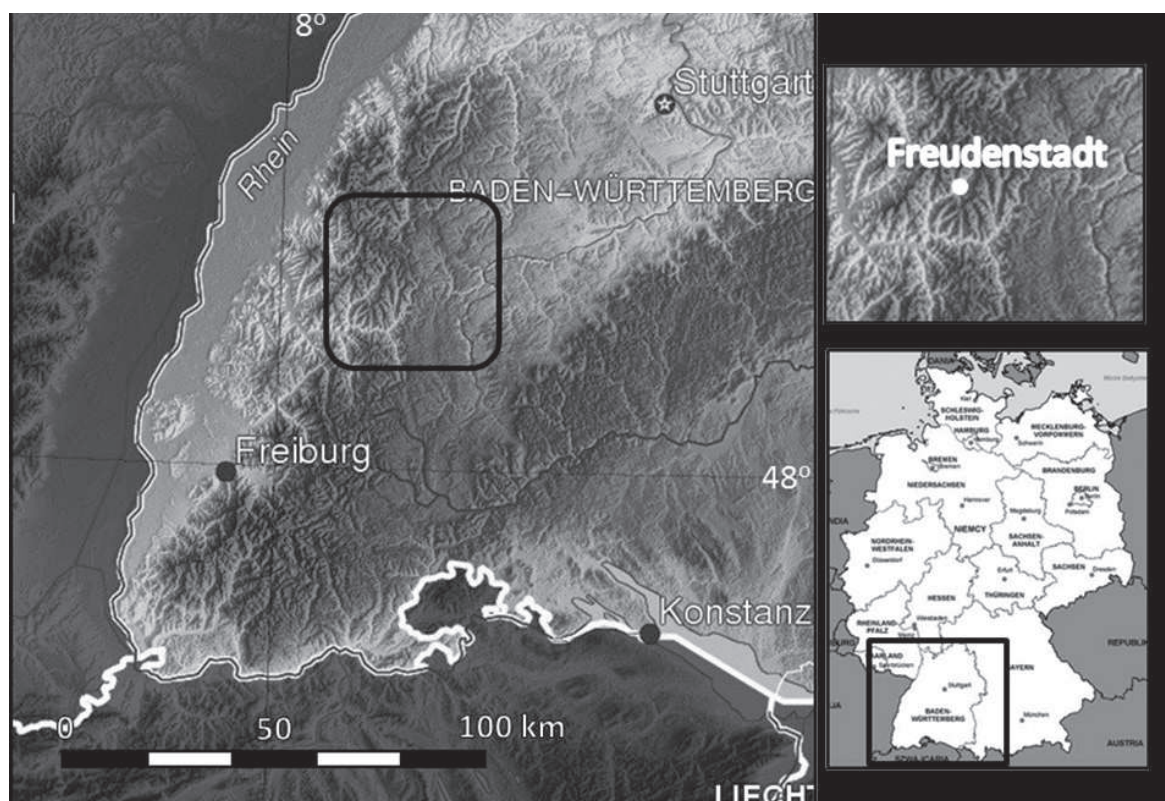
W ostatnich latach, szczególnie w literaturze anglojęzycznej, zwracano uwagę na zależność pomiędzy częstością występowania owych zjawisk a warunkami cyrkulacyjnymi panującymi w troposferze. Wystarczy wymienić prace Simeonova i Georgieva (2003), którzy podjęli się wyznaczenia sytuacji synoptycznych związanych ze szczególnie intensywnymi zjawiskami gradowymi, w literaturze anglojęzycznej nazywanych *severe hailstorms*, które nawiedzały Bułgarię w latach 1999–2001. Podobne badania na obszarze Niemiec prowadzili Kunz i współpracownicy (2009), starając się wyjaśnić przyczyny występowania zjawisk gradowych w rejonie Badenu-Wirtembergii, czy Bielec-Bąkowska (2010) oraz Twardosz i współpracownicy (2010), którzy analizowali częstość zjawisk gradowych w Polsce. Z kolei Groenemeijer i Van Delden (2006) oraz Lopez i współpracownicy (2000) podkreślali przydatność danych z sondażu aerologicznych oraz wskaźników chwiejności atmosfery, takich jak: CAPE (Convective Available Potential Energy), CIN (Convective inhibition) czy K Index do identyfikacji ekstremalnych zjawisk pogodowych.

Stąd też cel niniejszej analizy, czyli wyznaczenie typów sytuacji synoptycznych sprzyjających występowaniu opadów gradu w stacji Freudenstadt oraz określenie ich częstości w poszczególnych miesiącach ciepłego półrocza.

OBSZAR BADAŃ, MATERIAŁY ŹRÓDŁOWE I METODY BADAŃ

Wybór stacji Freudenstadt był nieprzypadkowy, gdyż wśród 40 niemieckich stacji meteorologicznych zlokalizowanych na wysokości mniejszej niż 1000 m n.p.m. to właśnie tu zanotowano najwięcej – 70 dni z opadami gradu w latach 1981–2010. Dodatkowo jest to stacja położona w terenie o bardzo urozmaiconej rzeźbie, w północno-wschodniej części zrębowego masywu górskiego Schwarzwald w Badenu-Wirtembergii (S Niemcy).

Otoczona jest ona pasmami góorskimi porozcinanymi licznymi potokami góorskimi oraz malowniczymi dolinami Renu (od NW), górnego biegu rzeki Neckar (od SE) i Murg (od N). Zachodnia część miasta opada łagodnie do doliny potoku Forbach (rys. 1). Dużą część miasta zajmują lasy. Położenie na obszarze o tak zróżnicowanej rzeźbie, a także zbliżony do południkowego układ dolin rzecznych stwarzają bardzo specyficzne warunki do rozwoju konwekcji i zjawisk gradowych, o czym wspominali Kunz i współpracownicy (2009).



Ryc. 1. Obszar badań

<<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/gltils.html>>

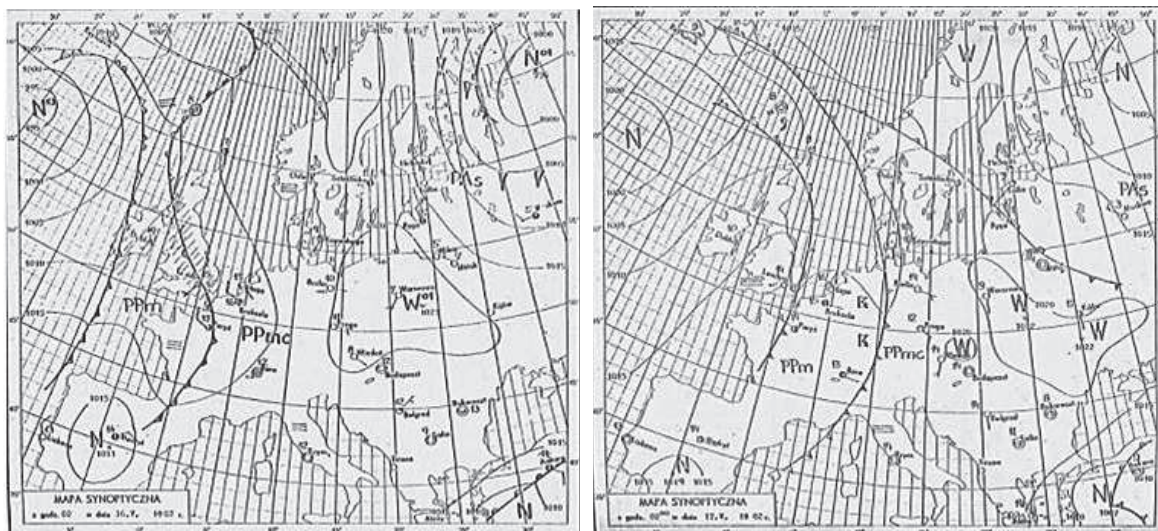
Fig. 1. Study area

<<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/gltils.html>>

Do przeprowadzenia analizy wykorzystano dane dotyczące występowania opadów gradu w miejscowości Freudenstadt, pochodzące z zasobów Deutscher Wetterdienst, obejmujące ciepłe półrocza (IV–IX) w latach 1981–2010.

Warunki cyrkulacyjne i termiczne w troposferze, sprzyjające występowaniu opadów gradu, w badanej stacji ustalono na podstawie danych o rozkładzie ciśnienia na poziomie morza, wysokości powierzchni barycznej 500 hPa oraz temperatury powietrza na dwóch poziomach barycznych – 850 i 500 hPa, pochodzących z zasobów NCEP/NCAR Reanalysis. Dzięki nim skonstruowano mapy: średniego rozkładu ciśnienia na poziomie morza, geopotencjału 500 hPa i temperatury na 500 i 850 hPa, uzupełnionych o mapy anomalii przedstawiające różnice między warunkami panującymi w czasie badanego zjawiska i warunkami przeciętnymi. Wyróżnienie typów sytuacji synoptycznych charakterystycznych dla dni z gradem było możliwe dzięki analizie dolnych map pogody z godziny 00 UTC, publikowanych w Codziennych biuletynach meteorologicznych IMGW. Na ich podstawie wyznaczono sześć typów sytuacji synoptycznych.

W typie 1 (ryc. 2) nad Europą Środkową przemieszczał się chłodny front atmosferyczny, w wielu przypadkach wypierający znad obszaru Europy Środkowej

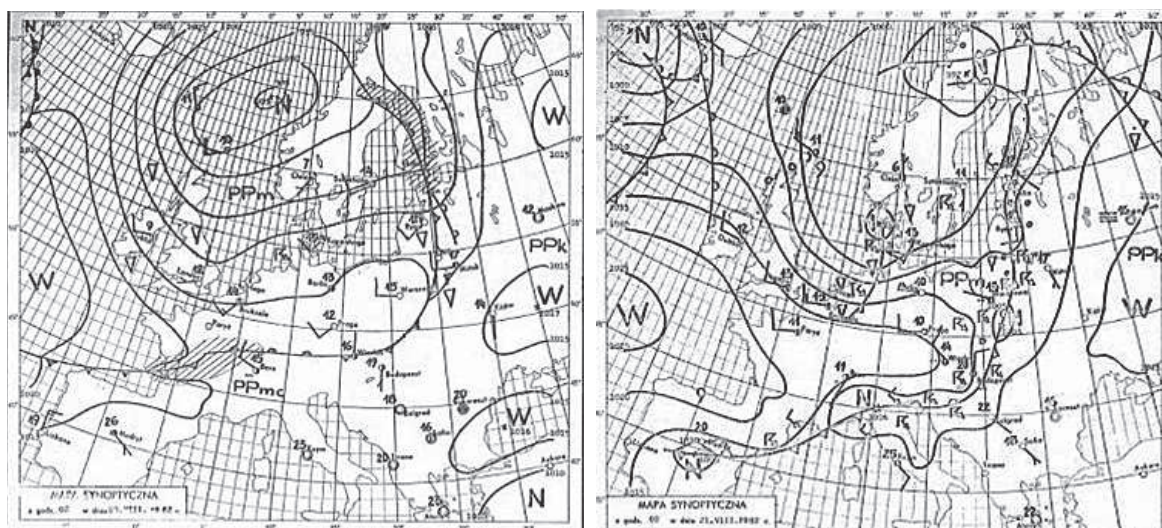


Ryc. 2. Sytuacja synoptyczna w dniach 16.05.1982 i 17.05.1982 – typ 1
Na podstawie Codziennego biuletynu meteorologicznego IMGW

Fig. 2. Synoptic conditions during 16th and 17th May 1982 – Type 1
According to Daily Meteorological Bulletin IMGW

zwrotnikowe masy powietrza. W cieplej porze roku na czole owego frontu zazwyczaj rozbudowują się chmury Cb z burzami i intensywnymi opadami – przy silnych kontrastach termicznych pada grad. Dzieje się tak przy napływie mas z NW.

Typ 2 (ryc. 3) związany były z obecnością ciepłego frontu atmosferycznego nadciągającego nad obszar Niemiec z południa Europy. W szczególnych przypadkach, na przykład gdy po obydwu stronach frontu ciepłego powietrze



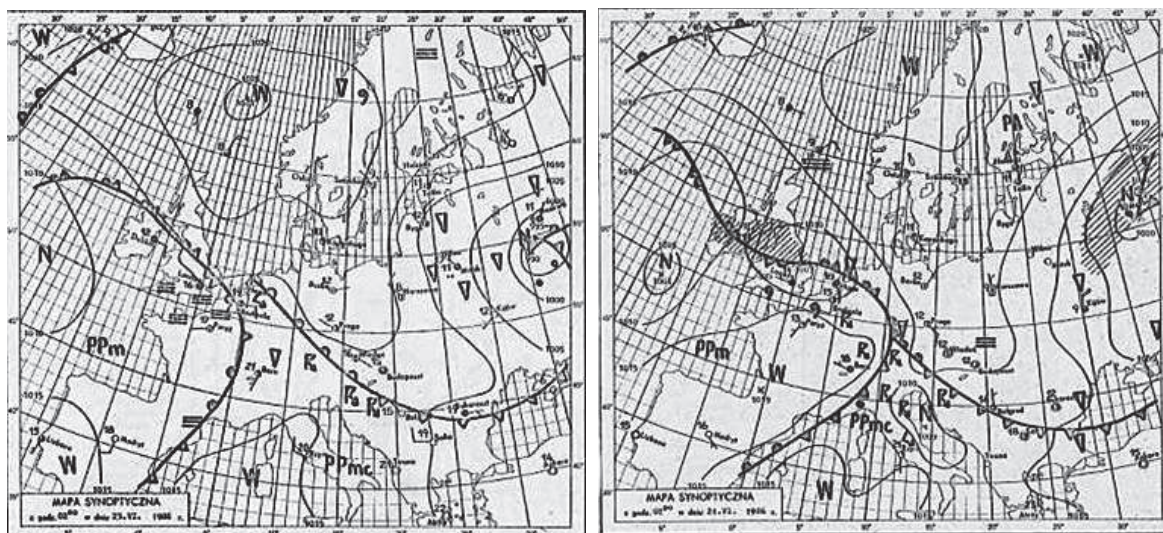
Ryc. 3. Sytuacja synoptyczna w dniach 20.08.1982 i 21.08.1982 – typ 2
Na podstawie Codziennego biuletynu meteorologicznego IMGW

Fig. 3. Synoptic conditions during 20th and 21st August 1982 – Type 2
According to Daily Meteorological Bulletin IMGW

znajduje się w stanie równowagi wilgotno-chwiejnej, przed frontem występują pasma chmur *Cu cong*, wznoszące się do powierzchni frontowej, a w ciepłej porze roku na froncie można spotkać wbudowane, niewidoczne przez obserwatora z ziemi, chmury *Cb* z burzą i intensywnym opadem. W innym przypadku za frontem ciepłym, w powietrzu o uwarstwieniu wilgotno-chwiejnym, mogą pojawić się też *Cu cong* i *Cb* (bez ograniczenia od góry).

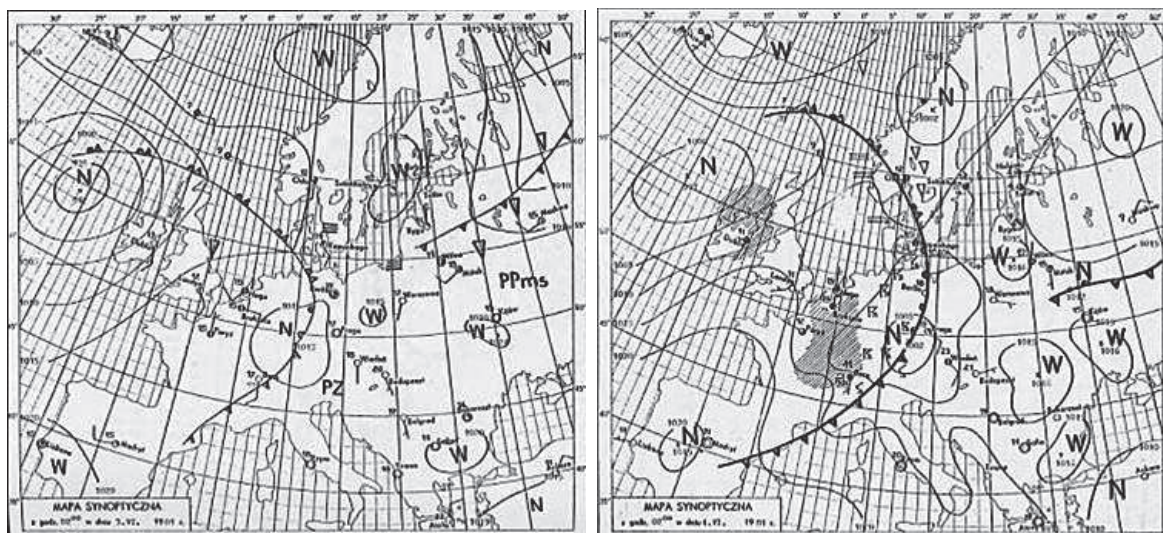
Wyróżniono także przypadki (typ 3) (ryc. 4), kiedy opady gradu towarzyszyły frontom zokludowanym, które w ciepłej porze roku zazwyczaj mają charakter frontu chłodnego, a w samym froncie okluzji niekiedy mogą rozwijać się ukryte wewnątrz chmury *Cb* o znacznej rozbudowie pionowej, dające wzmocnienie intensywności opadów i burz. Opady gradu związane z wędrówką nad obszarem południowych Niemiec centrów niskiego ciśnienia z licznymi frontami atmosferycznymi oznaczono jako typ 4 (ryc. 5).

W typie 5 (ryc. 6) grady we Freudenstadt nie były związane z frontami atmosferycznymi, lecz z obecnością rozległego układu antycyklonalnego, częstokroć rozciągającego się nad znaczny obszar Europy. Typ 6 (ryc. 7) został wyróżniony z uwagi na kilka przypadków opadów gradu, gdy nad Freudenstadt nie przechodziły fronty atmosferyczne, a jednocześnie nie znajdowały się one w zasięgu wyraźnego układu barycznego, jak na przykład w typie 4 czy 5. W owych 12 przypadkach nad Freudenstadt znajdował się skraj niżu lub wyżu bez frontów, niekiedy w towarzystwie zwrotnikowej lub polarno-kontynentalnej masy powietrza.



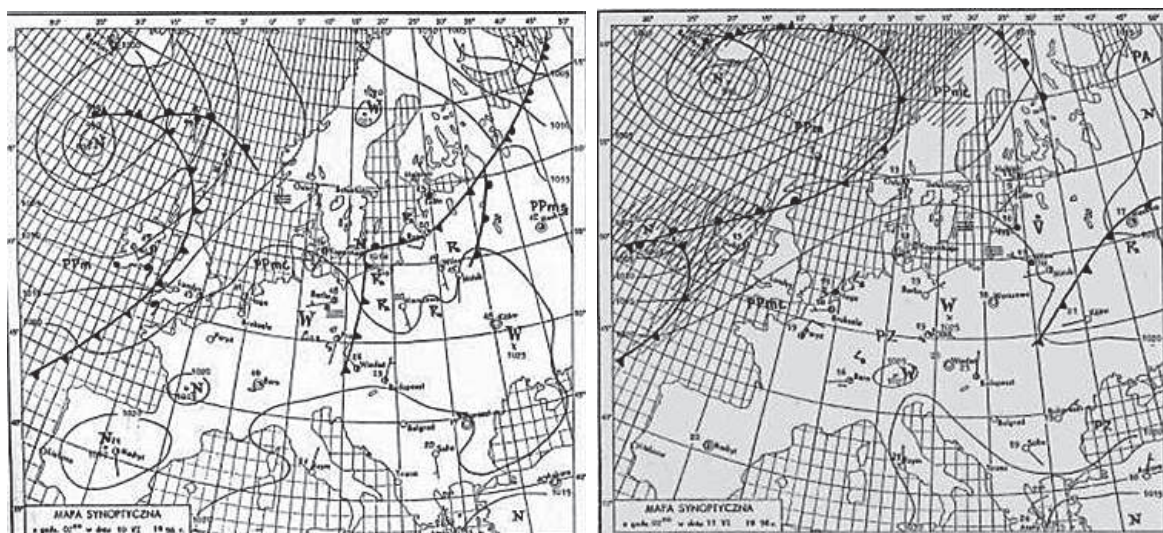
Ryc. 4. Sytuacja synoptyczna w dniach 23.06.1986 i 24.06.1986 – typ 3
Na podstawie Codziennego biuletynu meteorologicznego IMGW

Fig. 4. Synoptic conditions during 23rd and 24th June 1986 – Type 3
According to Daily Meteorological Bulletin IMGW



Ryc. 5. Sytuacja synoptyczna w dniach 03.06.1981 i 04.06.1981 – typ 4
Na podstawie Codziennego biuletynu meteorologicznego IMGW

Fig. 5. Synoptic conditions during 3rd and 4th June 1981 – Type 4
According to Daily Meteorological Bulletin IMGW



Ryc. 6. Sytuacja synoptyczna w dniach 10.06.1996 i 11.06.1996 – typ 5
Na podstawie Codziennego biuletynu meteorologicznego IMGW

Fig. 6. Synoptic conditions during 10th and 11th June 1996 – Type 5
According to Daily Meteorological Bulletin IMGW

WYNIKI BADAŃ

W analizowanym wieloleciu 1981–2010 na stacji Freudenstadt odnotowano 70 przypadków opadu gradu, z czego blisko 62% z nich wystąpiło w miesiącach od kwietnia do czerwca (tab.). Miesiącem o największej częstotliwości występowania opadów gradu był maj – średnio w wieloleciu około 0,8 dnia z gradem, co



Ryc. 7. Sytuacja synoptyczna w dniach 11.05.1993 i 12.05.1993 – typ 6
Na podstawie Codziennego biuletynu meteorologicznego IMGW

Fig. 7. Synoptic conditions during 11th and 12th May 1993 – Type 6
According to Daily Meteorological Bulletin IMGW

stanowiło 23 przypadki tego opadu. Badane zjawisko wystąpiło w każdym miesiącu ciepłego półrocza z minimum przypadającym na wrzesień.

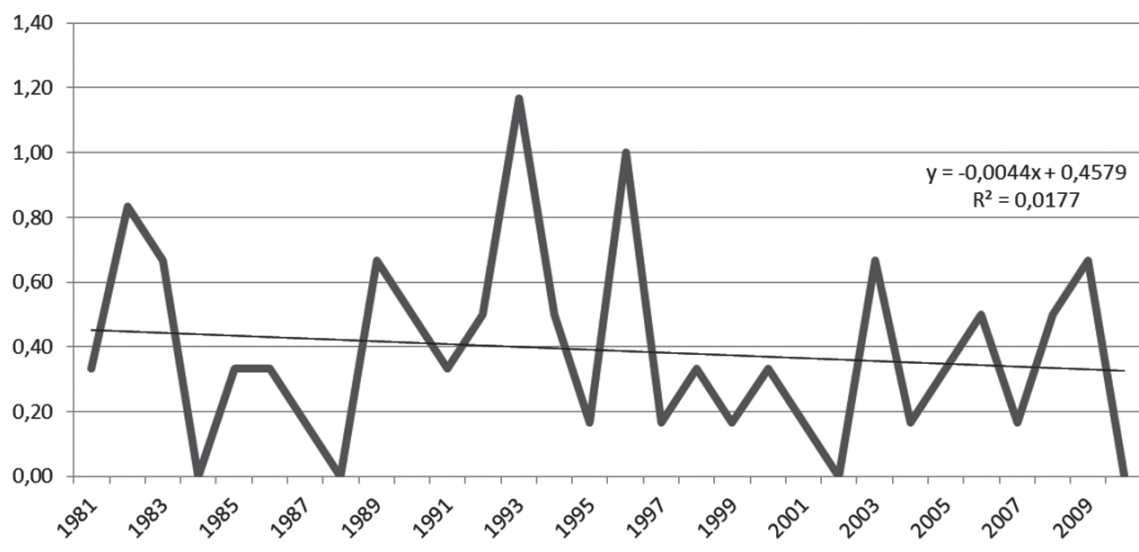
Pod względem zmienności czasowej częstości opadów gradu widoczna jest tendencja malejąca, z okresem najbardziej gradowym od 1989 do 1996. Przebieg owej zmienności czasowej podkreśla również nieciągły charakter tego zjawiska. Widoczne są dwa lata z ponad 1 dniem z gradem rocznie, a także lata, w których opad ten nie wystąpił. Średnio w wieloleciu zaobserwowano około 0,4 dnia z opadem gradu. Jest to wartość niewielka, jednakże w poszczególnych latach wartości wahały się od blisko 1,2 dnia (1993) do 0 (lata: 1984, 1988, 2002, 2010) (ryc. 8).

Rozpatrując warunki cyrkulacyjne, należy zaznaczyć, że w czasie dni z badanym zjawiskiem nad północną częścią sektora euroatlantyckiego rozciągał się układ niskiego ciśnienia z centrum na południowy wschód od wybrzeży Islandii (< 1011 hPa) oraz niewielką zatoką wkraczającą nad obszar Niemiec od północnego zachodu. Spowodowało to obniżenie ciśnienia nad Europą Środkową o blisko 3 hPa. Taki układ izobar z obecnością wyżu na południowy zachód od wybrzeży Wysp Azorskich oraz kolejnego układu wyżowego, rozwijającego się

Tabela. Liczba dni z opadem gradu we Freudenstadt w ciepłym półroczu (1981–2010)

Table. Number of days with hail in Freudenstadt during warm half-year (1981–2010)

Charakterystyka	IV	V	VI	VII	VIII	IX	SUMA	IV–VI	VII–IX
Średnia	0,23	0,77	0,43	0,40	0,40	0,10	2,33	1,43	0,90
Suma	7	23	13	12	12	3	70	43	27
[%]	10	32,86	18,57	17,14	17,14	4,29	100	61,43	38,57



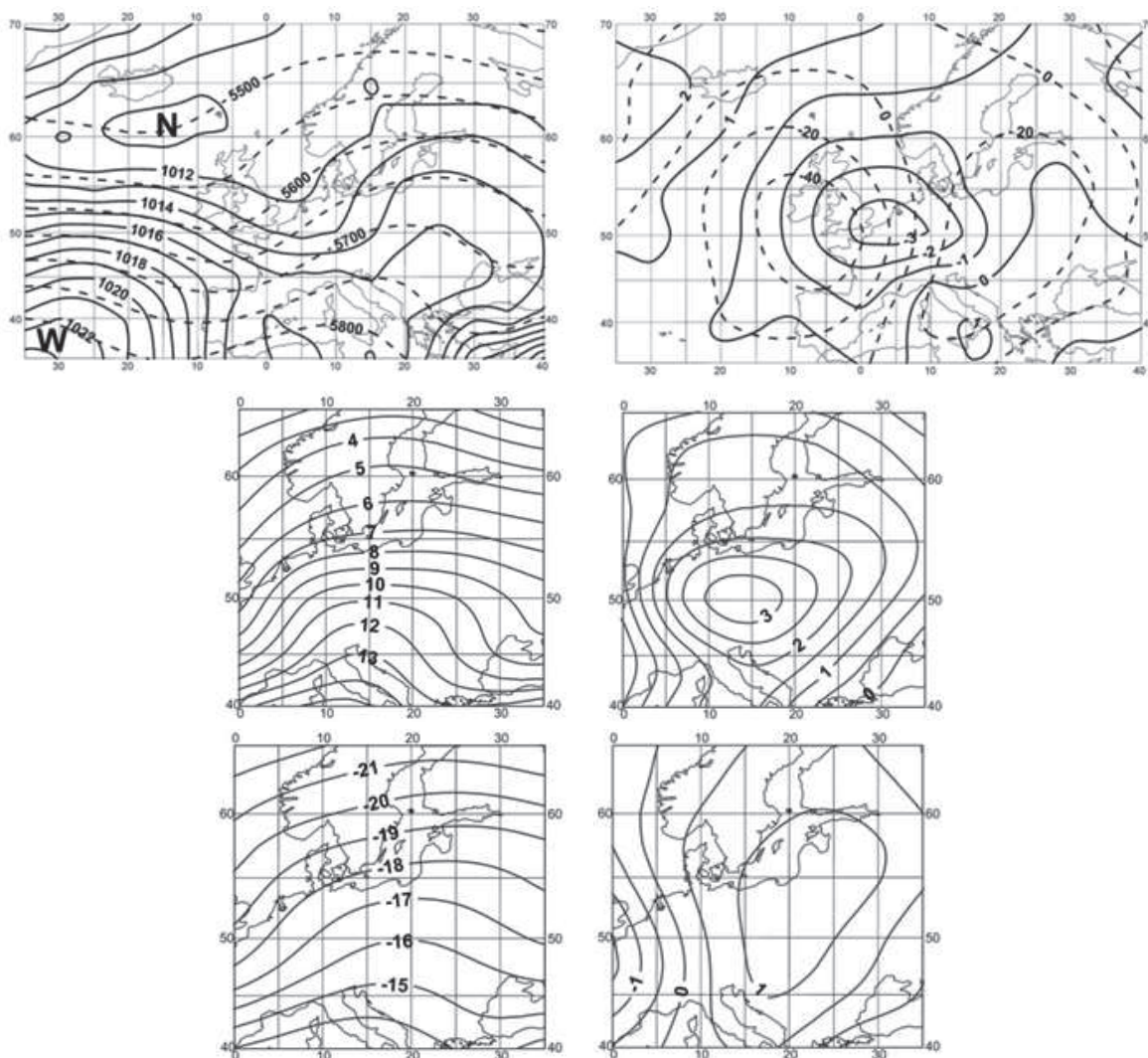
Ryc. 8. Zmienność czasowa częstości opadów gradu w wieloleciu 1981–2010

Fig. 8. Temporal variability of hail frequency during the years 1981–2010

stopniowo nad obszarem Bałkanów, powodował napływ mas powietrza nie tylko z sektora zachodniego, ale także z południa Europy. Na obecność ciepłych mas powietrza nad południem Europy wskazuje również przebieg wysokości zalegania geopotencjału 500 hPa, wyraźnie odchylony ku północy, a nad obszarem Europy Środkowo-Wschodniej zalegający wyżej o ponad 20 hPa niż w warunkach średnich (ryc. 9A). Na południowy kierunek adwekcji mas powietrza wskazuje także przebieg izoterm na wysokości 850 i 500 hPa oraz dodatnie centrum anomalii temperatury w niższych partiach troposfery nad obszarem południowych Niemiec (w owych dniach temperatura nad omawianym sektorem była wyższa o ponad 3°C) – rycina 9B. Jednocześnie warunki termiczne w średniej troposferze nie wykazywały tak silnych dodatnich anomalii. Niemniej jednak przebiegająca południkowo izoterma 0°C rozdzielała obszar Europy na część z wyższymi wartościami temperatury na wschodzie, obejmując Niemcy, oraz ujemne anomalie na zachodzie (ryc. 9C).

Aby wskazać warunki synoptyczne sprzyjające opadom gradu we Freudenstadt, przeanalizowano dolne mapy synoptyczne i na ich podstawie wydzielono sześć typów sytuacji synoptycznych związanych z gradami w badanej stacji.

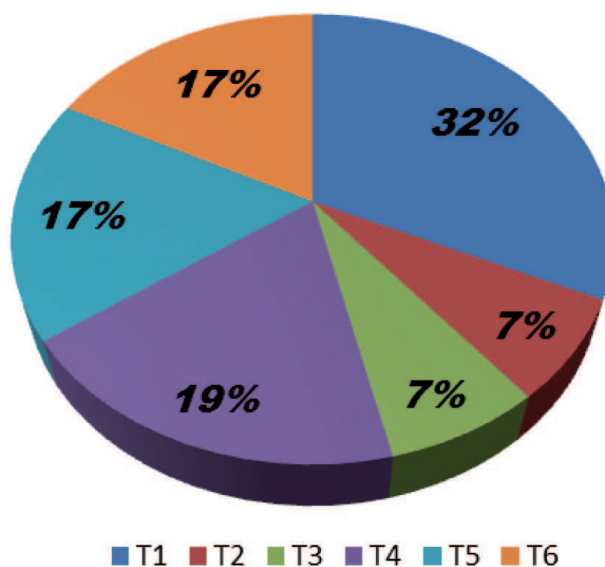
Z przeprowadzonej analizy wynika zatem, iż opady gradu we Freudenstadt pojawiały się najczęściej, bo niemal w 32% przypadków (ryc. 10), przy przechodzeniu nad obszarem Niemiec chłodnego frontu atmosferycznego, częstokroć wypierającego ciepłe zwrotnikowe masy powietrza (7 przypadków). Najmniej przypadków opadów gradu, bo zaledwie 7,2% w każdym typie, związanych było z wędrowką ciepłego (typ 2) lub zokludowanego (typ 3) frontu atmosferycznego, zwykle przynoszącego masy powietrza z południa Europy (ryc. 10). Ponad 18% dni z gradem we Freudenstadt to sytuacje, gdy rejon południowych



Ryc. 9. Średnia wartość ciśnienia atmosferycznego na poziomie morza i wysokości geopotencjału 500 hPa (A), temperatura na poziomie 850 (B) i 500 hPa (C) z mapami anomalii (prawa kolumna) w czasie dni z opadami gradu we Freudenstadt

Fig. 9. Mean sea level pressure and geopotential height of 500 hPa (a), temperature at geopotential height 850 (b) and 500 (c) for the days with hail. Right column – maps of the anomalies

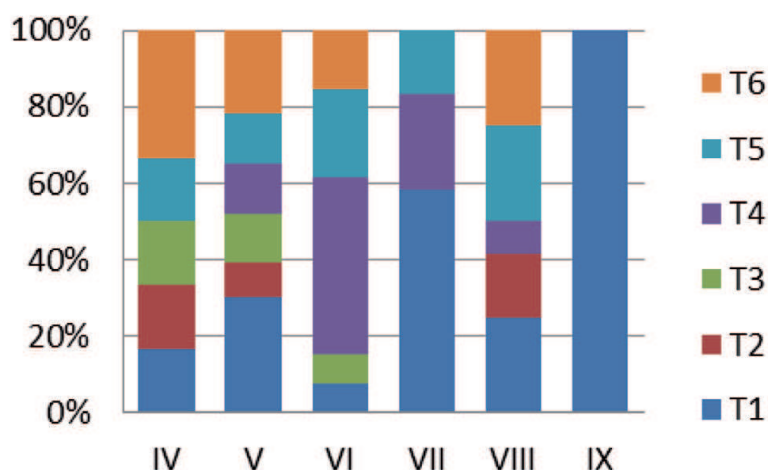
Niemiec znajdował się w zasięgu wędrujących z zachodu na wschód układów niskiego ciśnienia, którym towarzyszyły dynamicznie rozbudowujące się fronty atmosferyczne (ryc. 10). Pozostałe przypadki gradu rozwijały się w sytuacjach bezfrontowych, na przykład jak w typie 5 i 6. Łącznie stanowiły one niemalże 36% dni z badanym zjawiskiem. W trzech przypadkach w typie 6 nad obszarem Niemiec zalegała przetransformowana masa powietrza polarno-kontynentalnego lub zwrotnikowego. Z kolei układy wysokiego ciśnienia, charakterystyczne dla typu 5, w przeważającej części rozwijały się w obrębie polarno-kontynentalnej masy powietrza, a w dwóch przypadkach także arktycznej. Zazwyczaj owe układy rozciągnięte były nad większą częścią Europy, tworząc swoisty wał podwyższonego ciśnienia. W pięciu przypadkach towarzyszyły mu zwrotnikowe



Ryc. 10. Procentowy udział wydzielonych typów sytuacji synoptycznych w zanotowanych dniach z gradem
 Fig. 10. Share [%] of synoptic types in total number of days with hail

masy powietrza, które mogą cechować się równowagą chwiejną lub łatwo się uchwiejsniają.

Z ryciny 11 wynika, iż niektóre z wyróżnionych typów sytuacji synoptycznych przynoszą opady gradu w konkretnych miesiącach ciepłego półrocza. Na przykład grad padający we wrześniu związany był wyłącznie z frontem chłodnym. Ten sam typ odpowiedzialny był, w blisko 60% przypadków, za opady gradu w lipcu. Jednocześnie najmniej przypadków opadów gradu przy przechodzeniu frontu chłodnego zanotowano w czerwcu. W tym miesiącu z kolei zjawiska te w większości związane były z typem 4, który przynosił opady gradu tylko



Ryc. 11. Częstość [%] dni z opadami gradu w wyróżnionych typach sytuacji synoptycznych w poszczególnych miesiącach
 Fig. 11. Frequency [%] of days with hail in selected synoptic types in particular months

w miesiącach od maja do sierpnia. Najbardziej wyrównany udział wszystkich typów sytuacji synoptycznych przypadał na pierwszy miesiąc ciepłego półrocza. Jednak nie obserwowano wówczas opadów gradu związanych z obecnością nad obszarem badań centrum niżu z frontami atmosferycznymi (typ 4). Typ 3 odpowiadał za zjawiska gradowe wyłącznie w pierwszej połowie ciepłego półrocza, z największą liczbą przypadków w kwietniu. Front ciepły natomiast tłumaczy zjawiska gradowe występujące tylko w kwietniu, maju i sierpniu. Lipcowe przypadki opadów gradu związane były tylko z trzema typami sytuacji synoptycznych (typ 1, 4 i 5). Opady gradu niezwiązane z frontami atmosferycznymi głównie pojawiały się w kwietniu i sierpniu.

WNIOSKI

Na podstawie powyższej analizy można zaobserwować, iż większość przypadków gradu we Freudenstadt wystąpiło od kwietnia do czerwca (ok. 62%), co stanowiło średnio 1,43 dnia z gradem. Zbliżone wyniki dla Europy Środkowej uzyskała Bielec-Bąkowska (2010). Podobnie jak w Grecji (Siutas, Flocas 2003) i Polsce (Bielec-Bąkowska 2010; Twardosz i in. 2010) maksimum częstości opadów gradu przypadało tam na maj. Jednocześnie w Finlandii najwięcej opadów gradu obserwowano od czerwca do połowy sierpnia (Tuovinen i in. 2008). Jak stwierdza Kunz i współpracownicy (2009), na obszarze południowo-zachodnich Niemiec częstość opadów gradu ogólnie wzrasta. Niemniej jednak w stacji Freudenstadt, położonej w tym regionie, średnia liczba dni z gradem maleje w ostatnich 20 latach, a maksimum średniej liczby dni w roku z gradem przypadało na rok 1993 (ok. 1,2 dnia) i 1996 (ok. 1 dzień).

Opadom gradu we Freudenstadt towarzyszył rozległy układ niskiego ciśnienia nad północną Europą, a masy powietrza napływały nad obszar południowych Niemiec z sektora zachodniego, ze składową południową. Południe Europy w czasie owych dni znajdowało się pod wpływem ciepłych układów wysokiego ciśnienia, które przyczyniały się do adwekcji powietrza zwrotnikowego nad obszar Europy Środkowej. Napływ ten widoczny był również na mapach T850 i T500, z dodatnimi anomaliami temperatury nad Niemcami.

Sytuacja synoptyczna najbardziej sprzyjająca gradom w tym przypadku to przechodzenie nad obszarem Niemiec chłodnego frontu atmosferycznego, częstokroć wypierającego ciepłe zwrotnikowe masy powietrza. Podobną zależność zaobserwowano w południowej części Europy (Simeonov, Georgiev 2003; Siutas, Flocas 2003), a także w Polsce (Twardosz i in. 2010). Najmniej przypadków gradu odnotowano w obrębie ciepłych lub zokludowanych frontów atmosferycznych, zwykle przynoszących masy powietrza z południa Europy. Towarzyszyły one zjawiskom gradowym w początkowych miesiącach półrocza ciepłego (IV i V).

Ponad 18% dni z gradem odnotowano, gdy rejon południowych Niemiec znajdował się na szlaku wędrówek układów niskiego ciśnienia z frontami, które także, zdaniem Kunza i współpracowników (2009), były odpowiedzialne za opady gradu w rejonie południowo-zachodnich Niemiec. Pozostałe 36% przypadków to grady pojawiające się w sytuacjach bezfrontowych, jak typy 5 i 6. Na duży udział wewnątrzmasowych opadów gradu wskazywała również Bielec-Bąkowska (2010). Z jej opracowania dla Polski wynika, iż, podobnie jak we Freudenbergu, w owych dniach nad obszar badań napływały zwykle arktyczne lub polarno-kontynentalne masy powietrza.

Opady gradu we wrześniu związane były tylko z typem 1, czyli chłodnym frontem atmosferycznym, który pod koniec ciepłego półrocza prawdopodobnie staje się najbardziej dynamicznym układem tworzącym opady gradu. Opady wewnątrzmasowe są tutaj rzadko spotykane z uwagi na mniejsze kontrasty termiczne w troposferze i jej większą stabilność. Za czerwcowe opady gradu odpowiedzialna była głównie wędrówka nad Europą Środkową centrów niskiego ciśnienia z frontami atmosferycznymi, podczas gdy w najcieplejszym miesiącu roku (VII) był to typ 1, a w mniejszej części typy 4 i 5.

W przypadku miejscowości położonej w terenie o tak urozmaiconej rzeźbie należałoby także zwrócić uwagę na jej oddziaływanie na częstość tych zjawisk. Można przypuszczać, iż w porównaniu ze stacjami nizinnymi to właśnie ten czynnik wpłynął na większą intensywność opadów gradu. W trakcie przemieszczania się mas powietrza nad pofałdowanym, nierównym terenem dochodzi do wymuszenia turbulencji dynamicznej i tym samym przyspieszenia procesu konwekcji, który przy odpowiedniej stratyfikacji termicznej atmosfery (niskie zaleganie izoterm 0°C) może doprowadzić do powstania opadu stałego w postaci gradzin, co podkreślali między innymi Kunz i współpracownicy (2009). Dodatkowym czynnikiem wpływającym na możliwość powstania silnej konwekcji i opadów gradu jest odpowiednie usytuowanie dolin górskich względem napływających mas powietrza, powodujących powstanie efektu tunelowego – przyspieszony ruch mas powietrza, swobodna migracja wilgoci i ciepła w obrębie dolin, szczególnie przy południowej ekspozycji stoków.

LITERATURA

- Bielec-Bąkowska Z., 2010: *Występowanie gradu w Polsce w świetle cyrkulacji atmosfery w latach 1966–2006. Woda w badaniach geograficznych*. Kielce, 359–374.
- Groenemeijer P.H., Van Delden A., 2006: *Sounding-derived parameters associated with large hail and tornadoes in the Netherlands*. *Atmospheric Res.*, 83, 473–487.
- Koźmiński C., 1964: *Geograficzne rozmieszczenie większych burz gradowych zanotowanych na obszarze Polski w latach 1946–1956*. *Przegl. Geogr.*, 36, 1.
- Koźmiński C., 1968: *Studia nad opadami gradu i wyrządzanymi przez nie szkodami w zbożach na terenie Wyżyny Małopolskiej*. Wyższa Szkoła Rolnicza, Szczecin.
- Kunz M., Sander J., Kottmeier Ch., 2009: *Recent trends of thunderstorm and hailstorm frequency*

- and their relation to atmospheric characteristics in southwest Germany.* Intern. Journ. of Climatol., 29, 2283–2297.
- Lopez L. et al., 2001: *CAPE values and hailstorms on northwestern Spain.* Atmospheric Res., 56, 147–160.
- Simeonov P., Georgiev C.G., 2003: *Severe wind/hail storms over Bulgaria in 1999–2011 period: synoptic- and meso-scale factors for generation.* Atmospheric Res., 67–68, 629–643.
- Sioutas M.V., 2009: *Hail frequency and intensity in northern Greece.* Atmospheric Res., 93, 526–533.
- Sioutas M.V., Flocas H.A., 2003: *Hailstorms in Northern Greece: synoptic patterns and thermodynamic environment.* Theoretical and Applied Climatol., 75, 189–202.
- Tuovinen J.-P. et al., 2008: *Climatology of Severe Hail in Finland: 1930–2006.* Monthly Weather Rev., 137, 2238–2249.
- Twardosz R., Niedźwiedź T., Łupikasz E., 2010: *Burze gradowe w Krakowie i ich uwarunkowania cyrkulacyjne (1863–2008).* Woda w badaniach geograficznych. Kielce, 303–313.
- Woś A., 2010: *Klimat Polski w drugiej połowie XX wieku.* Wyd. Nauk. UAM, Poznań, 78–89.
- Zienkiewicz W., Michna E., 1995: *Częstotliwość występowania gradów w województwie lubelskim w zależności od warunków fizjograficznych.* Ann. UMCS, B, 10, Lublin.