

◆◆◆◆ ORYGINALNE PRACE ◆◆◆◆ I PRZYZYNYKI

Izabela GUZIK 

INSTYTUT METEOROLOGII I GOSPODARKI WODNEJ – PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY

Robert TWARDOSZ 

UNIwersytet Jagielloński, Wydział Geografii i Geologii

Marta CEBULSKA 

POLITECHNIKA KRAKOWSKA, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

UWARUNKOWANIA SYNOPTYCZNE WYSTĘPOWANIA DOBOWYCH SUM OPADÓW ATMOSFERYCZNYCH POWYŻEJ 100 MM W BIELSKU-BIAŁEJ

SYNOPTIC DETERMINANTS OF DAILY PRECIPITATION TOTALS EXCEEDING 100 MM IN BIELSKO-BIAŁA

Wprowadzenie

Ocieplenie klimatu, jakie dotyka również polskie Karpaty (Wypych i in. 2018), może przyczyniać się do wzrostu częstości i nasilenia skrajnie wysokich opadów. Dlatego konieczne jest ciągle ich monitorowanie. Takie opady atmosferyczne stanowią nieodłączną cechę klimatu umiarkowanego, w tym zwłaszcza klimatu na obszarach górskich, na których zwykle występuje więcej opadów. Do takich miejsc należy miasto Bielsko-Biała, położone u podnóża Beskidu Śląskiego na wysokości około 300-400 m n.p.m. w regionie klimatu górskiego (Niedźwiedz, Obrębska-Starkłowa 1991). Panują tu sprzyjające warunki geomorfologiczne do występowania obfitych opadów, ze względu na bezpośrednie wystawienie obszaru na deszczonośne wiatry zachodnie (Kostrakiewicz 1977).

W czerwcu i we wrześniu 2024 oraz lipcu 2025 roku na obszarze zachodnich Karpat Polskich, w szczególności w mieście Bielsko-Biała, miały miejsce trzy epizody dobowych opadów z sumą od 110 do 150 mm. Ich skutkiem były zniszczenia w infrastrukturze, w szczególności w Bielsku-Białej. W tym przypadku mieliśmy do czynienia z groźnym dla gospodarki i społeczeństwa zjawiskiem tzw. clusteringu (Cebulak i in. 2018; Twardosz i in. 2025), czyli powtarzania się danego zdarzenia w krótkich odstępach czasu, co uniemożliwia likwidację powstałych w jego efekcie strat. Doświadczenia te były inspiracją do podjęcia badań dotyczących częstości katastrofalnych zdarzeń opadowych przekraczających 100 mm na dobę w Bielsku-Białej poczynawszy od 1951 roku i ich synoptycznych uwarunkowań.

Z dotychczasowych analiz wynika, że o występowaniu obfitych opadów dobowych w polskich Karpatach decyduje rodzaj układu barycznego i kierunek adwekcji mas powietrznych (Kaczorowska 1933; Michalczewski 1953; Milata 1955; Morawska 1963; Morawska-Horawska 1971, 1979; Niedźwiedź 1972, 1981; Twardosz 2000). W szczególności dotyczy to katastrofalnych opadów powodujących powodzie w okresie letnim, które występują w niektórych sytuacjach synoptycznych związanych z adwekcją powietrza z sektora północnego (Milata 1955; Mycielska 1979; Morawska-Horawska 1971, 1979; Cebulak 1992a-b; Niedźwiedź, Czekierda 1998; Niedźwiedź 1999). Na tym obszarze najwięcej uwagi poświęcono opadom maksymalnym i ich uwarunkowaniom cyrkulacyjnym (m.in. Cebulak 1992a-b; Ustrnul i in. 2023). Opady takie były przyczyną wielu powodzi o zasięgu regionalnym, obejmującym znaczną część polskich Karpat (Nachlik, Kundzewicz 2016; Twardosz i in. 2016). Występowanie bardzo wysokich opadów w obszarach górskich to zagrożenie, o którym wciąż wiemy za mało (Cebulak i in. 2018). Ten artykuł traktujemy jako kolejny przyczynek do lepszego ich poznania.

Dane i metody

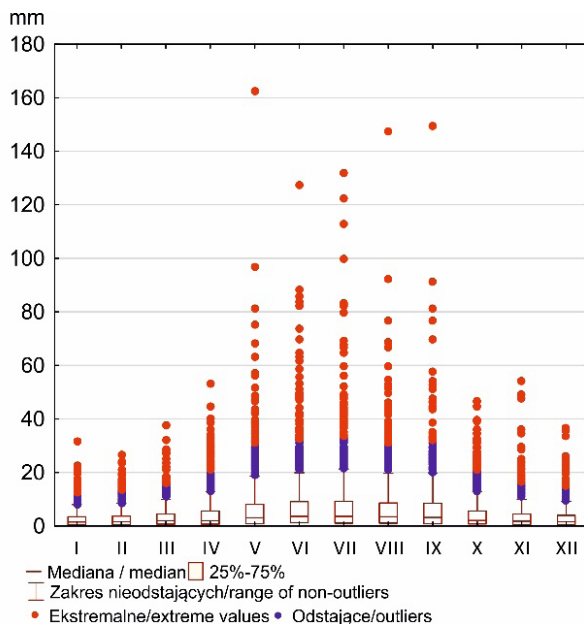
Materiałem wyjściowym do badań są dobowe sumy opadów atmosferycznych z lat 1951-2025 ze stacji synoptycznej w Bielsku-Białej (nr WMO 12600, $\lambda = 19^{\circ}00'04''$, $\varphi = 49^{\circ}48'29''$). Dane te pozyskano z polskiej służby meteorologicznej, tj. Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego (IMGW-PIB). Na podstawie tego zestawu wyłoniono opady dobowe o sumie przekraczającej 100 mm, czyli takie, które Lorenc (2012) zaliczyła do kategorii katastrofalnych. Określono ich liczbę w przyjętym do badań 75-leciu. Każdemu opadowi przypisano odpowiedni typ cyrkulacji według kalendarza T. Niedźwiedzia (1981, 2025). Zasadniczą część pracy stanowi analiza synoptyczna wystąpienia tych opadów. W zależności od dostępności danych, uwzględniono mapy synoptyczne dolne (meteo.imgw.pl), a także pola geopotencjału i temperatury powietrza na poziomach izobarycznych 500 hPa i 850 hPa (odpowiednio ok. 5500 m i 1500 m n.p.m.), wilgotności względnej powietrza na poziomie 700 hPa (ok. 3000 m n.p.m.) oraz wskaźniki niestabilności atmosfery (CAPE, ML CAPE, Lifted Index) (www.wetter3.de). Dla sytuacji z 2024 i 2025 roku wykorzystano również produkt radarowy DPSRI z radaru podwójnej polaryzacji w Ramży, zlokalizowanego około 40 km na północny zachód od obszaru badań (danepubliczne.imgw.pl).

Wyniki

Ogólna charakterystyka opadów w Bielsku-Białej

Położenie Bielska-Białej w najbardziej wysuniętej na zachód części polskich Karpat skutkuje wyższymi opadami na tle Beskidów; średni wieloletni opad roczny z 75-lecia 1951-2025 w Bielsku-Białej wynosi 990 ± 19 mm. Jest on zatem większy o około 300 mm od średniego obszarowego opadu w Polsce (Kozuchowski, Żmudzka 2003). Czynnikiem kształtującym tak duże sumy jest rzeźba terenu, tj. równoleżnikowy przebieg pasm górskich umożliwiających swobodny przepływ wilgotnych mas powietrznych z sektora zachodniego nad obszar badań oraz wysokości nad poziomem morza, wraz z którą opad wzrasta około 150 mm na 100 m wysokości (do wysokości 500 m n.p.m.) (Leśniak, Obrębska-Starkłowa 1983). Badania Walanus i in. (2021) pokazały, że opady roczne nie wykazują istotnych statystycznie zmian wieloletnich. Stwierdza się natomiast przejawy ich cyklicznych wahań, w tym występowanie 35-letniego istotnego statystycznie cyklu Brücknera.

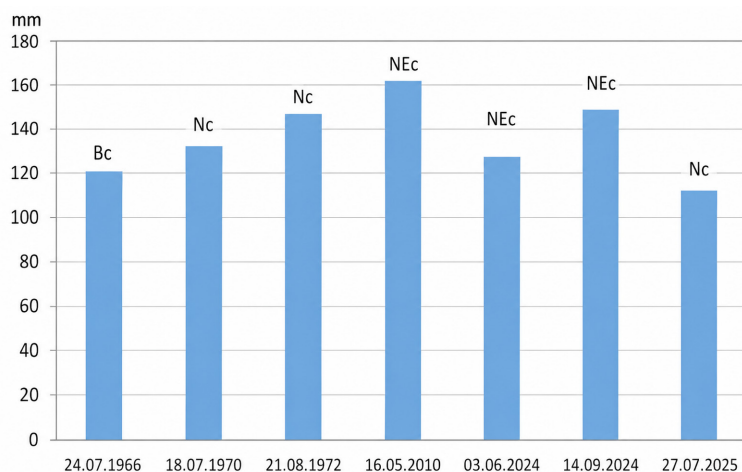
Opady w Bielsku-Białej występują średnio (1951-2025) w roku przez około 50% dni, jednak z różną częstością w poszczególnych miesiącach. Opady silne (≥ 10 mm) dominują od maja do lipca (rys. 1). Na obszarze badań mamy do czynienia z bardzo wydajnymi



Rys. 1. Charakterystyki statystyczne dobowych sum opadów w Bielsku-Białej (1951-2025).

Fig. 1. Statistical characteristics of the daily precipitation totals in Bielsko-Biala (1951-2025).

opadami krótkotrwałymi (dobowymi) o charakterze konwekcyjnym, jak i długotrwałymi kilkudniowymi (rozlewnymi) (Cebulak 1992a-b). Ich wynikiem są bardzo wysokie sumy miesięczne, przekraczające nawet 5-krotnie średni miesięczny opad (Twardosz i in. 2025). Największy zakres zmienności opadów, zarówno miesięcznych, jak i dobowych, dotyczy maja. W tym miesiącu w 2010 roku wystąpiły rekordowe sumy opadów (512 mm; Woźniak 2013), a dobowy opad osiągnął 162,7 mm. Finalnie ilość deszczu, która spadła w maju 2010 roku stanowiła aż 35% ówczesnej sumy rocznej opadów. Przyczyną wystąpienia tak obfitych opadów w polskich Karpatach jest zwykle zwiększona częstość cyklonalnych typów cyrkulacji z sektora północnego (Bissolli i in. 2011; Woźniak 2013; Twardosz i in. 2016). Maksymalne dobowe sumy opadów od października do kwietnia nie przekraczają 60 mm. W pozostałych pięciu miesiącach, kiedy wzrasta znaczenie konwekcji, opady są wyraźnie większe, a ich maksymalne wartości zdecydowanie przekraczają 100 mm (rys. 1). Łącznie takich opadów, o sumie większej od 100 mm, w rozpatrywanym okresie 75-lecia (1951-2025) było siedem (rys. 2); najwięcej w lipcu – trzy, i po jednym przypadku w pozostałych miesiącach. Wszystkie te opady wystąpiły w cyklonalnych typach cyrkulacji: sześć przy adwekcji z sektora północnego (Nc i NEc), a jeden w sytuacji bruzdy cyklonalnej (Bc) nad południową Polską. Z prostego porównania liczby zdarzeń do długości rozpatrywanego okresu wynika, że w Bielsku-Białej opad dobowy przekraczający 100 mm występuje przeciętnie około raz na 10 lat. W rzeczywistości jednak jego rozkład czasowy jest bardzo nieregularny. Okazuje się, że w ostatnim 15-leciu (2010-2025) wystąpiły aż cztery przypad-



Rys. 2. Wykaz opadów powyżej 100 mm w Bielsku-Białej w latach 1951-2025 według kolejności wystąpienia oraz typ cyrkulacji wg Niedźwiedzia (1981, 2025).

Fig. 2. List of precipitation events exceeding 100 mm in Bielsko-Biala from 1951 to 2025 (in order of occurrence) with the accompanying type of circulation according to Niedźwiedź (1981; 2025).

ki takich opadów. Z pozostałych trzech opadów, jeden wystąpił w 1966 roku, a pozostałe dwa w latach 70. XX wieku (rys. 2). Zaznacza się tu też kolejna prawidłowość dotycząca ich przebiegu rocznego. O ile w drugiej połowie XX wieku opady pojawiały się wyłącznie w lipcu i sierpniu, to w ostatnim 15-leciu występowały w różnych miesiącach od maja do września. Wzrost liczby takich epizodów można rozpatrywać w kontekście współczesnego ocieplenia klimatu, które sprzyja zwiększeniu zawartości pary wodnej w atmosferze oraz może prowadzić do częstszego występowania warunków atmosferycznych sprzyjających rozwojowi głębokiej konwekcji. Rekordowy opad w Bielsku-Białej wystąpił 16 maja 2010 roku i osiągnął aż 162,7 mm (rys. 2).

Analiza synoptyczna dobowych sum opadów ponad 100 mm

W pierwszym etapie analizy synoptycznej wykorzystano archiwalne mapy synoptyczne dolnych i górnych poziomów troposfery w celu klasyfikacji sytuacji barycznych poprzedzających epizody intensywnych opadów atmosferycznych. Na tej podstawie wyodrębniono dwa zasadnicze typy zdarzeń: przypadki związane z głęboką konwekcją (lub z jej przewagą) oraz przypadki, w których dominowały opady na dużym obszarze o charakterze ciągłym.

W drugim etapie przeprowadzono analizę warunków dynamicznych i termodynamicznych, obejmującą pola geopotencjału i temperatury na poziomach 500 hPa (~5500 m n.p.m.) i 850 hPa (~1500 m n.p.m.), wilgotności względnej na poziomie 700 hPa (~3000 m n.p.m.), a także parametry niestabilności atmosfery (m.in. MLCAPE i Lifted Index). Dla zdarzeń z 2024 i 2025 r. analizę rozszerzono o dane radarowe (DPSRI), umożliwiające ocenę struktury oraz natężenia opadu.

Opady związane z głęboką konwekcją

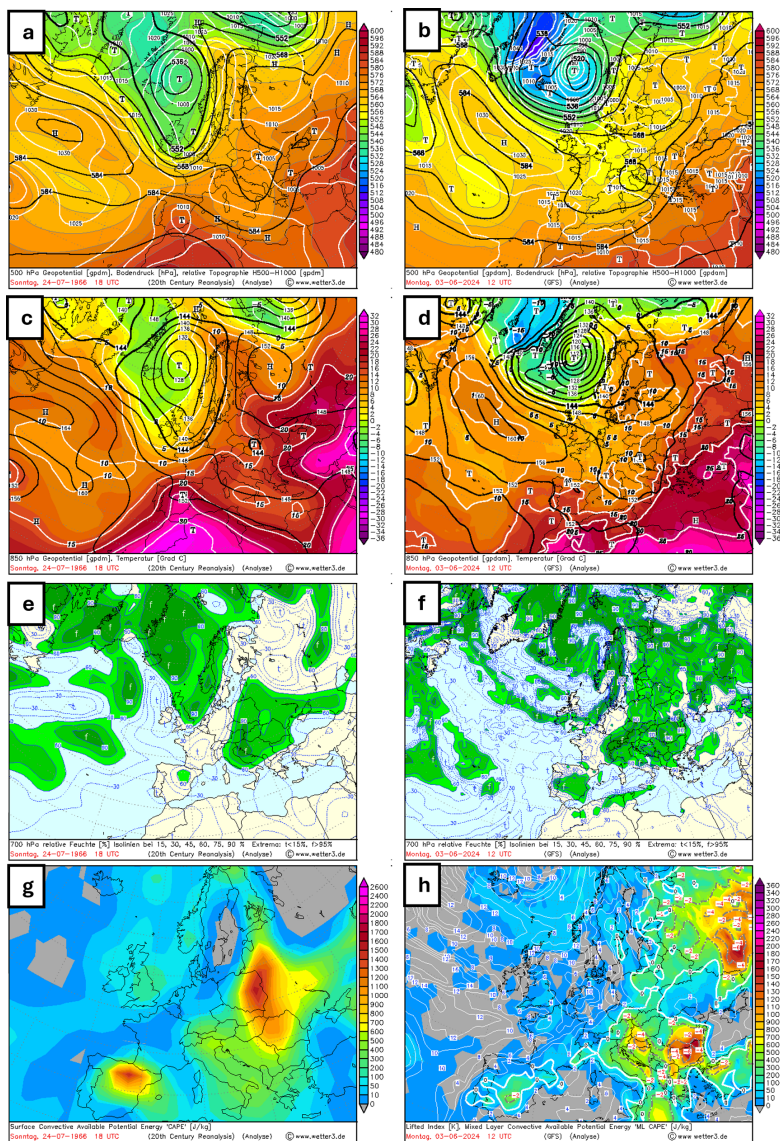
W rozpatrywanym okresie 75-lecia wystąpiły dwa przypadki opadów związanych z głęboką konwekcją – 24 lipca 1966 roku i 3 czerwca 2024 roku. W obu sytuacjach południowa Polska znajdowała się w zasięgu rozległych układów niżowych, z ośrodkami w rejonie Morza Czarnego i Węgier. Położenie obszaru badań w przedniej części górnej zatoki niżowej (rys. 3a-b) sprzyjało dodatniej adwekcji wirowości i dywergencji w środkowej troposferze, prowadząc do wymuszonych ruchów wznoszących. W połączeniu z adwekcją ciepłego i wilgotnego powietrza znad Morza Czarnego, skutkowało to wzrostem intensywności opadów.

Zaleganie bardzo ciepłej i wilgotnej masy powietrza nad obszarem badań potwierdza także analiza rozkładu temperatury na poziomie izobarycznym 850 hPa. 24 lipca 1966 roku temperatura na tym poziomie osiągała około 15°C (rys. 3c), natomiast wilgotność względna na wysokości 700 hPa wynosiła 75-85% (rys. 3e), co pozwala klasyfikować napływające powietrze jako zwrotnikowe lub polarne morskie ciepłe. Jednocześnie duża chwiejność termodynamiczna, wyrażona wartościami CAPE 1200-1500 J/kg (rys. 3g), wskazywała na sprzyjające warunki do rozwoju głębokiej konwekcji. Ponadto, słaby przepływ w środkowej troposferze oraz niewielki gradient baryczny sprzyjały stagnacji lub powolnemu przemieszczaniu się komórek burzowych, przyczyniając się do kumulacji bardzo wysokich sum opadów w Bielsku-Białej (rys. 3a).

3 czerwca 2024 roku temperatura na poziomie 850 hPa, podobnie jak w roku 1966, osiągała około 15°C (rys. 3d). Wilgotność względna, przekraczająca 90% na wysokości 700 hPa jest typowa dla aktywnych stref frontowych, zwłaszcza frontów ciepłych i okluzji (rys. 3f). W przeciwieństwie do przypadku z 1966 roku, chwiejność termodynamiczna była jednak wyraźnie mniejsza – wartości ML CAPE wynosiły 500-600 J/kg (rys. 3h). Oznacza to, że mniejsza rola chwiejności termodynamicznej została w tym przypadku skompensowana przez dynamiczne wymuszenie wznoszenia przez front atmosferyczny i barierę orograficzną Beskidów.

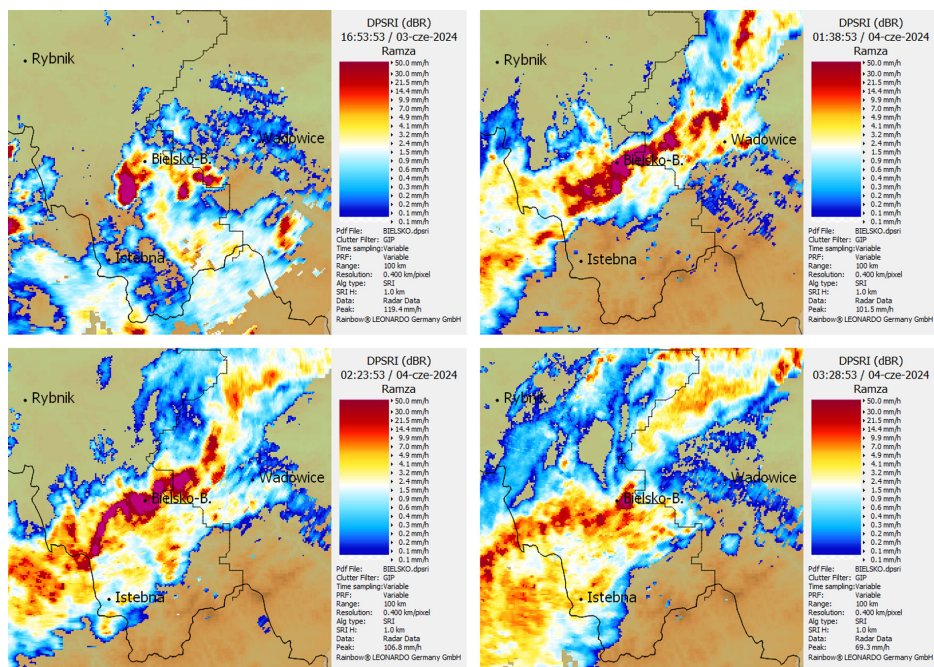
Analiza danych radarowych wykazała, że pierwsze izolowane komórki burzowe zaczęły się pojawiać po godzinie 16 UTC nad Beskidem Śląskim, z rdzeniem zlokalizowanym na południowy zachód od Bielska-Białej (rys. 4). Z analizy produktu radarowego (DPSRI) wynika, że natężenie opadu przekraczało 50 mm/h, co wskazuje na dużą wydajność opadów mimo umiarkowanej chwiejności. Najbardziej intensywne opady w Bielsku-Białej wystąpiły w nocy z 3 na 4 czerwca i były związane z przejściem płytkiego niżu oraz frontu okluzji (rys. 5). Równoległy przepływ powietrza względem linii frontu atmosferycznego oraz niewielka prędkość jego przemieszczania sprzyjały formowaniu się układu typu *training storms*, czyli kolejnych komórek konwekcyjnych przemieszczających się jedna za drugą nad tym samym obszarem przez wiele godzin (<https://forecast.weather.gov/glossary.php?letter=t>). Skutki tych opadów były katastrofalne – według danych pomiarowych IMGW-PIB suma opadów w Bielsku-Białej w ciągu jednej doby wyniosła 127,3 mm, z czego prawie 80 mm spadło między godziną 1 a 4 UTC. Doszło do wezbrania rzek i potoków oraz licznych podtopień i szkód w infrastrukturze; powódź uznano za jedną z największych katastrof hydrometeorologicznych w południowej Polsce w ostatnich kilkudziesięciu latach (<https://bielsko-biala.pl/>, <https://www.gov.pl/>).

W porównaniu z epizodem opadowym z 1966 roku, w którym decydującą rolę odgrywała bardzo silna chwiejność termodynamiczna i quasi-stacjonarność komórek burzowych, w 2024 kluczowe znaczenie miała organizacja komórek opadowych wzdłuż



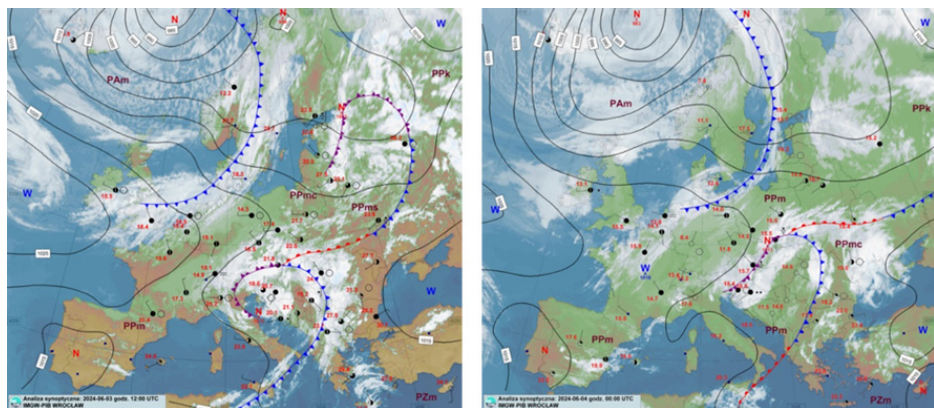
Rys. 3. Wysokość geopotencjału na 500 hPa, ciśnienie na poziomie morza oraz topografia względna 500-1000 hPa (a, b); wysokość geopotencjału i temperatura na 850 hPa (c, d); wilgotność względna na 700 hPa (e, f); CAPE (g); ML CAPE i Lifted Index (h) w dniu 24 lipca 1966 r. o 18 UTC i 3 czerwca 2024 r. o 12 UTC. Źródło: wetter3.de.

Fig. 3. Geopotential height at 500 hPa, sea-level pressure, and 500-1000 hPa thickness (a, b); geopotential height and temperature at 850 hPa (c, d); relative humidity at 700 hPa (e, f); CAPE (g); Mixed Layer CAPE and Lifted Index (h) on 24 July 1966 at 18 UTC and 3 June 2024 at 12 UTC. Source: wetter3.de.



Rys. 4. Natężenie opadu (produkt radarowy DPSRI, dBR) 3 czerwca 2024 r. o godz. 16:53 UTC i 4 czerwca 2024 r. o godz. 01:38, 02:23, 03:28 UTC. Źródło: danepubliczne.imgw.pl.

Fig. 4. Precipitation intensity (DPSRI radar product, dBR) on 3 June 2024 at 16:53 UTC and on 4 June 2024 at 01:38, 02:23, and 03:28 UTC; danepubliczne.imgw.pl.



Rys. 5. Sytuacja synoptyczna dolna 3 czerwca (12 UTC) i 4 czerwca (00 UTC) 2024 r. Źródło: meteo.imgw.pl.

Fig. 5. Surface synoptic situation on 3 June 2024 at 12 UTC and 4 June 2024 at 00 UTC. Source: meteo.imgw.pl.

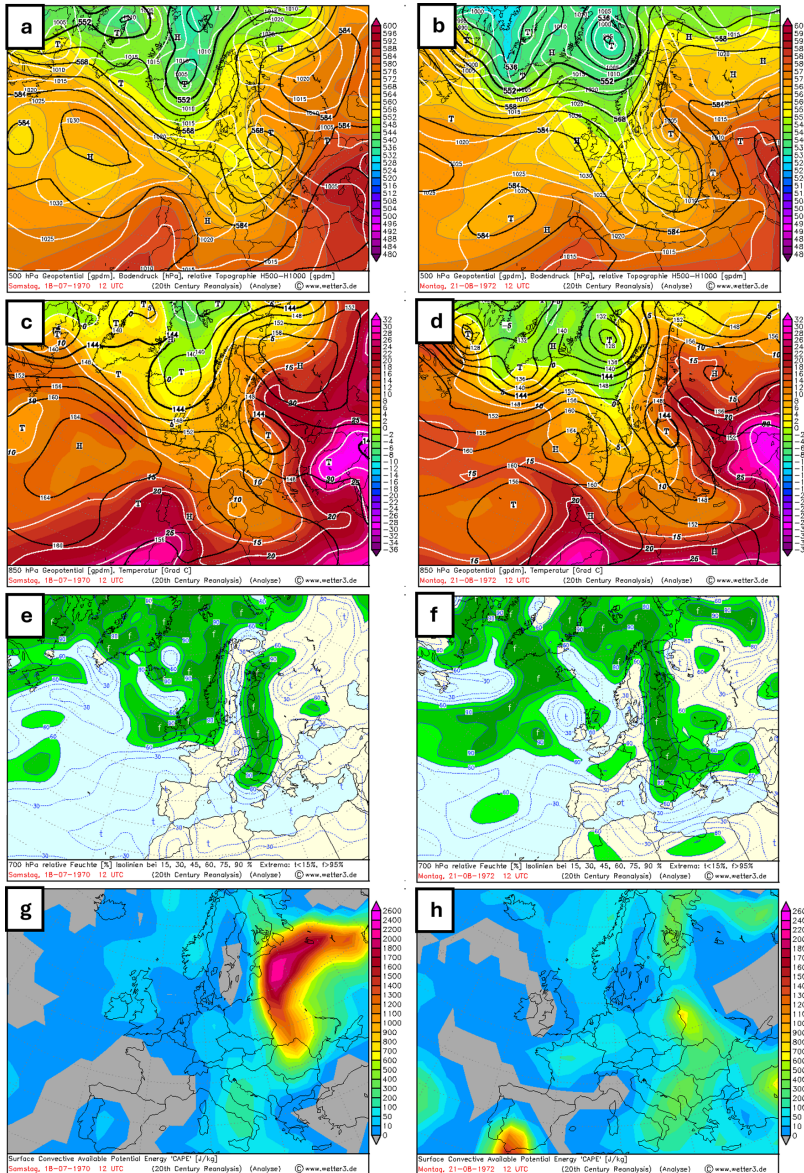
strefy frontowej. W obu przypadkach wspólnym elementem pozostawał jednak słaby przepływ w środkowej troposferze i niewielki gradient baryczny, sprzyjające długotrwałej ekspozycji rejonu Bielska-Białej na intensywne opady.

Opady związane z niżami śródziemnomorskimi

W rozpatrywanym okresie 75-lecia wystąpiło pięć przypadków opadów związanych z niżami śródziemnomorskimi, tj. 18 lipca 1970, 21 sierpnia 1972, 16 maja 2010, 14 września 2024 i 27 lipca 2025 roku. Te epizody ekstremalnych opadów atmosferycznych wpisują się w charakterystyczny schemat sytuacji synoptycznych związanych z niżami genueńskimi. Na podstawie analizy map synoptycznych z dni poprzedzających wystąpienie zdarzenia można stwierdzić, że ich geneza była związana z przemieszczaniem się niżów z rejonu Zatoki Genueńskiej w kierunku północnym, przez obszar Kotliny Panońskiej, po trajektorii biegnącej na wschód od badanego obszaru (tor Vb) (Van Beber 1891). W takich warunkach rejon Bielska-Białej znajdował się w zasięgu tylnej części niżów, co wiązało się z napływem powietrza z sektora północnego, prostopadłym do pasm Beskidów, skutkując wymuszonym wznoszeniem mas powietrza i orograficznym wzmocnieniem opadu.

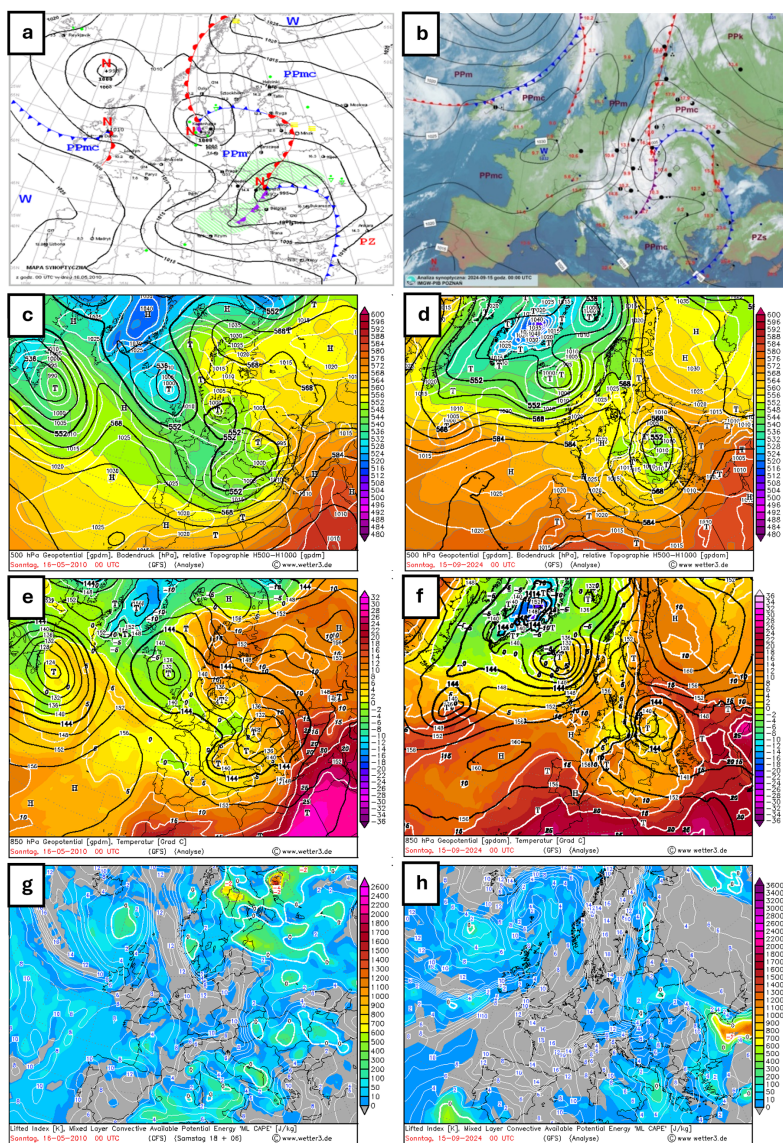
Opisany schemat cyrkulacyjny był szczególnie wyraźny w epizodach z 18 lipca 1970 i 21 sierpnia 1972 roku. W obu przypadkach analiza materiałów synoptycznych wskazuje na oddziaływanie dojrzałych niżów genueńskich, dobrze zaznaczonych w polu geopotencjału 500 hPa i 850 hPa (zamknięte izohipsy), co potwierdza ich pionowo rozbudowaną strukturę (rys. 6a-b). Temperatura na poziomie 850 hPa wynosiła 10-14°C, przy jednoczesnym występowaniu wyraźnego gradientu termicznego (rys. 6c-d), natomiast bardzo duża wilgotność względna w środkowej troposferze ($RH_{700} > 90\%$) wskazywała na obecność aktywnych stref frontowych i napływ powietrza polarne morskiego ciepłego nad południową Polskę (rys. 6e-f). Parametry termodynamiczne w obu sytuacjach wskazywały na niewielką chwiejność ($CAPE$ 100-300 J/kg), co przemawia za dominacją opadów o charakterze ciągłym, z ewentualną lokalną konwekcją wbudowaną w strefy frontów (rys. 6g-h). Dobowe sumy opadu osiągnęły 132,1 mm (1970) oraz 147,4 mm (1972), prowadząc do poważnych skutków hydrologicznych. Ze względu na ograniczoną dostępność danych obserwacyjnych, w tym brak danych radarowych, szczegółowa charakterystyka struktury opadu jest ograniczona. Dostępne materiały synoptyczne wskazują jednak na dominację procesów frontowych i wielkoskalowych.

Analogiczne uwarunkowania synoptyczne, jednak charakteryzujące się większą intensywnością procesów dynamicznych i dłuższym czasem oddziaływania układu ba-



Rys. 6. Wysokość geopotencjału na 500 hPa, ciśnienie na poziomie morza oraz topografia względna 500-1000 hPa (a, b); wysokość geopotencjału i temperatura na 850 hPa (c, d); wilgotność względna na 700 hPa (e, f); CAPE (g, h) w dniu 18 lipca 1970 r. i 21 sierpnia 1972 r. o godz. 12 UTC. Źródło: wetter3.de.

Fig. 6. Geopotential height at 500 hPa, sea-level pressure, and 500-1000 hPa thickness (a, b); geopotential height and temperature at 850 hPa (c, d); relative humidity at 700 hPa (e, f); CAPE (g, h) on 18 July 1970 and 21 August 1972 at 12 UTC. Source: wetter3.de.

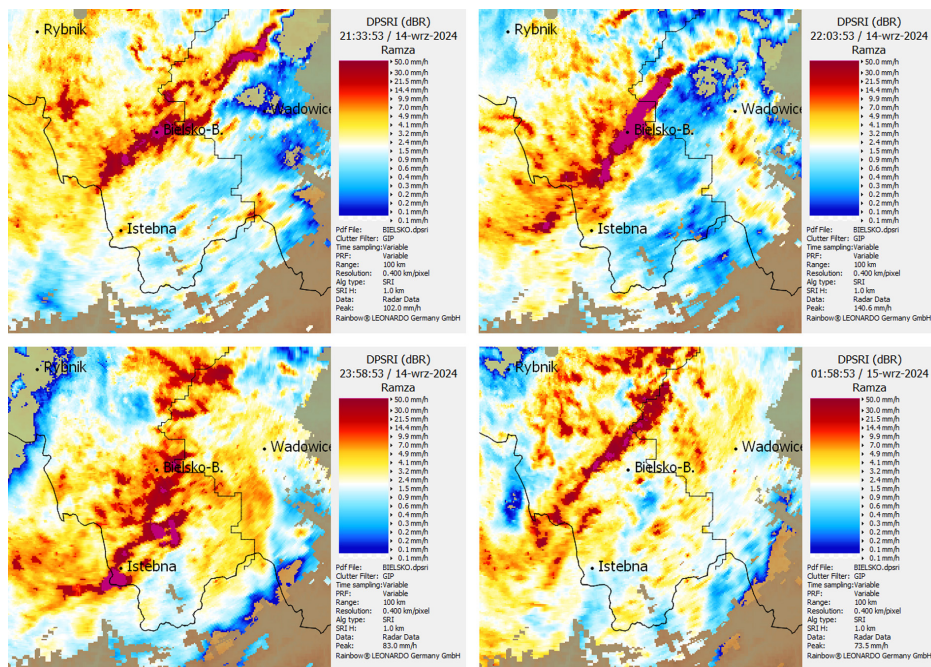


Rys. 7. Sytuacja synoptyczna dolna (a, b) biuletyn PSHM, meteo.imgw.pl; wysokość geopotencjału na 500 hPa, ciśnienie na poziomie morza oraz topografia względna 500-1000 hPa (c, d); wysokość geopotencjału i temperatura na 850 hPa (e, f); MLCAPE i Lifted Index (g, h); w dniu 16 maja 2010 r. i 15 września 2024 r. o godz. 00 UTC. Źródło: wetter3.de.

Fig. 7. Surface synoptic situation (a, b), PSHM Bulletin, meteo.imgw.pl; geopotential height at 500 hPa, sea-level pressure, and 500-1000 hPa thickness (c, d); geopotential height and temperature at 850 hPa (e, f); MLCAPE and Lifted Index (g, h) on 16 May 2010 and 15 September 2024 at 00 UTC.

Source: wetter3.de.

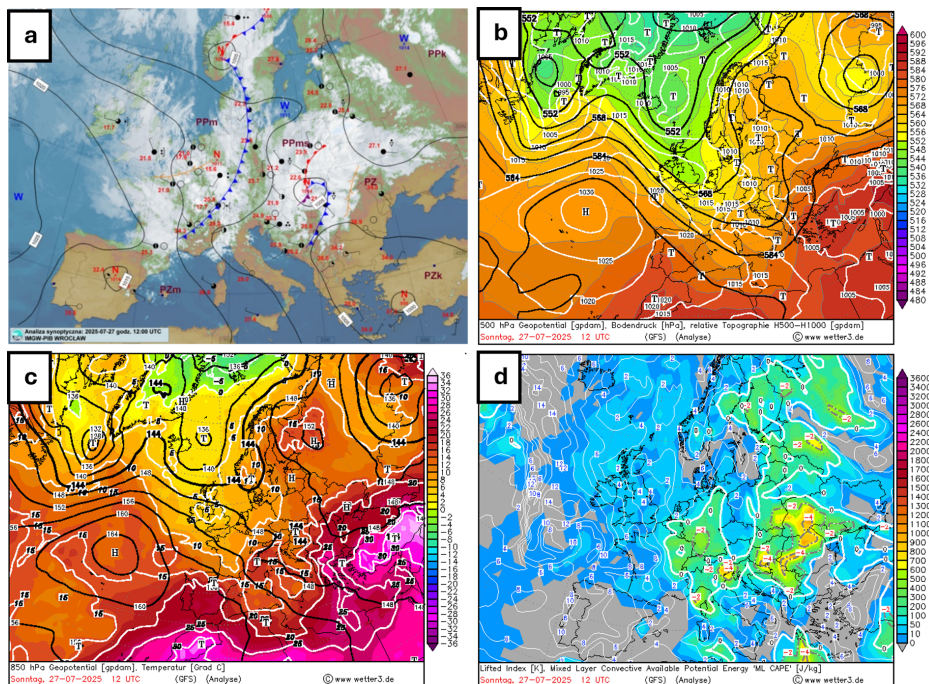
rycznego, wystąpiły w maju 2010 i we wrześniu 2024 roku. Opady te stanowią klasyczny przykład długotrwałego oddziaływania niżu genuńskiego przemieszczającego się po trajektorii Vb w warunkach sytuacji blokadowej (rys. 7a-b). W polu geopotencjału 500 hPa i 850 hPa występowały liczne zamknięte izohipsy, wskazujące na pionowo rozbudowaną, dojrzałą sytuację cyklonalną (rys. 7c-d). Obszar Bielska-Białej pozostawał w tylnej części niżu, jednak względnie blisko jego centrum oraz strefy okludujących się frontów, gdzie nakładały się procesy frontogenezy, dodatniej adwekcji wirowości oraz długotrwałego wymuszenia ruchów wznoszących. Rozkład temperatury powietrza na poziomie 850 hPa wykazywał wyraźny kontrast termiczny (rys. 7e-f), który sprzyjał utrzymywaniu aktywnych stref frontowych oraz nasileniu procesów frontogenezy. Warunki termodynamiczne charakteryzowały się niewielką chwiejnością (ML CAPE 100-300 J/kg) oraz dodatnimi wartościami wskaźnika Lifted Index (rys. 7g-h). Wskazuje to na dominację procesów wielkoskalowych, przy możliwej, lecz drugorzędnej roli wbudowanych komórek konwekcyjnych (rys. 8).



Rys. 8. Natężenie opadu (produkt radarowy DPSRI, dBR), 14 września 2024 r. o godz. 21:33, 22:03, 23:58 UTC i 15 września 2024 r. o godz. 01:58 UTC. Źródło: danepubliczne.imgw.pl.

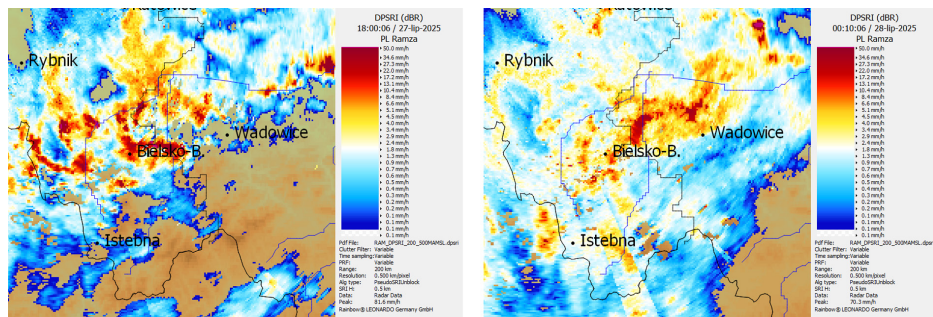
Fig. 8. Precipitation intensity (DPSRI radar product, dBR) on 14 September 2024 at 21:33, 22:03, and 23:58 UTC and on 15 September 2024 at 01:58 UTC. Source: danepubliczne.imgw.pl.

Dwa największe epizody opadów w Bielsku-Białej (162,7 mm w maju 2010 i 149,0 mm we wrześniu 2024 roku) nie były zatem wynikiem głębokiej konwekcji, lecz wynikały ze sprzężenia kilku procesów dynamicznych. Kluczowe znaczenie miała blokada wyżowa (silne układy wysokiego ciśnienia nad zachodnią Europą, Skandynawią oraz północno-zachodnią Rosją), w warunkach której nize wraz z systemem frontów pozostawały niemal stacjonarne lub przemieszczały się bardzo wolno. Jednocześnie północny napływ powietrza w tylnej części niżu, napotykając na barierę pasm Beskidów, powodował wymuszone wznoszenie orograficzne. Konsekwencją powstałych obfitych opadów były katastrofalne wezbrania rzek, liczne zalania oraz poważne szkody w infrastrukturze, a opady w maju 2010 roku przyczyniły się do wystąpienia jednej z największych powodzi w południowo-zachodniej Polsce.



Rys. 9. Sytuacja synoptyczna dolna (a) meteo.imgw.pl; wysokość geopotencjału na 500 hPa, ciśnienie na poziomie morza oraz topografia względna 500–1000 hPa (b); wysokość geopotencjału i temperatura na 850 hPa (c); MLCAPE i Lifted Index (d); w dniu 27 lipca 2025 r. o godz. 12 UTC. Źródło: wetter3.de.

Fig. 9. Surface synoptic situation (a), meteo.imgw.pl; geopotential height at 500 hPa, sea-level pressure, and 500–1000 hPa thickness (b); geopotential height and temperature at 850 hPa (c); MLCAPE and Lifted Index (d) on 27 July 2025 at 12 UTC. Source: wetter3.de.



Rys. 10. Natężenie opadu (produkt radarowy DPSRI, dBR), 27 lipca 2025 r. o godz. 18:00 i 28 lipca 2025 r. o godz. 00:10 UTC. Źródło: danepubliczne.imgw.pl.

Fig. 10. Precipitation intensity (DPSRI radar product, dBR) on 27 July 2025 at 18:00 UTC and on 28 July 2025 at 00:10 UTC. Source: danepubliczne.imgw.pl.

Wystąpienie kolejnego opadu katastrofalnego niespełna rok później potwierdza częste oddziaływanie sytuacji synoptycznych sprzyjających długotrwałym opadom wielkoskalowym nad obszarem Bielska-Białej. Sytuacja z 27 lipca 2025 roku (112,9 mm) wykazywała wyraźną analogię do wcześniej rozpatrywanych przypadków pomimo płytszego niżu (rys. 9a-d). Na poziomie 500 hPa zaznaczyła się jedynie głęboka zatoka niżowa bez w pełni zamkniętego ośrodka (rys. 9b). Jednocześnie temperatura powietrza na poziomie 850 hPa nad południową Polską wynosiła 12-14°C, co wskazuje na adwekcję ciepłej i wilgotnej masy powietrza polarnego morskiego (rys. 9c). Jak w poprzednich przypadkach, obszar Bielska-Białej znajdował się względnie blisko centrum niżu, a więc również strefy okludujących się frontów. Analiza danych radarowych (produkt DPSRI) wskazuje na okresy wzmożonych opadów, lokalnie przekraczających 35-40 mm/h, szczególnie w strefie oddziaływania frontu (rys. 10). W odróżnieniu od sytuacji z 2010 i z 2024, w 2025 roku nie obserwowano klasycznej, silnej blokady wyżowej. Wskazuje to, że katastrofalne opady mogą występować również w warunkach jedynie umiarkowanie spowolnionego przemieszczania się układu barycznego.

Podsumowanie

W rozpatrywanym 75-leciu w Bielsku-Białej wystąpiło siedem przypadków opadów dobowych przekraczających 100 mm, co oznacza, że przeciętnie tego rodzaju zdarzenia pojawiały się względnie często, bo około raz na 10 lat. W rzeczywistości jednak ich występowanie jest bardzo zmienne w ujęciu zarówno wieloletnim, jak i rocznym. Ponad połowa tych epizodów opadowych (cztery przypadki) wystąpiła w 15-leciu 2010-2025.

Ta zauważalna koncentracja może wynikać zarówno ze wzrostu potencjału termodynamicznego atmosfery w cieplejszym klimacie (większa zawartość pary wodnej w masach powietrza), jak i ze zmienności cyrkulacji atmosferycznej sprzyjającej częstszemu napływowi wilgotnego powietrza. Choć analiza opiera się na niewielkiej liczbie zdarzeń, zauważalne jest, że w ostatnich latach opady katastrofalne nie ograniczają się już wyłącznie do miesięcy letnich (lipiec-sierpień), lecz pojawiają się również w maju i we wrześniu. Może to świadczyć o wydłużaniu się okresu w roku sprzyjającego występowaniu warunków termodynamicznych prowadzących do ekstremalnych sum dobowych.

Analiza synoptyczna zdarzeń wykazała, że tak wysokie sumy opadów były spowodowane zarówno głęboką konwekcją i wystąpieniem burz, jak i przejściem nad południową Polską niżów genueńskich torem Vb. Kluczową rolę w intensyfikacji opadów odegrała rzeźba terenu – strome, dowietrzne zbocza Beskidów działały jako bariera orograficzna, wzmacniająca procesy wznoszenia powietrza i przyczyniająca się do kumulacji rekordowych sum dobowych, dochodzących w Bielsku-Białej do 163 mm.

Przedstawione przypadki pokazują, że opady katastrofalne w Bielsku-Białej są efektem łącznego oddziaływania warunków synoptycznych (fronty atmosferyczne), termodynamicznych (ciepłe i wilgotne masy powietrzne) oraz orograficznych (pasma Beskidów). Złożoność tych czynników sprawia, że nawet przy podobnych warunkach wyjściowych nie zawsze dochodzi do wystąpienia opadów o charakterze katastrofalnym. Wskazuje to na naturalną zmienność tego typu zjawisk oraz ograniczoną możliwość ich jednoznacznego odwzorowania w modelach prognostycznych.

Z dotychczasowych badań wynika jednoznacznie, że intensywne opady w polskich Karpatach wywołują zwykle układy niżowe znad Morza Śródziemnego i północnych Włoch, przemieszczające się w kierunku północno-wschodnim, zwykle przez Węgry i Karpaty, nad Polskę południową, Ukrainę lub Białoruś, co można zilustrować wieloma znanymi przykładami z literatury wcześniejszych powodzi, np. w 1970 (Niedźwiedź 1972), 1997 (Grela i in. 1999) i 2010 (Bissolli i in. 2011; Maciejewski i in. 2011). Po przekroczeniu głównego łańcucha Karpat niżej takie utrzymują się od 2 do 3, a nawet 7 dni nad południowo-wschodnią Polską i zachodnią Ukrainą, zapewniając długotrwałą adwekcję wilgotnych mas powietrznych i intensywne opady na północnych stokach Beskidów Zachodnich. Bariery orograficzne stają się dodatkowym czynnikiem odpowiedzialnym za kondensację pary wodnej i powstanie grubej warstwy niskich chmur. Opady rozlewne obejmują wówczas duże obszary i są przyczyną regionalnych powodzi (Cebulak i in. 2000). W czasie przemieszczania się układów niżowych nad obszarami górskimi bariery orograficzne mogą utrudniać przepływ mas powietrza i sprzyjać efektom spiętrzeniowym. W fazie wypełniania się niżej mogą przyjmować charakter quasi-stacjonarny, a opady stają się długotrwałe (Twardosz i in. 2025).

W kontekście uzyskanych wyników warto odnieść się do częstości występowania niżów śródziemnomorskich nad obszarem Karpat. Przeciętnie stwierdza się około siedmiu takich niżów w roku, co odpowiada prawdopodobieństwu ich wystąpienia w dowolnym dniu na poziomie około 2% (Degirmendzić, Kozuchowski 2016). Niże te wykazują wyraźną sezonową zmienność występowania z maksimum wiosennym i jesiennym. Maksimum wiosenne jest bardziej zaznaczone i związane z dominującą w tej porze roku cyrkulacją południkową nad Europą, która sprzyja wędrówce niżów znad Morza Śródziemnego na północ. Z obecnością tych niżów związane jest 88% powodzi w Polsce (Morozowska 1971; Bartoszek 2006).

Niże śródziemnomorskie, w odróżnieniu od niżów znad północnego Atlantyku, wykazują mniejszą aktywność oraz krótszy czas trwania. Co czwarty przypadek anomalii pogodowej jest przypisywany cyklonom genueńskim (Bartoszek 2006). W Polsce w cieplej porze roku przeciętnie co czwartemu niżowi towarzyszą opady o sumie dobowej przekraczającej 50 mm (Morozowska 1971). Prędkość przemieszczania się niżu i frontów atmosferycznych była zależna od występowania sytuacji blokadowych, które sprzyjały długotrwałej akumulacji opadów, prowadząc do wystąpienia rekordowych sum opadów, jak w maju 2010 roku. Badania te pokazały, że szczególną uwagę należy zwrócić na lokalne występowanie wtórnych niżów w obrębie rozległej zatoki niżowej, co – jak wykazała sytuacja z września 2024 roku – może istotnie zwiększyć intensywność opadów i ryzyko powodzi błyskawicznych w Karpatach Polskich.

Badania potwierdzają zatem, że decydujące znaczenie ma nie tylko obecność niżu śródziemnomorskiego, lecz także jego trajektoria, tempo przemieszczania się oraz położenie badanego obszaru względem centrum układu i stref frontowych. Uzyskane wyniki pozwalają na sformułowanie następujących uogólnień dotyczących opadów katastrofalnych w Bielsku-Białej:

- Kluczową rolę w ich powstawaniu odgrywają niże genueńskie przemieszczające się najczęściej po trajektorii Vb, przebiegającej na wschód od badanego obszaru i prowadzącej na północ.
- Intensywność opadów wzrasta wraz z bliskością centrum niżu i frontów atmosferycznych.
- Istotnym czynnikiem modyfikującym wielkość sum opadów jest orografia – szczególnie przy napływie powietrza z sektora północnego, kiedy wymuszone wznoszenie na stokach Beskidów sprzyja wzrostowi opadów.
- Opady te były związane zarówno z głęboką konwekcją, jak i z układami niżowymi, które pozostawały przez dłuższy czas niemal stacjonarne, ze względu na blokujące układy wysokiego ciśnienia.

- W części przypadków (np. 1970 i 1972) wysokie sumy dobowe wynikały z powolnego przemieszczania się niżu na północ, bez jego całkowitej stagnacji.

Reasumując, należy stwierdzić, że przedstawiona analiza ma charakter studium przypadku opartego wyłącznie na danych z jednej stacji. Uzyskane wyniki wskazują, że opady przekraczające 100 mm są ściśle związane z określonymi sytuacjami synoptycznymi, zwłaszcza z adwekcją wilgotnych mas powietrza w tylnej części niżów śródziemnomorskich oraz z epizodami głębokiej konwekcji. Jednocześnie większa koncentracja tych zdarzeń w ostatnich latach może pozostawać w związku z ociepleniem klimatu, które sprzyja wzrostowi zawartości pary wodnej w atmosferze i zwiększa potencjał opadowy przy sprzyjających warunkach cyrkulacyjnych. Pełniejsze rozpoznanie tego zjawiska wymaga jednak rozszerzenia badań na cały obszar Karpat Polskich, gdyż ekstremalne opady stanowią istotne zagrożenie hydrologiczne i społeczne dla wielu mieszkańców obszaru.

L i t e r a t u r a

- Bartoszek K., 2006, Niże śródziemnomorskie, *Przegląd Geofizyczny*, 1, 35-45.
- Bissolli P., Friedrich K., Rapp J., Ziese M., 2011, Flooding in eastern central Europe in May 2010 – reasons, evolution and climatological assessment, *Weather*, 66, 147-153.
- Cebulak E., 1992a, Wpływ sytuacji synoptycznej na maksymalne opady dobowe w dorzeczu górnej Wisły, *Folia Geographica, Series Geographica-Physica*, 23, 81-95.
- Cebulak E., 1992b, Maksymalne opady dobowe w dorzeczu górnej Wisły, *Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne*, 90, 79-96.
- Cebulak E., Faško P., Lapin M., Šťastný P., 2000, Extreme precipitation events in the Western Carpathians, *Prace Geograficzne*, 108, 117-124.
- Cebulak E., Limanówka D., Pyrc R., Gębica P., Starkel L., 2018, Wpływ wybranych barier górskich na rozkład opadów w polskich Karpatach, *Przegląd Geofizyczny*, 1-2, 123-133.
- Degirmendzić J., Kożuchowski K., 2016, Aktywność niżów śródziemnomorskich nad Polską a cyrkulacja w górnej i środkowej troposferze, *Przegląd Geofizyczny*, 1-2, 3-30.
- Grela J., Słota H., Zieliński J. (red.), 1999, *Dorzecze Wisły – Monografia Powodzi*, lipiec 1997, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa, Poland.
- Kaczorowska Z., 1933, Przyczyny meteorologiczne letnich wezbrań Wisły, *Prace PIM*, 2, ss. 54.
- Kostrakiewicz L., 1977, Opady atmosferyczne na terenach nawietrznych i zawietrznych Polskich Karpat, *Czasopismo Geograficzne*, XLVIII, 2.

- Kożuchowski K., Żmudzka E., 2003, 100-year series of areally averaged temperatures and precipitation totals in Poland, *Studia Geograficzne*, 75, *Acta Universitatis Wratislaviensis*, 2542, 116-122.
- Leśniak B., Obrębska-Starkłowa B., 1983, Klimat województwa bielskiego, *Folia Geographica, Series Geographica-Physica*, 15, 21-47.
- Lorenc H., 2012, Kłęski żywiołowe a bezpieczeństwo wewnętrzne kraju, IMGW Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa, ss. 39.
- Maciejewski M., Ostojski M., Walczykiwicz T. (red.), 2011, Dorzecze Wisły: monografia powodzi maj – czerwiec 2010, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa.
- Michalczewski J., 1953, Meteorologiczna analiza powodzi z 10 i 11 maja 1951 r., *Przegląd Meteorologiczny i Hydrologiczny*, 6, 3-4, 107-113.
- Milata W., 1955, Synoptyka wielkich opadów atmosferycznych w Karpatach, *Przegląd Meteorologiczny i Hydrologiczny*, 8, 3-4, 210-217.
- Morawska M., 1963, Meteorologiczna charakterystyka powodzi z czerwca 1948 r., *Biuletyn PIHM*, 1, ss. 28.
- Morawska-Horawska M., 1971, Meteorologiczne przyczyny powodzi w Polsce Południowej w lipcu 1970 roku, *Przegląd Geofizyczny*, 16 (24), 4, 299-315.
- Morawska-Horawska M., 1979, Meteorologiczne przyczyny letniego wezbrania w Karpatach Zachodnich w 1973 r., *Przegląd Geofizyczny*, 24, 3-4, 339-347.
- Morozowska J., 1971, Opady ciągle w Polsce związane z niżami pochodzenia południowo-europejskiego, *Prace PIHM*, 103, 57-67.
- Mycielska H., 1979, Atlas typowych sytuacji synoptycznych przy występowaniu opadów powodziowych w dorzeczu górnej Wisły (1951-1960), Wyd. IMGW, Warszawa, ss. 16.
- Nachlik E., Kundzewicz Z. W., 2016, History of floods on the Upper Vistula, [w:] Z. Kundzewicz, M. Stoffel, T. Niedźwiedz, B. Wyżga (red.), *Flood risk in the Upper Vistula Basin. Geo-Planet: Earth and planetary sciences*, 279-292.
- Niedźwiedz T., 1972, Heavy Rainfall in the Polish Carpathians during the Flood in July 1970, *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, 6, 194-199.
- Niedźwiedz T., 1981, Sytuacje synoptyczne i ich wpływ na zróżnicowanie przestrzenne wybranych elementów klimatu w dorzeczu górnej Wisły, *Rozprawy habilitacyjne UJ*, 58, Kraków, ss. 165.
- Niedźwiedz T., 1999, Rainfall characteristics in southern Poland during the severe flooding event of July 1997, *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, 33, 5-25.
- Niedźwiedz T., 2025, Kalendarz typów cyrkulacji atmosfery dla Polski południowej – zbiór komputerowy, Uniwersytet Śląski, Katedra Klimatologii, Sosnowiec, <http://klimat.wnoz.us.edu.pl/>
- Niedźwiedz T., Czekierda D., 1998, Cyrkulacyjne uwarunkowania katastrofalnej powodzi w lipcu 1997 roku, [w:] *Powódź w dorzeczu górnej Wisły w lipcu 1997*, Konferencja naukowa w Krakowie 7-9 maja 1998, Wydawnictwo Oddziału Polskiej Akademii Nauk, Kraków, 53-66.

- Niedźwiedz T., Obrębska-Starkłowa B., 1991, *Klimat*, [w:] I. Dynowska, M. Maciejewski (red.), *Dorzecze górnej Wisły*, Wydawnictwo PWN, Warszawa, 68-84.
- Twardosz R., 2000, Wieloletnia zmienność sum dobowych opadów w Krakowie w powiązaniu z sytuacjami synoptycznymi, *Prace Geograficzne*, 105, 19-71.
- Twardosz R., Cebulska M., Walanus A., 2016, Anomalously heavy monthly and seasonal precipitation in the Polish Carpathian Mountains and their foreland during the years 1881-2010, *Theoretical and Applied Climatology*, 126, 323-337.
- Twardosz R., Guzik I., Cebulska M., 2025, Catastrophic Precipitation in the City of Bielsko-Biała (Polish Carpathian Mountains) and Their Synoptic Circumstances (1951-2024), *Water*, 17, 1611, DOI: 10.3390/w17111611.
- Ustrnul Z., Wypych A., Nejedlík P., Mikulová K., 2023, The influence of circulation conditions on extreme precipitation totals over the territory of the Western Carpathians in the warm season, *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 53 (4), 399-411, DOI: 10.31577/congeo.2023.53.4.5.
- Van Bebber W.J., 1891, Die Zugstrassen der barometrischen Minima, *Meteorologische Zeitschrift*, 8, 361-366.
- Walanus A., Cebulska M., Twardosz R., 2021, Long-term variability pattern of monthly and annual atmospheric precipitation in the Polish Carpathian Mountains and their foreland (1881-2018), *Pure and Applied Geophysics*, 178, 633-650, DOI: 10.1007/s00024-021-02663-9.
- Woźniak A., 2013, Opady w 2010 roku w Karpatach polskich na tle wielolecia 1881-2010, *Prace Geograficzne*, 133, 35-48, DOI: 10.4467/20833113PG.13.009.1099.
- Wypych A., Ustrnul Z., Schmatz D. R., 2018, Long-term variability of air temperature and precipitation conditions in the Polish Carpathians, *Journal of Mountain Science*, 15, 237-253.

Źródła internetowe

www.wetter3.de (dostęp: 9.06.2026); danepubliczne.imgw.pl (dostęp: 9.06.2026); <https://bielsko-biala.pl/> (dostęp: 9.06.2026); <https://www.gov.pl/> (dostęp: 9.06.2026); meteo.imgw.pl (dostęp: 9.06.2026); <https://forecast.weather.gov/glossary.php?letter=t> (dostęp: 9.06.2026)

Streszczenie

Celem pracy jest analiza uwarunkowań synoptycznych występowania dobowych sum opadów atmosferycznych przekraczających 100 mm w Bielsku-Białej w latach 1951-2025. Na podstawie tych danych z 75-lecia wyłoniono siedem takich epizodów opadowych w miesiącach od maja do września. Ponad połowa tych zdarzeń (4 przypadki) przypadła na lata 2010-2025. Uzyskane wyniki

wskazują, że opady przekraczające 100 mm są ściśle związane z określonymi sytuacjami synoptycznymi, zwłaszcza z adwekcją wilgotnych mas powietrza w tylnej części niżów śródziemnomorskich – pięć przypadków oraz z epizodami głębokiej konwekcji – dwa przypadki. Opady tej kategorii są efektem łącznego oddziaływania warunków synoptycznych (fronty atmosferyczne), warunków termodynamicznych (ciepłe i wilgotne masy powietrzne) oraz orograficznych (pasma Beskidów). Zwiększona liczba takich epizodów w ostatnich latach może mieć związek z ociepleniem klimatu i większą zasobnością atmosfery w parę wodną. Wyniki podkreślają znaczenie analizy warunków synoptycznych w prognozowaniu opadów ekstremalnych oraz potrzebę rozszerzenia badań na obszar całych Karpat.

Słowa kluczowe: opady powodziowe, sytuacja synoptyczna, Beskid Śląski, nize śródziemnomorskie.

A b s t r a c t

The aim of this study is to analyse the synoptic conditions accompanying daily precipitation totals exceeding 100 mm in Bielsko-Biała over the 75-year period 1951-2025. Based on long-term precipitation data, seven such extreme precipitation episodes were identified between May and September. More than half of these events, i.e. four cases, occurred during 2010-2025. The results indicate that precipitation totals exceeding 100 mm are closely linked to specific synoptic situations, particularly the advection of moist air masses on the rear side of Mediterranean cyclones, which occurred in five cases, and episodes of deep convection, which occurred in two cases. Precipitation of this magnitude results from the combined influence of synoptic conditions, including atmospheric fronts, thermodynamic conditions, namely warm and humid air masses, and orographic factors associated with the Beskid mountain ranges. The increased frequency of such episodes in recent years may be related to ongoing climate warming and the resulting increase in atmospheric moisture content. The findings highlight the importance of analysing synoptic conditions for the forecasting of extreme precipitation events and emphasise the need to extend such research to the entire Carpathian region.

Key words: flood precipitation, synoptic situation, Silesian Beskid, Mediterranean cyclones.