

Bartłomiej Pietras (bartłomiej.pietras@up.krakow.pl) *

Robert Pyrc (robert.pyrc@imgw.pl) **

* *Instytut Geografii Uniwersytetu Pedagogicznego im. Komisji Edukacji Narodowej w Krakowie, ul. Podchorążych 2, 30-084 Kraków*

** *Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Piotra Borowego 14, 30-215 Kraków*

Geneza ekstremalnego opadu burzowego i powodzi błyskawicznej w Bielinach w dniu 26 maja 2018 roku

The genesis of extreme stormfall and flash flood in Bieliny on May 26, 2018

STRESZCZENIE

Ekstremalne opady burzowe i wezbrania o charakterze powodzi błyskawicznych stanowią istotne zagrożenie dla życia mieszkańców i wiążą się ze znacznym ryzykiem powstania dużych szkód materialnych na danym obszarze. W niniejszym opracowaniu podjęto próbę przedstawienia genezy ekstremalnego opadu jaki wystąpił 26 maja 2018 w miejscowości Bieliny położonej w powiecie kieleckim. W niniejszym artykule autorzy skupili się na synoptycznych i meteorologicznych uwarunkowaniach rozwoju burz podczas analizowanego epizodu a także przedstawili przebieg i rozwój zjawisk burzowych i związanych z nimi opadów w ujęciu czasowym oraz przestrzennym. Ponadto na podstawie danych radarowych oraz opadowych pochodzących z sieci IMGW przedstawiono natężenie i wydajność opadu atmosferycznego w oparciu o współczynnik wydajności α zaproponowany przez Chomicza.

SUMMARY

Extreme rainfall and flash flood pose a significant threat to the health of residents as well as are associated with significant risk of material damage on the given area. The paper presents a study on the causes of an extreme rainfall incident connected with thunderstorm development on 26th May 2018 in Bieliny (Kielce county, Poland). We focus on synoptic and meteorological background of thunderstorm development during the analyzed episode. We also present the evolution of storm phenomena with their spatial extent and temporal changes. In addition, we present the intensity and efficiency of precipitation based on data from Institute of Meteorology and Water Management measuring network determined by the efficiency coefficient (α) proposed by Chomicz.

Słowa kluczowe: Deszcz nawalny, burze, powódź błyskawiczna, dane radarowe

Key words: Heavy rain, thunderstorms, flash flood, radar data

WPROWADZENIE

Zjawiska burzowe stanowią bezpośrednie zagrożenie dla ludzkiego życia oraz mogą przyczyniać się do znacznych strat materialnych. W Polsce w ciągu roku notuje się średnio 151 dni z burzą, zaś roczna liczba dni z burzą wzrasta od 15-20 dni w rejonie Morza Bałtyckiego do 30-35 dni w rejonie Karpat (Taszarek i in. 2015). Występowaniu aktywnych burz w Polsce towarzyszy szereg zjawisk niebezpiecznych takich jak silne porywy wiatru, intensywne opady deszczu, wyładowania atmosferyczne, a także w niektórych przypadkach rozwój trąb powietrznych. Wśród najbardziej niebezpiecznych zjawisk będących wynikiem ekstremalnych zjawisk opadów burzowych należy wymienić powodzie błyskawiczne (flash flood). Ten rodzaj powodzi z racji genezy i mechanizmu powstania (konwekcja, deszcz nawalny), wyróżnia się nagłym i krótkotrwałym zalaniem terenu, trwającym od kilkunastu do kilkudziesięciu minut, oraz lokalnym zasięgiem. Podstawowym czynnikiem warunkującym wystąpienie powodzi błyskawicznej jest punktowy i ekstremalnie wysoki opad deszczu.

W przypadku klasyfikowania wybranego zjawiska meteorologicznego jako zdarzenia ekstremalnego nie ma jednoznacznie określonych, uniwersalnych kryteriów dla jego kategoryzacji. Jedną z pierwszych prób klasyfikowania elementów meteorologicznych oraz zjawisk ekstremalnych w polskiej literaturze zaproponował Warakomski (1997), skupiając się głównie na genezie, parametrach, czasie trwania, zasięgu i wielkości szkód jakie spowodowało dane zjawisko, jednak nie przypisując im żadnych konkretnych wartości progowych jako kryterium. Według Trepieńskiej (2007) zjawiskiem ekstremalnym określa się zjawisko lub wartości bliskie ekstremom absolutnym danego elementu, których prawdopodobieństwo wystąpienia wynosi mniej niż 10%. Z kolei zdefiniowane w Słowniku meteorologicznym (2003) hasło „ekstrema” charakteryzowane jest przez pojęcie wartości skrajnych (maksymalnych i minimalnych) określonego parametru meteorologicznego. Ponadto w literaturze funkcjonuje także pojęcie maksymalnego wiarygodnego opadu (WMO), definiowanego jako teoretycznie największa wartość opadu o określonym czasie trwania, którego wystąpienie jest możliwe nad danym obszarem o określonej powierzchni i w wybranej porze roku. Podstawowymi parametrami i założeniami wykorzystywanymi w powyższej metodzie są (Suligowski 2013):

- maksymalna wilgotność powietrza w obszarze źródłowym formowania się mas powietrza decydujących o wysokich opadach na danym obszarze;
- minimalny stopień ich transformacji podczas przemieszczania się do obszaru zasilającego układ opadotwórczy;
- maksymalna efektywność mechanizmu opadotwórczego.

Celem artykułu jest określenie wpływu warunków meteorologicznych, w tym uwarunkowań cyrkulacyjnych oraz warunków termodynamicznych atmosfery na wystąpienie ekstremalnego opadu burzowego w Bielinach (woj. świętokrzyskie,

pow. kielecki) w dniu 26 maja 2018 roku z uwzględnieniem potencjalnego wpływu orografii na przebieg powyższego zjawiska.

PRZEGLĄD LITERATURY

Problematyka występowania burz w Polsce poruszana była w licznych publikacjach. Już w latach 60-tych XX wieku M. Stopa (1960, 1962, 1965) scharakteryzowała występowanie burz w Polsce oraz wydzieliła na obszarze kraju rejony burzowe. Zależność występowania burz w Polsce od cyrkulacji atmosferycznej badali L. Kolendowicz (1998, 2005, 2007), Z. Bielec (2000), R. Twardosz i in. (2010a, 2010b, 2011) oraz D. Matuszko i K. Piotrowicz (2012). Uwarunkowania cyrkulacyjne ekstremalnie burzowych dni w Polsce, w których jako kryterium przyjęto obserwacje burz na 80% stacji synoptycznych były tematem opracowania Z. Ustrnula i D. Czekierdy (2009). Zróżnicowanie przestrzenne i zmienność wieloletnia występowania burz w Polsce była przedmiotem badań między innymi K. Grabowskiej (2001, 2005) oraz Z. Bielec-Bąkowskiej (2002, 2003). Liczną grupę opracowań stanowią publikacje poruszające temat zależności pomiędzy powstawaniem i aktywnością burz a wartościami poszczególnych wskaźników konwekcji (Wróbel 1985; Bąkowski 2005; Siedlecki, Rzepa 2008; Malinowska 2011; Siedlecki 2011; Waławender i in. 2015; Poręba 2016).

Temat cyrkulacyjnych uwarunkowań przestrzennego rozkładu wskaźników niestabilności atmosfery i występowania burz był często podejmowany i został dobrze poznany również w literaturze anglojęzycznej. Warto tutaj wspomnieć o badaniach opartych na reanalizach meteorologicznych, charakteryzujących między innymi rozkład gwałtownych burz w odniesieniu do wskaźników konwekcji, które przeprowadzili E.H. Brooks i in. (2003, 2007) oraz opracowanie D.M. Holley i in. (2014) w którym przedstawiono rozkład wskaźnika CAPE dla obszaru Wielkiej Brytanii. Z kolei A. Delden (2001) opracował szczegółowe mapy synoptyczne, uwzględniające rozkład potencjalnej niestabilności atmosfery podczas występowania burz w Europie Zachodniej.

Występujące podczas burz intensywne opady deszczu mogą przyczynić się do powstania lokalnych powodzi błyskawicznych. Wśród opracowań poruszających problematykę przewidywania i prognozowania ryzyka związanego z występowaniem intensywnych opadów deszczu należy wymienić pracę R. Suligowskiego (2013) dotyczącą maksymalnego możliwego opadu oraz publikację J. Pociask-Karteczki i in. (2017), w której przedstawiono możliwości i sposoby ograniczania skutków powodzi błyskawicznych. Z kolei próbę usystematyzowania i uogólnienia wiedzy a temat przyczyn i przebiegu powodzi błyskawicznych zawiera artykuł J. Pociask-Karteczki i J. Żychowskiego (2014). Gwałtowne wezbrania rzeczne, ich uwarunkowania opadowe jak również cechy fizjograficzne zlewni na obszarach

podgórskich i w Karpatach, które przyspieszające transformacji opadu w odpływ były przedmiotem badań T. Bryndala (2011, 2014). Ponadto, ogólnego przeglądu stanu badań dotyczących ekstremalnych zjawisk meteorologicznych w różnych skalach czasowych i przestrzennych na bazie polskiej literatury naukowej dokonali B. Kaszewski i E. Flis (2014).

O opadach intensywnych na obszarze Polski już w latach 50-tych pisał Chomicz (1954), a o wpływie opadów intensywnych na szybkie powodzi i transformacje morfologiczną zlewni L. Starkel (2012), oraz T. Ziętara (1968), niemniej jednak rzadko w literaturze pojawiają się dokładne analizy poszczególnych przypadków i konkretnych epizodów opadowych.

Skutkiem występujących opadów intensywnych oraz złożonych uwarunkowań środowiskowych jest występowanie nagłych powodzi, powodzi błyskawicznych (ang. flash flood). Jest to powódź o dużej objętości wody i krótkim czasie trwania, występująca po gwałtownym, intensywnym (zwykle burzowym) opadzie, trwającym od kilkunastu minut do kilku, a nawet kilkunastu godzin. Powódź taka może zdarzyć się praktycznie w każdym rejonie Polski i nie musi być związana z gwałtownym wezbraniem na rzece. Może to być również powódź miejska, wywołująca podtopienia i zalania pewnych obszarów miasta (Ostrowski i in. 2013). Wynikiem prowadzonych przez J. Ostrowskiego wraz z zespołem prac w ramach projektu „Klimat” było stworzenie katalogu „nagłych powodzi” na obszarze Polski. Jednym z wniosków określonym w trakcie prac była dalsza potrzeba analizy tego typu zjawiska włącznie z jego genezą synoptyczną i opadową.

TEREN BADAŃ

Bieliny to wieś położona w województwie świętokrzyskim, w powiecie kieleckim w odległości około 20 km na wschód od Kielc. Nazwa Bieliny obowiązuje od 1 stycznia 2003 roku i zastąpiła nazwy miejscowości Bieliny Poduchowne i Bieliny Kapitulne (które pozostały nieoficjalnymi nazwami części wsi). Zgodnie z podziałem regionalnym Polski według J. Kondrackiego (2001), Bieliny leżą w obrębie makroregionu Wyżyny Kielecko-Sandomierskiej i będącego jej elementem mezoregionu Gór Świętokrzyskich.

MATERIAŁY I METODY

Analizę sytuacji synoptycznej z dnia 26 maja 2018 roku dokonano w oparciu o archiwalne dane synoptyczne oraz wyniki modeli numerycznych z godziny 06 UTC. Dla celów analizy pola górnego wykorzystano wyniki globalnego modelu GFS. Wartości wskaźników chwiejności oraz warunków kinematycznych troposfery dla analizowanego dnia pozyskano z modelu ALARO (rozdzielczość przestrzenna 4 km i 60 poziomów) oraz

wielkoskalowego, niehydrostatycznego modelu AROME o rozdzielczości przestrzennej 2.040 km i 60 poziomach wertykalnych. Drugim rodzajem danych dotyczących warunków chwiejności troposfery były pomiary aerologiczne wykonane na stacji aerosondażowej w Legionowie w dwóch terminach: 00 UTC i 12 UTC.

Dane pomiarowe wysokości opadów atmosferycznych pochodziły z sieci posterunków telemetrycznych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej. W opracowaniu wykorzystano wartości godzinowe oraz dobowe sumy opadów z 26 maja 2018 roku.

W celu analizy i prezentacji rozwoju oraz przebiegu zjawiska w opracowaniu wykorzystano dane radarowe polskiej sieci radarów meteorologicznych (POLRAD). Analizie poddano między innymi obrazy radarowe o rozdzielczości czasowej 10 min i przestrzennej 1 km, w zakresie:

- intensywności i sum opadów;
- wysokości wierzchołków chmur;
- możliwości wystąpienia groźnych zjawisk meteorologicznych.

Wykorzystane produkty radarowe obejmowały między innymi kompozycje: CMAX – odbiciowości maksymalnej, SRI – natężenia opadu, PAC – suma opadu za 1 godzinę, ZHail – prawdopodobieństwo wystąpienia gradu.

Produkty satelitarne obrazujące przebieg struktury zachmurzenia nad Polską obejmowały zdjęcia w zakresie widzialnym oraz z wykorzystaniem palety Setvak.

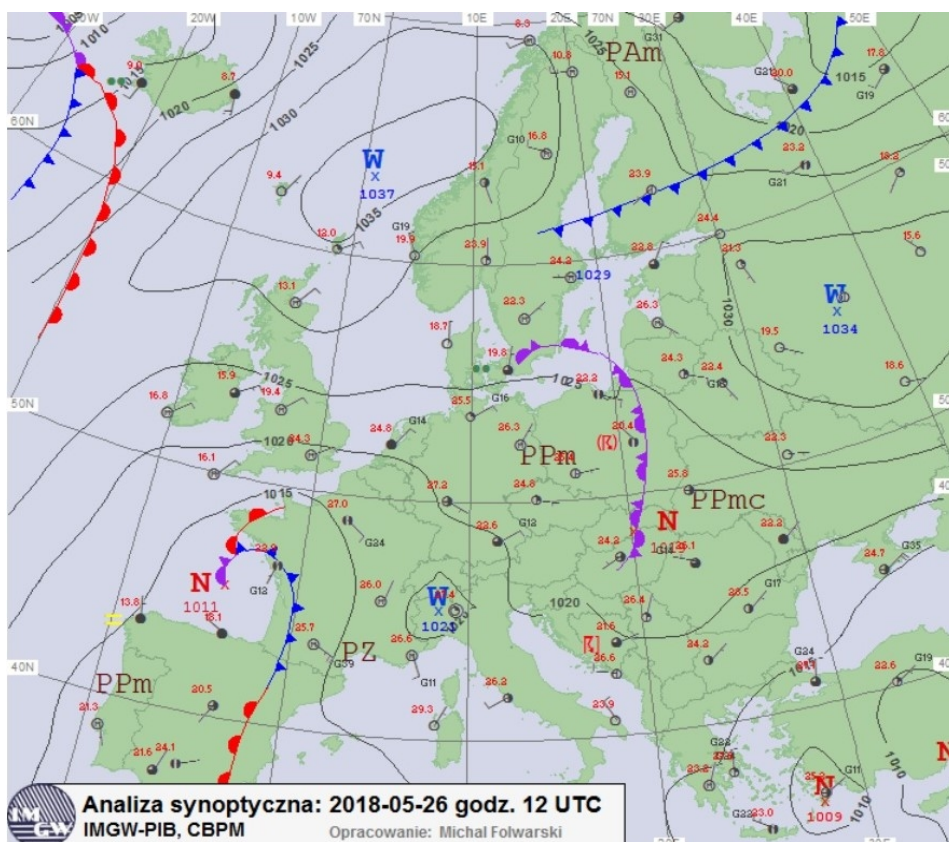
Kierunek napływu mas powietrza nad obszar Polski określono przy użyciu modelu HYSPLIT (HYbrid Single – Particle Lagrangian Integrated Trajectory) - obliczenia modelowe wykonano przy użyciu historycznych danych meteorologicznych GDAS (Global Data Assimilation System). Danymi wejściowymi do modelu były pola rozkładu parametrów meteorologicznych: kierunku i prędkości wiatru, ciśnienia atmosferycznego, temperatury powietrza.

Elementami katalogu zjawisk typu flash flood jest określenie wskaźników charakteryzujących opad atmosferyczny, w wyniku którego dane zjawisko wystąpiło. Opisany jest on wysokością opadu w mm, czasem trwania, natężeniem opadu oraz współczynnikiem Chomicza.

Klasyfikacja Chomicza została opublikowana w artykule "Ulewy i deszcze nawalne w Polsce", w roku 1954, i do dzisiaj stanowi podstawę określania natężenia opadu atmosferycznego w postaci tzw. współczynnika wydajności α . Klasyfikacja ta oparta jest o dwa parametry: wysokość opadu w mm oraz czas trwania opadu w minutach.

WYNIKI

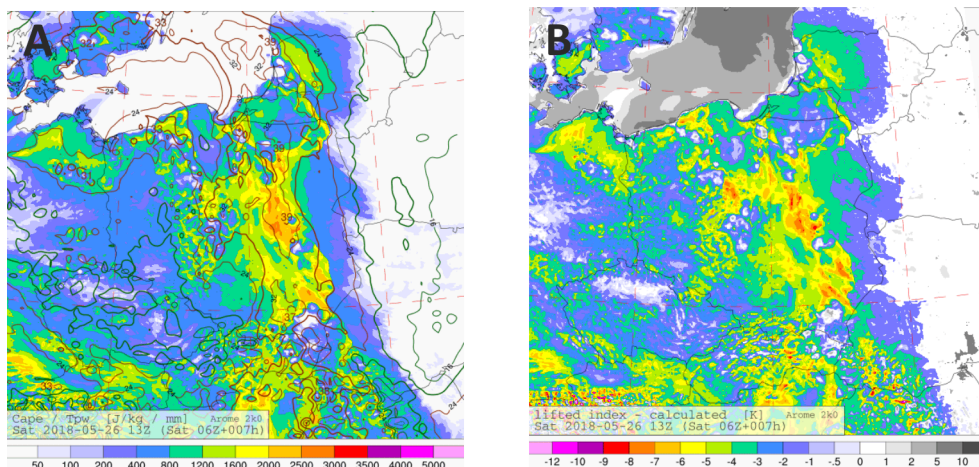
W dniu 26 maja 2018 roku wschodnia i centralna Polska znajdowała się pod wpływem płytkiego, zanikającego niżu, którego ośrodek znajdował się nad Słowacją. Województwa zachodnie znajdowały się na skraju wyżu z centrum nad Morzem Północnym. Przez obszar wschodniej i centralnej Polski południkowo przebiegał słabo wyrażony i ulegający stopniowej frontolizacji zokludowany front oddzielający napływające nad wschodnią Polskę powietrze polarno-morskie ciepłe od powietrza polarnego, zalegającego nad zachodnią częścią kraju (Ryc. 1). W górnym polu barycznym nad obszarem Polski, wschodnich Niemiec oraz Czech znajdował się odcięty i stopniowo wypełniający się górny niż.



Ryc.1. Sytuacja synoptyczna z 26 maja 2018 z godziny 12 UTC. (źródło: <http://www.pogodynka.pl/>)
Fig.1. Surface pressure and synoptic chart from 26th May 2018 at 12 UTC.
(source: <http://www.pogodynka.pl/>)

Biorąc pod uwagę wyniki numerycznych modeli prognostycznych z godziny 06 UTC główny rozwój burz spodziewany był w godzinach południowych. W pasie wschodniej i centralnej Polski prognozowana chwiejność termodynamiczna wyliczona

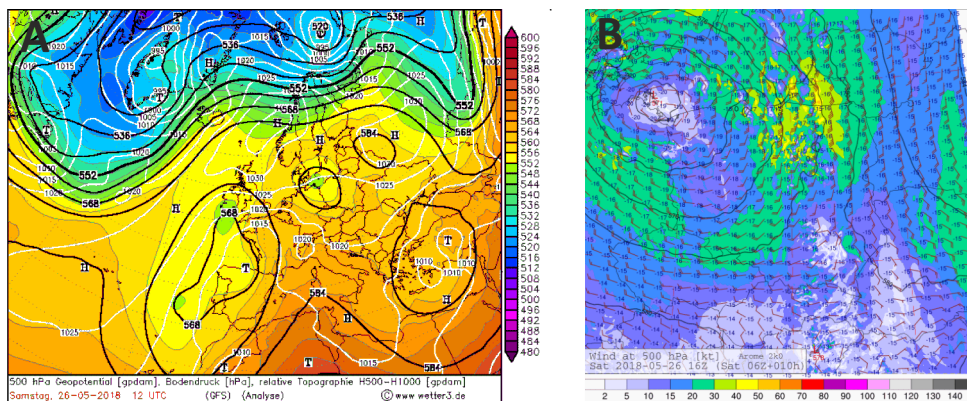
w oparciu o parametr CAPE wynosiła do 1500-2000 J/kg (Ryc. 2A), natomiast Lifted Index (LI) osiągał wartości od około -4°C do -6°C, miejscami -8°C (Ryc. 2B). Ze względu na stosunkowo wysoką zawartość wody w kolumnie powietrza (wskaźnik Total Precipitable Water osiągał wartości 30-35 mm) głównym zagrożeniem związanym z burzami były intensywne opady deszczu. Tego dnia nad Polską warunki kinematyczne w całym profilu pionowym troposfery cechowały się stosunkowo niewielką dynamiką. Niewielki przepływ w środkowej troposferze przyczyniał się do powolnego ruchu komórek konwekcyjnych, czego efektem mogło być potencjalne zwiększenie sumy opadów w trakcie trwania zjawiska.



Ryc.2. Wartości wskaźników chwiejności troposfery CAPE i TPW (A) oraz Lifted Index (B) według modelu Arome w dniu 26 maja 2018 roku (prognoza dla godziny 15 czasu urzędowego). (źródło: opracowanie własne na podstawie obliczeń modelu AROME)

Fig.2. Value of CAPE, TPW (A) and Lifted index (B) from numerical model Arome for 26th of May 2018. (source: own study based on calculations of the AROME model)

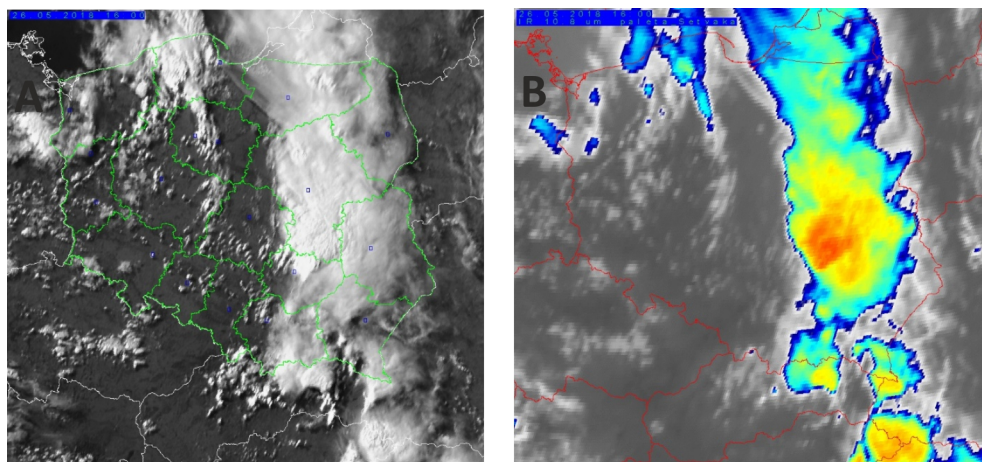
W analizowanej sytuacji obszar południowo-wschodniej oraz część wschodniej Polski znajdowała się na skraju płytkiego, górnego niżu nad zachodniej Polski oraz wschodnich Niemiec, a także rozległego i dobrze wyrażonego na górnych poziomach troposfery wyżu nad zachodniej Rosji (Ryc. 3). Konsekwencją takiego rozkładu pola barycznego na poszczególnych poziomach był niewielki przepływ na górnych poziomach troposfery co przyczyniało się do powolnego ruchu komórek burzowych.



Ryc.3. Mapa geopotencjału na poziomie 500hPa (A) oraz kierunek i prędkość wiatru na poziomie 500hPa (B). (źródło: <http://www.wetter3.de/>)

Fig.3. Map of geopotential on 500hPa (A) and direction and wind speed on level 500 hPa (B). (source: <http://www.wetter3.de/>)

Około południa wspomniany wcześniej front okluzji, wraz z związanym z nim zachmurzeniem, przebiegał południkowo między innymi przez granicę województwa małopolskiego oraz świętokrzyskiego. W godzinach południowych i popołudniowych doszło w regionie do intensywnego rozwoju zjawisk konwekcyjnych oraz wypiętrzania się komórek burzowych. Burze początkowo przyjmowały formę pojedynczych komórek łącząc się w kolejnych godzinach w struktury wielokomórkowe w postaci liniowej, ułożonej południkowo. Ze względu na duże wypiętrzenie chmur wraz z opadem deszczu występowały lokalne opady gradu (Ryc. 4).

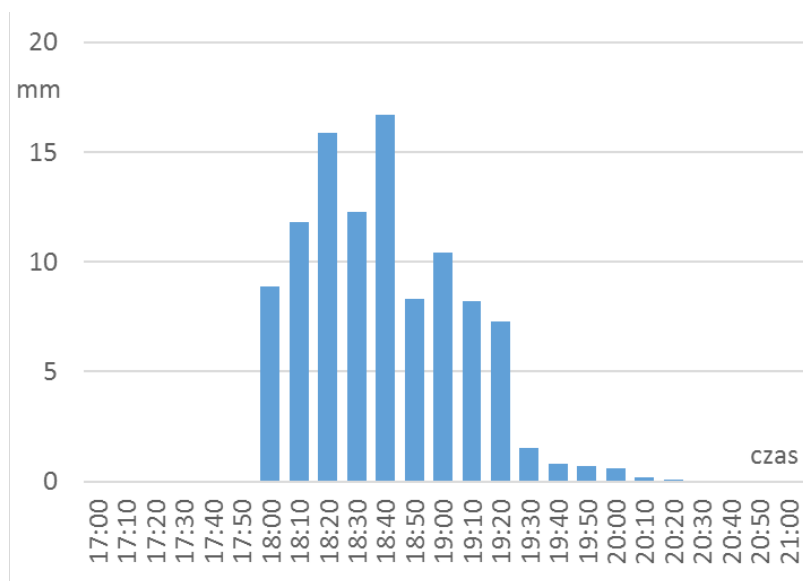


Ryc.4. Zdjęcie struktury zachmurzenia frontowego w paśmie widzialnym (A) oraz w paśmie Setvak (B) z godziny 18 (pomarańczowy i czerwony kolor wskazuje na wyraźne wypiętrzenie komórek burzowych). (źródło: materiały Ośrodka Teledetekcji Satelitarnej IMGW w Krakowie)

Fig.4. Photography of the frontal structure in the visible band (a) and in the Setvak palette (b) at 16 UTC. (source: materials of the IMGW Satellite Remote Sensing Centre in Cracow)

Wczesnym popołudniem, około godziny 14⁰⁰ doszło do gwałtownego rozwoju procesów konwekcyjnych w dwóch strefach: pierwszej obejmującej południowo – wschodnią część województwa małopolskiego oraz drugiej na linii doliny Sanu. W kolejnych minutach obszary objęte głęboką konwekcją uległy powiększeniu oraz po godzinie 15⁰⁰ połączony w wielokomórkową strefę burzową, przebiegającą na linii pomiędzy rzekami Wiśtokiem i Wiśtoką dalej dolnym biegiem Wiśtoku oraz doliny Wisły. Około godziny 16⁰⁰ opady atmosferyczne związane z dobrze rozwiniętym klastrem burzowym, lokalnie przybierając charakter opadów ulewnych i nawalnych, obejmowały obszar prawobrzeżnej i lewobrzeżnej Wisły na południe i zachód od Tarnobrzega. W kolejnych minutach strefa opadów przemieszczała się w kierunku północnym i północno – wschodnim, po godzinie 16⁰⁰ wkraczając na obszar Wyżyny Kieleckiej. W kolejnych minutach strefa opadów intensywnych przemieszczała się wgłąb Wyżyny.

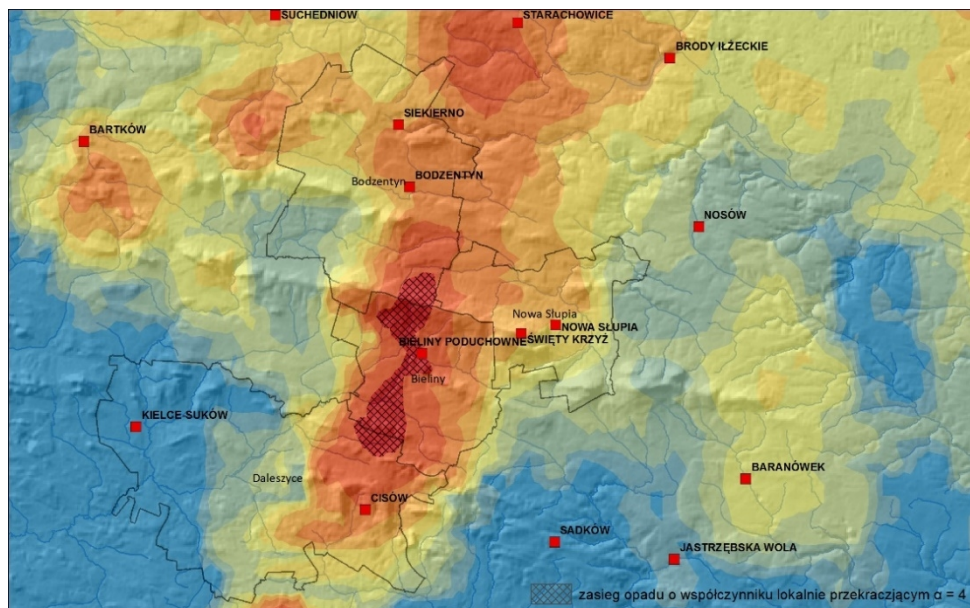
Po godzinie 17⁰⁰ nasuwająca się ze wschodu i znajdująca się po północnej stronie Gór Świętokrzyskich struktura burzowa zaczęła przyjmować charakter superkomórki, z wykształconym w jej obrębie prądem wstępującym o wyraźnych cechach rotacji. W ciągu kolejnych 30 minut doszło do przekroczenia progu orograficznego w postaci Gór Świętokrzyskich przez południowy fragment wspomnianej wyżej struktury burzowej, co wraz z ruchem wirowym doprowadziło do wystąpienia opadów oraz efektu orograficznego również po południowej stronie pasma Łysogór. Dodatkowy efekt wzmocnienia opadów oraz czynnik ułatwiający propagację nowych komórek burzowych mógł stanowić dynamiczny wpływ chłodnego powietrza na przedpolu superkomórki, związany z intensywnym lub nawalnym opadem deszczu w obrębie prądu zstępującego. W początkowej fazie rozwoju zjawiska opad występował na północ od Cisowa, na pograniczu gminy Daleszyce oraz Bieliny. W kolejnych minutach doszło do gwałtownego napierania mas powietrza na barierę orograficzną czego efektem było znaczne zwiększenie intensywności opadu. O godzinie 18⁰⁰ na stacji pomiarowej w Bielinach Poduchownych zmierzono opad o sumie 8,9 mm za okres 10 min. Analiza danych radarowych pozwala stwierdzić, że maksimum opadu w tym okresie występowało około 1,5 km na południe na progu Pasma Bielińskiego, gdzie występował opad intensywny o współczynniku α przekraczającym wartość 4, co potwierdza analiza danych radarowych produktu SRI. W kolejnych kilkunastu minutach opad intensywny o charakterze opadu ulewnego i lokalnie nawalnego występował na obszarze centralnej części gminy Bieliny oraz na granicy z gminą Daleszyce. Potwierdzają to zarówno analizy produktu radarowego SRI jak również naziemnych danych pomiarowych ze stacji Bieliny Poduchowne (Ryc. 5).



Ryc.5. Rozkład sum opadu o czasie trwania 10 min na stacji Bieliny Poduchowne w dniu 26.05.2018 r. (źródło: opracowanie własne na podstawie danych telemetrycznych IMGW)
Fig.5. The distribution of rainfall in 10 minutes intervals on Bieliny Poduchowne on 26th May 2018. (source: own study based on IMGW telemetry data)

Strefa opadu o charakterze opadu ulewnego oraz nawalnego, w wyniku występowania blokady orograficznej, po godzinie 18⁰⁰ w dalszym ciągu koncentrowała się na obszarze gminy Bieliny oraz południowej części gminy Bodzentyn oraz fragmentu gminy Nowa Słupia. Maksymalny zasięg przestrzenny oraz największą chwilową wydajność (intensywność) opad osiągnął pomiędzy godziną 18³⁰ a godziną 18⁴⁰, kiedy to na stacji w Bielinach suma opadu za okres 10 minut wyniosła 16,7 mm (Ryc. 5) co odpowiada deszczowi ulewnemu o współczynniku $\alpha = 5,3$. Przestrzennie opad nawalny obejmował obszar Łysogór (południowa część gminy Bodzentyn, północna część gminy Bieliny), centralną i południową część gminy Bieliny oraz północną część gminy Daleszyce (Ryc. 6).

Od godziny 18⁴⁰ do godziny 19⁰⁰ strefa opadów intensywnych zmieniła zasięg przestrzenny. Centrum intensywnego opadu przesunęło się w kierunku południowym, obejmując swoim zasięgiem wschodnią część gminy Daleszyce (wschodnia część Pasma Daleszyckiego, miejscowość Daleszyce oraz fragment pasma Cisowskiego), a w kolejnych minutach również obszar położony na południe od miejscowości Daleszyce. Stacja pomiarowa zlokalizowana w Cisowie o godzinie 18⁵⁰ zmierzyła maksymalny opad o czasie trwania 10 minut wynoszący 11,3 mm. Analiza przestrzennego rozkładu opadów na podstawie danych radarowych pozwala stwierdzić, że stacja pomiarowa znajdująca się w cieniu opadowym Pasma Cisowskiego, a co za tym idzie opady na zachód od stacji były znacznie wyższe i zdecydowanie przekraczały wartości mierzone na stacji.



Ryc.6. Chwilowy zasięg występowania lokalnych opadów ulewnych [A4] na terenie powiatu kieleckiego na podstawie danych radarowych IMGW-PIB (produkt SRI skan 18³⁰ 26.05.2018 r.). (źródło: opracowanie własne na podstawie danych radarowych IMGW – produkt SRI)

Fig.6. Temporary range of heavy rainfall in Kielce county – based on radar data (SRI product 16³⁰ UTC, 26th May 2018). (source: ow study based on IMGW radar data – SRI product)

Największy opad na analizowanym obszarze wystąpił praktycznie na całym terenie gminy Bieliny, co potwierdzają zarówno dane pomiarowe, jak również dane radarowe. Łączna suma opadów za cały epizod opadowy na stacji Bieliny Poduchowne wyniosła ponad 100 mm (103,7 mm), a w okresie największej intensywności w ciągu 90 min suma wyniosła 99,8 mm. Wartości te odpowiadają współczynnikowi $\alpha = 10,5$. Według klasyfikacji Chomicza opad ten można zaklasyfikować jako deszcz nawalny VI stopnia (B2).

PODSUMOWANIE

Ekstremalne opady burzowe w dniu 26 maja 2018 roku były wynikiem napływającej z południa i południowego wschodu rozległej, powoli przemieszczającej się nad analizowany obszar wielokomórkowej struktury burzowej. W wyniku dynamicznej konwekcji w rejonie Gór Świętokrzyskich uległa ona przekształceniu w superkomórkę burzową. Urozmaicona rzeźba terenu rejonu Gór Świętokrzyskich oraz równoleżnikowy przebieg pasma, biegnącego poprzecznie względem słabego

przepływu w troposferze o składowej północnej, dodatkowo przyczyniły się do spowolnienia i utrudnienia przemieszczania się komórek burzowych. W analizowanym przypadku skutkiem intensywnego, przyjmującego quasi-stacjonarny charakter opadu, było również nakładanie się fal powodziowych spowodowanej południkowym układem sieci rzecznej prawobrzeżnych dopływów górnego odcinka Czarnej Nidy.

Szczegółowa analiza genezy opadów oraz ich interakcji ze środowiskiem geograficznym i przyrodniczym powinna w opinii autorów być przeprowadzona w każdym przypadku wystąpienia tego typu opadów oraz negatywnych skutków w środowisku. Pozwoli to w znacznie lepszym stopniu prognozować tego typu zjawiska, jak również ograniczyć skutki ich wystąpienia w wyniku technicznych i edukacyjnych działań lokalnych. Może to być między innymi zaprojektowanie odpowiednich i wydajnych sieci drenażu lub ulepszenie systemu ostrzegania przed tego typu groźnymi zjawiskami atmosferycznymi. Zwiększoną skuteczność przewidywania i odpowiednio wczesnego ostrzegania przed zjawiskiem powodzi błyskawicznych można osiągnąć poprzez rozwój prognoz nowcastingowych w obrębie Państwowej Służby Hydrologiczno-Meteorologicznej.

LITERATURA

- Bąkowski R. (2005). *Wybrane analityczne i prognostyczne wskaźniki chwiejności atmosfery*. W: M. Ozga-Zielińska, D. Limanówka (red.): *Hydrologia, meteorologia, klimatologia – badania naukowe i prognozy w erze informatyzacji*. Wyd. Polskie Towarzystwo Geofizyczne – IMGW, Warszawa: 209–218.
- Bielec Z. (2000). *Przebieg dobowy i charakterystyka synoptyczna burz w Krakowie w latach 1896–1995*. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Jagiellońskiego, Prace Geograficzne 105, Kraków: 73–83.
- Bielec-Bąkowska Z. (2002). *Zróżnicowanie przestrzenne i zmienność wieloletnia występowania burz w Polsce (1949–1998)*. Wyd. UŚ, Katowice.
- Bielec-Bąkowska Z. (2003). *Long-term variability of thunderstorm occurrence in Poland in the 20th century*. *Atm. Res.* (67–68): 35–52.
- Brooks E.H., Anderson A.R., Riemann K., Ebberts I., Flachs H. (2007). *Climatological aspects of convective parameters from the NCAR/NCEP reanalysis*. *Atmospheric Research*, (83): 294–305.
- Brooks E.H., Lee W.J., Craven P.J., (2003). *The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data*. *Atmospheric Research*, (67–68): 73–94.
- Bryndał T. (2011). *Identyfikacja małych zlewni podatnych na formowanie gwałtownych wezbrań na przykładzie Pogórza Dynowskiego, Strzyżowskiego i Przemyskiego*. *Przegląd Geograficzny*, (83 / 1): 5–26.
- Bryndał T. (2014). *Powodzie błyskawiczne w małych zlewniach karpackich – wybrane aspekty zarządzania ryzykiem powodziowym*. *Annales Universitatis Paedagogicae Cracoviensis, Studia Geographica*, (t. 7): 69–80.

- Chomicz K. (1951). *Ulewy i deszcze nawalne w Polsce*. Wiadomości Służby Hydrologicznej i Meteorologicznej, 2, 3, s. 5-88.
- Delden A. (2001). *The synoptic setting of thunderstorms in western Europe*. Atmospheric Research, (56): 89–110.
- Grabowska K. (2001). *Zmienność aktywności burzowej w niektórych regionach geograficznych Polski*. Pr. i Stud. Geogr. UW, (t. 29): 181–190.
- (red.) Kossowska-Cezak U., Szkutnicki J. (2005). *Ekstremalne zjawiska hydrologiczne i meteorologiczne*. Wyd. IMGW, Warszawa.
- Holley D.M., Dorling R., Steele C.J., Earl N. (2014). *A climatology of convective available potential energy in Great Britain*. International Journal of Climatology (t. 34): 3811–3824.
- Kaszewski B., Flis E. (2014). *Meteorologiczne i klimatologiczne zdarzenia ekstremalne w polskiej literaturze*. Prace Geograficzne, (z. 139): 7-19.
- Kolendowicz L. (1998). *Zjawiska burzowe w Polsce a warunki synoptyczne*. Wyd. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań.
- Kolendowicz L. (2005). *Wpływ cyrkulacji atmosferycznej oraz temperatury i wilgotności powietrza na występowanie dni z burzą na obszarze Polski*. Wyd. UAM, Poznań.
- Kolendowicz L. (2007). *Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na występowanie dni z burzą w Poznaniu w latach 1951–2000*. Bad. Fizjogr. nad Pol. Zach., Ser. A – Geografia Fizyczna, (t. 58): 79–87.
- Malinowska M. (2011). *Variability of chosen instability indices in Poland in XXI century*. Prace i Studia Geograficzne, (t. 47): 97-107.
- Matuszko D., Piotrowicz K. (2012). *Ekstremalne zdarzenia pogodowe w Krakowie i ich uwarunkowania cyrkulacyjne*. W: Z. Bielec-Bąkowska, E. Łupikasza, A. Widawski (red.): *Rola cyrkulacji atmosfery w kształtowaniu klimatu*, Wyd. UŚ, Sosnowiec: 211–218.
- Ostrowski J., Czarnecka H., Głowacka B., Krupa-Marchlewska J., Zaniewska M., Sasim M., Moskwiński T., Dobrowolski A. (2012). *Nagłe powodzie lokalne (flash flood) w Polsce i skala ich zagrożeń*. W: Lorenc H. (red.). *Kłęski żywiołowe a bezpieczeństwo kraju*. Monogr. IMGW-PIB, Warszawa: 123-149.
- Pociask-Karteczka J., Żychowski J. (2014). *Powodzie błyskawiczne (flash floods) – przyczyny i przebieg*. W: T. Ciupa, R. Suligowski (red.): *Woda w mieście*. Monografie Komisji Hydrologicznej PTG – tom 2, Wyd. UJK, Kielce: 213-226.
- Poręba S. (2016). *Uwarunkowania cyrkulacyjne konwekcji w południowej Polsce*. Badania Fizjograficzne, Seria A., Geografia Fizyczna (t. 67), 179-193.
- Siedlecki M. (2011). *Charakterystyka klimatologiczna chwiejności atmosfery nad Europą*. Acta Universitatis Lodzianis, Folia Geographica Physica, Łódź, (t. 11): 1–204.
- Siedlecki M., Rzepa M. (2008). *Charakterystyka całkowitej energii chwiejności atmosfery nad Europą w latach 1991–2003*. Przegląd Geofizyczny, (t. 53/1): 43–54.
- Słownik meteorologiczny*, (2003). T. Niedźwiedź (red.), PTGeof./IMGW, Warszawa.
- Suligowski R. (2013). *Maksymalny wiarygodny opad na Wyżynie Kieleckiej*. Wyd. UJK, Kielce.

- Starkel L. (2012). *Typy i częstotliwość opadów ulewnych i wezbrań oraz ich efekty geomorfologiczne w Karpatach i górach klimatu monsunowego*. Prace i Studia Geograficzne, Uniwersytet Warszawski, (t. 49): 103-118.
- Stopa M. (1960). *Liczba z burzą w Polsce*. Przegl. Geogr. (t. 32, z. 3): 329–333.
- Stopa M. (1962) *Burze w Polsce*. Pr. Geogr. IG PAN, Warszawa, (t. 34): 109–185.
- Stopa M. (1965). *Rejony burzowe w Polsce*. Dokument. Geogr. 1, Wyd. IG PAN, Warszawa.
- Taszarek M., Czarnecki B., Koziół A., (2015). *A Cloud-to-Ground Lightning Climatology of Poland*. Monthly Weather Review, (t. 143): 4285-4304.
- Trepińska J.B. (2007). *Katastrofalne zdarzenia pogodowe jako zagrożenia cywilizacyjne*. W: J. Szkutnicki, U. Kossowska-Cezak, E. Bogdanowicz, M. Ceran (red.): *Cywilizacja i żywioły*, PTGeof., IMGW, Warszawa: 29–39.
- Twardosz R., Niedźwiedź T., Łupikasza E. (2010a). *The influence of atmospheric circulation on the type of precipitation (Kraków, southern Poland)*. Theoretical and Appl. Clim. (t. 104): 233–250.
- Twardosz R., Niedźwiedź T., Łupikasza E. (2010b). *Burze w Krakowie i ich uwarunkowania cyrkulacyjne*. W: T. Ciupa, R. Suligowski (red.): *Woda w badaniach geograficznych*, Inst. Geogr. UJK, Kielce: 303–313.
- Twardosz R., Niedźwiedź T., Łupikasza E. (2011): *Zmienność i uwarunkowania cyrkulacyjne występowania postaci i typów opadów atmosferycznych na przykładzie Krakowa*. Wyd. UJ, Kraków: 125–143.
- Ustrnul Z., Czekierda D. (2009). *Atlas ekstremalnych zjawisk meteorologicznych oraz sytuacji synoptycznych w Polsce*. Wyd. IMGW, Warszawa.
- Waławender E., Kiela R., Ustrnul Z. (2015). *Use of RegCM gridded dataset for thunderstorm favorable conditions analysis over Poland-climatological approach*. Theoretical and Applied Climatology.
- Warakomski W. (1997). *Problemy z klasyfikacją i przewidywaniem pogodowych zjawisk ekstremalnych*. W: *Ekstremalne zjawiska meteorologiczne, hydrologiczne i oceanograficzne*, Sympozjum Jubileuszowe PTGeof., Warszawa: 169–174.
- Wróbel J. (1985). *Próba określenia związku pomiędzy występowaniem burz a wybranymi warunkami meteorologicznymi*. Przegl. Geofiz. (t. 30, z. 2): 187–195.
- Ziętara T. (1968). *Rola gwałtownych ulew i powodzi w modelowaniu rzeźby Beskidów*. Prace Geogr., IG PAN, Warszawa: 60.

Źródła internetowe:

- Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy – <http://www.imgw.pl/> [dostęp z dn. 31.12.2018]
- Serwis pogodowy IMGW – PIB – <http://www.pogodynka.pl/> [dostęp z dn. 31.12.2018]
- Die Welt in Wetterkarten – <http://www.wetter3.de/> [dostęp z dn. 31.12.2018]