

Elżbieta CEBULAK, Danuta LIMANÓWKA, Robert PYRC  
Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy\*

Piotr GĘBICA

Wyższa Szkoła Informatyki i Zarządzania w Rzeszowie

Leszek STARKEL

Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN

## **WPŁYW WYBRANYCH BARIER GÓRSKICH NA ROZKŁAD OPADÓW W POLSKICH KARPATACH**

### **INFLUENCE OF SELECTED MOUNTAIN BARRIER FOR THE DISTRIBUTION OF PRECIPITATION IN THE POLISH CARPATHIANS**

#### **Wstęp**

Znaczenie barier orograficznych (progów morfologicznych) w generowaniu opadów ulewnych w obszarach górskich to zagadnienie, o którym wciąż wiemy za mało. W badaniach zjawisk o charakterze lokalnym zupełnie pomijana jest rola ekspozycji stoków, mająca istotny wpływ na rozkład opadów w obszarach o zróżnicowanej rzeźbie. Tymczasem na wystąpienie intensywnych opadów i spowodowane nimi katastrofalne powodzie (lata 1903, 1970, 1997, 2010) mają wpływ nie tylko zwarte i wysokie masywy górskie, ale również niskie bariery orograficzne, w tym zbocza dolin lub progi wyżynne, które spełniają istotną rolę w rozkładzie i intensywności opadów generujących fale wezbraniowe oraz lokalne powodzie.

Zauważalny w ostatnich latach powrót środowiska naukowego do tematyki barier orograficznych wynika z nasilenia występowania zdarzeń o charakterze ekstremalnym i zachodzących zmian klimatycznych. Wprowadzenie nowych

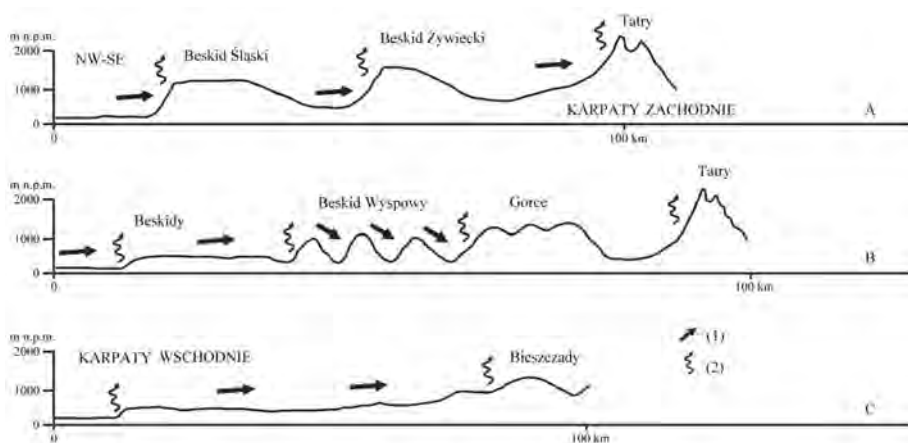
\*Oddział w Krakowie

technik pomiarowych atmosfery, takich jak radary, a także rozwój nowoczesnych metod badawczych stwarza możliwości bardziej szczegółowych opisów przyczyn i przebiegu zdarzeń opadowych. Wśród badaczy wykrystalizowały się dwa główne nurty zainteresowań – meteorolodzy koncentrują się przede wszystkim na rozkładzie czasowo-przestrzennym opadu, a geomorfolodzy na zmianach środowiskowych (w środowisku przyrodniczym).

Podstawowym celem niniejszego artykułu jest pokazanie zróżnicowania warunków wystąpienia opadów, ich efektów hydrologicznych i geomorfologicznych, które zależą od wysokości progów morfologicznych.

### Orografia Karpat i typy cyrkulacji wywołujące ekstremalne opady

Rozciągający się na długości 300 km łańcuch polskich Karpat Zewnętrznych (fliszowych) składa się z kilku, równoleżnikowo biegnących, pasm górskich (Beskidów) i pogórzy na ich przedpolu. W części zachodniej zwarte masywy górskie Beskidu Śląskiego i Małego, o przebiegu SW-NE i wysokości 900-1200 m n.p.m., ograniczone progiem denudacyjnym o wysokości 500-800 m, opadają ku północy, wąską na 10-15 km, platformą pogórza (rys. 1A). W odległości 20-30 km za obniżeniem w głębi gór biegną wyższe grzbieity Beskidu Żywieckiego o wysokości 1300-1700 m n.p.m., a dalej za obniżeniem Podhala, w odległości kolejnych 30-50 km – wysokogórski masyw Tatr (2000-2600 m n.p.m.). Ku wschodowi, od doliny Skawy po dolinę Dunajca, rozciąga

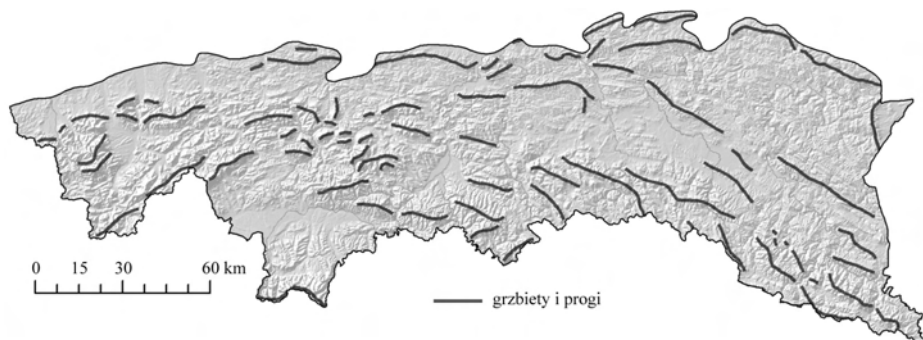


Rys. 1. Bariery orograficzne Karpat i rodzaj opadu; objaśnienia: 1A – Karpaty Zachodnie, 1B – Beskidy, 1C – Karpaty Wschodnie; 1 – opad rozlewny, 2 – opad konwekcyjny

Fig. 1. Orographical barriers of Carpathians and the type of precipitation; explanations: 1A – West Carpathians, 1B – Beskidy, 1C – East Carpathians; 1 – spreading rainfall, 2 – convective rainfall

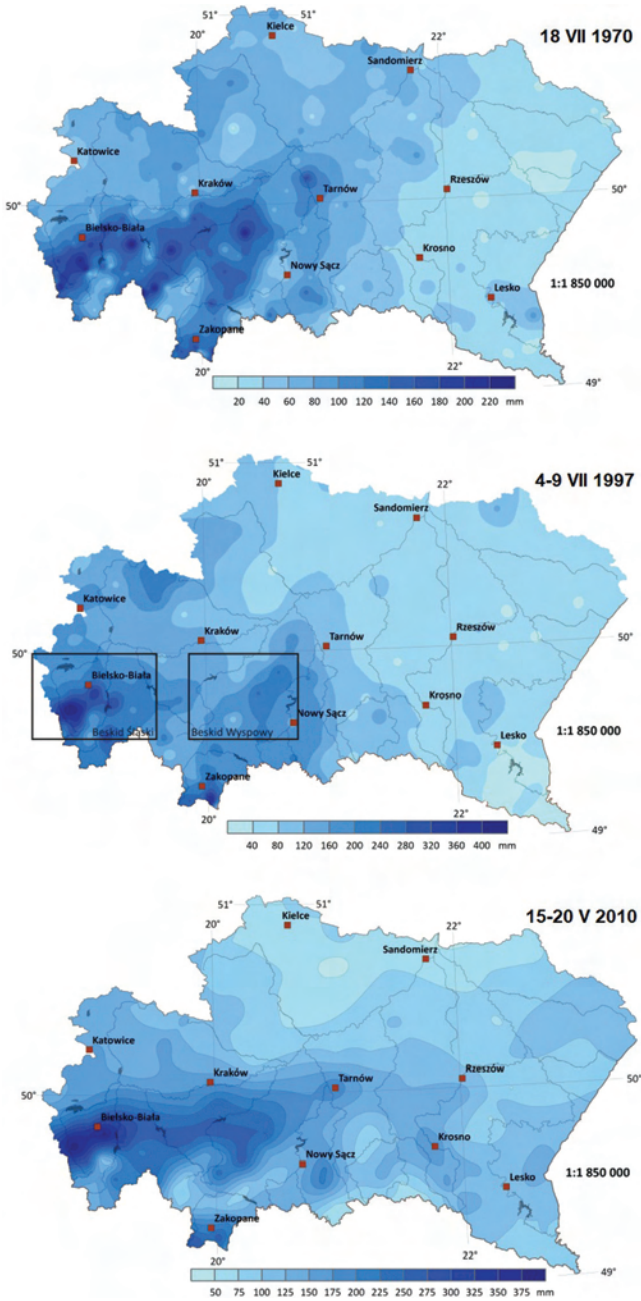
się strefa krótszych i niższych pasm górskich i gór wyspowych sięgających 700-1000 m n.p.m., od południa zamkniętych wyższym pasmem górskim Gorców (do 1310 m n.p.m.), a od wschodu niewiele niższym Beskidem Sądeckim (rys. 1B i rys. 2). Od północy, szeroka na 20-30 km, strefa Pogórza opada ku Kotlinie Sandomierskiej progiem wysokości 100-200 m. Na wschód od doliny rzeki Biała Tarnowska strefa Pogórza Karpackiego rozszerza się do 35-60 km, z wierzchowinami o wysokości 300-500 m n.p.m., rozczłonkowana dolinami i kotlinami głębokimi do 100-200 m. Od północy ograniczona jest ona progiem; na południu rozciągają się niskie grzbiety Beskidu Niskiego o wysokości 600-900 m n.p.m., przechodzące ku wschodowi w pasmo Bieszczadów, których grzbiety osiągnęły w części północnej od 700 do 900 m n.p.m. i do ponad 1300 m n.p.m. w części południowo-wschodniej (rys. 1C i rys. 2).

Intensywne opady w Karpatach wywołują ośrodki niżowe znad Morza Śródziemnego i północnych Włoch, przesuwające się torem Vb (według nomenklatury Van Bebbera) w kierunku północno-wschodnim, zazwyczaj poprzez Węgry i Karpaty, nad Polskę południową, Ukrainę lub Białoruś, co można zilustrować przykładami z lat 1970 (Niedźwiedź 1972), 1997 (Grela i in. 1999) i 2010 (Maciejewski i in. 2011) (rys. 3). Po przekroczeniu głównego łańcucha Karpat niżej takie utrzymują się przez dwa do trzech dni nad południowo-wschodnią Polską i zachodnią Ukrainą, zapewniając długotrwałą dostawę wilgotnych mas powietrza i intensywne opady na stokach Beskidów Zachodnich. Bariery orograficzne stają się dodatkowym czynnikiem odpowiedzialnym za kondensację pary wodnej i powstanie grubej warstwy niskich chmur. Opady rozlewne obejmują często duże obszary, dorzecza kilku sąsiednich rzek i są przyczyną katastrofalnych powodzi (Cebulak i in. 2000). W czasie wędrówki ośrodków niżowych przez pasma górskie, również progi orograficzne i pojedyncze grzbiety mogą utrudniać przepływ mas powietrznych i odpowiadać za efekty spiętrzeniowe.



Rys. 2. Rozmieszczenie progów morfologicznych w polskich Karpatach

Fig. 2. Distribution of morphological ridges in the Polish Carpathians



Rys. 3. Rozkład sumy opadu rozlewnego w dniach 18 lipca 1970 r., 4-9 lipca 1997 r. i 15-20 maja 2010 r. w polskich Karpatach

Fig. 3. Spatial rainfall distribution on 18<sup>th</sup> July 1970, 4-9<sup>th</sup> July 1997 and 15-20<sup>th</sup> May 2010 in the Polish Carpathians

## Opady w lipcu 1997 r. na progu Beskidu Śląskiego, Małego i Wyspowego

Duże opady, które spowodowały katastrofalną powódź w dorzeczu górnej Wisły w lipcu 1997 r. były następstwem układu niżowego wędrującego z nad Morza Śródziemnego. Kluczową cechą układu dolnego była jego termiczna asymetria. Po wschodniej stronie niżu obserwowano napływ z sektora południowego ciepłych i wilgotnych mas powietrza zwrotnikowo-morskiego. Po stronie zachodniej niżu, z północy, napływało polarno-morskie powietrze chłodne. Kontrast termiczny między tymi masami przekraczał  $10^{\circ}\text{C}$ , co powodowało cały szereg konsekwencji, w tym intensyfikację konwergencji. Centrum wspomnianego quasi-stacjonarnego niżu utrzymywało się w dniach 4-9 lipca 1997 r. nad Bramą Morawską (Niedźwiedź, Czekierda 1998). Największe opady w dniach 5-8 lipca koncentrowały się w Beskidzie Śląskim, Żywieckim i Tatrach (rys. 3). 6 lipca intensywne deszcze występowały po dowietrznej stronie Beskidu Śląskiego (Brenna 133 mm) oraz Beskidu Śląsko-Morawskiego (Łysa Hora 234 mm) (Kveton i in. 1997). 8 lipca strefa opadów orograficznych objęła Beskid Żywiecki i Tatry, gdzie opady dobowe przekroczyły 200 mm (Cebulak 1998).

9 lipca ośrodek niżowy przesunął się na wschód i w zachodniej części Karpat opady zaczęły zanikać wskutek oddziaływania wyżu z nad Europy zachodniej (Niedźwiedź, Czekierda 1998). Między dolinami Raby i Dunajca, w strefie odizolowanych wzniesień (kop) i grzbietów Beskidu Wyspowego, utworzyła się w godzinach popołudniowych komórka burzowa, co doprowadziło w części wschodniej tego obszaru do ulewnych opadów o bardzo dużym natężeniu (rzędu 150 mm w ciągu dwóch godzin) (Cebulak 1998). Stacja w Rozdzielu na progu Beskidu Wyspowego zanotowała 120 mm opadu (rys. 3). Skutki ulewy były katastrofalne, gdyż objęła ona tereny, na których 7 i 8 lipca wystąpiły duże opady o charakterze ciągłym, powodując nasycenie pokrywy zwietrzelinowej. Ulewy wywołały gwałtowne wezbranie, a wzrost fali powodziowej w korycie Sanki sięgnął 5 m. Największe zmiany w rzeźbie wystąpiły w dolinach Uszwicy i Sanki na przedpolu Beskidu Wyspowego (German 1997; Patkowski 2002). Na stokach powstały liczne osuwiska i spływy gruzowo-błotne, a u wylotu dolin stożki napływowe o miąższości 2-3 m (German 1997; Rączkowski, Mrozek 2002; Górczyca 2004).

## Wędrujący cumulonimbus na krawędzi Bieszczadów w lipcu 2005 r.

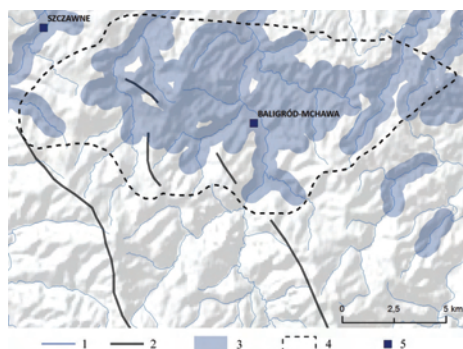
Innym przykładem wpływu brzegu gór na ukierunkowanie opadu burzowego jest zdarzenie z 26 lipca 2005 r. Północna krawędź Zachodnich Bieszczadów, o wysokości 300-500 m, „wymusiła” ruch chmury typu cumulonimbus z zachodu na wschód, co nastąpiło w ciągu kilku godzin (tab. 1). Wędrówkę

Tabela 1. Zestawienie dobowych i godzinowych sum opadów atmosferycznych w rejonie Baligródu 26 lipca 2005 r.

Table 1. Daily and hourly precipitations on 26<sup>th</sup> July 2005 r. near Baligród

Stacja	Dobowe sumy opadów [mm]	Przebieg opadów		
		Czas trwania [min.]	Suma opadu [mm]	Stopień intensywności wg skali Chomicza
Przed progiem morfologicznym				
Szczawne	67,2	12:30-14:20	46,2	Deszcz nawałny I stopnia (B1)
Baligród-Mchawa	130,6	13:00-13:20	9,2	Ulewa II stopnia (A2)
		13:30-14:30	91,4	Deszcz nawałny II stopnia (B2)
Terka	56,0	16:00-16:40	49,6	Ulewa (A4)
Za progiem morfologicznym				
Komańcza	14,5	14:20-15:10	13,7	Ulewa I stopnia (A1)

tę uchwycono dzięki pomiarom uzyskanym z kilku stacji opadowych rozmieszczonych wzdłuż trasy chmury. Suma opadu trwającego od 60 do 100 minut osiągnęła 131 mm, a maksymalne natężenie wynosiło nawet 2 mm/minutę. Po kilku godzinach chmura przekroczyła (północny) wysoki na 300-400 m próg Bieszczadów wzdłuż doliny Solinki. Szczegółowe kartowanie terenowe skutków hydrologicznych i geomorfologicznych bezpośrednio po ulewie pozwoliło wyznaczyć zasięg opadu burzowego (rys. 4).



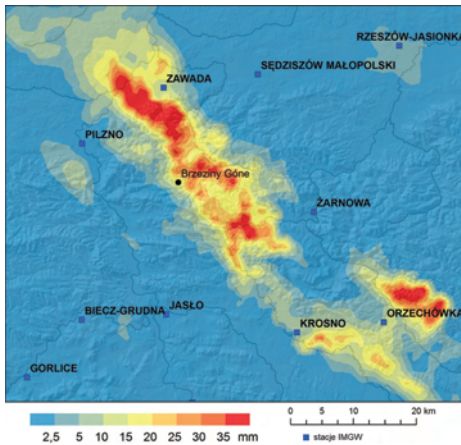
Rys. 4. Zasięg opadu z 26 lipca 2005 r. koło Baligródu wyznaczony na podstawie zarejestrowanych hydrologicznych i geomorfologicznych skutków; objaśnienia: 1 – rzeki, 2 – grzbiety i progi, 3, 4 – zasięg opadu wg rejestrowanych skutków, 5 – stacje IMGW-PIB

Fig. 4. Heavy downpour and their geomorphic effects – 26<sup>th</sup> July 2005 near Baligród; explanatory: 1 – river, 2 – thresholds and bridges, 3 – morphological effects, 4 – extend of extreme rainfall registered after geomorphic effects, 5 – IMGW-PIB stations



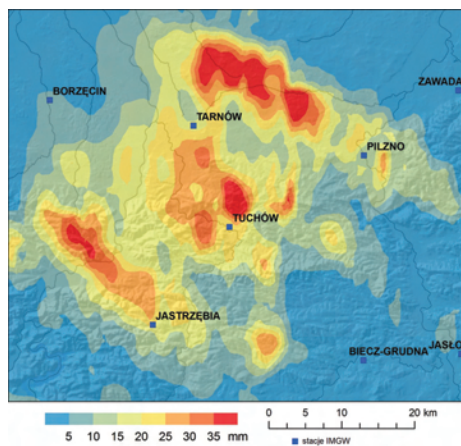
## Opady u progu Pogórza Karpackiego

Próg Pogórza Karpat, o wysokości względnej 100-200 m, może mieć również znaczenie w powstawaniu lokalnych, intensywnych opadów burzowych pochodzenia termicznego i generowaniu wezbrań typu flash flood (rys. 5-6). Ulewy na progu Pogórza rejestrowano m.in. latem 1996 r. (Cebulak, Niedźwiedź 1998). Wyjątkowo wysokie opady wystąpiły także w czerwcu 2009 r. W strefie frontu przesuującego się od strony Morza Czarnego, w bardzo ciepłym i wilgotnym powietrzu zwrotnikowym, tworzyły się komórki burzowe, napotykając na swej drodze progi morfologiczne, na których zarejestrowano zdarzenia powodziowe i efekty erozyjne. Krótkotrwałe ulewy wystąpiły kilkukrotnie w dniach od 19 do 27 czerwca 2009 r. Najwyższe sumy opadów z tego okresu przekroczyły 250 mm (Pilzno 271 mm, Brzeziny 248 mm).



Rys. 5. Suma opadu trwającego jedną godzinę w dniu 25 czerwca 2009 r., 00:00, w Zawadzie na progu Pogórza Dynowskiego i w Brzeziniach na progu Pogórza Strzyżowskiego; dane z meteorologicznego radaru IMGW-PIB w Rzeszowie

Fig. 5. Sum of precipitation in 1 hour, June 25<sup>th</sup>, 2009, 00:00, in the Zawada village on the edge of Dynów Foothills and in the Brzeziny village on the edge of Strzyżów Foothills; based on meteorological radar in Rzeszów



Rys. 6. Suma opadu trwającego jedną godzinę w dniu 26 czerwca 2009 r., 00:00, w dolinie Wątku na południowy wschód od Tarnowa; dane z meteorologicznego radaru IMGW-PIB w Rzeszowie

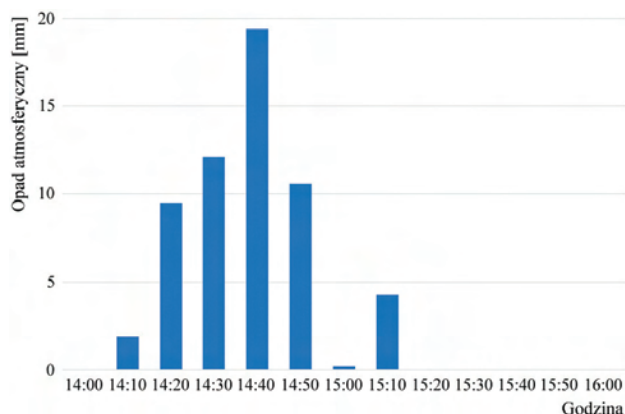
Fig. 6. Sum of precipitation in 1 hour, June 26<sup>th</sup>, 2009, 00:00, in the Wątok Valley, south-east from Tarnów; based on meteorological radar in Rzeszów

Wyjątkowo intensywne opady notowano między innymi 22 czerwca w dorzeczu Mleczki koło Kańczugi, 25 czerwca w zlewni Zawadki i górnej Wielopolki oraz 26 czerwca w zlewni Wątołu na południowy wschód od Tarnowa.

### Opad w czerwcu 2015 r. na progu Beskidu Niskiego

14 czerwca 2015 r. Polska południowa była w zasięgu niżu, którego ośrodek o godzinie 12:00 znajdował się w rejonie Wysp Alandzkich. Z centrum w kierunku południowo-wschodnim przemieszczał się chłodny front atmosferyczny, który oddzielał gorące powietrze zwrotnikowe od chłodniejszego polarno-morskiego. Wieczorem do krańców północno-zachodnich Polski zbliżyła się strefa mało aktywnego, wtórnego frontu chłodnego. Zachmurzenie było małe i umiarkowane, okresami duże. Miejscami na południu i wschodzie kraju, głównie po południu, występowały opady deszczu i burze, także z gradem. Lokalnie burzom towarzyszyły ulewne opady, a punktowo na Płaskowyżu Głubczyckim i Podkarpaciu deszcz był nawalny.

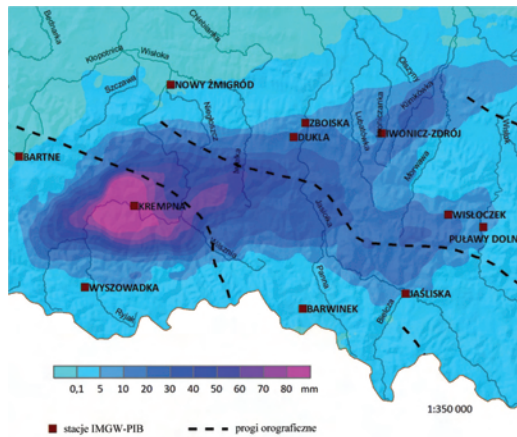
Okolo godziny 13:30 w rejonie Barwinka, a kilkanaście minut później w dolinie Wisłoki (rejon Krempnej), doszło do gwałtownego wypiętrzenia komórki burzowej, która w krótkim czasie objęła swoim zasięgiem całą dolinę. W związku z blokadą orograficzną od strony północnej, występowanie intensywnych opadów miało bardzo lokalny i punktowy zasięg, a przemieszczanie się wspomnianej komórki burzowej było znacznie ograniczone. Strefa opadów przesuwiała się do godziny 15:00 w kierunku wschodnim, by w końcowej fazie przejść na północno-wschodni, aż do przekroczenia progu. Stacja w Krempnej zarejestrowała łączny opad o sumie 58 mm i czasie trwania 70 min. (rys. 7). Blokada orograficzna doprowadziła do kumulacji opadów w dolinie Wisłoki



Rys. 7. Przebieg opadu atmosferycznego na stacji w Krempnej 14 czerwca 2015 r.

Fig. 7. Distribution of precipitation on Krempna meteorological station on 14<sup>th</sup> June 2015





Rys. 8. Rozkład opadu w dniu 14 czerwca 2015 r. z godziny 15:00 o czasie trwania 60 min; dane z meteorologicznego radaru IMGW-PIB w Rzeszowie  
 Fig. 8. Spatial distribution of hourly rainfall amount at 14:00-15:00 pm on 14<sup>th</sup> June 2015; based on IMGW-PIB meteorological radar located near Rzeszów

w godzinach 14:20-14:50, w wysokości 51,6 mm, co wg klasyfikacji Chomicza odpowiada deszczowi nawalnemu VI stopnia (B2). Analiza danych radarowych (rys. 8) wykazała, że w tym czasie zarówno natężenia, jak i sumy opadów lokalnie w obrębie doliny Wisłoki mogły być znacznie wyższe.

## Wnioski

Bariery orograficzne, zarówno wysokie (np. krawędź Beskidów), jak i niskie (Pogórze Karpat), spełniają istotną rolę w generowaniu ekstremalnych opadów, których skutki zauważalne są w efektach hydro-geomorfologicznych. Wybrane przykłady z polskich Karpat pokazują wpływ warunków orograficznych i meteorologicznych na wzrost zagrożenia powstałego w wyniku intensywnych opadów. Przewidywany wzrost intensywności i częstości tych zjawisk na skutek zmian klimatycznych leżał u podstaw podjęcia tej tematyki przez autorów. Groźnym dla gospodarki i społeczeństwa zjawiskiem jest tzw. clustering, czyli powtarzanie się danego zdarzenia w krótkich odstępach czasowych, co uniemożliwia likwidację powstałych strat. Obecność ekstremalnych zdarzeń opadowych w sąsiedztwie barier orograficznych zwraca uwagę na konieczność uruchomienia dodatkowego monitoringu (przykład z 2015 r.). Dla wyznaczenia faktycznego zasięgu opadów ulewnych i ich skutków (hydrologicznych i geomorfologicznych) niezbędne są dane z większej liczby stacji opadowych i wodowskazowych, wykorzystanie danych radarowych oraz z naziemnej inwentaryzacji (kartowanie) miejsc, na których opady te wystą-

piły. W przekonaniu autorów zamieszczone w niniejszym artykule przykłady stanowią istotny wkład w badania dotyczące roli barier górskich generujących ekstremalne opady.

### L i t e r a t u r a

- Cebulak E., 1998, Przegląd opadów ekstremalnych, które wywołały powódzie w XX wieku w dorzeczu górnej Wisły, [w:] Powódź w dorzeczu górnej Wisły w lipcu 1997 roku: konferencja naukowa w Krakowie 7-9 maja 1998, L. Starkel, J. Grela (red.), Wydawnictwo Oddziału Polskiej Akademii Nauk, Kraków, 21-37
- Cebulak E., Faško P., Lapin M., Štastný P., 2000, Extreme precipitation events in the Western Carpathians, *Prace Geograficzne*, 108, 117-124
- Cebulak E., Limanówka D., Malota A., Niedbała J., Pyrc R., Starkel L., 2008, Przebieg i skutki ulewy w dorzeczu górnego Sanu w dniu 26 lipca 2005 roku, *Materiały Badawcze IMGW. Seria: Meteorologia*, 40, 56 s.
- Cebulak E., Niedźwiedź T., 1998, Ekstremalne zjawiska opadowe w dorzeczu górnej Wisły w latach 1995-1996, [w:] Geomorfologiczny i sedymentologiczny zapis lokalnych ulew, L. Starkel (red.), *Dokumentacja Geograficzna*, 11, 11-30
- German K., 1998, Przebieg wezbrania i powodzi 9 lipca 1997 roku w okolicach Żegociny oraz ich skutki w krajobrazie, [w:] Powódź w dorzeczu górnej Wisły w lipcu 1997 roku: konferencja naukowa w Krakowie 7-9 maja 1998, L. Starkel, J. Grela (red.), Wydawnictwo Oddziału Polskiej Akademii Nauk, Kraków, 177-184
- Gorczyca E., 2004, Przekształcanie stoków fliszowych przez procesy masowe podczas katastrofalnych opadów (dorzecze Łososiny), Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków, 102 s.
- Grela J., Słota H., Zieliński J. (red.), 1999, Dorzecze Wisły: monografia powodzi lipiec 1997, IMGW, Warszawa, 199 s.
- Kveton V., Smensky R., Vesely R., 1997, Rozlozeni srážek pri povodních v červenci 1997, *Meteorologické Zpravy*, 50 (6), 171-177
- Maciejewski M., Ostojski M.S., Walczykiewicz T. (red.), 2011, Dorzecze powodzi. Monografia powodzi maj-czerwiec 2010, IMGW-PIB, Warszawa, 236 s.
- Niedźwiedź T., 1972, Heavy rainfall in the Polish Carpathians during the flood in July 1970, *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, 6, 194-198
- Niedźwiedź T., Czekierda D., 1998, Cyrkulacyjne uwarunkowania katastrofalnej powodzi w lipcu 1997 roku, [w:] Powódź w dorzeczu górnej Wisły w lipcu 1997 roku: konferencja naukowa w Krakowie 7-9 maja 1998, L. Starkel, J. Grela (red.), Wydawnictwo Oddziału Polskiej Akademii Nauk, Kraków, 53-66
- Patkowski B., 2002, Rola ekstremalnych wezbrań w kształtowaniu koryta Uszwicy (na przykładzie powodzi w latach 1997-1998), *Prace Instytutu Geografii Akademii Świętokrzyskiej*, 81 (3), 139-152

Rączkowski W., Mrozek T., 2002, Actating of landsliding in the Polish Flysch Carpathians by the end of the 20<sup>th</sup> century, *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, 36, 91-111

### S t r e s z c z e n i e

Krawędzie gór i wyżyn stanowią istotne bariery dla przepływu mas powietrza wędrujących znad oceanów. Przy znacznej wysokości i szerokości pasm górskich mogą one stanowić zaporę trudną do przebycia albo być strefą podwyższonych opadów, zwłaszcza dla wędrujących cyklonów. Nawet niewysokie progi stanowią barierę, która objawia się w postaci prądów konwekcyjnych.

Autorzy omawiają przykłady z różnych części polskich Karpat. Zwarte krawędzie Beskidu Śląskiego, Małego i Żywieckiego do 1 km wysokości wystawione są na opady ośrodków niżowych z kierunków W-NW. Ku wschodowi krawędź rozbita jest na mniejsze grupy górskie Beskidu Wyspowego, co ułatwia wnikanie opadów w głąb gór wysokich. Niekiedy chmura burzowa wędruje wzdłuż wysokiego progu (np. krawędzi Zachodnich Bieszczadów), ale i próg Pogórza wysoki tylko do 200 m sprzyja lokalnym opadom konwekcyjnym.

### S u m m a r y

The edges of mountains and uplands constitute significant barriers to the flow of air masses travelling from the oceans. The barriers are particularly difficult to be overcome when the height and width of mountain ranges are large, such settings can be create zones of increased rainfall, especially for roaming cyclones. Even low mountain edges form barriers which induce convectional currents.

The authors discuss examples from various parts of the Polish Carpathians. The compact edges of the Silesian, Mały and Żywiecki Beskids up to 1 km high are exposed to precipitation of low-pressure systems from the W-NW directions. To the east, the edge is split into smaller mountain groups of the Beskid Wyspowy, which facilitates the penetration of high rainfall into the mountain interior. Sometimes storm clouds travel along a high edge of the mountains, e.g. along the edge of the Western Bieszczady. The edge of the foothills, only up to 200 m high, favours local convection rainfall.