

Jakub SOROKA 

INSTYTUT METEOROLOGII I GOSPODARKI WODNEJ – PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY

Patryk MATCZAK

UNIwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu,
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych
Stowarzyszenie Skywarn Polska, Warszawa

BURZA SUPERKOMÓRKOWA Z DESZCZEM NAWALNYM 8 WRZEŚNIA 2022 ROKU W REJONIE GORZOWA WIELKOPOLSKIEGO

SUPERCELL THUNDERSTORM WITH HEAVY RAIN ON
SEPTEMBER 8, 2022 IN THE AREA OF GORZÓW WIELKOPOLSKI

Wstęp

Deszcze nawalne w Polsce są zjawiskiem stosunkowo rzadkim. Ich konsekwencją są często powodzie błyskawiczne, skutkujące dużymi stratami w środowisku przyrodniczym i infrastrukturze technicznej oraz stanowiące niekiedy zagrożenie dla życia człowieka. Najsilniejsze ulewy są zazwyczaj związane z gwałtownym rozwojem chmur burzowych i obejmują swym zasięgiem przeważnie niewielki obszar, dlatego tylko niektóre przypadki opadów nawalnych zostają uchwycone przez naziemną sieć opadową.

Deszcz nawalny definiuje się powszechnie w literaturze krajowej według klasyfikacji Chomicza (1951) jako wystąpienie deszczu o wydajności u (suma opadów w mm) w czasie t (w min.) przekraczającej wartość $u_5 = 5,66 \cdot t^{0,5}$. Opady o największych natężeniach w Polsce były przedmiotem prac wielu badaczy (Chomicz 1951; Chudy 2002; Prokop 2006, 2007; Wrona 2008; Stach 2009; Kotowski i in. 2010; Lorenc i in. 2012). O pojedynczych epizodach deszczów nawalnych w Polsce pisali m.in. Olecki (1970), Olejnik i in. (1989), Niedźwiedz (1997), Cebulak i in. (2008), Pietras i Pyrc (2018). Natomiast skutki geomorfologiczne opadów nawalnych były analizowane m.in. w pracach: Rodzik i in. (1998) oraz Starkel (1997). Opad nawalny z 8 września 2022 r. w rejonie Gorzowa był przedmiotem krótkiej analizy w tekście *Burza w Gorzowie Wielkopolskim* (<https://blog.meteomodel.pl>). Katastrofalne skutki tego opadu i powodzi błyskawicznej opisywano w wielu relacjach i tekstach prasowych w mediach lokalnych i ogólnopolskich.

Celem opracowania jest przedstawienie przyczyn, przebiegu i skutków deszczu nawałnego, jaki wystąpił w godzinach porannych 8 września 2022 r. na styku granic miasta Gorzowa Wlkp., gminy Santok oraz gminy Deszczno.

Dane źródłowe i metody opracowania

Analizę warunków meteorologicznych i sytuacji synoptycznej analizowanego przypadku burzy i deszczu nawałnego przeprowadzono na podstawie archiwalnych danych udostępnianych publicznie przez europejskie służby meteorologiczne (m.in. Deutscher Wetterdienst, Met Office, IMGW-PIB). Pozyskane informacje porównywano również z wynikami reanaliz meteorologicznych (CFS, GFS oraz ERA5). Naziemne dane meteorologiczne pozyskano z jedyne go oficjalnego punktu pomiarowego objętego zasięgiem opadu, tj. Stacji Hydrologiczno-Meteorologicznej IMGW-PIB w Gorzowie Wlkp. ($\varphi = 52^{\circ}44'28''\text{N}$, $\lambda = 15^{\circ}16'38''\text{E}$, $H_s = 71$ m n.p.m., ok. 3 km na północny wschód od rdzenia ulewy). Niestety od roku 2021 stacja działa w trybie ograniczonym, tj. z pracą obserwatora tylko w porze dziennej. W dniu wystąpienia ulewy obserwator rozpoczął dyżur o godz. 06:00 UTC (08:00 czasu urzędowego), zatem tuż po ustąpieniu ulewy, wobec czego opis zjawiska opiera się przede wszystkim na wskazaniach przyrządów automatycznych. Wykorzystano dane z deszczomierzy o powierzchni wlotu 200 cm^2 – Hellmanna i deszczomierza korytkowego TPG-124-H24 firmy A-STER. Obserwator dokonujący pomiaru o godz. 06:00 UTC w dniu 8 września 2022 r. stwierdził przelanie się zbiorniczka w deszczomierzu Hellmanna, woda rozlała się w podstawie deszczomierza, ale całość została zmierzona. Istnieje podejrzenie, że opad o nadzwyczaj silnym natężeniu spowodował niedostatecznie szybki odbiór wody z wewnętrznego lejka deszczomierza korytkowego i okresowe wylewanie się wody poza korytko, co mogło przyczynić się do zaniżonej sumy opadów. Wobec istotnych rozbieżności we wskazaniach między deszczomierzami na stacji, zdecydowano, że najbardziej wiarygodną informacją o dobowej sumie opadów atmosferycznych będzie pomiar deszczomierzem Hellmanna. Do przedstawienia natężenia opadów w wybranych przedziałach czasowych wybrano deszczomierz korytkowy, który jako jedyny dostarcza dane z rozdzielczością 1 minuty.

Uzyskano także 5-minutowe sumy opadów z amatorskiej stacji meteorologicznej w Wawrowie, która działa w sieci Wunderground ($\varphi = 52^{\circ}43'55''\text{N}$, $\lambda = 15^{\circ}18'08''\text{E}$, $H = 62$ m n.p.m., ok. 1 km na północny wschód od rdzenia ulewy; www.wunderground.com). W punkcie tym zamontowana jest stacja typu WH4000SE, a lokalizacja spełnia minimalne warunki reprezentatywności pomiarów wysokości opadów atmosferycznych obowiązujące w IMGW-PIB. Badania porównawcze tego typu stacji, również przy opadzie nawałnym III stopnia (B_3), wykazały dobrą zgodność przyrządów amatorskich i profesjonalnych (Radosław Drożdżoń, IMGW-PIB, informacja ustna).

Aktywność elektryczną burzy oceniono na podstawie danych z systemu detekcji i lokalizacji wyładowań atmosferycznych PERUN IMGW-PIB. Rozwój, zasięg i przemieszczanie się komórek burzowych udokumentowano dzięki danym z sieci radarów

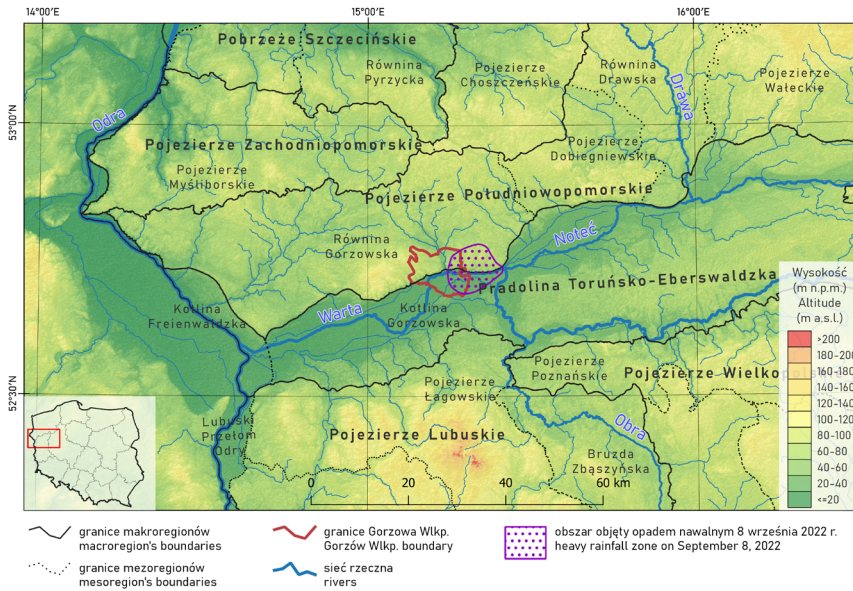
meteorologicznych POLRAD IMGW-PIB, w szczególności z najbliższej położonego radaru – w Poznaniu (ok. 105 km od rozpatrywanego miejsca). Z kolei do oceny sumy opadów i ich natężenia zastosowano model RainGRS łączący dane z sieci automatycznych stacji opadowych, dane radarowe (w tym z krajów sąsiednich) oraz dane satelitarne (Jurczyk i in. 2020). Model ten jest wykorzystywany operacyjnie w IMGW-PIB i dostarcza danych o 10-minutowej sumie opadów. Dodatkowo, skorzystano z reanalizy RainGRS Clim wykonanej w Zakładzie Nowcastingu IMGW-PIB. Produkt ten opiera się na opisanym wyżej modelu RainGRS 24 h, ale jest uzupełniany o dane opóźnione, a następnie podlega ponownej weryfikacji. Dodatkowo model jest zasilany zweryfikowanymi danymi z kilkuset stacji opadowych w Polsce wyposażonych w deszczomierz Hellmanna. Produkty RainGRS Clim dostarczają informacji o dobowej i miesięcznej sumie opadów z rozdzielczością przestrzenną 1 km, a dane są bardziej wiarygodne niż z operacyjnie użytkowanego modelu RainGRS (Jurczyk i in. 2023).

Obszar objęty analizą

Ziemia gorzowska położona jest w zachodniej Polsce, w północnej części województwa lubuskiego. Katastrofalny opad i związana z nim powódź błyskawiczna objęły obszar kilkudziesięciu kilometrów kwadratowych: wschodnią część miasta Gorzowa Wlkp., zachodnią część gminy Santok i północną część gminy Deszczno. Tereny te są położone na Nizinie Środkowoeuropejskiej, a ściślej ujmując na obszarze Pojezierzy Południowobałtyckich. Według podziału Solona i in. (2018) południową część obszaru stanowi Kotlina Gorzowska (będąca częścią Pradoliny Toruńsko-Eberswaldzkiej), natomiast na północy rozciąga się Równina Gorzowska wchodząca w skład Pojezierza Południowopomorskiego (rys. 1). Charakterystycznym elementem krajobrazu rozpatrywanego obszaru jest płynąca ze wschodu na zachód rzeka Warta i równoległe do niej biegnąca krawędź wysoczyzny o wysokościach względnych 50-70 m, oddzielająca wspomniane mezoregiony. Wysokości bezwzględne tego terenu zmieniają się od ok. 20 m n.p.m. na dnie doliny Warty do 93 m n.p.m. w gminie Santok oraz do 142 m n.p.m. na zachód od Gorzowa Wlkp. Krawędź wysoczyzny, urozmaicona licznymi rozcięciami erozyjnymi, ma ekspozycję przeważnie południową. Przeciętne nachylenie krawędzi osiąga 10-20°, a największe nachylenia terenu dochodzą miejscami do 35°. Teren jest użytkowany głównie rolniczo – grunty orne na Równinie Gorzowskiej oraz łąki i pastwiska w Kotlinie Gorzowskiej. Nieliczne obszary leśne występują na wysoczyźnie.

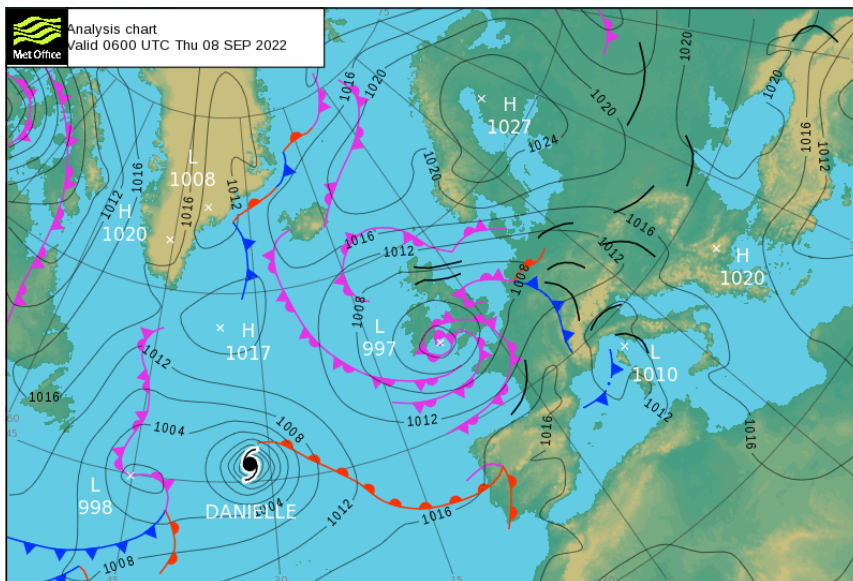
Zarys sytuacji synoptycznej

Sytuację pogodową w Europie podczas wystąpienia deszczu nawalnego kształtowały w dużej mierze dwa ośrodki baryczne. Na obszarze Półwyspu Skandynawskiego znajdował się rozległy, ale słabnący wyż. Natomiast nad Europą Zachodnią pojawił się



Rys. 1. Położenie obszaru objętego deszczem nawałnym na tle jednostek fizycznogeograficznych wg Solona i in. (2018).

Fig. 1. Localisation of heavy rainfall zone against the background of physiographic units (after Solon et al. 2018).

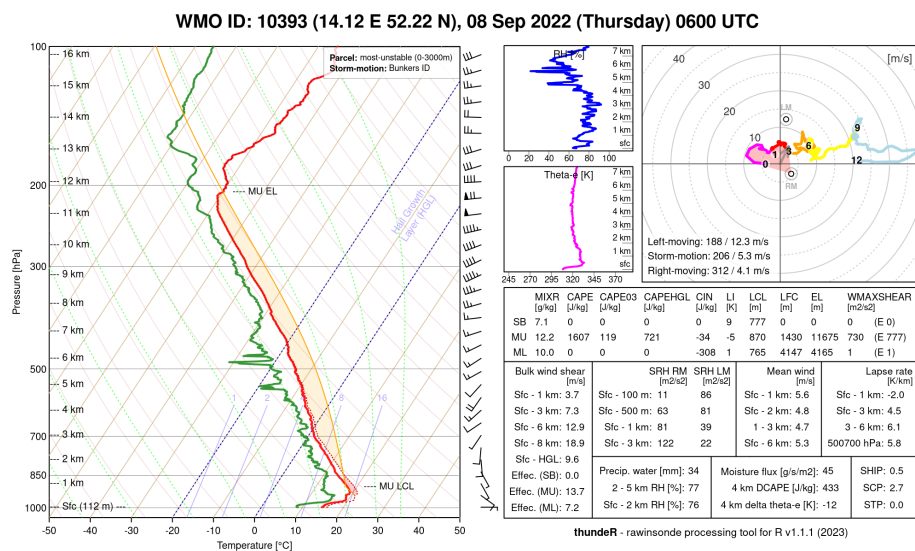


Rys. 2. Mapa synoptyczna Europy w dniu 8 września 2022 r. o godz. 06:00 UTC (Met Office).

Fig. 2. Archived synoptic map prepared by the UK National Meteorological Service (Met Office) showing the synoptic situation for Europe on September 8, 2022, at 06:00 UTC.

spory układ niskiego ciśnienia o dużej rozciągłości w pionie, który przesuwał się znad rejonu Wysp Brytyjskich w stronę Polski. Taka sytuacja spowodowała po pierwsze napływ znad ciepłych wód Atlantyku i Zatoki Biskajskiej ciepłego, chwiejnego oraz zasobnego w wilgoć powietrza polarnego morskiego; po drugie, na obszarze zachodniej Polski oraz Niemiec wykształciła się silna, dolnotroposferyczna zbieżność wiatru (rys. 2). Była ona istotnym czynnikiem wspomagającym rozwój konwekcji tego dnia, zwłaszcza nad obszarem południowej Polski w godzinach popołudniowych 8 września, gdzie wystąpiło wiele burz. Wraz z obecnością niżu pojawiły się liczne strefy frontowe, które stopniowo przesuwały się w stronę Polski, przynosząc zmianę pogody.

Warunki do rozwoju burz na pograniczu polsko-niemieckim w nocy 7/8 września 2022 r. były sprzyjające. W atmosferze obecna była duża, jak na tę porę doby, ilość energii potencjalnej dostępnej drogą konwekcji (MUCAPE), dochodząca miejscami do 1600 J/kg. Napływająca masa powietrza, która wówczas znajdowała się nad zachodnią częścią kraju, była zasobna w wilgoć, o czym świadczyły m.in. podwyższone parametry stosunku zmieszania pary wodnej (ang. mixing ratio) oraz wodności troposfery (ang. precipitable water) - odpowiednio 12,2 g/kg oraz 34 mm. Wilgotność względna praktycznie w całym profilu atmosfery była bliska 80%. Wartości zmierzone na nieodległej stacji pomiarów aerologicznych w Lindenbergu ukazywały potencjał wilgotnej konwekcji oraz intensywny-



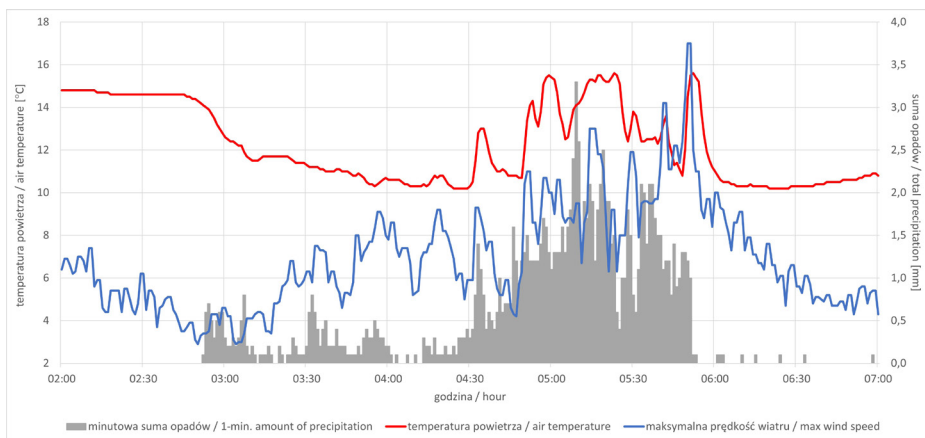
Rys. 3. Sondaż aerologiczny wykonany na stacji w Lindenbergu (WMO ID: 10393) 95 km na południowy zachód od przejścia burzy w dniu 8 września 2022 r. o godz. 06:00 UTC, wygenerowany przy użyciu paczki "thunder" w języku programowania R (Czernecki i in. 2023; Taszarek i in. 2023, rawinsonde.com).

Fig. 3. Atmospheric sounding from the Lindenberg station (WMO ID: 10393) 95 km southwest of the storm's path, on September 8, 2022 at 06:00 UTC using 'thunder' R-language rawinsonde package (Czernecki et al. 2023; Taszarek et al. 2023, rawinsonde.com).

nych opadów deszczu, jednak nie wskazywały na nadzwyczajną anomalię związaną z opadami deszczu. Pole i konfiguracja wiatru sprzyjały wolnemu przemieszczaniu się burz. Prędkość wiatru na wielu poziomach troposfery była względnie niska. Uskoki wiatru również były relatywnie słabe, jednak w obrębie dolnej troposfery pojawił się wyraźny skręt kierunku wiatru, który mógł sprzyjać rozwojowi superkomórek burzowych. W samej warstwie granicznej obecna była warstwa inwersji temperatury, która miała wpływ na specyfikę konwekcji poprzez zmiany gradientu temperatury, a w niektórych miejscach mogła także skutecznie utrudniać procesy konwekcyjne. Na sondażu aerologicznym przeprowadzonym o godz. 06:00 UTC w Lindenbergu (rys. 3) można zauważyć nietypowy układ związany z ujemnymi wartościami różnicy pomiędzy temperaturą ekwiwalentno-potencjalną a najniższą temperaturą do wysokości 4 km (delta theta-e -12K), a także znaczną ilością energii CAPE. W tym przypadku doszło więc do bardzo rzadkiej sytuacji, w której temperatura prądów zstępujących była wyższa niż temperatura przy powierzchni ziemi. Kluczowym czynnikiem do rozwoju burzy okazała się wspomniana wcześniej linia zbieżności wiatru obecna w północno-wschodnich Niemczech oraz zachodniej Polsce, która wspierała procesy wymuszania wznoszenia powietrza i aktywny rozwój konwekcji w godzinach nocnych.

Przebieg burzy

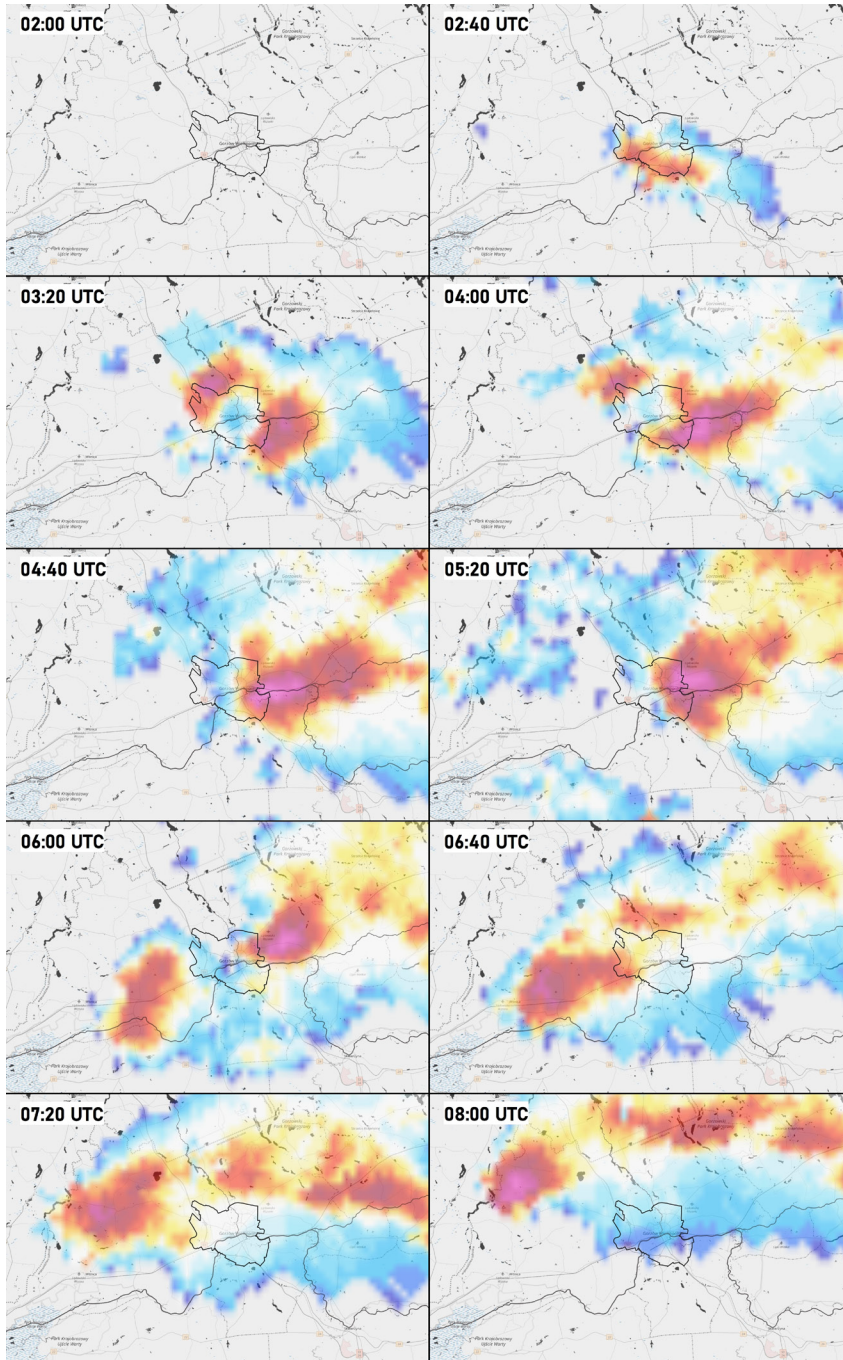
Nocą 7/8 września 2022 r. w Polsce północnej i zachodniej zaczęły powstawać izolowane komórki konwekcyjne z przelotnymi opadami deszczu i lokalnymi wyładowaniami atmosferycznymi. W powiecie gorzowskim pierwsza komórka opadowa pojawiła się około godz. 02:00 UTC (04:00 czasu urzędowego) na obszarze gminy Deszczno i w zachodniej części gminy Bogdaniec (na południe i południowy zachód od Gorzowa). O godz. 02:00 UTC na stacji pomiarowej IMGW-PIB zarejestrowano temperaturę powietrza 14,8°C oraz wschodni kierunek wiatru (przeciwny do kierunku przemieszczania się stref burzowych i opadowych). W ciągu kilkadziesiąt minut, na skutek korzystnych warunków w atmosferze, doszło do gwałtownego rozwoju konwekcji. Opad deszczu odznaczał się silnym natężeniem, wystąpiły wyładowania atmosferyczne oraz opady gradu. Na obrazowaniach radarowych prędkości radialnej wiatru, z dostępnego radaru dopplerowskiego w Poznaniu, pojawiły się sygnatury świadczące o powstaniu superkomórki burzowej (ang. supercell thunderstorm) wraz z wbudowanym mezocyklonem. Burza superkomórkowa przyjęła charakter prawoskrętny (ang. right mover), a ponieważ ogólna prędkość przemieszczania się burz była w tym dniu niewielka, przez to stała się burzą superkomórkową niemalże stacjonarną (występującą przez długi okres nad tym samym obszarem). Kulminacja rozwoju tego układu przypadła na godziny 03:00-06:00 UTC (rys. 5). W tym okresie strefa największej intensywności opadów przemieszczała się bardzo wolno od rejonu Karnina i Osiedla Poznańskiego przez Siedlice, Zakanale, Janice, Czechów po Wawrów i Janczewo, tj. na południe, południowy wschód i wschód od centrum miasta. Po godz. 06:00 UTC układ burzowy ulegał powolnemu osłabieniu i wolno przemieszczał się na północ.



Rys. 4. Przebieg temperatury powietrza ($^{\circ}\text{C}$), maksymalnej prędkości wiatru (m/s) i minutowych sum opadów atmosferycznych (mm) w Gorzowie Wlkp. (stacja IMGW-PIB) 8 września 2022 r.

Fig. 4. The course of air temperature ($^{\circ}\text{C}$), maximum wind speed (m/s) and 1-min. amount of precipitation (mm) in Gorzów Wlkp. (station IMGW-PIB) on September 8, 2022.

Istotnym czynnikiem sprzyjającym intensyfikacji struktury burzowej było rzadko występujące zjawisko na terenie Polski o symptomach zbliżonych do tzw. convective heat burst. Heat burst definiowany jest jako nagły i szybki wzrost temperatury oraz spadek wilgotności (Johnson 1983; Trobec 2008; Basara, Rowell 2012). Według najnowszych badań (Bunting 2022), w nieco bardziej uściślonej klasyfikacji, heat burst klasyfikowany jest jako suchy microburst (ang. dry microburst) powodujący także porywisty wiatr, związany ze strefą odpływu powietrza z burzy. Zjawisko to jest charakterystyczne dla burz występujących późnym wieczorem lub wczesnym rankiem (Schlatter 1995). Heat burst może występować przez całą dobę, również w ciągu dnia, jednak wtedy nagłe różnice w przebiegu poszczególnych parametrów meteorologicznych są mniej zauważalne. Oprócz wzrostu temperatury i spadku wilgotności względnej, zjawisko to charakteryzuje się często także rozpadem chmur i osłabieniem echa radarowego, a jego występowanie jest ściśle związane z obecnością warstwy inwersyjnej temperatury w dolnej troposferze (Johnson 1983; Johnson 2003; Bunting 2022). Omawiane czynniki wystąpiły 8 września podczas burzy nad Gorzowem Wlkp. W pierwszym przypadku wzrost temperatury następował skokowo od godz. 04:30 UTC do godz. 05:20 UTC, wówczas temperatura powietrza wzrosła od około 10°C do ponad $15,5^{\circ}\text{C}$ (rys. 4). Wraz z gwałtowną adwekcją ciepła rozpoczęły się także najsilniejsze opady deszczu o natężeniu ponad 2 mm na minutę. Kolejny, nagły i gwałtowny wzrost temperatury przypominający zjawisko heat burst zanotowano około godz. 05:50 UTC (rys. 4). W ciągu zaledwie 6 minut temperatura wzrosła o blisko 5°C . Zanotowano również wzrost prędkości wiatru z maksymalnym porywem o wartości 17,0 m/s. Na wykresie sondażu aerologicznego, przeprowadzonego o godz. 06:00 UTC w Lindenbergu oraz profilu pionowego atmosfery wygenerowanego na podstawie reanalizy ERA5 dla lokalizacji Gorzowa Wlkp., można zauważyć wyraźne



Rys. 5. Obraz radarowy (produkt CMAX) w rejonie Gorzowa Wlkp., 8 września 2022 r.

Fig. 5. CMAX radar signatures in the area of Gorzów Wlkp., September 8, 2022.

warstwy inwersyjne w dolnej troposferze sugerujące rozwój burzy z tzw. trybu uniesionej konwekcji, a także sprzyjające występowaniu zjawiska heat burst. Nie zaobserwowano natomiast spadku wilgotności względnej wraz z napływem ciepłego powietrza.

Burza była aktywna elektrycznie, w godz. 02:40-08:00 UTC system PERUN IMGW-PIB zarejestrował w promieniu 20 km od miejscowości Czechów 310 wyładowań doziemnych oraz 1233 wyładowania chmurowe. Największa aktywność elektryczna burzy przypadała na godz. 04:00-04:40 UTC. Superkomórka burzowa przyniosła również w okolicy opady gradu – o godz. 06:00 UTC na stacji IMGW-PIB w Gorzowie obserwator stwierdził warstwę gradu na gruncie, a wielkość największych gradzin dochodziła do 2 cm.

Warto zauważyć, że ok. godz. 05:00 UTC zarejestrowano powstanie i gwałtowny rozwój nowej komórki burzowej na zachód od Gorzowa, tj. w gminie Witnica. Tym razem także była to superkomórka burzowa, jednak o charakterze lewoskrętnym (ang. left mover). Przemieszczała się mniej więcej na trasie Witnica (woj. lubuskie) – Myślibórz (woj. zachodniopomorskie). Z dużym prawdopodobieństwem można stwierdzić, iż przyczyniła się do modyfikacji warunków w strefie napływu powietrza do superkomórki znad Gorzowa i tym samym ograniczyła żywotność tego układu. Lewoskrętna burza superkomórkowa połączyła się w godz. 06:00-07:00 UTC z wygasającym układem znad wschodniej części Gorzowa tworząc wydłużoną strukturę opadów o długości kilkudziesięciu kilometrów, ułożoną niemal równoleżnikowo i nawiązującą do przebiegu krawędzi wysoczyzny i doliny Warty.

Wyjątkową cechą superkomórki burzowej nad ziemią gorzowską było wyraźnie wolniejsze przemieszczanie się od pozostałych komórek konwekcyjnych, które w tym czasie pojawiły się na pograniczu lubusko-wielkopolskim oraz w dolinie dolnej Odry (rejon Szczecina i Gryfina). Było to spowodowane specyficznym dla tego typu sytuacji ułożeniem pionowego profilu wiatru. Charakterystyczne wygięcie wektora profilu wiatru widoczne jest na hodografie (rys. 3), który pozwala oszacować prędkość oraz przemieszczanie się burz superkomórkowych prawo- i lewoskrętnych za pomocą metody Bunkersa (Bunkers i in. 2000). W tym przypadku wektor superkomórek prawoskrętnych był bliski wartości „0”. To wskazywało na zwiększone prawdopodobieństwo tego, że jeżeli wystąpi burza superkomórkowa o charakterze prawoskrętnym, to będzie ona przemieszczać się bardzo powoli w porównaniu do średniej prędkości przemieszczania się pozostałych burz.

Charakterystyka deszczu nawalnego

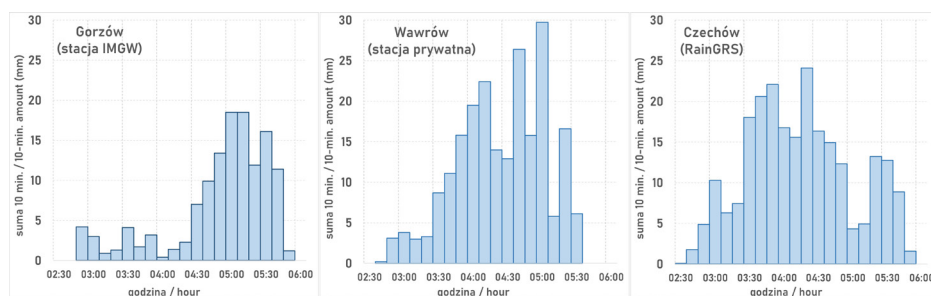
Na stacji IMGW-PIB w Gorzowie Wlkp. początek opadu deszczu został zarejestrowany o godz. 02:40 UTC i bardzo szybko osiągnął silne natężenie – przez pierwsze 80 minut wahało się w przedziale 1-4 mm/10 min., jedynie przejściowo po godz. 04:00 UTC spadło poniżej 1 mm/10 min. (rys. 6). Faza największej intensywności opadu trwała w godz. 04:30-05:50 UTC. W tym okresie minutowe natężenie opadu przekraczało 1 mm/min., z maksimum 3,3 mm/min. o godz. 5:09 UTC. Przez godzinę natężenie opadu przekraczało 10 mm/10 min., a największą 10-minutową sumę zarejestrowano w godz. 05:05-05:15

UTC – blisko 21 mm. Z kolei maksymalną godzinną sumę opadów zmierzono w godz. 04:45-05:45 UTC i wyniosła ona 90,3 mm (tab. 1). O godz. 05:50 UTC opady zaczęły stopniowo słabnąć i zakończyły się o godz. 07:22 UTC. Uwzględniając najintensywniejszą fazę opadu, trwającą 80 minut (w godz. 04:31-05:51 UTC spadło 107,3 mm), współczynnik wydajności opadów wg skali Chomicza osiągnął $\alpha = 12,0$, co pozwala zaliczyć ten epizod do deszczu nawalnego III stopnia (B_3).

Dobowa suma opadów na stacji meteorologicznej IMGW-PIB w Gorzowie osiągnęła 144,9 mm wg pomiarów deszczomierzem Hellmanna. Wartość ta obejmuje opad trwający 3 godz. 20 min. Należy uzupełnić, że w oficjalnych zestawieniach IMGW-PIB figuruje wartość 130,4 mm, która została zmierzona podstawowym przyrządem pomiarowym, jakim był wówczas automatyczny deszczomierz korytkowy. Wyjaśnienia wymaga fakt, że rekordowa suma opadów została odnotowana w bazach danych dobowych pod datą 7 września (doba opadowa trwa od godz. 06:00 UTC dnia 7 września do godz. 06:00 UTC dnia 8 września 2022 r.), mimo że faktyczny opad nastąpił we wczesnych godzinach porannych 8 września.

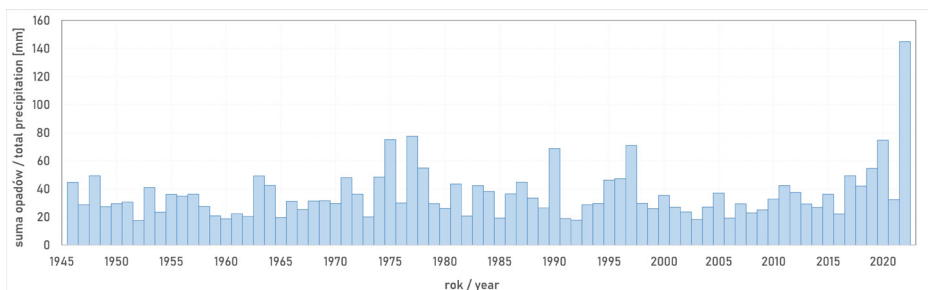
Rekordowa dobowo suma opadów 144,9 mm stanowiła przewyższenie dotychczasowego maksimum w Gorzowie z 8 sierpnia 1977 r. aż o 87% (rys. 7). Dane minutowe wskazują, że rekord dotychczasowej dobowej sumy opadów został pobity już w czasie niespełna 50 minut, a w ciągu 120 minut przekoczona została najwyższa miesięczna suma opadów we wrześniu (odnotowana we wrześniu 2001 r. – 114,7 mm). Dla porównania, poprzednie dobowe maksimum opadów z roku 1977 zostało osiągnięte wskutek ulewy trwającej aż 6,5 godziny. Niespełna 3,5-godzinny opad z 8 września 2022 r. stanowił 26% średniej rocznej sumy opadów oraz 323% średniej sumy opadów we wrześniu. Na podstawie danych z lat 1966-2010 prawdopodobieństwo przewyższenia maksymalnego opadu dobowego o wys. ≥ 100 mm w Gorzowie wynosi 0,4%, tj. raz na 250 lat (Lorenc i in. 2012).

Inne źródła danych wskazują, że w okolicy intensywność opadów była jeszcze większa niż ta określona na podstawie pomiarów na stacji IMGW-PIB w Gorzowie.



Rys. 6. Przebieg 10-minutowych sum opadów (mm) w rejonie Gorzowa Wlkp. w dniu 8 września 2022 r.

Fig. 6. The course of 10-min. amount of precipitation (mm) in Gorzów Wlkp. area on September 8, 2022.



Rys. 7. Maksymalne dobowe sumy opadów atmosferycznych (mm) w latach 1946-2022 na stacji IMGW-PIB w Gorzowie Wlkp.

Fig. 7. The course of maximum daily precipitation noted at IMGW-PIB station in Gorzów Wlkp. in the observation period 1946-2022.

Na amatorskiej automatycznej stacji meteorologicznej w Wawrowie (na pograniczu z Czechowem, w odległości ok. 2 km od stacji IMGW-PIB w kierunku południowo-wschodnim) deszczomierz automatyczny zarejestrował opad w godz. 02:50-05:40 UTC. W tym okresie suma 10-minutowa dochodziła do 30 mm (w godz. 05:00-05:10 UTC), a suma godzinna w godz. 04:10-05:10 UTC osiągnęła 121 mm (rys. 6, tab. 1). Dobowa suma opadów zmierzona w tym punkcie wyniosła 218 mm. Współczynnik wydajności opadu wg Chomicza największą wartość osiągnął w odniesieniu do opadu o czasie trwania 120 minut (w godz. 03:30-05:30 UTC spadło 199 mm) i wyniósł $\alpha = 18,2$, co wskazuje na deszcz nawałny IV stopnia (B_4). Wartości ze stacji automatycznej w Wawrowie wydają się wiarygodne i nawiązują do rozkładu sum opadów ustalonych na podstawie danych radarowych, ale pozostają danymi nieoficjalnymi, pochodzą bowiem z przyrządu amatorskiego, nieobjętego regularnym serwisem i kalibracją.

Tabela 1. Charakterystyka opadów atmosferycznych (mm) 8 września 2022 r. w Gorzowie i Wawrowie.

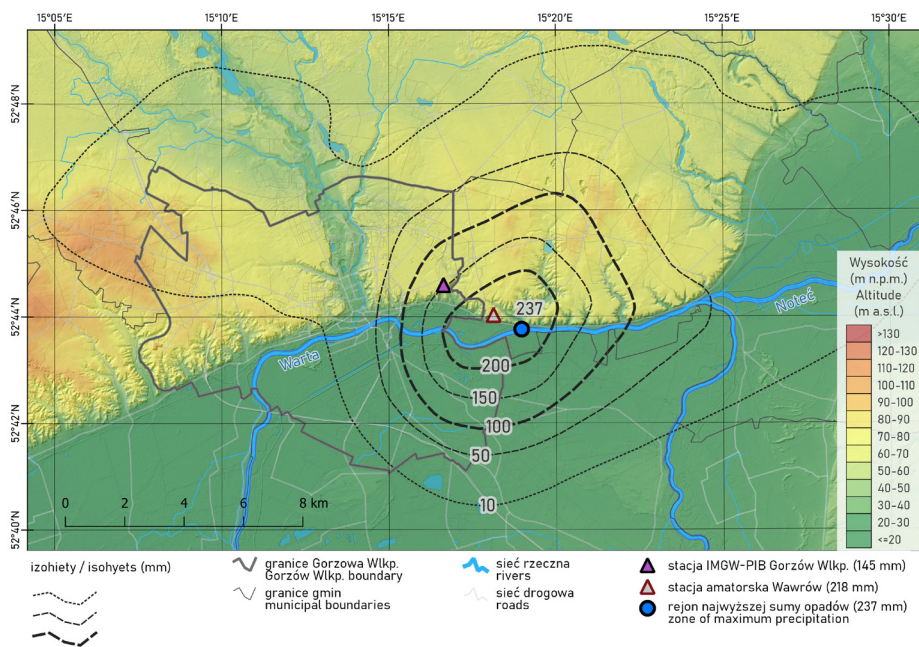
Table 1. Rain-gauge data in Gorzów and Wawrów on September 8, 2022.

Parametr Parameters		Stacja IMGW-PIB Gorzów IMGW-PIB Gorzów station	Stacja amatorska Wawrów Wawrów amateur station
Dobowa suma opadów do 06:00 UTC 8.09.2022 Daily total precipitations till 06:00 UTC 8.09.2022		144,9*	218
Maksymalna suma opadu w okresie: Maximum rainfall amount in period:	10 min.	21**	30
	30 min.	51**	72
	60 min.	90**	121
	120 min.	115**	199
	180 min.	130**	218
Kategoria deszczu wg Chomicza Rainfall categories aft. Chomicz		nawałny III st. (B_3)	nawałny IV st. (B_4)

*pomiar deszczomierzem Hellmanna / measured with the Hellmann rain gauge;

**pomiar deszczomierzem korytkowym / measured with the tipping bucket rain gauge.

Użytkowany operacyjnie w IMGW-PIB model RainGRS oszacował maksymalną dobową sumę opadów na 266 mm i zlokalizował ją w rejonie rzeki Warty na wysokości miejscowości Czechów, położonej u podnóża strefy krawędziowej Wysoczyzny Gorzowskiej, ok. 3 km na południowy wschód od stacji IMGW-PIB. Jest prawdopodobne, że suma opadów w rdzeniu komórki była nieco przeszacowana z powodu obecności gradu (informacja ustna z Zakładu Nowcastingu IMGW-PIB; *Burza w Gorzowie Wielkopolskim* 2022). Bardziej miarodajnych informacji opadowych z tego epizodu dostarcza reanaliza RainGRS Clim, zgodnie z którą maksimum dobowej sumy opadów (doba opadowa 7 września 2022 r.) wystąpiło w rejonie Czechowa i wyniosło 237 mm (rys. 8). Uwzględniając opisane wcześniej dane naziemne i radarowe, można przyjąć, że wartość ta jest najbardziej wiarygodna.



Rys. 8. Dobowa suma opadów atmosferycznych do godz. 06:00 UTC 8 września 2022 r. w rejonie Gorzowa estymowana wg reanalizy RainGRS Clim.

Fig. 8. 24-hour precipitation amounts until 06:00 UTC, September 8, 2022 in the area of Gorzów Wielkopolski, estimated with the RainGRS Clim reanalysis.

Najwyższa 10-minutowa suma opadów oszacowana na podstawie modelu RainGRS i RainGRS Clim wyniosła ok. 33 mm (godz. 04:40-04:50 UTC w rejonie Siedlic). Z kolei estymowana maksymalna godzinna suma opadów osiągnęła ok. 122 mm (godz. 04:20-05:20 UTC we wschodniej części Gorzowa, między Siedlicami a Janicami). Strefa opadów przekraczających 100 mm objęła obszar ok. 40 km^2 wokół styku granic Gorzowa i gmin Santok i Deszczno, natomiast obszar opadów powyżej 200 mm szacowany jest na ok. 10 km^2 .

Oprócz omówionego wyżej zasadniczego rdzenia opadowego, w tym samym okresie pojawiały się również niewielkie komórki z intensywnym opadem w innych miejscach regionu. Jedną z ulew rozwinęła się na północno-zachodnich krańcach Gorzowa, między Santockiem, Marwicami i Baczyną. Tu szacowana wg modeli RainGRS suma opadów w godz. 02:40-05:10 UTC wyniosła ok. 45 mm. Wspomniana wcześniej burza nad gminą Witnica była również wyjątkowo opadowa. W tym rejonie dobową sumę opadów dochodziła do 108 mm, a maksymalna godzinna suma (w godz. 06:00-07:00 UTC) sięgała 95 mm (wg estymacji RainGRS). Warto zaznaczyć, że strefa maksymalnych opadów przypadła na pogranicze między Kotliną Gorzowską i Równiną Gorzowską, które oddzielone są wyraźną krawędzią o wysokości względnej 30-40 m.

Dyskusja

Opady o natężeniu odnotowanym w czasie deszczu nawalnego 8 września 2022 r. są na terenie Polski nizinnej absolutnym ewenementem. W całej historii pomiarów meteorologicznych na obszarze dzisiejszej Polski liczba epizodów zmierzonych dobowych sum opadów osiagających co najmniej 200 mm wyniosła 37 (ustalono na podstawie danych Centralnej Bazy Danych Historycznych IMGW-PIB oraz literatury: Chomicz 1951; Kłysik, Fortuniak 1993; Stach 2009). Absolutne maksimum w historii Polski odnotowano na Hali Gąsienicowej 30 czerwca 1973 r. (300 mm). Zdecydowana większość zdarzeń o sumie dobowej co najmniej 200 mm miało miejsce na południu Polski, na stacjach położonych przeważnie powyżej 400 m n.p.m. Spośród stacji nizinnych najwyższe sumy opadów zarejestrowano:

- 223,5 mm, 14.05.1972 r., Wądołki-Borowe (pow. zambrowski, woj. podlaskie),
- 221,8 mm, 8.07.1955 r., Nieszawa (pow. aleksandrowski, woj. kujawsko-pomorskie),
- 211,4 mm, 8.06.1988 r., Lubień (pow. piotrkowski, woj. łódzkie),
- 210,8 mm, 8.09.1978 r., Zawodzie (pow. ostrołęcki, woj. mazowieckie).

Dane te wskazują, że dobową sumę opadów zarejestrowaną o godz. 06:00 UTC dnia 8 września 2022 r. w Wawrowie (218 mm) była jedną z najwyższych wartości odnotowanych w historii pomiarów w nizinnej części Polski. Natomiast suma 237 mm w rejonie Czechowa (wielkość szacowana w reanalizie RainGRS Clim) jest wartością nie mającą precedensu na Niziu Polskim, a uwzględniając cały obszar kraju, plasuje się w pierwszej siódemce absolutnych rekordów dobowych sum opadów w historii pomiarów w Polsce. Analizowany opad z okolic Gorzowa był pierwszym w historii Polski odnotowanym przypadkiem wystąpienia opadu dobowego o wysokości co najmniej 200 mm na terenach poniżej 85 m n.p.m. Izohieta 200 mm zgodnie z reanalizą RainGRS Clim objęła obszar o wysokościach 18-83 m n.p.m. Dotychczasowy rekord najniższej położonej stacji z takim opadem należał do stacji w Nieszawie położonej na wysokości 89 m n.p.m.

Na obszarze Polski zachodniej powojenne dobowe sumy opadów przewyższające rekord stacji IMGW-PIB w Gorzowie (144,9 mm) zostały zanotowane tylko dwukrotnie

- 9 czerwca 1990 r. (150,3 mm w Mielęcinie, pow. pyrzycki) oraz 20 lipca 2011 r. (155-161 mm w pow. czarnkowsko-trzcianeckim). Przypadki te związane były z opadami trwającymi przynajmniej kilkanaście godzin. W literaturze odnotowano tylko jeden epizod opadu nawalnego w Polsce nizinnej o wydajności zbliżonej do burzy w rejonie Gorzowa. Mowa tu o popołudniowej ulewie z 6 czerwca 1988 r., jaka wystąpiła na obszarze gminy Dopiewo w powiecie poznańskim. Rdzeń komórki burzowej nie objął zasięgiem oficjalnej stacji opadowej, ale dzięki pośrednim obserwacjom oszacowano, że w ciągu 3 godzin mogło spaść 220-250 mm (Olejnik i in. 1989).

Sumy opadów, jakie wystąpiły 8 września 2022 r. w krótszych niż doba przedziałach czasowych, zbliżały się lub przekraczały rekordy ogólnopolskie. Najwyższa godzinna suma opadów w Wawrowie wyniosła 121 mm i była nieznacznie wyższa niż dotychczasowy rekord 120 mm zanotowany 23 lipca 1914 r. w podnyskich Giełczycach (Chomicz 1951; Prokop 2007). Uzupełnić należy, że w literaturze często podawany jest epizod z podkrakowskiej Sułoszowej, gdzie 18 maja 1996 r. miało spaść ok. 180 mm/godz., przy czym wartość ta nie była zmierzona, a szacowano ją metodami pośrednimi (Prokop 2007). W okresie 2-godzinnym najwyższa suma opadów w Wawrowie wyniosła 199 mm. Tym samym przekroczony został dotychczasowy rekord z 2 sierpnia 1951 r. odnotowany w Komorowie koło Świdnicy, gdzie w ciągu 2 godzin spadło 193,4 mm (Chudy 2002). Najwyższa suma opadów w okresie 3 godzin w Wawrowie wyniosła 218 mm, a wg reanalizy RainGRS Clim szacowana 3-godzinna suma opadów w rejonie Czechowa wyniosła 234 mm. W tym przedziale czasowym za ogólnopolski rekord uchodzi wspomniany wcześniej epizod deszczu nawalnego w podpoznańskiej gminie Dopiewo, suma opadów nie była tu zmierzona, oszacowano ją metodami pośrednimi na 220 mm w ciągu 3 godz. (Olejnik i in. 1989; Chudy 2002; Kotowski i in. 2010).

2- i 3-godzinne sumy opadów zmierzone na amatorskiej stacji w Wawrowie (odpowiednio 199 i 218 mm) oraz szacowane w reanalizie RainGRS Clim przewyższyły wartości wynikające ze wzorów do szacowania krótkotrwałych maksymalnych opadów w Polsce cytowanych m.in. przez Cebulak i in. (1986), Prokopa (2006) oraz Licznara i in. (2020).

W Polsce opady nawalne IV stopnia (B_4) są bardzo rzadkim zjawiskiem. W latach 1858-1941 na obszarze Polski odnotowano tylko dwa takie epizody (Chomicz 1951), a w okresie 1966-1981 stwierdzono dwanaście przypadków deszczów nawalnych IV stopnia (Chudy 2002). Najsilniejsze deszcze nawalne w Polsce sięgały V stopnia (B_5) - do roku 2006 odnotowano tylko sześć takich zdarzeń (Prokop 2007). Najczęściej deszcze nawalne IV i V stopnia trwają kilkadziesiąt minut, rzadko powyżej 75 minut. Na amatorskiej stacji w Wawrowie 8 września 2022 r. deszcz nawalny B_4 trwał aż 180 minut. Okres ten znacznie przekracza próg 137 minut wyznaczony przez Chomicza jako maksymalny czas trwania deszczu nawalnego jednolitego pod względem genetycznym i pochodzącego z chmur burzowych (Cebulak i in. 1986).

Analizując rozwój i przebieg superkomórki burzowej z 8 września 2022 r. na podstawie danych radarowych i systemu RainGRS, można przypuszczać, że wpływ na intensyfikację opadów mogło mieć ukształtowanie terenu. Uskok oddzielający Równinę Gorzowską od Kotliny Gorzowskiej w rejonie Czechowa osiąga wysokość względną do

60 m. Kierunek przemieszczania się ulewy był niemal prostopadły do równoleżnikowego przebiegu krawędzi wysoczyzny. Obszar największej sumy opadów przypadł na strefę krawędziową (rys. 8), zatem z dużą dozą prawdopodobieństwa można założyć, że we wschodniej części Gorzowa i w zachodniej części gminy Santok mogło dojść do wzmocnienia orograficznego komórki konwekcyjnej i zwiększenia wydajności opadów oraz pojawienia się gradu. Podobna sytuacja miała miejsce 11 czerwca 2019 r. podczas przejścia gwałtownej superkomórki burzowej bezpośrednio nad miastem z opadami rekordowo dużego gradu o średnicy do 12 cm. W tym przypadku ukształtowanie terenu w obrębie krawędzi Pradoliny Toruńsko-Eberswaldzkiej prawdopodobnie również przyczyniło się do modyfikacji przepływu powietrza, intensyfikacji prądów wstępujących, co skutkowało nasileniem burzy oraz zjawisk współtowarzyszących (Piasecki i in. 2023).

Niektóre z wymienionych wcześniej przypadków wyjątkowo wysokich dobowych sum opadów na nizinach (np. Nieszawa i epizod z pow. czarnkowsko-trzcianieckiego) miały miejsce również na pograniczu dolin rzecznych (odpowiednio: Wisły i Noteci) i wysoczyzn morenowych oddzielonych kilkudziesięciometrową krawędzią. W literaturze przedmiotu znane jest zjawisko orograficznego wzmocnienia intensywności opadów, dobrze rozpoznane w Karpatach (Cebulak i in. 2018) i Sudetach (Wrona 2008). W badaniach wskazuje się, że na intensyfikację opadów wpływają nie tylko duże łańcuchy górskie, ale i niższe przeszkody terenowe, jak np. zbocza dolin i progi wyżynne (Cebulak i in. 2018) oraz wzgórza Pojezierza Pomorskiego (Lorenc i in. 2012). Epizody ekstremalnych opadów na Niżu Polskim wskazują, że taki wpływ mogą mieć również krawędzie i wzgórza o wysokościach względnych kilkudziesięciu metrów, zwłaszcza w przypadku komórek burzowych o niewielkiej prędkości przemieszczania.

Niezwykłość burzy z 8 września 2022 r. polegała również na jej pojawieniu się poza okresem najczęstszego występowania burz – zarówno w przebiegu rocznym, jak i dobowym. Największa częstość burz w Polsce przypada na okres od maja do sierpnia, z kulminacją w lipcu (Bielec-Bąkowska 2013). Najwięcej odnotowanych dobowych sum opadów o wartości co najmniej 200 mm w Polsce zdarzyło się w lipcu (blisko 60% przypadków), pozostałe występowały od połowy maja do pierwszej dekady września. Deszcz nawalny z okolic Gorzowa był drugim w historii przypadkiem takiego opadu we wrześniu. Z kolei dobową aktywność doziemnych wyładowań atmosferycznych w Polsce osiąga największe wartości od godzin południowych do wieczornych, z maksimum w godz. 14-15 UTC, a najrzadziej są notowane w godz. 3-9 UTC (Taszarek i in. 2015). Niemniej badania nad burzami występującymi nocą w Polsce wskazują, że również o tej porze doby mogą pojawiać się zjawiska o dużej aktywności elektrycznej. Obszary szczególnie uprzywilejowane pod kątem występowania nocnych wyładowań doziemnych obejmują Polskę zachodnią (Poręba i in. 2023).

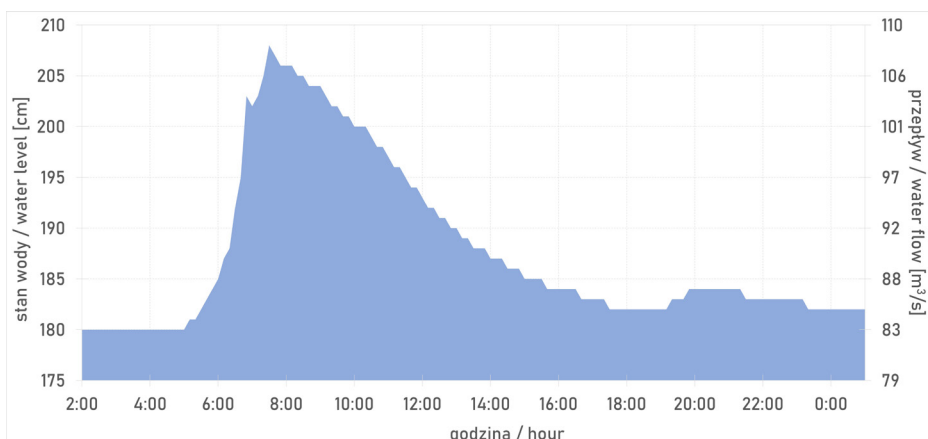
W skali zagrożenia powodziowego w Polsce opady o dobowej sumie 100 mm i więcej są klasyfikowane jako katastrofalne. Tego typu zdarzenia, zwłaszcza jeśli występują w krótkim czasie, stanowią bezpośrednie zagrożenie dla życia człowieka, powodują olbrzymie straty w infrastrukturze, skutki mają charakter klęski żywiołowej (Lorenc i in. 2012). Podobnie było w godzinach porannych 8 września 2022 r. – powódź błyskawiczna

objęła miejscowości Czechów, Górki, Wawrów oraz rejon ulicy Warszawskiej w Gorzowie. Gigantyczne masy wody opadowej spływały wszelkimi obniżeniami z wysoczyzny ku dolinie Warty, niszcząc wiele budynków, upraw rolnych i obiektów infrastruktury. W znajdującym się w centrum Wawrowa stawie poziom wody gwałtownie podniósł się o 2 m zalewając okoliczne domy i ulice. W rejonie ul. Warszawskiej w Gorzowie zalegająca woda utworzyła rozlewiska o głębokości do 2 m. Wójt gminy Santok raportował, że w sołectwie Czechów 90% dróg gminnych uległo zniszczeniu. Na nachylonych powierzchniach objętych opadem nawałnym dochodziło do intensywnego spłukiwania. W strefie krawędziowej wysoczyzny w kilku miejscach uruchomione zostały, nieobserwowane tu wcześniej, osuwiska i zerwy. Wzdłuż suchych dolinek rozcinających krawędź wysoczyzny dochodziło do intensywnej erozji wgłębnej (tzw. erozja wąwozowa),



Rys. 9. Wybrane fotografie autorskie ukazujące zniszczenia w rejonie Gorzowa Wlkp. na skutek nawałnych opadów deszczu oraz zalaną ulicę Warszawską w lewym górnym rogu (źródło: 1 - TVN24, 2-4 - fot. Patryk Matczak, 5-6 - fot. Krzysztof Januszewski).

Fig. 9. Selected author's photographs showing damage in the Gorzow Wlkp. area due to heavy rainfall and flooded Warszawska Street in the top left corner (source: 1 - TVN24, 2-4 - photo by Patryk Matczak, 5-6 - photo by Krzysztof Januszewski).



Rys. 10. Hydrogram Warty – stan wody i natężenie przepływu na stacji hydrologicznej IMGW-PIB w Gorzowie Wlkp. w dniu 8 września 2022 r.

Fig. 10. Hydrogram of the water level and flow of the Warta river at the hydrological station of IMGW-PIB in Gorzow Wlkp. on September 8, 2022.

a u wylotów obniżen powstały stożki napływowe z dużą ilością materiału ziemnego wypłukanego z wyższych partii zbocza. Na obszarach zalewowych Warty zaobserwowano powstanie nowych rozcięć odprowadzających nadmiar wód do rzeki, których głębokość dochodziła do 3 metrów (rys. 9).

W wyniku ulewy na stacji wodowskazowej IMGW-PIB w Gorzowie na Warcie (ok. 5 km poniżej strefy maksymalnych opadów) zarejestrowano niespotykany wzrost poziomu rzeki o 28 cm w ciągu 2,5 godziny. Wystąpił gwałtowny – jak na dolny bieg dużej rzeki nizinnej – wzrost natężenia przepływu o 30% (z $83 \text{ m}^3/\text{s}$ do $108 \text{ m}^3/\text{s}$). Rzeka powróciła do poziomu wyjściowego po 10 godzinach (rys. 10).

Podsumowanie

Deszcz nawalny, który wystąpił w godzinach porannych 8 września 2022 r. w rejonie Gorzowa Wlkp., był efektem gwałtownego rozwoju superkomórki burzowej w warunkach wilgotnej i chwiejnej masy powietrza pochodzenia polarnego morskiego, w obrębie strefy zbieżności, przy względnie niewielkich prędkościach przyziemnych ruchów powietrza. Opisywany epizod opadowo-burzowy charakteryzował się kilkoma cechami świadczącymi o wyjątkowości tego zjawiska:

- brakiem ekstremalnych wartości wskaźników termodynamicznych atmosfery wskazujących na możliwość wystąpienia gwałtownej burzy i deszczu nawalnego;
- wystąpieniem poza rocznym maksimum aktywności burzowej i deszczu nawalnych oraz podczas minimum dobowego przebiegu aktywności burz i ulew;

- wzmocnieniem orograficznym superkomórki burzowej na krawędzi oddzielającej Pojezierze Południowopomorskie i Pradolinę Toruńsko-Eberswaldzką;
- rekordową dobową sumą opadów w Gorzowie Wlkp. w 150-letniej historii pomiarów (144,9 mm wg pomiarów deszczomierzem Hellmanna oraz 130,4 mm wg pomiarów podstawowym deszczomierzem korytkowym);
- najwyższą w historii pomiarów szacowaną dobową sumą opadów na Niziu Polskim (237 mm wg RainGRS Clim);
- pierwszą w historii pomiarów w Polsce dobową sumą opadów przekraczających 200 mm na obszarze poniżej 85 m n.p.m. (wg RainGRS Clim);
- rekordowymi w historii pomiarów w Polsce zmierzonymi sumami opadów w okresie 2 i 3 godzin (odpowiednio 199 i 218 mm, stacja w Wawrowie, dane nieoficjalne);
- wyjątkowo długim czasem występowania deszczu nawalnego B₄ (180 min. w Wawrowie, dane nieoficjalne).

Pojawienie się silnej burzy i deszczu nawalnego 8 września 2022 r. nie było spodziewane, bowiem zarówno prognozy opracowane przez synoptyków, jak i numeryczne modele prognostyczne nie zakładały wystąpienia opadów o ekstremalnym natężeniu.

Jeszcze do niedawna identyfikacja epizodów deszczów nawalnych była dużym wyzwaniem. Na problem zbyt rzadkiej sieci opadowej do wychwytywania lokalnych ulew na obszarze Polski nizinnej zwracali uwagę m.in. Olejnik i in. (1989) oraz Kłysik i Fortuniak (1993). Od początku obecnego stulecia obserwuje się rosnącą gęstość automatycznych stacji meteorologicznych w Polsce, przyspieszył także rozwój metod teledetekcji opadów i szacowania ich wielkości. Deszczomierze automatyczne dostarczają danych z dużą rozdzielczością czasową, z kolei dane radarowe oraz produkty typu RainGRS pozwalają zebrać szczegółowe informacje o przestrzennym rozkładzie opadu. Dzięki temu poprawia się jakość informacji o opadach, a ich dostępność sprawia, że przebieg każdej ulewy można śledzić niemal na bieżąco.

Analiza scenariuszy zmian klimatu w Polsce wskazuje, że do końca XXI w. należy oczekiwać wzrostu liczby dni z sumą opadu co najmniej 20 mm oraz wzrostu wartości maksymalnych dobowych sum opadów (Pińskwar, Choryński 2021). Zakładając realizację tego założenia, należy spodziewać się, że wkrótce w Polsce będą występowały kolejne rekordy sum i natężenia opadów atmosferycznych. Z kolei prognozowany w następnych dekadach wzrost średniej temperatury powietrza może przyczynić się do wydłużenia sezonu występowania silnych burz z opadami nawalnymi.

L i t e r a t u r a

- Basara J.B., Rowell M.D., 2012, Mesoscale observations of an extended heat burst and associated wind storm in Central Oklahoma, *Meteorological Applications*, 19 (1), 91-110, DOI: 10.1002/met.280.
- Bielec-Bąkowska Z., 2013, Burze i grady w Polsce, *Prace Geograficzne*, 132, 99-132, DOI: 10.4467/20833113PG.13.005.1095.

- Bunkers M.J., Klimowski B.A., Zeitler J.W., Thompson R.L., Weisman M.L., 2000, Predicting supercell motion using a new hodograph technique, *Weather and Forecasting*, 15 (1), 61-79, DOI: 10.1175/1520-0434(2000)015<0061:PSMUAN>2.0.CO;2.
- Bunting L., 2022, Determining the impact of evaporative cooling and inversion layer height on heat burst formation in decaying convective storms, doctoral dissertation, Texas Tech University.
- Burza w Gorzowie Wielkopolskim, 2022, blog "Pogoda i Klimat", dostępne online <https://blog.meteomodel.pl/burza-w-gorzowie-wielkopolskim> (10.09.2022).
- Cebulak E., Farat R., Koczorowska R., Niedźwiedź T., Plenzler W., 1986, Deszcze ulewne, [w:] *Atlas Hydrologiczny Polski*, t. II, z. 1, praca zbiorowa pod red. J. Stachy, IMGW, Wyd. Geologiczne, Warszawa, 31-34.
- Cebulak E., Limanówka D., Malota A., Niedbala J., Pyrc R., Starkel L., 2008, Przebieg i skutki ulewy w dorzeczu górnego Sanu w dniu 26 lipca 2005 r., *Materiały Badawcze IMGW. Seria Meteorologia*, 40.
- Cebulak E., Limanówka D., Pyrc R., Gębica P., Starkel L., 2018, Wpływ wybranych barier górskich na rozkład opadów w polskich Karpatach, *Przegląd Geofizyczny*, 63 (1-2), 123-133.
- Chomicz K., 1951, Ulewy i deszcze nawalne w Polsce. *Wiadomości Służby Hydrologicznej i Meteorologicznej*, 2 (3), 177-260.
- Chudy Ł., 2002, Porozmawiajmy o... deszczach nawalnych, *Gazeta Obserwatora IMGW*, 5, 24-25.
- Czernecki B., Taszarek M., Szuster P., 2023, Thunder: Computation and Visualisation of Atmospheric Convective Parameters, <https://bczernecki.github.io/thunder/>.
- Johnson B.C., 1983, The heat burst of 29 May 1976, *Monthly Weather Review*, 111, 1776-1792, DOI: 10.1175/1520-0493(1983)111<1776:THBOM>2.0.CO;2.
- Johnson J.S., 2003, Examination of a long-lived heat burst event in the northern plains, *National Weather Digest*, National Weather Association, 27, 27-34.
- Jurczyk A., Ośródką K., Szturc J., Pasierb M., Kurcz A., 2023, Long-term multi-source precipitation estimation with high resolution (RainGRS Clim), *Atmospheric Measurements Techniques*, 16, 4067-4079, DOI: 10.5194/amt-16-4067-2023.
- Jurczyk A., Szturc J., Otop I., Ośródką K., Struzik P., 2020, Quality-based combination of multi-source precipitation data, *Remote Sensing*, 12, 1709; DOI: 10.3390/rs12111709.
- Kłysik K., Fortuniak K., 1993, Maksymalne opady dobowe w środkowej Polsce, *Przegląd Geograficzny*, 64 (1-2), 97-110.
- Kotowski A., Dancewicz A., Kaźmierczak B., 2010, Czasowo-przestrzenne zróżnicowanie opadów atmosferycznych we Wrocławiu, *Ochrona Środowiska*, 32 (4), 37-46.
- Licznar P., Siekanowicz K., Oktawiec M., Zaleski J., Wilk P., Wereski S., Mikołajewski K., 2020, Maksymalne wysokości i natężenia opadów i ich modele, [w:] *Metodyka opracowania Polskiego Atlasu Natężeń Deszczów (PANDA)*, P. Licznar, J. Zaleski (red.), IMGW-PIB, Warszawa, 55-75.
- Lorenc H., Cebulak E., Głowicki B., Kowalewski M., 2012, Struktura występowania intensywnych opadów deszczu powodujących zagrożenie dla społeczeństwa, środowiska i gospodarki Polski, [w:] *Kłęski żywiołowe a bezpieczeństwo wewnętrzne kraju*, H. Lorenc (red.), IMGW-PIB, Warszawa, 7-32.
- Niedźwiedź T., 1997, Katastrofalny deszcz nawalny w górnej części dorzecza Nidzicy w dniu 15 września 1995 r., *Dokumentacja Geograficzna*, 8, 38-42.

- Olecki Z., 1970, Przebieg i skutki silnej ulewy w dniu 29 maja 1968 r. w Gaiku-Brzezowej, *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, 4, 101-105.
- Olejnik K., Mager P., Pakuła M., 1989, Deszcz nawalny z 6 czerwca 1988 na południowo-zachodnim obrzeżu Poznania, *Gazeta Obserwatora*, 1-6, 8-11.
- Piasecki K., Matczak P., Taszarek M., Czernecki B., Skop F., Sobisiak A., 2023, Giant hail in Poland produced by a supercell merger in extreme instability—A sign of a warming climate?, *Atmospheric Research*, 292, 106843, 1-11, DOI: 10.1016/j.atmosres.2023.106843.
- Pietras B., Pyrc R., 2018, Geneza ekstremalnego opadu burzowego i powodzi błyskawicznej w Bielinach w dniu 26 maja 2018 roku, *Prace Studenckiego Koła Naukowego Geografów Uniwersytetu Przyrodniczego w Krakowie*, 7, 24-37.
- Pińskwar I., Choryński A., 2021, Projections of precipitation changes in Poland, [w:] *Climate Change in Poland – Past, Present, Future*, M. Falarz (red.), Springer Climate, 529-544, DOI: 10.1007/978-3-030-70328-8_22.
- Poręba S., Kiełt Ł., Pietras B., Taszarek M., 2023, Nocturnal thunderstorms in Poland: Environments, synoptic patterns and comparison to diurnal thunderstorms, *Atmospheric Research*, 291 (106816), DOI: 10.1016/j.atmosres.2023.106816.
- Prokop P., 2006, Maksymalne opady oraz czas ich trwania na świecie i w Polsce, *Przegląd Geofizyczny*, 51 (2), 147-160.
- Prokop P., 2007, Maksymalne opady w funkcji czasu trwania obserwowane w Polsce, [w:] *Funkcjonowanie geokosystemów zlewni rzecznych. 4. Procesy ekstremalne w środowisku geograficznym*, A. Kostrzewski, J. Szpikowski (red.), Poznań, Bogucki Wydawnictwo Naukowe, 189-196.
- Rodzik J., Janicki G., Zagórski P., Zgłobicki W., 1998, Deszcze nawalne na Wyżynie Lubelskiej i ich wpływ na rzeźbę obszarów lessowych. Geomorfologiczny i sedymentologiczny zapis lokalnych ulew, *Dokumentacja Geograficzna*, 11, 45-68.
- Schlatter T., 1995, Weather queries: anatomy of a heat burst, *Weatherwise*, 48 (4), 42-43, DOI: 10.1080/00431672.1995.9933574.
- Solon J., Borzyszkowski J., Bidłasik M., Richling A., Badora K., Balon J., Brzezińska-Wójcik T., Chabudziński Ł., Dobrowolski R., Grzegorzczak I., Jodłowski M., Kistowski M., Kot R., Krąż P., Lechnio J., Macias A., Majchrowska A., Malinowska E., Migoń P., Myga-Piątek U., Nita J., Papińska E., Rodzik J., Strzyż M., Terpilowski S., Ziaja W., 2018, Physicogeographical mesoregions of Poland: Verification and adjustment of boundaries on the basis of contemporary spatial data, *Geographia Polonica*, 91 (2), 143-170, DOI: 10.7163/GPol.0115.
- Stach A., 2009, Analiza struktury przestrzennej i czasoprzestrzennej maksymalnych opadów dobowych w Polsce w latach 1956-1980, *Seria Geografia*, 85, Wyd. Naukowe UAM, Poznań.
- Starkel L. (red.), 1997, Rola gwałtownych ulew w ewolucji rzeźby Wyżyny Miechowskiej (na przykładzie ulewy w dniu 15 września 1995 roku), *Dokumentacja Geograficzna*, 8.
- Taszarek M., Czernecki B., Koziół A., 2015, A cloud-to-ground lightning climatology for Poland, *Monthly Weather Review*, 143, 4285-4304, DOI: 10.1175/MWR-D-15-0206.1.
- Taszarek M., Czernecki B., Szuster P., 2023, ThundeR – a rawinsonde package for processing convective parameters and visualizing atmospheric profiles, [w:] 11th European Conference on Severe Storms, Bucharest, Romania, DOI: 10.5194/ecss2023-28.

- Trobec J., 2008, Heat burst detection by a temporally fine-scale mesonet, *NWA Electronic Journal of Operational Meteorology*, 2008, EJ1.
- Wrona B., 2008, Meteorologiczne i morfologiczne uwarunkowania ekstremalnych opadów atmosferycznych w dorzeczu górnej i środkowej Odry, *Materiały Badawcze IMGW. Seria Meteorologia*, 41.

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

W artykule opisano przypadek deszczu nawalnego związanego z długotrwałą, quasi-stacjonarną superkomórką burzową, która wystąpiła nad ranem 8 września 2022 r. w rejonie Gorzowa Wielkopolskiego. Warunki atmosferyczne charakteryzowały się wówczas sporą niestabilnością atmosfery oraz dużą zawartością wilgoci w powietrzu, a także niewielkim przepływem powietrza. Istotne dane minutowe ukazały rzadki przypadek związany z gwałtownymi napływami cieplejszego powietrza podczas trwania burzy o symptomach zbliżonych do tzw. zjawiska heat burst. Przy opadzie trwającym niespełna 3,5 godz. sumy opadów osiągnęły od 144,9 mm w Gorzowie (stacja IMGW-PIB) do 218 mm w Wawrowie (dane nieoficjalne). Najwyższa dobową sumą opadów oszacowaną przy pomocy reanalizy RainGRS Clim wystąpiła w rejonie Czechowa i wyniosła 237 mm. Zarejestrowane sumy i natężenie opadów były jednymi z największych w historii pomiarów jakie odnotowano na obszarze Polski nizinnej. Rozwój superkomórki burzowej przypadł na wczesne godziny poranne, czyli poza okresem typowego występowania burz w przebiegu dobowym. Na intensyfikację rozwoju burzy wpływ mogło mieć wzmocnienie orograficzne w obrębie krawędzi między wysoczyzną i doliną rzeki Warty. Wystąpienie deszczu nawalnego spowodowało powódź błyskawiczną i olbrzymie zniszczenia w lokalnej infrastrukturze, zwłaszcza w sołectwach Czechów i Wawrów.

Słowa kluczowe: deszcz nawalny, opady atmosferyczne, burza, powódź błyskawiczna, RainGRS, Gorzów Wielkopolski.

S u m m a r y

A heavy rainfall episode associated with a long-lived, quasi-stationary supercell thunderstorm occurred in the Gorzów Wielkopolski area (western Poland) on September 8, 2022. The atmospheric environment was saturated with moisture and instability with relatively weak air flow. Precise synoptic 1-minute data showed a very rare event associated with sudden advection of warm air during a thunderstorm, closely resembling the heat burst phenomenon. The highest rainfall amounts were recorded in Gorzów Wielkopolski (144.9 mm) and Wawrów (218 mm, unofficial data). Based on the RainGRS Clim reanalysis, a maximum of daily total precipitation was estimated at 237 mm in Czechów village. It was one of the most extreme precipitation events in the Polish lowlands. The supercell thunderstorm developed unusually in the early morning hours, outside of the period of maximum thunderstorm activity. It is possible that the edge between the Gorzow highlands and the Warta river valley favoured orographically forced convective precipitation. As a consequence of this

unprecedented event, flash floods and destruction of local technical infrastructure were observed, particularly in Czechów and Wawrów villages.

Keywords: heavy rainfall, precipitation, thunderstorm, flash flood, RainGRS, Gorzów Wielkopolski.