



## Warunki synoptyczne sprzyjające rozwojowi burz nocnych w Polsce

### *Synoptic conditions favouring the development of nocturnal thunderstorms in Poland*

Szymon Poręba<sup>1,2</sup>  Bartłomiej Pietras<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Podleśna 61, 01-673 Warszawa

<sup>2</sup>Uniwersytet Jagielloński w Krakowie, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej  
ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków

<sup>3</sup>Uniwersytet Pedagogiczny w Krakowie, Instytut Geografii  
ul. Podchorążych 2, 30-084 Kraków

szymon.poreba@doctoral.uj.edu.pl • bartlomiej.pietras@up.krakow.pl

**Zarys treści.** W badaniach przedstawiono tematykę występowania nocnych burz w Polsce, w tym próbę określenia korzystnych warunków synoptycznych i wskaźników termodynamicznych determinujących ich rozwój i aktywność. Burze jako gwałtowne zjawiska atmosferyczne wiążą się z szeregiem groźnych zjawisk, m.in. intensywnymi opadami deszczu, opadami gradu czy też silnymi porywami wiatru, jednak w opracowaniu jako wyznacznik aktywności burz przyjęto ich aktywność elektryczną. Opracowanie ma na celu określenie sytuacji synoptycznych sprzyjających burzom nocnym, wyodrębnienie dominujących struktur burzowych oraz poznanie najskuteczniejszych wskaźników konwekcji w prognozowaniu burz nocnych. Cel zrealizowano na podstawie analizy doziemnych wyładowań atmosferycznych występujących w Polsce w latach 2002-2018, o których dane uzyskano z systemu PERUN. Parametry atmosfery i wskaźniki konwekcji opracowane zostały na podstawie reanalizy ERA5. Ponadto dla wyszczególnionych burz przeprowadzono analizę synoptyczną oraz dodatkowo została określona ich dominująca struktura. W opracowaniu przeanalizowanych zostało ponad 1,5 mln wyładowań doziemnych. Przeprowadzone badania wykazały, że głównymi sytuacjami synoptycznymi umożliwiającymi rozwój burz nocnych są przede wszystkim: front pofalowany, front chłodny, zbieżność wiatru dolnego – tj. sytuacje wyróżniające się na ogół dobrą organizacją konwekcji. Dodatkowym czynnikiem, który we wszystkich przypadkach wspomagał rozwój i aktywność burz nocnych, była obecność prądu strumieniowego w górnej troposferze.

**Słowa kluczowe:** burze nocne, wskaźniki konwekcji, warunki termodynamiczne, Polska.

**Keywords:** nocturnal thunderstorms, convection indices, thermodynamic conditions, Poland.

## Wstęp

Burze nocne stanowią jedno z większych wyzwań prognostycznych w meteorologii synoptycznej. Wynika to ze specyficznych warunków termodynamicznych oraz mechanizmów determinujących rozwój głębokiej konwekcji w porze nocnej. Inicjacja burz w nocy związana jest z procesami mezoskalowymi powodującymi wznoszenie się powietrza. Rozwój aktywnych burz w porze nocnej wspomagany jest zwłaszcza przez adwekcję ciepłego i wilgotnego powietrza powyżej stabilnej warstwy granicznej, dolnotroposferycz-

ny prąd strumieniowy (ang. *Low Level Jet* – LLJ), fronty atmosferyczne, wypływ chłodu (ang. *outflow boundary*), ruchy falowe w obrębie warstwy granicznej (ang. *undular bore*), a także oddziaływanie rzeźby terenu (Markowski i Richardson, 2010; Geerts et al., 2017).

Problematyka występowania burz w Polsce, głównie ich zależności od cyrkulacji atmosferycznej, podejmowana była w licznych publikacjach: Stopa-Boryczka (1962), Bielec-Bąkowska (2002), Kolendowicz (2006, 2012), Ustrnul i Czekierda (2009), Twardosz et al. (2010), Grabowska (2011). Badania te w dużej mierze opierały się na analizie rozkładu przestrzennego oraz częstości występowania burz, bazując na danych ze stacji synoptycznych. Odminną metodykę badań zastosowali Taszarek et al. (2015), przedstawiając analizę wyładowań doziemnych na obszarze Polski na podstawie danych z sieci detekcji wyładowań atmosferycznych PERUN. Z pracy wynika, że średnio rocznie występuje 151 dni burzowych, uwzględniając całą powierzchnię Polski. Badaniami rozkładu przestrzennego i wielkości wskaźników konwekcji zajmowali się Bąkowski (2005), Bąkowski i Bielec-Bąkowska (2005), Siedlecki i Rzepa (2008), Malinowska (2011) oraz Waławender et al. (2015), dochodząc do wniosku, że największe wartości wskaźników chwiejności termodynamicznej dobrze pokrywają się z największą częstością burz. Pomimo szczegółowych analiz w wyżej wymienionych badaniach, tematyka burz nocnych nie została jak do tej pory kompleksowo opracowana dla obszaru Polski.

Zagadnienia związane z uwarunkowaniami rozwoju głębokiej konwekcji i aktywności burz nocnych były tematem licznych publikacji w literaturze zagranicznej. Szczegółowe analizy kinematycznych oraz termodynamicznych warunków rozwoju mezoskalowych kompleksów konwekcyjnych (MCS) stanowiących najwyraźniejszy przejaw aktywności burz nocnych na obszarze Wielkich Równin przeprowadzili m.in. Maddox (1983), Augustine i Caracena (1994), Moore et al. (2003), Marsham et al. (2011). Badania wykazały, że gwałtowne burze nocne występują w sytuacjach z chwiejnością atmosferyczną obecną w wyższych warstwach troposfery, w czasie silnej adwekcji ciepłego i wilgotnego powietrza oraz z udziałem znacznego ścinania wiatru i jego skrętności związanej z tzw. dolnotroposferycznym prądem strumieniowym (*Low Level Jet*). Dolnotroposferyczny prąd strumieniowy wpływa na lepszą organizację strukturalną konwekcji, zwiększa ścinanie wiatru i zapewnia długotrwałą i znaczny dopływ wilgotnego powietrza do układów burzowych (Trier et al., 2006; Parish, 2016; Gebauer et al., 2018). Nocna inicjacja konwekcji, która została szczegółowo zbadana w projekcie terenowym PECAN na obszarze Wielkich Równin (Geerts et al., 2017) często związana jest m.in. z falami grawitacyjnymi w obrębie stabilnej warstwy mieszania (ang. *undular bore*) (Mueller et al., 2017; Loveless et al., 2019). W szczególnych przypadkach dalsza inicjacja konwekcji w nocy jest możliwa z powierzchni czynnej podczas występowania silnych porywów wiatru związanych z burzą (Grasmick et al., 2018; Parker et al., 2019). Burze nocne są w USA silnie rozwijającym się tematem badawczym, a badania skupiają się nie tylko na uwarunkowaniach inicjacji konwekcji nocnej, a także na próbie określenia dominującej struktury burz nocnych (Reif i Bluestein, 2017, 2018).

Prognozowanie burz nocnych, podobnie jak w przypadku burz dziennych, opiera się głównie na metodzie składnikowej (Doswell et al., 1996), a jednym z najczęściej stosowanych wskaźników konwekcyjnych jest MUCAPE (ang. *Most Unstable Convective Available Potential Energy*) (Rochette et al., 1999).

Pomimo stosunkowo dobrego rozpoznania problematyki burz nocnych na obszarze Stanów Zjednoczonych Ameryki oraz dość uniwersalnej metody ich prognozowania, zagad-

nienie nie zostało jak do tej pory zbadane w Europie Środkowej, co wiąże się ze znacznie trudniejszym ich prognozowaniem. W Polsce ze względu na odmienne lokalne uwarunkowania cyrkulacyjne i fizycznogeograficzne, rozwój burz nocnych w dużej mierze cechuje się inną skalą i dynamiką. Opracowanie ma na celu określenie sytuacji synoptycznych sprzyjających burzom nocnym, wyodrębnienie dominujących struktur burzowych oraz wydzielenie najskuteczniejszych wskaźników konwekcji w prognozowaniu burz nocnych.

## **Materiały i metody**

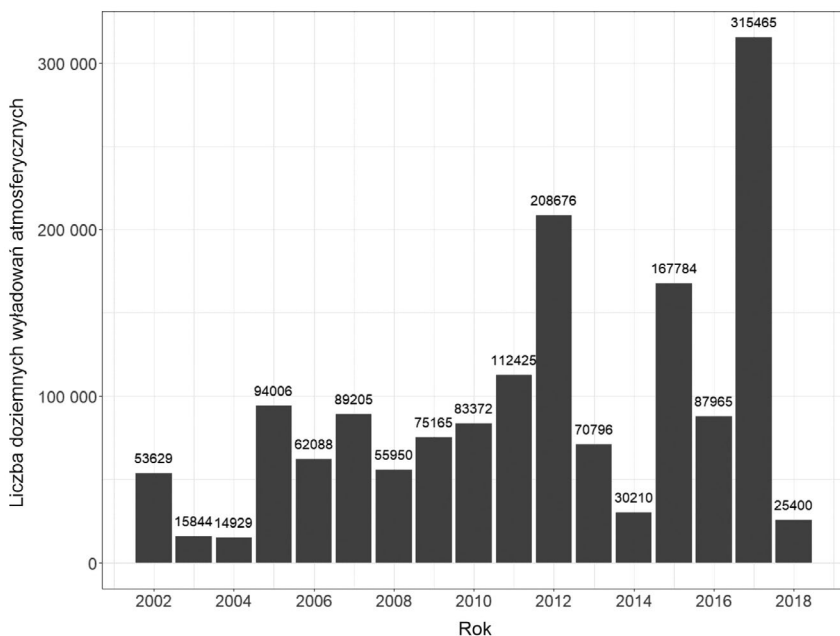
Analizę występowania i aktywności burz nocnych w Polsce przeprowadzono na podstawie danych o doziemnych wyładowaniach atmosferycznych na obszarze kraju w latach 2002-2018 z systemu PERUN. Jako kryterium godzin nocnych przyjęto dziesięciogodzinny przedział od 20:00 UTC do 5:00 UTC. Takie dostosowanie przedziału godzin nocnych pozwoliło uniknąć niejednorodności czasu trwania nocy w obrębie domeny wynikającej ze zróżnicowania kąta padania promieni słonecznych. Co prawda, szczególnie w miesiącach letnich powyższy zakres godzin obejmuje już godziny poranne po wschodzie słońca, jednak ogólny bilans energetyczny powierzchni czynnej związany z ogrzewaniem na skutek insolacji ma wciąż ujemną wartość (Kozuchowski, 2020). Inicjacja lub kontynuacja procesów wznoszących powietrze nie występuje o tak wczesnej porze na skutek tzw. termiki wypracowanej, lecz jest wypadkową warunków rozwoju burz panujących w porze nocnej (Wilson i Roberts, 2006).

Analizowano łącznie 302 noce, w których liczba wyładowań doziemnych osiągnęła lub przekroczyła wartość trzeciego kwartyla ogółu wyładowań nocnych tj. 115. W kolejnym etapie, dla wyodrębnionych nocy burzowych przeprowadzono ekspercką, szczegółową analizę synoptyczną, w której wyszczególniono: front chłodny, front chłodny wraz ze zbieżnością wiatru, front ciepły, okluzję, front pofalowany, zbieżność wiatru oraz brak frontu. Dodatkowo określona została dominująca struktura burz nocnych. Uwzględniono następujące struktury burz: klastry wielokomórkowe, wielokomórkowe układy liniowe, burze izolowane (Smith et al., 2012). Burze superkomórkowe nie zostały wydzielone z uwagi na ich złożoność i trudność identyfikacji zwłaszcza w przypadku ograniczonego zasięgu danych radarowych. W celu uzyskania najdokładniejszego odwzorowania parametrów atmosfery w czasie i miejscu burz nocnych, zastosowano reanalizę meteorologiczną konsorcjum ECMWF – ERA5, której rozdzielczość przestrzenna wynosi  $0,25^\circ$  na  $0,25^\circ$  szerokości i długości siatki geograficznej, a krok czasowy – jedną godzinę. Zasięg przestrzenny węzłów obliczeniowych reanalizy został dostosowany do granic administracyjnych Polski. Parametry stanu atmosfery oraz obliczenia wskaźników konwekcji bazowały na poziomach ciśnieniowych reanalizy ERA5 (975-750 hPa co 25 hPa oraz 750-200 hPa co 50 hPa) oraz na powierzchni ziemi. Dla każdej godziny dopasowano wyładowania atmosferyczne przeprowadzając tzw. gridowanie danych do identycznej siatki geograficznej jak reanaliza ERA5. W opracowaniu przeanalizowanych zostało ponad 1,5 mln doziemnych wyładowań atmosferycznych.

## Wyniki

W badanym okresie, nocą, wystąpiło 1 586 691 doziemnych wyładowań atmosferycznych, z czego jesienią 7160, zimą 1022, wiosną 15 600 i latem 1 562 909. Wyładowania nocne występujące w lecie stanowiły 98,5% wszystkich analizowanych nocnych doziemnych wyładowań atmosferycznych. Każdego lata liczba nocnych doziemnych wyładowań atmosferycznych była silnie zróżnicowana. Najwięcej wyładowań zanotowano w roku 2017 – ponad 315 tys., a najmniej w roku 2004 – około 15 tys. (ryc. 1). Znaczne różnice (przekraczające wielkość jednego odchylenia standardowego) w liczbie wyładowań atmosferycznych w nocy z roku na rok są dowodem na to, jak dynamicznym zjawiskiem są burze. Ich występowanie jest uzależnione od wielu czynników, a nocna inicjacja konwekcji i aktywność jest szczególnie złożona. W badanym okresie najwięcej nocy burzowych (tab. 1) wiązało się z frontem pofalowanym (77) i chłodnym (67), najmniej natomiast z frontem okluzji (18). Front pofalowany i front chłodny były przyczyną burz w niemal połowie analizowanych nocy burzowych. Aktywność burz rozumiana jako mediana liczby doziemnych wyładowań atmosferycznych była największa w przypadku frontu chłodnego wraz ze zbieżnością wiatru (6642) oraz frontu pofalowanego (3327).

Jednym z czynników wpływających na rozwój burz nocnych jest obecność prądu strumieniowego. W niemal każdej analizowanej dolnej sytuacji barycznej zaobserwowano większą liczbę doziemnych wyładowań atmosferycznych w przypadku oddziaływania prądu strumieniowego (ryc. 2), a różnice pomiędzy medianami wyróżnionych przypadków



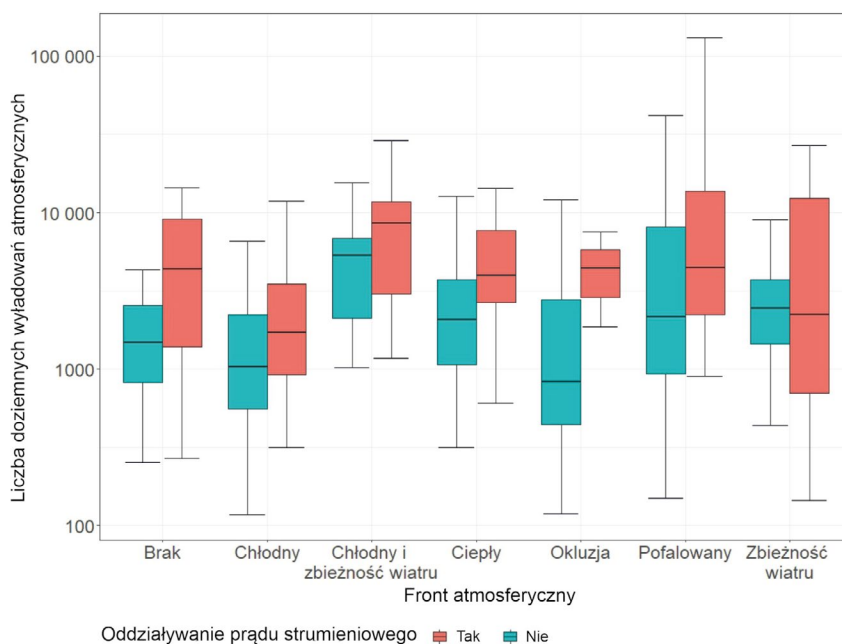
**Ryc. 1.** Zmienność rocznej liczby doziemnych wyładowań atmosferycznych występujących na terytorium Polski w latach 2002-2018

*Variability of annual totals for cloud-to-ground lightning flashes in Poland, 2002-2018*

Opracowanie własne na podstawie danych z systemu PERUN dla lat 2002-2018.

**Tabela 1.** Liczba nocy burzowych oraz mediana liczby doziemnych wyładowań atmosferycznych w poszczególnych sytuacjach synoptycznych w Polsce w latach 2002-2018  
*Number of nights with thunderstorms and median number of cloud-to-ground lightning flashes in selected synoptic situations in Poland, 2002-2018*

Cecha	Front pofalowany	Front chłodny	Zbieżność wiatru	Front ciepły	Front chłodny i zbieżność wiatru	Brak frontu	Front okluzji
Liczba nocy burzowych	77 (26%)	67 (22%)	43 (14%)	36 (12%)	25 (8%)	22 (7%)	18 (6%)
Mediana doziemnych wyładowań atmosferycznych	3327	1345	2241	2672	6642	1692	1370



**Ryc. 2.** Oddziaływanie prądu strumieniowego na liczbę nocnych doziemnych wyładowań atmosferycznych w zależności od rodzaju frontu atmosferycznego

*Influence of the jet stream on numbers of nocturnal cloud-to-ground lightning flashes as related to types of atmospheric front*

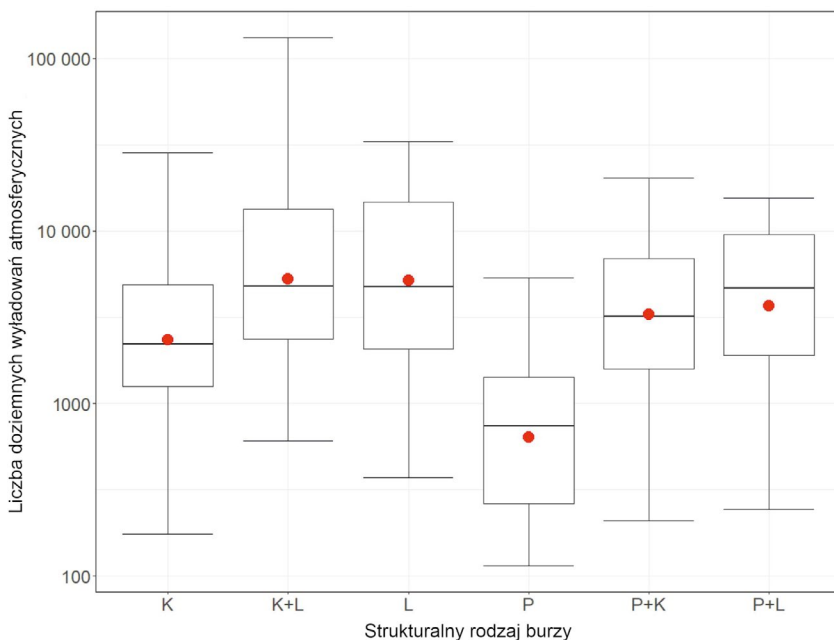
Opracowanie własne na podstawie danych z systemu PERUN dla lat 2002-2018.

osiągała nawet kilka tysięcy. Większa liczba wyładowań atmosferycznych wynika z faktu, iż prąd strumieniowy wydłuża żywotność poszczególnych komórek oraz wpływa na lepszą organizację konwekcji, czego efektem jest powstawanie burz o strukturach wielokomórkowych. Wpływ prądu strumieniowego na liczbę doziemnych wyładowań atmosferycznych był szczególnie widoczny w przypadkach burz związanych z frontem okluzji, niezwiązanych z frontem oraz w sytuacji frontu chłodnego wraz ze zbieżnością wiatru. W tych przypadkach różnica pomiędzy poszczególnymi medianami osiągała ponad 5000 wyładowań. Mediana liczby wyładowań doziemnych była nieco wyższa w przypadku braku oddziaływania prądu strumieniowego jedynie w sytuacji zbieżności wiatru dolnego. Najwyższe wartości

kwartyla trzeciego oraz percentyla 90, zarówno w sytuacji oddziaływania, jak i braku oddziaływania prądu strumieniowego, występowały w przypadku frontu pofalowanego.

Struktury burzowe, z którymi związana była największa liczba doziemnych wyładowań atmosferycznych w nocy, to przede wszystkim wielokomórkowe układy liniowe występujące wraz z klastrami wielokomórkowymi oraz wielokomórkowe układy liniowe (ryc. 3). W tych przypadkach średnia i mediana wynosiły około 5000 wyładowań. W przypadku tych struktur można wyróżnić noce, podczas których liczba wyładowań doziemnych nad obszarem Polski przekraczała 100 tysięcy. Najmniej wyładowań atmosferycznych występowało natomiast w przypadku burz izolowanych, osiągając średnio 740. Samodzielnie występujące klastry wielokomórkowe cechowały się mniejszą średnią liczbą wyładowań atmosferycznych niż w sytuacji ich połączenia z burzami izolowanymi.

Analizując parametry atmosfery w czasie burz nocnych posłużono się reanalizą ERA5. Część wyników odnosi się do liczby przypadków, co oznacza liczbę gridów ERA5 z przynajmniej jednym doziemnym wyładowaniem atmosferycznym. W pierwszej kolejności badano wpływ średniego stosunku zmieszania w dolnych 500 m troposfery (informującego o ilości pary wodnej w tej warstwie) oraz średniego pionowego gradientu termicznego w warstwie 800–600 hPa, na liczbę doziemnych wyładowań atmosferycznych występujących w nocy. W czasie burz nocnych stosunek zmieszania mieścił się na ogół w przedziale od 7,5 g/kg

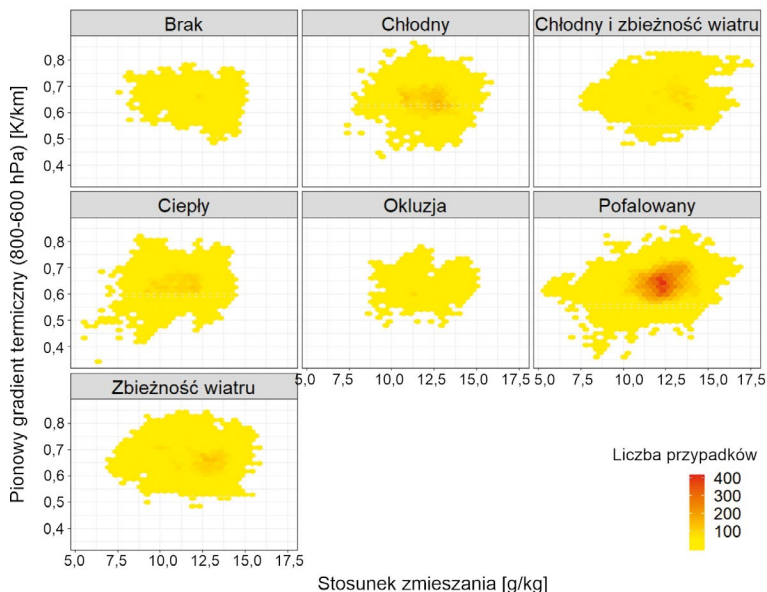


**Ryc. 3.** Liczba nocnych doziemnych wyładowań atmosferycznych w zależności od strukturalnego rodzaju burzy. Oznaczenia struktur burz: K – klastry wielokomórkowe, K+L – klastry wielokomórkowe i wielokomórkowe układy liniowe, L – wielokomórkowe układy liniowe, P – komórki izolowane, P+K – komórki izolowane i klastry wielokomórkowe, P+L – komórki izolowane i wielokomórkowe układy liniowe. Czerwona kropka oznacza wartość średnią.

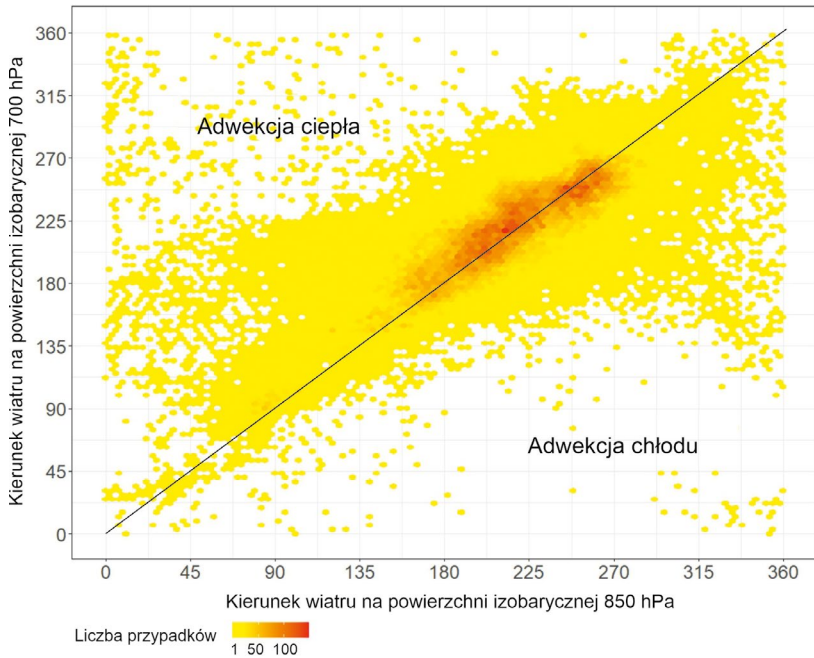
*Number of nocturnal cloud-to-ground lightning flashes in relation to thunderstorm type*  
Opracowanie własne na podstawie danych z systemu PERUN dla lat 2002–2018.

do 15 g/kg, a najwięcej przypadków występowało w przedziale 10 g/kg do 14 g/kg. Natomiast pionowy gradient termiczny kształtował się na ogół od 0,4 K/100 m do 0,8 K/100 m, a najwięcej przypadków występowało w przedziale 0,6-0,7 K/100 m (ryc. 4). Największa liczba przypadków w sytuacji frontu pofalowanego (sytuacji synoptycznej z największą częstością burz nocnych) związana była zazwyczaj ze stosunkiem zmieszania na poziomie około 12,5 g/kg oraz pionowym gradientem termicznym osiągającym 0,6-0,7 K/100 m. W sytuacji frontu ciepłego zaobserwowano większą liczbę przypadków w warunkach z mniejszym stosunkiem zmieszania niż w innych sytuacjach synoptycznych. Stosunkowo wysokie wartości pionowego gradientu termicznego – powyżej 0,6-0,7 K/100 m były charakterystyczne dla frontu chłodnego wraz ze zbieżnością wiatru dolnego oraz w przypadku samej zbieżności wiatru.

Na podstawie literatury (Grant, 1995) stwierdzono, że niejednokrotnie inicjacja nocnej konwekcji związana jest z adwekcją ciepła w dolnej troposferze. Jednym ze sposobów określenia rodzaju adwekcji jest wykorzystanie reguły wiatru termicznego – adwekcja ciepła wiąże się ze skretem wiatru w prawo wraz z wysokością. W prowadzonych badaniach zastosowano powyższą metodę dla poziomów 850 hPa i 700 hPa. Badania ukazują, że również w Polsce burze nocne występują częściej w czasie adwekcji ciepła (ryc. 5). Rozkład różnicy kierunku wiatru pomiędzy powierzchniami 700 hPa a 850 hPa cechował się skośnością wynoszącą -0,64, co świadczy o znacznym pochyleniu rozkładu w stronę adwekcji ciepła. Dodatkowo określono, że w większości przypadków burze nocne występowały w przypadku adwekcji powietrza z zachodu i południowego zachodu.



**Ryc. 4.** Liczba przypadków (gridów ERA5) burz nocnych w zależności od pionowego gradientu termicznego pomiędzy powierzchniami izobarycznymi 800-600 hPa oraz stosunku zmieszania. Obliczenia na podstawie reanalizy ERA5 jedynie dla gridów związanych z nocnymi doziemnymi wyładowaniami atmosferycznymi *Number of cases of nocturnal thunderstorm (ERA5 grids) in relation to temperature lapse rate between 800 and 600 hPa and mixing ratio. Calculations based on ERA5 reanalysis confined to grid squares associated with nocturnal cloud-to-ground lightning flashes*

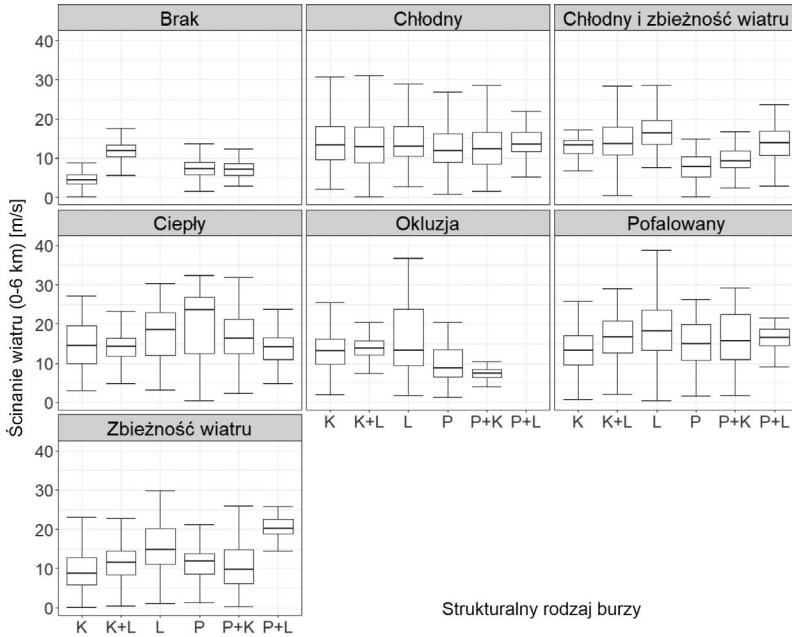


**Ryc. 5.** Liczba przypadków (gridów ERA5) burz nocnych w zależności od kierunku wiatru na powierzchni izobarycznej 850 hPa i 700 hPa z wydzieleniem adwekcji ciepła i chłodu. Obliczenia na podstawie reanalizy ERA5 jedynie dla gridów związanych z nocnymi doziemnymi wyładowaniami atmosferycznymi  
*Number of cases of nocturnal thunderstorm (ERA5 grids) in relation to wind direction at 850 hPa and 700 hPa and with a distinction drawn between warm and cold advection. Calculations based on ERA5 reanalysis confined to for grid squares associated with nocturnal cloud-to-ground lightning discharges.*

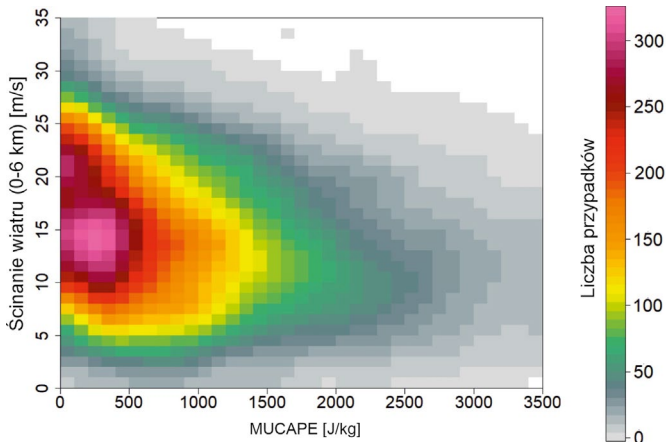
Strukturalny rodzaj burzy zwykle związany jest z wielkością ścinania wiatru i chwiejnością termodynamiczną, co istotnie wpływa na intensywność burz (Brooks et al., 2003; Thompson et al., 2007). Burze nocne występujące w badanym okresie cechowały się na ogół wartościami ścinania wiatru w przedziale 5-15 m/s w warstwie 0-6 km (ryc. 6). Burze wielokomórkowe o charakterze liniowym cechowały się największymi wartościami ścinania wiatru (mediana 15-20 m/s) niemal we wszystkich analizowanych rodzajach sytuacji synoptycznych, osiągając szczególnie wysokie wartości w sytuacji frontu pofalowanego oraz zbieżności wiatru. Burze związane z frontem ciepłym wiązały się z równie wysokimi wartościami ścinania wiatru, a w przypadku burz izolowanych na froncie ciepłym ścinanie wiatru przekraczało 25 m/s, stanowiąc najwyższą wartość mediany dla analizowanych struktur i sytuacji synoptycznych. Zaobserwowano prawidłowość wzrostu wartości ścinania wiatru wraz z większym stopniem organizacji strukturalnej burz.

Stopień organizacji burz oraz ich gwałtowność jest szczególnie uzależniona od chwiejności termodynamicznej (MUCAPE) i ścinania wiatru (DLS). W analizowanym okresie najwięcej burz wystąpiło w warunkach z MUCAPE na ogół poniżej 500 J/kg oraz DLS w przedziale 10-17 m/s (ryc. 7). Występowanie burz nocnych w niskich wartościach chwiejności termodynamicznej wiązało się z wysokimi wartościami ścinania wiatru oraz odwrotnie, w sytuacji znacznej chwiejności termodynamicznej wartości ścinania wiatru były niższe. Oznacza to występowanie istotnej dla konwekcji nocnej zależności pomiędzy





**Ryc. 6.** Wielkość ścinania wiatru (0-6 km) w zależności od strukturalnego rodzaju burzy. Obliczenia na podstawie reanalizy ERA5 jedynie dla gridów związanych z nocnymi doziemnymi wyładowaniami atmosferycznymi. Oznaczenia struktur burz: K – klastry wielokomórkowe, K+L – klastry wielokomórkowe i wielokomórkowe układy liniowe, L – wielokomórkowe układy liniowe, P – komórki izolowane, P+K – komórki izolowane i klastry wielokomórkowe, P+L – komórki izolowane i wielokomórkowe układy liniowe  
*Wind shear (0-6 km) in relation to thunderstorm type. Calculations based on ERA5 reanalysis confined to grid squares associated with nocturnal cloud-to-ground lightning flashes*



**Ryc. 7.** Występowanie burz nocnych (gridów ERA5) w zależności od MUCAPE oraz ścinania wiatru (0-6 km). Obliczenia na podstawie reanalizy ERA5 jedynie dla gridów związanych z nocnymi doziemnymi wyładowaniami atmosferycznymi  
*Occurrence of nocturnal thunderstorms (ERA5 grids) as a function of MUCAPE and wind shear (0-6 km). Calculations based on ERA5 reanalysis confined to grid squares associated with nocturnal cloud-to-ground lightning discharges*

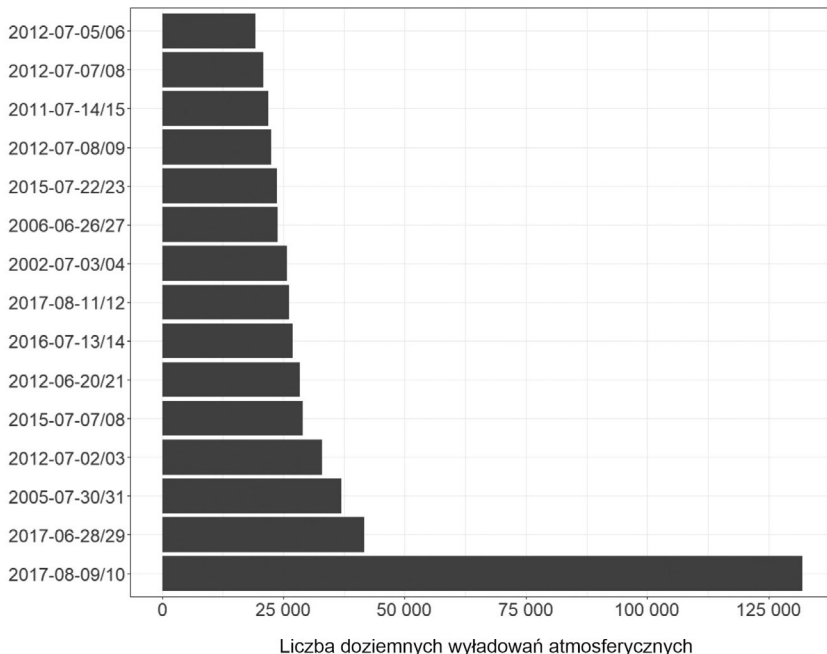
chwiejnością termodynamiczną i ścinaniem wiatru, która jest dobrze odzwierciedlana przez wskaźnik WMAXSHEAR, który łączy obydwie zmienne.

### Burza w nocy 09/10 sierpnia 2017

W badanym okresie występowały burze nocne o znacznej aktywności elektrycznej, lecz szczególnie intensywna burza wystąpiła w nocy 9/10.08.2017. Burza ta wiązała się z rekordową liczbą wyładowań również w porównaniu do burz dziennych (obliczenia własne na podstawie danych z systemu PERUN). Analiza burzowych nocy o sumie doziemnych wyładowań atmosferycznych powyżej 95 percentyla ukazuje znaczną różnicę między wspomnianą burzą a burzami w innych terminach (ryc. 8). W nocy 9/10.08.2017 wystąpiło łącznie ponad 131 tys. wyładowań atmosferycznych (dla obszaru całego kraju), podczas gdy w nocy z drugą w kolejności najwyższą liczbą doziemnych wyładowań atmosferycznych – zaledwie 41 tys. Te statystyki pozwalają zakwalifikować tę burzę do burz ekstremalnych.

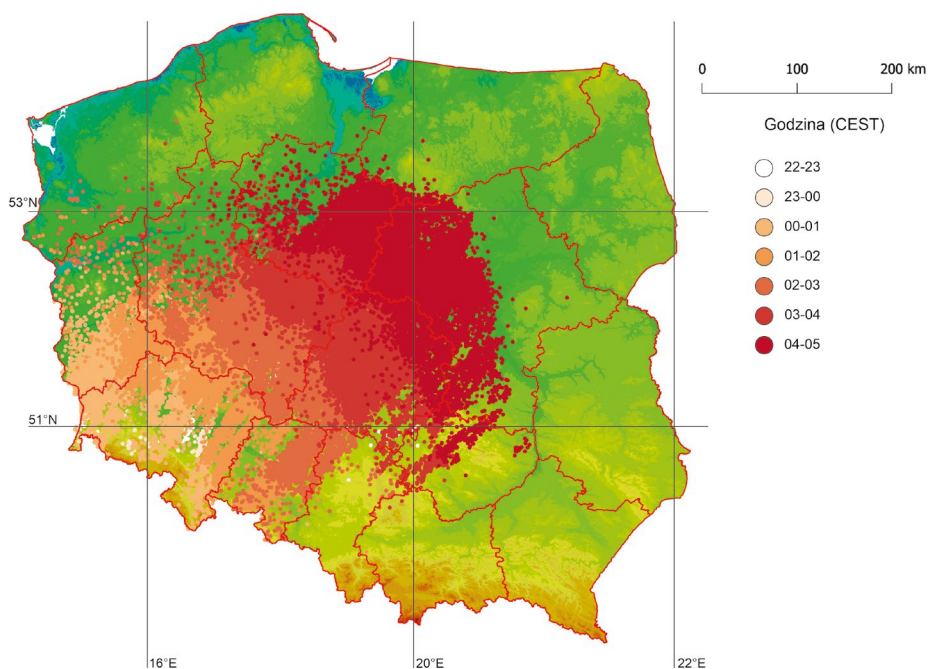
Burza utworzyła się około 22:00 w Sudetach szybko zwiększając stopień organizacji, przemieszczając się przez Wielkopolskę, województwo łódzkie oraz Mazowsze aż po Podlasie. Przed południem burza przemieściła się nad terytorium Litwy i Białorusi.

Tej nocy według mapy synoptycznej Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW) z terminu 00:00 UTC Polska znajdowała się pomiędzy wyżem znad zachodniej Rosji a niżem z ośrodkiem nad południowo-zachodnią Skandynawią. Przez obszar kraju



**Ryc. 8.** Noce z liczbą doziemnych wyładowań atmosferycznych przekraczającą percentyl 95 w latach 2002-2018  
*Nights with cloud-to-ground lightning flashes exceeding the 95<sup>th</sup> percentile for 2002-2018*  
 Opracowanie własne na podstawie danych z systemu PERUN dla lat 2002-2018.

przebiegała strefa pofalowanego frontu atmosferycznego, rozciągającego się od Warmii przez Kujawy i Wielkopolskę po Dolny Śląsk (ryc. 9). Taki rozkład pola ciśnienia atmosferycznego warunkował napływ nad przeważającą część kraju gorącej i wilgotnej masy powietrza pochodzenia zwrotnikowego, jedynie na krańcach północno-zachodnich zalegało powietrze polarne morskie. Inicjację i dalszy dynamiczny rozwój konwekcji w napływającej z południa chwiejnej, zwrotnikowej masie powietrza wspomagała obecność pofalowanego frontu atmosferycznego oraz przyziemna strefa konwencji wiatru. Burze rozwijały się głównie na ciepłym odcinku frontu pofalowanego w dobrych warunkach termodynamicznych do rozwoju głębokiej konwekcji. Zwrotnikowa masa powietrza cechowała się dużą zawartością pary wodnej – według danych z reanalizy ERA5 stosunek zmieszania przeważnie osiągał wartość 12,5 g/kg, miejscami maksymalnie do 16 g/kg, a całkowita zawartość wody w pionowej kolumnie powietrza przekraczała 50 mm (tab. 2). Co prawda w pionowym profilu atmosfery zaznaczała się warstwa inwersyjna, która hamowała ruchy wstępujące z powierzchni czynnej, jednak inicjację burz umożliwiły procesy mezoskalowe (cyklogeneza i zafalowanie frontu), prowadzące do uniesienia wilgotnego powietrza powyżej warstwy inwersyjnej. Dalszy dynamiczny rozwój konwekcji wynikał między innymi z dużej niestabilności i energii zgromadzonej powyżej warstwy inwersyjnej (maksymalne wartości MUCAPE przekraczały 6000 J/kg), a także stromego pionowego gradientu termicznego (0,7-0,8 K na 100 metrów).



**Ryc. 9.** Lokalizacja doziemnych wyładowań atmosferycznych występujących w nocy 9/10.08.2017 (między 22:00 a 05:00)

*Localization of cloud-to-ground lightning flashes occurring on the night of 9/10.08.2017 (between 22:00 and 05:00 LT)*

Opracowanie własne na podstawie danych z systemu PERUN.

Jak wcześniej wspomniano dodatkowym czynnikiem, który wzmacnił aktywność burz, było zafalowanie frontu, związane z obecnością wyraźnie zaznaczonego prądu strumieniowego w górnej troposferze. W rezultacie nad obszarem Czech powstał płytki, wtórny ośrodek niskiego ciśnienia, który na skutek wielkoskalowych procesów wznoszących powietrza oraz zwiększenia adwekcji ciepła w strefie frontowej przyczynił się do inicjacji burz pomimo pory nocnej. Na górnych poziomach izobarycznych 500 hPa i 300 hPa izohipsy miały kształt prostoliniowy, a duży gradient i znaczny przepływ w środkowej i górnej troposferze powodował, że warunki kinematyczne sprzyjały dobrej organizacji konwekcji. Ścinanie wiatru w warstwie 0-6 km (DLS) osiągało znaczne wartości, w wielu miejscach przekraczając 20 m/s. Ponadto występowały podwyższone wartości skrętności wiatru (osiągające 120-160 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>) związane z silną adwekcją ciepła powyżej warstwy granicznej (temperatura na poziomie 850 hPa wynosiła 15-18°C, a na 700 hPa 5-7°C). W początkowej fazie rozwoju burze przybierały postać wielokomórkowego klastra, a znaczne ścinanie wiatru spowodowało szybką organizację w wielokomórkowy układ liniowy cechujący się ponadprzeciętną aktywnością elektryczną. Bardzo duża chwiejność termodynamiczna i ścinanie wiatru sprzyjały silnym porywom wiatru, co z kolei przyczyniło się do dalszej inicjacji konwekcji również z powierzchni czynnej. Było to również obserwowane w badaniach na obszarze Wielkich Równin Stanów Zjednoczonych (Parker et al., 2019).

**Tabela 2.** Statystyki wybranych wskaźników konwekcji w nocy 9/10 sierpnia 2017. Obliczenia bazowały na reanalizie ERA5 wykorzystując jedynie gridy związane z doziemnym wyładowaniem atmosferycznym  
*Statistics for selected convection indices at night on 9/10 August 2017. Calculations based on ERA5 reanalysis confined to grid squares associated with nocturnal cloud-to-ground lightning flashes*

Miara statystyczna	MUCAPE (J/kg)	Stosunek zmieszania (g/kg)	TPW (mm)	DLS (m/s)	MLS (m/s)	SRH (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
Średnia	1070	12,5	39,7	15,2	12,0	121
Kwartyl 3	1439	13,4	43,9	20,4	15,6	161
Maksimum	6960	16,2	52,1	35,4	26,3	581

## Podsumowanie i wnioski

Analiza doziemnych wyładowań atmosferycznych występujących nocą w Polsce w latach 2002-2018 pozwoliła stwierdzić, że burze nocne rozwijają się najczęściej w sytuacji synoptycznej związanej z frontem pofalowanym, frontem chłodnym, a także zbieżnością wiatru dolnego. W tych sytuacjach występowała również największa liczba doziemnych wyładowań atmosferycznych. Te sytuacje synoptyczne sprzyjają wysokiemu stopniowi organizacji konwekcji, a lepsza organizacja konwekcji wiąże się z większą liczbą doziemnych wyładowań atmosferycznych. W analizowanym okresie zależność ta została szczególnie dobrze zaobserwowana w burzach wielokomórkowych zarówno o charakterze klastrów, jak i układów liniowych. Obecność prądu strumieniowego w górnej troposferze przyczynia się do zwiększenia liczby doziemnych wyładowań atmosferycznych. Szczególnie duży wpływ prądu strumieniowego występował w przypadku frontu okluzji lub braku frontu. Sytuacje te są mniej korzystne dla rozwoju głębokiej konwekcji, natomiast dodatkowa obecność prądu strumieniowego wydłuża żywotność poszczególnych komórek w tych sytuacjach synoptycznych oraz wpływa na lepszą organizację strukturalną konwekcji. Prąd strumie-

niowy może być jednym z czynników inicjujących konwekcję, a ponadto górna dywergencja z nim związana pozwala na dłuższy czas trwania burz.

Analiza liczby wyładowań doziemnych nocą w zależności od wielkości stosunku zmieszania i pionowego gradientu termicznego wskazuje na rozwój burz w podobnych warunkach jak dla konwekcji dziennej. Największa liczba wyładowań występowała, gdy stosunek zmieszania osiągał wartości 10-15 g/kg, a pionowy gradient termiczny 0,6-0,7 K/100 m. Front ciepły umożliwia rozwój burz nawet w warunkach słabszego gradientu termicznego oraz niższego stosunku zmieszania. Badania potwierdziły, że adwekcja ciepła wynikająca z reguły wiatru termicznego, wiązała się z większą liczbą doziemnych wyładowań atmosferycznych niż w przypadku adwekcji chłodu. Takie same wnioski zostały uzyskane w przypadku badań w USA (Grant, 1995). Adwekcja ciepła przyczynia się do zwiększania miąższości poszczególnych warstw izobarycznych, co wywołuje wznoszenie się powietrza powyżej warstwy z adwekcją ciepła. Chwiejności atmosfery w przypadku frontu ciepłego była najmniejsza, co świadczy o tym, że burze w tej sytuacji mogą rozwijać się nawet przy stosunkowo niewielkim pionowym gradiencie termicznym. Sugeruje to, że w tej sytuacji znaczący udział we wspomaganiu rozwoju burz mają mezoskalowe i synoptyczne czynniki wznoszące.

Struktury burzowe występujące w nocy są ściśle powiązane ze ścinaniem wiatru. Wyniki potwierdziły zależność: im większe ścinanie wiatru, tym lepsza organizacja burz. W przypadku frontu ciepłego ścinanie wiatru osiągało szczególnie wysokie wartości dla burz izolowanych. Może to świadczyć o korzystnych warunkach meteorologicznych dla superkomórek burzowych związanych z frontem ciepłym. Burze na froncie ciepłym wymagają szczególnej uwagi w prognozowaniu. Stosunkowo mało sprzyjające warunki meteorologiczne, tj. obniżone wartości chwiejności termodynamicznej oraz stosunku zmieszania, mogą w pewnych sytuacjach, przy obecności dużego ścinania wiatru, inicjować wystąpienie silnych superkomórek. Ponadto ścinanie wiatru przekraczające 20 m/s w przypadku konwekcji liniowej w sytuacji frontu pofalowanego ukazuje możliwość rozwoju nocnych mezoskalowych systemów konwekcyjnych, które powstają w warunkach silnego przepływu powietrza w dolnej troposferze (Grant, 1995; Rochette i Moore, 1999; Moore et al., 2003).

Ryciny i tabele, pod którymi nie zamieszczono źródeł, są opracowaniami własnymi autorów artykułu.

## Piśmiennictwo

- Augustine, J.A., & Caracena, F. (1994). Lower-tropospheric precursors to nocturnal MCS development over the Central United States. *Weather Forecasting*, 9, 116-135.
- Bąkowski, R. (2005). Wybrane analityczne i prognostyczne wskaźniki chwiejności atmosfery. W: M. Ozga-Zielińska, & D. Limanówka (red.), *Hydrologia, meteorologia i klimatologia: badania naukowe i prognozy w erze informatyzacji*. Seria Monografie (s. 209-218). Warszawa: IMGW.
- Bąkowski, R., & Bielec-Bąkowska, Z. (2005). Wybrane przypadki wystąpienia groźnych zjawisk atmosferycznych w Polsce w ostatnich latach. W: E. Bogdanowicz, U. Kossowska-Cezak, & J. Szkutnicki (red.), *Ekstremalne zjawiska hydrologiczne i meteorologiczne*. Seria Monografie (s. 325-335). Warszawa: IMGW.
- Bielec-Bąkowska, Z. (2002). *Zróżnicowanie przestrzenne i zmienność wieloletnia występowania burz w Polsce (1949-1998)*. Katowice: Wydawnictwa Uniwersytetu Śląskiego.

- Brooks, H.E., Lee, J.W., & Craven, J.P. (2003). The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data. *Atmospheric Research*, 67-68, 73-94. [https://doi.org/10.1016/S0169-8095\(03\)00045-0](https://doi.org/10.1016/S0169-8095(03)00045-0)
- Doswell, C.A., Brooks, H.E., & Maddox, R.A. (1996). Flash flood forecasting: an ingredients-based methodology, *Weather and Forecasting*, 11, 560-581. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1996\)011<0560:FFFAIB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1996)011<0560:FFFAIB>2.0.CO;2)
- Gebauer, J.G., Shapiro, A., Fedorovich, E., & Klein, P. (2018). Convection initiation caused by heterogeneous low-level jets over the Great Plains. *Monthly Weather Review*, 146, 2615-2637. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0002.1>
- Geerts, B., Parsons, D., Ziegler, C., Weckwerth, T., Biggerstaff, M., Clark, R., Coniglio, M., Demoz, B., Ferrare, R., Gallus, W., Haghi, K., Hanesiak, J., Klein, P., Knupp, K., Kosiba, K., McFarquhar, G., Moore, J., Nehrir, A., Parker, M., Pinto, J., Rauber, R., Schmuacher, R., Truner, D., Wang, Q., Wang, X., Wang, Z., & Wurman, J. (2017). The 2015 Plains Elevated Convection at Night Field Project. *Bulletin of American Meteorological Society*, 98(4), 767-786. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00257.1>
- Grabowska, K. (2011). Przebieg roczny i dobowy burz w klimacie umiarkowanym morskim, przejściowym i kontynentalnym (na przykładzie Londynu, Warszawy i Moskwy). *Prace i Studia Geograficzne*, 47, 463-471.
- Grasmick, C., Geerts, B., Turner, D.D., Wang, Z., & Weckwerth, T.M. (2018). The relation between nocturnal MCS evolution and its outflow boundaries in the stable boundary layer: an observational study of the 15 July 2015 MCS in PECAN. *Monthly Weather Review*, 146, 3203-3226. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0169.1>
- Kolendowicz, L. (2006). Synoptic situation favorable for violent thunderstorms on the area of Poland. *The International Journal of Meteorology*, 306(31), 49-56.
- Kolendowicz, L. (2012). Synoptic patterns associated with thunderstorms in Poland. *Meteorologische Zeitschrift*, 21(2), 145-156.
- Kożuchowski, K. (2020). *Meteorologia i klimatologia*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Loveless, D.M., Wagner, T.J., Turner, D.D., Ackerman, S.A., & Feltz, W.F. (2019). A composite perspective on bore passages during the PECAN campaign. *Monthly Weather Review*, 147, 1395-1413. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0291.1>
- Maddox, R.A. (1983). Large-scale meteorological conditions associated with mid-latitude mesoscale convective complexes. *Monthly Weather Review*, 111, 1475-1493.
- Malinowska, M. (2011). Variability of chosen instability indices in Poland in XXI century. *Prace i Studia Geograficzne*, 47, 97-107.
- Markowski, P., & Richardson, Y. (2010). *Mesoscale Meteorology in Midlatitudes*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Marshall, J., Trier, S., Weckwerth, T., & Wilson, J. (2011). Observations of elevated convection initiation leading to a surface-based squall line during 13 June IHOP 2002. *Monthly Weather Review*, 139, 247-271.
- Moore, J., Glass, F., Graves, C., Rochette, S., & Singer, M. (2003). The environment of warm-season elevated thunderstorms associated with heavy rainfall over Central United States. *Weather Forecasting*, 18(5), 861-878. [https://doi.org/10.1175/15200434\(2003\)018<0861:TEOWET>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200434(2003)018<0861:TEOWET>2.0.CO;2)
- Mueller, D., Geerts, B., Wang, Z., Deng, M., & Grasmick, C. (2017). Evolution and vertical structure of an undular bore observed on 20 June 2015 during PECAN. *Monthly Weather Review*, 145, 3775-3794. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0305.1>
- Parish, T.R. (2016). A comparative study of the 3 June 2015 Great Plains low-level jet. *Monthly Weather Review*, 144, 2963-2979. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0071.1>

- Parker, M.D., Borchardt, B.S., Miller, R.L., & Ziegler, C.L. (2019). Simulated evolution and severe wind production by the 25-26 June 2015 nocturnal MCS from PECAN. *Monthly Weather Review*, *148*, 183-209. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-19-0072.1>
- Reif, D.W., & Bluestein, H.B. (2017). A 20-year climatology of nocturnal convection initiation over the central and southern Great Plains during the warm season. *Monthly Weather Review*, *145*, 1615-1639. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0340.1>
- Reif, D.W., & Bluestein, H.B. (2018). Initiation mechanisms of nocturnal convection without nearby surface boundaries over the central and southern Great Plains during the warm season. *Monthly Weather Review*, *146*, 3053-3078. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0040.1>
- Rochette, S.M., Moore, J.T., & Market, P.S. (1999). The importance of parcel choice in elevated CAPE computations. *National Weather Digest*, *23*, 20-32.
- Siedlecki, M., & Rzepa, M. (2008). Charakterystyka całkowitej energii chwiejności atmosfery nad Europą w latach 1991-2003. *Przegląd Geofizyczny*, *53*(1), 43-54.
- Smith, B., Thompson, R., Grams, J., Broyles, C., & Brooks, H. (2012). Convective modes for significant thunderstorms in the Contiguous United States. Part I: storms classification and climatology. *Weather Forecasting*, *27*(5), 1114-1135. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-11-00115.1>
- Stopa-Boryczka, M. (1962). *Burze w Polsce*. Prace Geograficzne, 34. Warszawa: Instytut Geografii PAN.
- Taszarek, M., Czernecki, B., & Kozioł, A. (2015). A cloud-to-ground lightning climatology for Poland. *Monthly Weather Review*, *143*, 4285-4304.
- Thompson, R.L., Mead, C.M., & Edwards, R. (2007). Effective storm-relative helicity and bulk shear in supercell thunderstorm environments. *Weather and Forecasting*, *22*, 102-115. <https://doi.org/10.1175/WAF969.1>
- Trier, S., Davis, C., Ahijevych, D., Weisman, M., & Bryan, G. (2006). Mechanisms supporting long-lived episodes of propagating nocturnal convection within a 7-day WRF model simulation. *Journal Atmospheric Sciences*, *63*, 2437-2461.
- Twardosz, R., Niedźwiedź, T., & Łupikasza, E. (2010). Burze w Krakowie i ich uwarunkowania cyrkulacyjne. W: T. Ciupa, & R. Suligowski (red.), *Woda w badaniach geograficznych* (s. 303-313). Kielce: Instytut Geografii, Uniwersytet Jana Kochanowskiego.
- Ustrnul, Z., & Czekierda, D. (2009). *Atlas ekstremalnych zjawisk meteorologicznych oraz sytuacji synoptycznych w Polsce*, Warszawa: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej.
- Walawender, E., Kielar, R., & Ustrnul, Z. (2015). Use of RegCM gridded dataset for thunderstorm favorable conditions analysis over Poland-climatological approach. *Theoretical and Applied Climatology*, *127*, 229-240.
- Wilson, J., & Roberts, R. (2006). Summary of convective storm initiation and evolution during IHOP: Observational and modeling perspective. *Monthly Weather Review*, *134*, 23-47. <https://doi.org/10.1175/MWR3069.1>

## Summary

This article presents research into the meteorological conditions underpinning the development of night thunderstorms in Poland. The main objective was thus to identify the synoptic situations favouring nocturnal thunderstorms, as well as to determine which convection indices are of greatest relevance to forecasts of this type of thunderstorm. The research detailed here was carried out by analysing cloud-to-ground lightning flashes registered in Poland in the years 2002-2018 via the PERUN system. ERA 5 reanalysis was used

to obtain relevant atmospheric parameters and convection indices. In addition, synoptic analysis was carried out for specified thunderstorms, with their dominant structure also determined. No fewer than 1.5 million cloud-to-ground lightning flashes were analysed for the purposes of this study. These data making it clear that the development of nocturnal thunderstorms is favoured primarily in conditions of a waving front, cold front or wind convergence line. In all cases, the jet stream in the upper troposphere emerged as an additional factor increasing the development and activity of nocturnal thunderstorms.

