

## O fizyce burzy; akustyce i mechanizmie wyładowań, oraz zdrowotnych konsekwencjach

Opracowanie: dr Grzegorz Duniec, dr Joanna Wieczorek, CMM IMGW-PIB

Burze to jedno z najbardziej spektakularnych zjawisk w atmosferze ziemskiej. I choć podstawowa fizyka opisująca burze jest całkiem dobrze rozpoznana, to jednocześnie zjawisku temu towarzyszy duża niepewność dotycząca predykcji trajektorii przemieszczania się, natężenia zjawisk towarzyszących i potencjalnych skutków. Ta nieprzewidywalność łącznie z ogromnym zasobem energii zjawiska czyni burze **niebezpiecznym zjawiskiem meteorologicznym**. I choć wiele osób, zwłaszcza dzieci, przejawia lęk przed burzą, a zagrożenia z nią związane to wiedza powszechna, to w praktyce wiele osób nadal ryzykuje swoim życiem i zdrowiem – wybierając się w góry mimo ostrzeżeń czy chroniąc pod drzewem w czasie burzowej ulewy. I co ciekawe, często przyczyną napięcia i niepokoju bywają efekty akustyczne związane z burzą, podczas gdy to zjawiska elektryczne związane z przepływem ładunku elektrycznego w kanale burzowym (chmura - ziemia) stanowią poważne zagrożenie dla naszego bezpieczeństwa.

W piątek 4 sierpnia 2023 nad Rozewiem przeszła burza. Po godzinie 14 w okolicy latarni morskiej było sporo turystów, którzy schowali się przed ulewą pod okolicznymi drzewami. Pojedyncze osoby, a nawet rodziny z dziećmi. W jedno z drzew uderzył piorun i raził pośrednio dwóch stojących pod nim mężczyzn. Obrażenia pierwszego to oparzenia, u drugiego z mężczyzn doszło do zatrzymania akcji serca. Na szczęście po długiej reanimacji udało się przywrócić funkcje życiowe, a obu mężczyzn przewieziono do szpitala.

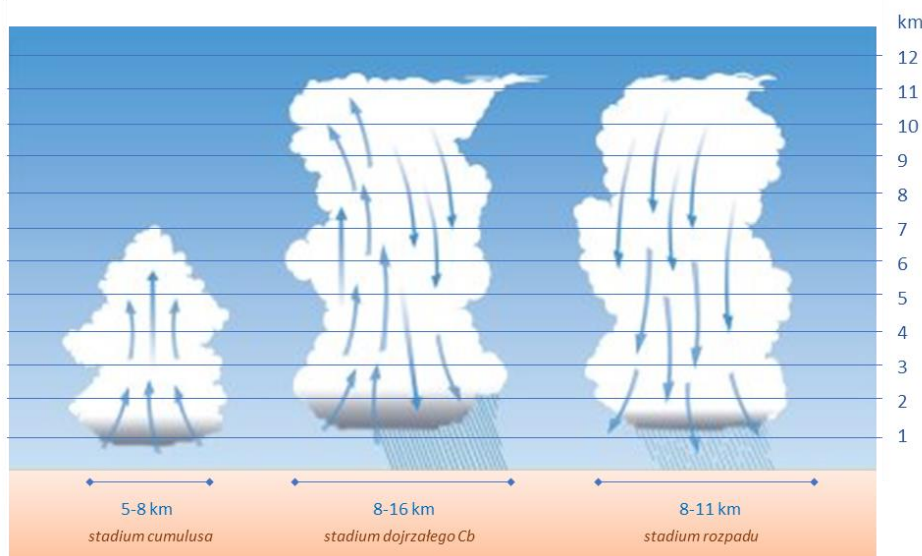
W poniższym wpisie dzielimy się wiedzą naukową, by uświadomić skalę zjawiska, realne zagrożenie, a także jakie mogą być zdrowotne konsekwencje.

### ***Od chmury do komórki burzowej***

Warto wiedzieć, że każda komórka burzowa przechodzi przez trzy stadia rozwoju, w czasie których zmieniać się będzie jej wygląd zewnętrzny, a także zasięg przestrzenny i natężenie procesów w chmurze oraz zjawisk im towarzyszących. Na początku mamy chmurę kłębiastą Cumulus (chmura „pięknej pogody”), która powstaje kiedy ogrzany przy powierzchni bąbel powietrza wznosi się do góry. Podczas wznoszenia nienasycona porcja powietrza ulega adiabatycznemu ochłodzeniu, dodatkowo na brzegach miesza się z otoczeniem (proces zachodzi nie tylko w fazie początkowej). Kiedy zostanie osiągnięty poziom kondensacji CCL (konwekcyjny poziom kondensacji) tworzą się kropelki wody. Dalszy rozwój będzie zależny od dalszego rozwoju prądów wstępujących. Aby z chmury Cumulus (Cu) mógł utworzyć się Cumulonimbus (Cb) i w rezultacie wystąpiła burza, muszą zostać spełnione warunki: odpowiednia stratyfikacja termiczna atmosfery (równowaga chwiejna lub chwiejna warunkowa), duża zawartość wilgoci w powietrzu, przegrzana warstwa powietrza w podłożu oraz warunki sprzyjające adwekcyjnemu lub dynamicznemu wznoszeniu się powietrza [1]. Więcej informacji o rozwoju komórki burzowej można znaleźć w artykule „Mechanizm powstawania burz”.

Kiedy chmura rozbuduje się w pionie, a jej wierzchołek osiągnie wysokość powyżej izotermy zero, to w jej górnej części poza przechłodzonymi kropelkami wody, w warunkach temperatury ujemnej, zaczynają również powstawać kryształki lodu [Międzynarodowy Atlas Chmur, 1987]. O specyfice i różnorodności tych form można przeczytać: [https://cmm.imgw.pl/?page\\_id=20995](https://cmm.imgw.pl/?page_id=20995). Wraz z pojawieniem się kryształków lodu w górnej strefie chmury konwekcyjnej chmura traci ostry zarys i ukazuje włóknisty lub prążkowany wygląd [2, 3], co wynika z rozpraszania promieni słonecznych na kryształach o bardziej zróżnicowanej geometrii w porównaniu do tej sferycznej charakteryzującej krople wody. To znak, że chmura burzowa wchodzi w stadium chmury *Cumulonimbus calvus*. Wraz

z pojawianiem się cząstek stałych i rozwojem w pionie intensyfikują się procesy związane z elektryzacją chmury. Dzięki procesom mikrofizycznym zachodzącym w chmurze tworzą się opady, które zaczynają inicjować prądy zstępujące. Kiedy wierzchołek rozbudowującej się w pionie chmury dotrze do obszaru silniejszych wiatrów i strefy inwersji wówczas dalszy wzrost chmury ustaje, a sam wierzchołek rozpościera się w postaci rozległej warstwy złożonej z kryształków, którą nazywamy kowadłem chmury *incus*. W ostatniej fazie w chmurze dominują prądy zstępujące, intensywność opadu zmniejsza się, a sam opad występuje pod całą podstawą. Podczas opadania opad może parować, co jest spowodowane ogrzewaniem adiabatycznym [1]. Opadające prądy powietrza ogrzewają się adiabatycznie osiągając temperaturę zbliżoną do temperatury otoczenia zrównując się w fazie końcowej i chmura rozpada się i zanika [1]. Bardzo szczegółowy opis przebiegu konwekcji oraz odpowiedź na pytanie czy miasto napędza burzę? znajduje się: <https://obserwator.imgw.pl/czy-miasto-napedza-burze/>.



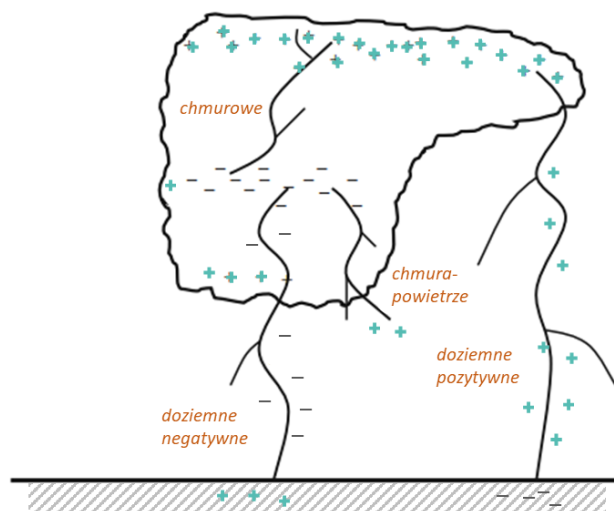
Stadia rozwojowe komórki burzowej źródło: <http://www.bom.gov.au/>, zmodyfikowane

Energia napędzająca burze pochodzi głównie z ciepła utajonego, które uwalniane jest w procesie skraplania się pary wodnej i tworzenia kropeł chmurowych. Choć to dosyć subtelne procesy to należy podkreślić, że charakteryzują się ogromnymi zasobami energetycznymi. Jakiego rzędu to energia? Gdyby oszacować ją na podstawie całości wody wytrąconej z typowej chmury burzowej to okazałoby się, że energię burzy można byłoby oszacować na około  $10^7$  kilowatogodzin [4] – czyli porównywalnie do 20-kilotonowej eksplozji jądrowej (choć w przypadku burzy nie będzie to milisekundowa eksplozja, a energia będzie stopniowo uwalniana w czasie trwania burzy). Natomiast taka wielokomórkowa burza może być pod względem energetycznym nawet 10-100 razy większa!

### **Cumulonimbus uzbrojony elektrycznie**

Zanim dojdzie do zainicjowania wyładowania iskrowego, czyli błyskawicy, w chmurze Cb musi zostać wygenerowane natężenie pola elektrycznego przebicia o wartości 3 MV/m (przy powierzchni Ziemi przy ciśnieniu normalnym) [5, 6, 7]. Mechanizmów odpowiedzialnych za elektryzację chmury Cb jest wiele, a ich szczegółowy opis znajdziecie: <https://obserwator.imgw.pl/czy-miasto-napedza-burze/>. Kiedy natężenie pola elektrycznego w chmurze kłębiasto-burzowej (Cb) osiągnie wartość przebicia rozpoczyna się inicjacja wyładowań iskrowych, czyli błyskawicy. Mogą one występować wewnątrz chmury, pomiędzy centrami ładunków elektrycznych, ale dwóch różnych chmur Cumulonimbus, pomiędzy centrum wewnątrz chmury a ładunkiem w atmosferze, pomiędzy ładunkiem w chmurze a tym w ziemi [6]. Wyładowania doziemne, mogą być dodatnie lub ujemne, w zależności od obszaru

inicjacji (inicjacja z obszaru dodatniego lub ujemnego centrum ładunku chmury). Wyładowania doziemne mogą być inicjowane z chmury lub z powierzchni ziemi. Wymienione wyżej wyładowania nazywamy piorunami liniowymi. Więcej szczegółów na temat rodzajów i charakterystyki wyładowań: <https://obserwator.imgw.pl/czy-miasto-napedza-burze/>.



Typy wyładowań. Za Vernon Cooray, *An Introduction to Lightning*, Springer, 2015, zmodyfikowane

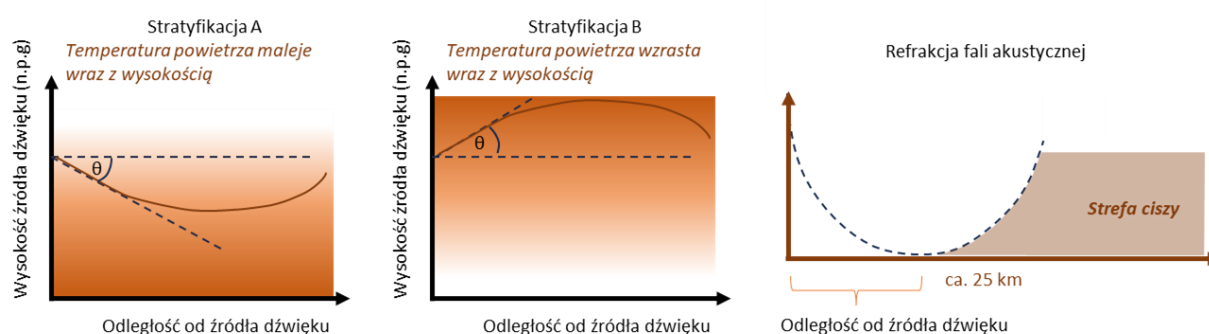
### **Akustyka burzy: każdy słyszał, ale mało kto wie czym właściwie jest grzmot**

Ładunki elektryczne przepływają w kanale burzowym, w którym występuje zjonizowane powietrze. Za jonizację powietrza w kanale odpowiedzialny jest tzw. lider krokowy, czyli strumień ładunków, który poruszając się w kanale wywołuje jonizację powietrza, czyli są to zjonizowane atomy tlenu i azotu. Prekursor, czyli inna nazwa lidera krokowego, jest odpowiedzialny także, za jego świecenie. Średnica takiego kanału waha się od 1 do 10 metrów [6]. Rozmiary rdzenia wynoszą około 1 cm średnicy. Długość błyskawicy może sięgać nawet 10 km [5]. Ruch ładunku elektrycznego w kanale to nic innego jak przepływający prąd elektryczny, który ogrzewa powietrze znajdujące się w kanale. Temperatura w kanale wzrasta do około 30000 K [8]. Wzrost temperatury powietrza w kanale powoduje także wzrost jego ciśnienia. Proces ten przebiega dość szybko. Szybki wzrost ciśnienia w kanale powoduje, że dochodzi do eksplozji [8]. Powietrze z kanału zostaje wyrzucone na zewnątrz kanału. Powietrze znajdujące się w sąsiedztwie kanału zostaje sprężone, które następnie ponownie się rozpręża, sprężając kolejne sąsiadujące warstwy powietrza. W ten sposób powstała propagujące się drganie powietrza. Te drgania powietrza zachodzą w kierunku propagacji. Takie rozchodzące się drganie (podłużne) w ośrodku sprężystym to nic innego jak fala akustyczna [9]. Początkowo eksplodujący kanał rozszerza się z prędkością większą od prędkości dźwięku, wywołując w powietrzu falę uderzeniową gwałtownych zmian ciśnienia [10]. W taki o to sposób zostaje wygenerowany grzmot. Po pierwszej eksplozji kanału, kiedy powietrze zostało wyrzucone na zewnątrz, ciśnienie obniża się w kanale tworząc podciśnienie, które powoduje ponowne zasysanie powietrza do wnętrza kanału, gdzie następuje ponowne sprężanie powietrza [8]. Ponowne sprężanie powietrza wewnątrz kanału skutkuje wzrostem ciśnienia, choć już nie do takiej wartości jak na początku. Kiedy ciśnienie w kanale wzrośnie, ponownie nastąpi eksplozja, ale już mniej spektakularna, o mniejszej amplitudzie. Proces będzie się powtarzał jeszcze kilkakrotnie, aż do chwili kiedy nastąpi całkowity bezruch. Wówczas wewnątrz kanału burzowego nie obserwuje się zmian ciśnienia. Jeśli mielibyśmy możliwość obserwowania kanału

burzowego z bliska, to zauważylibyśmy, że poszczególne fragmenty tego kanału drgają z różną prędkością, co jest spowodowane niejednorodnością atmosfery.

### ***Czy w każdej odległości od burzy człowiek słyszy grzmot w taki sam sposób?***

Uważny obserwator spostrzeże, że inaczej słyszeć burzę znajdująca się z bliska, a inaczej gdy znajduje się daleko. Kiedy źródło fali akustycznej jest blisko, widmo wygenerowanej fali jest mieszaniną niskich i wysokich tonów składowych. Barwa takiej fali jest jasna. Kiedy źródło dźwięku znajduje się w znacznej odległości od obserwatora fala akustyczna po wygenerowaniu pokonuje pewną odległość zanim dotrze do odbiornika, czyli do uszu człowieka lub zwierzęcia, który już słyszy burzę inaczej. W warunkach normalnych współczynnik tłumienia tonu zależy od kwadratu częstotliwości, co skutkuje wzrostem tłumienia z częstotliwością tonu [8, 11]. Kiedy fala akustyczna wygenerowana przez źródło, która zawiera zarówno tony niskie jak i wysokie, propaguje się w ośrodku czyli w powietrzu, zaczyna tracić wysokie składowe w wyniku tłumienia. Do obserwatora dociera fala, która zawiera niskie składowe tonu. Kiedy znajdujemy się w pobliżu miejsca, w którym zainicjowane zostało wyładowanie iskrowe i została wygenerowana fala akustyczna człowiek słyszy dźwięk o barwie jasnej i metalicznej (fala zawiera jeszcze składowe niskie i wysokie) [8]. Kiedy znajdujemy się w dużej odległości od błyskawicy, docierający do nas grzmot jest barwy ciemnej i głuchej (fala zawiera składowe niskie) [8].



*Kształt promienia akustycznego w zależności od stratyfikacji atmosfery. Za Makarewicz 2023 [7].*

### ***Z jakiej odległości można usłyszeć burzę?***

Pierwsze pomruki burzy możemy już usłyszeć z odległości około 25 km. Spowodowane jest to zjawiskiem refrakcji [7, 12, 13]. Atmosfera nie jest jednorodna. Gdyby była jednorodna, prędkość fali akustycznej byłaby stała, a sama fala rozprzestrzeniałaby się po linii prostej [7]. I takie zjawisko bywa czasem obserwowane w wypadku niskich chmur Stratus, gdzie w pewnym jej obszarze ośrodek jest jednorodny termicznie i akustycznie. Kiedy wraz z wysokością temperatura powietrza zmienia się, zmienia się także prędkość propagacji fali akustycznej, co powoduje, że fala zmienia kierunek swojej propagacji, wynika to z prawa załamania, czyli prawa Snella. Z lekcji fizyki, każdy pamięta, jak zmieniał się kierunek fali świetlnej, kiedy przechodziła z ośrodka mniej gęstego do ośrodka gęstszego optycznie lub na odwrót. Podobnie zachowuje się fala akustyczna. Kiedy temperatura powietrza maleje z wysokością wówczas promień fali akustycznej wygina się w kierunku nieba. W sytuacji, kiedy temperatura powietrza rośnie z wysokością, czyli wtedy kiedy mamy do czynienia z inwersją wówczas promień akustyczny wygina się ku dołowi, czyli ku ziemi. Kiedy występują sprzyjające warunki do powstawania chmur Cumulonimbus wówczas temperatura powietrza spada z wysokością. Zatem promień wygenerowanej fali akustycznej, czyli grzmotu, będzie wyginał się ku niebu. Wygenerowanie fali następuje na pewnej wysokości nad powierzchnią gruntu. Kiedy przeanalizujemy rozchodzącą się falę akustyczną, to zauważymy, że ze zbioru wszystkich promieni, występuje taki jeden, który będzie

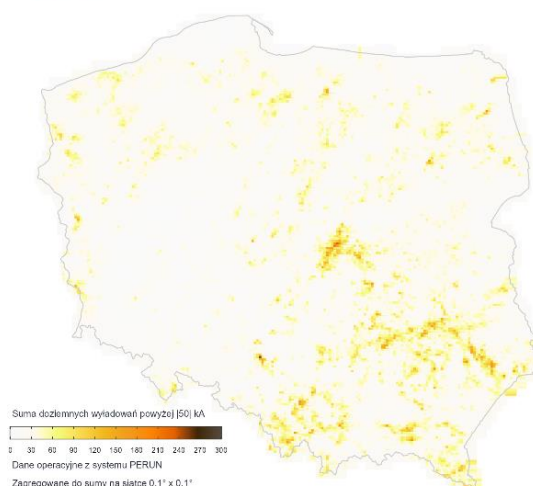
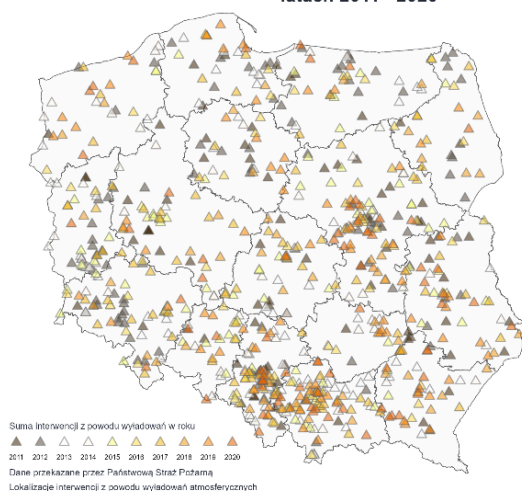
miął jeden punkt styczny z powierzchnią ziemi. Taki promień nazywamy promieniem granicznym. Kiedy obserwator znajdzie się w odległości większej niż odległość punktu stycznego promienia granicznego z powierzchnią gruntu, nic nie będzie słyszał, znajdzie się w tzw. strefie ciszy, czyli jest obszar gdzie nie dociera żaden promień akustyczny. Granicą strefy ciszy jest właśnie promień graniczny. W wypadku burzy ta odległość punktu stycznego promienia akustycznego z ziemią wynosi około 25 km. Wszystkie promienie, które docierają do powierzchni ziemi w odległości mniejszej niż 25 km ulegną odbiciu od powierzchni ziemi. Strefa ciszy jest odkształcana przez wiatr. Należy także zaznaczyć, że w cieniu akustycznym nie panuje absolutna cisza. Przyczyny należy upatrywać w turbulencji, która powoduje przedostanie się do strefy ciszy nieco energii fali akustycznej [7].

Wiele osób odczuwa lęk związany z burzą. U wielu odgłosy grzmotu, fale dźwiękowe czy wibracje rozchodzące się w atmosferze, a związane z sąsiedztwem występowania burzy, budzą lęk i niepokój. Jeśli występują przy tym zachowania i objawy psychosomatyczne, które utrudniają lub całkowicie uniemożliwiają normalne funkcjonowanie, to są klasyfikowane jako fobie specyficzne. Ta przed burzą nosi w psychologii nazwę astrapofobii.

### ***Relatywnie niskie prawdopodobieństwo ale ogromne ryzyko***

Z punktu widzenia zagrożenia istotnym wyładowaniem jest wyładowanie doziemne. Podczas wyładowania doziemnego przepływają ładunki w kanale łączącym ziemię i chmurę. Kanałem tym może przebiegać więcej niż jedno uderzenia zwrotnego pioruna [6]. Wyładowanie doziemne może być ujemne lub dodatnie. Podczas wyładowania ujemnego przenoszony do ziemi jest ładunek rzędu 8 C, natomiast w pierwszym uderzeniu zwrotnym przepływa prąd szczytowy o natężeniu około 30 kA. W wypadku wyładowań dodatnich do ziemi przenoszony jest ładunek rzędu nawet 80 C, natomiast natężenie prądu szczytowego wynosi rzędu 200-300 kA [6]. Prostym elementarnym rachunkiem można policzyć jaką energią wyzwała się podczas jednego wyładowania, która jest rzędu 3 GJ ( $3 \cdot 10^9$  J) [14]. W obiekty wysokościowe jak Empire State Building pioruny trafiają średnio 23 razy w ciągu roku. Nie warto ponadto oswajać się z myślą, że ryzyko rażenia piorunem jest przecież znikome, bo charakteryzuje się niskim prawdopodobieństwem wystąpienia – jeden na milion - jak wylicza amerykańska agencja Centers for Disease Control and Prevention (CDC) [15]. Choć są takie obszary, choćby Floryda w USA, gdzie ryzyko dla mieszkańca, że w ciągu swojego życia zostanie rażony piorunem wynosi poniżej 1:10 000 [16]. Należy podkreślić, że bardzo duże niebezpieczeństwo wynika z możliwości przeniesienia ładunku w sąsiedztwie uderzenia pioruna. Według statystyk austriackich ratowników alpejskich spośród ponad 100 tys. poszkodowanych w górach w okresie 2005-2015, 64 przypadki dotyczyły osób porażonych przez piorun, z czego 63 zdarzenia miały miejsce w czasie turystycznej aktywności [17].

Będąc w terenie należy przyjąć, dla własnego bezpieczeństwa, że jeśli tylko widzimy błyskawice i słyszymy grzmoty, nawet odległe to jest ten moment by poszukać schronienia. Komórki burzowe potrafią przemieszczać się z prędkością nawet 80 km/h, a dodatkowo jeśli trafią nad obszar podsycający konwekcję, mogą nagle rozbudować się w obszarach, gdzie byśmy się ich nie spodziewali, nawet śledząc ich trajektorię. Z tego względu kontynuowanie górskiej wędrówki, przeczekiwanie obok kąpieliska, są ryzykowne i nieodpowiedzialne.



*Silne wyladowania atmosferyczne najczęściej towarzyszą burzom, występują więc w przewadze w ciepłej połowie roku, a ich rozkład przestrzenny uwarunkowany jest częstością zjawisk konwekcyjnych, źródło: raporty PSP i IMGW-PIB*

W Polsce burze i związana z nimi aktywność elektryczna występują sezonowo w przebiegu rocznym, z maksimum aktywności od czerwca do sierpnia. W 2022 roku w lipcu zaobserwowano ich niemal 150 na wybranych stacjach synoptycznych IMGW-PIB. Najwięcej w Krakowie Balicach (25), Rzeszowie (18) oraz w Warszawie (15) [18]. Natomiast we wspomnianym lipcu 2022 system detekcji wyladowań PERUN zarejestrował nad obszarem Polski 129 011 wyladowań doziemnych i 414 155 chmurowych, czyli takich, gdzie transfer ładunku odbywa się tylko w atmosferze, pomiędzy chmurami. Mapy z lokalizacją burz wraz z diagramami wyladowań można śledzić na stronie: [https://awiacia.imgw.pl/mapa-burz-rad/burzrad\\_p.html](https://awiacia.imgw.pl/mapa-burz-rad/burzrad_p.html)

### **Od pioruna do powstania urazu**

Urazy mogą wystąpić w wyniku bezpośredniego porażenia piorunem - czyli kiedy tworzy się kanał przepływu prądu pomiędzy ciałem a piorunem. Jest to około 5% przypadków i zwykle kończą się śmiercią poszkodowanego [19]. Zdecydowanie częściej występują urazy w wyniku porażenia pośredniego. Sytuacje te stanowią około 50% wszystkich przypadków. Dochodzi do nich, gdy:

- dojdzie do tzw napięcia krokowego - czyli nastąpi przeniesienie ładunku z pobliskiego miejsca uderzenia pioruna: np.
  - w sąsiedztwie rażonego piorunem obiektu w terenie (kontakt atmosfera-ziemia, atmosfera-woda),
  - z obiektu, z którym ciało miało kontakt (np. parasol)
- ładunek przenosi się z innej porażonej osoby [16].
- dojdzie do „rozprysku bocznego” czyli odbicia pioruna od obiektu i trafienia w inny obiekt – np. od skały. Powstaje wówczas wyladowanie iskrowe, które sprawia, że prąd przechodzi przez powierzchnię ciała i wywołuje w efekcie liczne poparzenia.



#### OD PIORUNA DO URAZU



#### *Jak może dojść do porażenia wyładowaniem atmosferycznym*

Z powyższych powodów stanie pod drzewem, schronienie się w niszy skalnej, pozostawanie w kąpielisku czy kontakt z metalowymi przedmiotami w czasie burzy niosą ryzyko porażenia (pośredniego). Warto podkreślić, że kontakt z osobą, u której wystąpiło porażenie, ale doszło już do zamknięcia kanału przepływu energii, nie grozi wtórnym porażeniem. Takiej osobie trzeba jak najszybciej pomóc.

Urazy ciała mogą wystąpić również poprzez kontakt z falą uderzeniową, która powstaje poprzez zmianę ciśnienia w wyniku rozszerzania się nagranych gazów w kanale wyładowania i rozchodzi się po przeniesieniu ładunku w rażony obiekt. Nadciśnienie w sąsiedztwie wyładowania może osiągnąć 150-300 psi [20]. Jeśli człowiek znajduje się w jego zasięgu, może dojść do wystąpienia urazów mechanicznych wewnętrznych (i na przykład skutkować pęknięciem błon, narządów wewnętrznych czy wystąpieniem krwotoku) i zewnętrznych [20, 21]. Gdy fala uderzeniowa doprowadzi do zniszczeń, np. oderwania się fragmentów skalnych.

Często trudno jest przewidzieć jakie konsekwencje zdarzenia zdrowotnego mogą wystąpić po rażeniu piorunem lub w wyniku ekspozycji na falę uderzeniową. Bywa, że kilka osób poszkodowanych w jednym zdarzeniu wymaga innej terapii, a rokowania bywają niepewne. W sierpniu 2019 roku w wyniku uderzenia pioruna w szczyt Giewontu śmiertelnie rażone zostały 4 osoby, a w wyniku przeniesienia ładunku - tzw. napięcia krokowego, rannych zostało wiele osób znajdujących się w sąsiedztwie uderzenia i osób rażonych. Bilans rannych wyniósł wówczas 157 osób [22]. O analizie warunków meteorologicznych i przebiegu tamtego wydarzenia można przeczytać: <https://obserwator.imgw.pl/niebezpieczne-burze-w-gorach-giewont/>

Należy mieć na względzie, że jeśli nawet po wystąpieniu porażenia bądź "oślepczenia" nie widać istotnych zaburzeń należy skonsultować stan poszkodowanego na oddziale ratunkowym, bowiem niekorzystne efekty zdrowotne mogą ujawnić się z czasem bądź są maskowane, np. poprzez funkcjonowanie organizmu w stanie podwyższonego poziomu adrenaliny [16]. W rejestrach medycznych skutki działania innych czynników zewnętrznych - skutki uderzenia pioruna, są opisywane kodem T.75.0 (międzynarodowy system kodów ICD-10).

### ***Co dzieje się, gdy nagle przez ciało przepływa przez duży ładunek elektryczny?***

Obrażenia powstałe wskutek porażenia piorunem różnią się od porażen prądem elektrycznym. Wynika to z działania ładunku elektrycznego o bardzo wysokim napięciu (ponad 10 mln woltów), natężeniu (ponad 2 tys. amperów), termice i przez bardzo krótki okres czasu, niespełna 100 milisekund. Uderzenie piorunem wywołuje zjawisko fali ognia (temperatura w sąsiedztwie wyładowania sięga 8 tys. stopni Celsjusza), tzn. prąd elektryczny opływa głównie zewnętrzną powierzchnię człowieka, stąd powoduje przeważnie powierzchowne uszkodzenia, a obrażenia wewnętrzne spowodowane przepływem prądu zdarzają się rzadziej [21]. Choć badania [23] z wykorzystaniem wtórnej oceny tomografem, przeprowadzone przez zespół z Johannesburga wykazały, że w tkankach kostnych powstają serie mikropęknięć o specyficznym układzie. Wiele zależy w jakim obwodzie przepłynie ładunek. Najślabsze rokowania dotyczą osób bezpośrednio rażonych w głowę. Jeśli piorun trafi w przedmiot trzymany w dłoni, to prąd przepłynie również przez serce i może dojść do zatrzymania krążenia. Najmniejsze urazy dotyczą zwykle osób które w czasie porażenia znajdowały się w tzw. wykroku - czyli gdy między stającymi nogami występuje różnica potencjałów. Wówczas prąd przepływa i nie dotyka ważnych dla życia organów. Skutkiem tego rodzaju rażenia są poparzenia ciała.

Osoby rażone piorunem najczęściej tracą świadomość - ze względu na zaburzenia nerwów obwodowych, często skorelowane również z zaburzeniami czucia i deficytami motorycznymi [19]. O ile zaburzenia czucia bywają przejściowe, o tyle pamięć z momentu porażenia zwykle nie wraca. Poszkodowani mogą również stracić przytomność, m.in. z powodu chwilowego skurczu naczyń, a nawet bezdechu, które prowadzą do niedotlenienia. W chwili po porażeniu tętno może nie być dobrze wyczuwalne. Bardzo istotna jest kontrola respiracji, bowiem zdarza się, że krążenie powraca natomiast dochodzi do zapaści oddechowej.

### ***Rażenie piorunem a konsekwencje zdrowotne***

#### **Mózg, układ nerwowy i narządy zmysłów**

Rażenie piorunem może spowodować uszkodzenie ośrodkowego i obwodowego układu nerwowego – bezpośredniego uszkodzenia komórek nerwowych (stopień osłonek mielinowych włókien nerwowych) lub w wyniku wystąpienia śródczaszkowego krwotoku [19]. Może również dojść do wystąpienia częściowego paraliżu spowodowanego skurczem naczyń i niestabilnością współczulnego układu nerwowego. Najczęściej paraliż taki występuje w kończynach dolnych, jest zazwyczaj tymczasowy i ustępuje bez leczenia [19].

Osoby porażone piorunem doznają czasowego rozszerzenia źrenic, co jest wynikiem przejściowego uszkodzenia układu autonomicznego. Może również dojść do uszkodzenia rogówki, ciała szklatego skutkujących zaburzeniami ostrości widzenia - również w dłuższej perspektywie [19]. Może dojść do chwilowego ogłuszenia lub utraty słuchu. Jeśli dojdzie do pęknięcia błony bębenkowej w wyniku powstałego nadciśnienia spowodowanego falą uderzeniową (barotrauma). A jest to bardzo możliwe, dotyczy nawet 50-80 % porażonych [19], bowiem poziom powstałego nadciśnienia może przekraczać 10-krotnie prób 29 psi, przy którym powstają pęknięcia błony bębenkowej [20].

#### **Serce i układ krążenia**

Rażenie piorunem może wywołać zatrzymanie akcji serca, co jest spowodowane natychmiastową i jednoczesną depolaryzacją wszystkich komórek mięśnia sercowego. Rzadziej występują komorowe zaburzenia rytmu lub wtórne zatrzymanie akcji serca [19]. Rytm może zostać przywrócony spontanicznie, po dłuższym czasie w wyniku ingerencji medycznej lub nie



udaje się go przywrócić poszkodowanemu. Ponadto skutki mogą obejmować również niedokrwienie mięśnia sercowego, stłuczenie mięśnia sercowego, choroby osierdza, uszkodzenie aorty, a także niewydolność komorową. Długotrwała resuscytacja może prowadzić do korzystnych wyników, zwłaszcza u młodych i wcześniej zdrowych ofiar [24].

Spektrum zmian po rażeniu piorunem bywa zatem szerokie. W artykule [16] opisywano przypadek rażenia pary, u mężczyzny nie wystąpiły żadne reakcje kardiologiczne. U kobiety początkowo występowała tachykardia (>100 uderzeń na minutę), a w kolejnych godzinach występowały okresowe niepożądane zdarzenia sercowe.

#### Skóra

Najpowszechniejszym rodzajem uszkodzeń ciała w wyniku rażenia piorunem są oparzenia. Najczęściej mają charakter liniowy, bowiem spowodowane są szybkim nagrzewaniem i odparowywaniem potu lub wilgoci [19]. Charakterystycznym, choć mniej powszechnym objawem bywają również zmiany o strukturze dentrytycznej, podobne do liści paproci – tzw. zmiany Lichtenberga [16]. Powstają w wyniku wynaczynienia krwi i odbarwienia tkanki podskórnej, zwykle znikają w ciągu kilku dni. Osoby, które znalazły się w strefie rażenia piorunem i znalazły w zasięgu eksplozji materiału ze zniszczonych obiektów mogą ponadto mieć uszkodzenia tkanki skórnej podobne do poszkodowanych w wyniku wybuchu materiałów wybuchowych.

#### Układ kostny i narządy wewnętrzne

Stan układu kostnego pacjenta w dużej mierze zależy będzie od przebiegu porażenia. Barotrauma może spowodować pęknięcia pojedynczych kości lub mikrospeknięcia [23] - zależnie od uwarunkowań zdrowotnych i osobniczych poszkodowanego. Dodatkowe urazy mogą być wynikiem uderzeń materiału powstałego w czasie wybuchu w miejscu rażenia.

Oprócz powikłań sercowych u 3–15% ofiar uderzenia pioruna może rozwinąć się ostra niewydolność nerek. Uraz elektryczny może bowiem spowodować poważne uszkodzenie mięśni wzdłuż drogi przewodzenia; a uszkodzona tkanka mięśniowa może uwalniać do krążenia nadmierne ilości toksycznych składników komórek mięśniowych prowadząc do powstania niewydolności układu wewnętrznego wydalania [16]. Fala mechaniczna rozchodząca się w czasie wybuchu w miejscu rażenia piorunem może powodować uszkodzenia i pęknięcia tkanek miękkich, stąd pęknięciu mogą ulegać takie narządy jak śledziona czy wątroba.



#### *Najczęściej występujące obrażenia u poszkodowanych w wyniku rażenia piorunem*

Osoby rażone piorunem mogą również doświadczać bardziej długofalowych skutków. Odczuwać zwiększoną podatność na dolegliwości bólowe, mieć osłabione kończyny górne i dolne, cierpieć na zawroty głowy, zaburzenia snu, problemy z koncentracją i pamięcią. Częstość powikłań jest zespół

stresu pourazowego, w którym w wyniku wytworzenia nadciśnienia spowodowanego stresem może dojść do wystąpienia rozległego zawału czy udaru mózgu. Rażenie pioruna jest jednym z najbardziej traumatycznych przeżyć.

### ***Pierwsza pomoc osobie poszkodowanej***

Zasady postępowania w przypadku pomocy osobie rażonej piorunem (pośrednio lub bezpośrednio) są takie same jak w przypadku udzielania ogólnej pomocy przedmedycznej. Rozpoczynając pomoc należy również wezwać karetkę i upewnić się, że miejsce, w którym znajduje się poszkodowany jest bezpieczne. Podstawą jest prowadzenie skutecznej metody resuscytacji krążeniowo-oddechowej (RKO). Schemat ogólny u osoby dorosłej składa się z sekwencji 30 uciśnieć klatki piersiowej i wykonania 2 wdechów. U dzieci schemat 15 uciśnieć (do głębokości ok 1/3 klatki piersiowej, tempo 100-120 uciśnieć na minutę) i 2 wdechy. W obu przypadkach czynności te należy powtarzać do momentu odzyskania oddechu przez ofiarę lub przyjazdu pogotowia. Jeśli na ciele porażonego znajdują się poparzenia, należy je w miarę możliwości schłodzić zimną wodą przez kilka minut, a następnie przyłożyć jałową gazę. Oparzenia opatrzyć, a jeśli dojdzie do złamania - należy usztywnić kończynę. Bardzo szczegółowy opis udzielania pierwszej pomocy osobie rażonej piorunem można znaleźć tutaj [25].

Pacjenci określani mianem „wysokiego ryzyka” - czyli ci po bezpośrednim uderzeniu, z bólem w klatce piersiowej, dusznością, stanem po zatrzymaniu akcji serca wymagają zwykle dłuższego monitoringu parametrów sercowych; EKG i echokardiogramu oraz markerów sercowych, które są zwykle podwyższone. Wszyscy pacjenci porażeni piorunem powinni zostać poddani dokładnemu badaniu pod kątem oznak urazu z odpowiednim badaniem i obrazowaniem, które należy kierować się wywiadem i badaniem. U każdego chorego z utratą przytomności, oparzeniami głowy lub nieprawidłowym wynikiem badania neurologicznego należy wykonać tomografię komputerową głowy ze względu na zwiększone ryzyko krwotoku śródczaszkowego [19].

### ***Zasady bezpieczeństwa w czasie burzy***

#### W pomieszczeniu:

- zabezpiecz drzwi i okna,
- unikaj kontaktu z wodą, bowiem w skrajnych przypadkach ładunek może przemieszczać się przez instalacje wodociągowe, szczególnie jeśli nie są wykonane z tworzywa sztucznego,
- unikaj używania urządzeń przewodowych, by nie narazić się na rażenie ładunkiem elektrycznym z sieci, najlepiej odłączyć te, z których nie korzystasz,
- unikaj kontaktu z elementami zbrojenia i powierzchniami betonowymi, ponieważ ładunek może przenosić się przez metalowe konstrukcje wewnętrzne zbrojenia betonu.

Zdecydowanie gorzej, gdy burza zaskoczy w terenie. Najlepiej byłoby jak najszybciej znaleźć schronienie w obiekcie zadaszonym i w pełni osłoniętym. Altany ogrodowe czy wiaty przystankowe mogą nie być wystarczające by osłonić przed energią wyładowania. Zdecydowanie najlepszym wyjściem będzie schronienie się w zaparkowanym samochodzie - który osłoni nas jak klatka Faradaya - ładunek spłynie po karoserii do ziemi.

#### By przetrwać burzę na zewnątrz:

1. Nawet jeśli prognoza czy aplikacja z obrazami radarowymi nie wskazuje na bezpośrednie sąsiedztwo burzy zawsze śledź zmiany na niebie i jeśli zobaczysz błyski kieruj się do budynku lub auta.
2. Jeśli jesteś na szlaku jak najszybciej skieruj się do doliny czy w zagłębienie terenu czy piętro lasu lecz nie przebywaj w bezpośrednim sąsiedztwie skał i drzew.
3. Jeśli poruszasz się w grupie należy się rozproszyć - na odległość ponad 1m, by nie doszło do przeniesienia ładunku.
4. Nie poruszaj się pod liniami wysokiego napięcia lub w sąsiedztwie instalacji.
5. Unikaj sąsiedztwa wyższych obiektów - drzew, masztów czy znaków drogowych.
6. Jeśli jesteś nad wodą jak najszybciej oddal się od akwenu.
6. Zejdź z roweru i odłóż go w odległości kilku metrów.
7. Jeśli nie masz możliwości schronić się wewnątrz przykucnij z nogami podciągniętymi do tułowia i złączonymi stopami a głowę zasłoń ramionami.
8. Jeśli przemieszczasz się autem zjedź w bezpieczne miejsce – bez sąsiedztwa drzew, instalacji czy innych obiektów które mogłyby ulec zawaleniu w czasie rażenia piorunem.

#### Literatura:

- [1] Piotr Szewczak, Meteorologia dla pilota samolotowego, Avia-Test, Poznań 2014.
- [2] Międzynarodowy Atlas Chmur, Atlas skrócony, Światowa Organizacja Meteorologiczna, IMGW, Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa, 1987.
- [3] Storm Dunlop, Pogoda - przewodnik ilustrowany, Świat Książki, Warszawa, 2003.
- [4] <https://www.britannica.com/science/thunderstorm/Movement-of-thunderstorms>
- [5] I. W. Sawieliew, Wykłady z fizyki, tom 2, PWN, Warszawa, 2002.
- [6] Paweł Bodzak, Detekcja i lokalizacja wyładowań atmosferycznych, IMGW, Warszawa, 2007.
- [7] Vernon Cooray, *An Introduction to Lightning*, Springer, 2015
- [8] Rufin Makarewicz, Dźwięki i fale, Wydawnictwo Naukowe UAM, Wydanie 6, Poznań, 2023.
- [9] Szczepan Szczeniowski, Fizyka doświadczalna, część 1, PWN, Warszawa, 1980.
- [10] Jearl Walker, Latający cyrk fizyki, PWN, 2018.
- [11] Rufin Makarewicz, Wstęp do akustyki teoretycznej, część 1, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań, 2005.
- [12] Rufin Makarewicz, Dźwięk w środowisku, Ośrodek Wydawnictw Naukowych, Poznań, 1994.
- [13] Rufin Makarewicz, Hałas drogowy, szynowy i lotniczy - podstawy teoretyczne, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań, 2021.
- [14] J.V. Iribarne, H.-R. Cho, Fizyka atmosfery, PWN, Warszawa, 1988.
- [15] <https://www.cdc.gov/disasters/lightning/faq.html>

- [16] Eyerly-Webb SA, Solomon R, Lee SK, Sanchez R, Carrillo EH, Davare DL, Kiffin C, Rosenthal A. Lightning Burns and Electrical Trauma in a Couple Simultaneously Struck by Lightning. Clin Pract Cases Emerg Med. 2017
- [17] Ströhle M, Wallner B, Lanthaler M, Rauch S, Brugger H, Paal P. Lightning accidents in the Austrian alps - a 10-year retrospective nationwide analysis. Scand J Trauma Resusc Emerg Med. 2018 Sep 10;26(1):74.
- [18] Opracowanie Klimat Polski 2022, IMGW-PIB [https://www.imgw.pl/sites/default/files/2023-07/klimat-polski-2022\\_raport-koncowy-2.pdf](https://www.imgw.pl/sites/default/files/2023-07/klimat-polski-2022_raport-koncowy-2.pdf)
- [19] Jensen JD, Thurman J, Vincent AL. Lightning Injuries. [Updated 2022 Jul 18]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2023 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK441920/>
- [20] Blumenthal R. The Explosive Effects of Lightning: What are the Risks? Acad Forensic Pathol. 2016 Mar;6(1):89-95. doi: 10.23907/2016.008.
- [21] Ratunkowe leczenie obrażeń ciała w traumatologii dziecięcej, red. Janusz P. Sikora, Wydawnictwo Uniwersytetu Medycznego w Łodzi, 2022 [https://wydawnictwo.umed.pl/wp-content/uploads/2022/05/MONOGRAFIA\\_03\\_cz1\\_2022\\_\\_SIKORA.pdf#page=25](https://wydawnictwo.umed.pl/wp-content/uploads/2022/05/MONOGRAFIA_03_cz1_2022__SIKORA.pdf#page=25)
- [22] <https://zakopane.wyborcza.pl/zakopane/7,179294,27482343,burza-na-giewoncie-minely-dwa-lata-od-najwiekszej-akcji-w-historii.html>
- [23] [10] Bacci N, Augustine TN, Hunt HGP, Nixon KJ, Hoffman J, Bam L, de Beer F, Randolph-Quinney P. Harnessing Thor's Hammer: Experimentally induced lightning trauma to human bone by high impulse current. Forensic Sci Int Synerg. 2021 Nov 3;3:100206. doi: 10.1016/j.fsisyn.2021.100206.
- [24] Christophides T, Khan S, Ahmad M, Fayed H, Bogle R. Cardiac Effects of Lightning Strikes. Arrhythm Electrophysiol Rev. 2017 Aug;6(3):114-117. doi: 10.15420/aer.2017:7:3.
- [25] Polskie Towarzystwo Pielęgniarek Ratunkowych, pierwsza pomoc: <http://ptpaiio-lodz.one.pl/wp-content/uploads/2015/11/Pora%C5%BConia-elektryczne.pdf>