



# Charakterystyka oraz mechanizmy powstawania chwilowych zjawisk świetlnych – artykuł przeglądowy

Emilia Mykowska | Uniwersytet Gdański  
<https://orcid.org/0000-0003-3173-4413>

## Streszczenie

**Słowa kluczowe:**  
jonosfera, pioruny,  
duszkki, elfy,  
strumienie

Plazma zawarta w jonosferze jest jedną z przyczyn powstawania wielu zjawisk świetlnych. Oprócz zorzy polarnej zaobserwować w niej można barwne i różnorodne chwilowe zjawiska świetlne, których wystąpienie bardzo często towarzyszy chmurom burzowym oraz piorunom. Wśród rodzajów wyładowań piorunowych wyróżnić można dosyć rzadkie dodatnie wyładowania doziemne, których część prowadzi do pojawienia się duszków o czerwonym kolorze. Jeśli wyładowanie doziemne będzie wystarczająco silne, może skutkować powstaniem impulsu elektromagnetycznego wywołującego elfy, widoczne jako kręgi rozchodzącego się czerwonego światła. Wśród dobrze poznanych chwilowych zjawisk świetlnych wyróżnić można również strumienie, których powstanie związane jest z wystąpieniem niezrównoważonego ładunku w chmurze burzowej. Innymi, nadal słabo zbadanymi, zjawiskami świetlnymi jonosfery są m.in. gnomy, wróżki, trolle oraz duchy.

## Characteristics and mechanisms of generation of transient luminous events – a review (Summary)

**Keywords:**  
ionosphere,  
lightnings, sprites,  
elves, jets

The plasma contained in the ionosphere enables the formation of many light phenomena. Apart from the aurora borealis, colourful and diverse transient luminous events can be observed in the ionosphere, the formation of which is very often associated with thunderstorm clouds and lightning. Among the types of discharges, we can distinguish quite rare positive ground discharges, some of which lead to the appearance of red-coloured sprites. If the discharge is strong enough, it can lead to an electromagnetic pulse causing elves, visible as circles of propagating red light. Among the well-studied transient luminous events, one can also distinguish jets, whose origin is related to the occurrence of an unbalanced charge in a storm cloud. Other, still poorly studied, light phenomena of the ionosphere include gnomes, pixies, trolls, and ghosts.

## Wstęp

Chwilowe (przejściowe) zjawiska świetlne (*transient luminous events*) są stale odkrywaniem i badaniem obszarem nauki dotyczącym jonosfery. Jest to dziedzina stosunkowo nowa, gdyż pierwsze chwilowe zjawisko świetlne zostało zarejestrowane w 1989 roku (Franz, Nemzek, Winckler 1990: 48), jednak stale rozwijająca się. Dzięki swoim niezwykłym kształtom oraz różnorodnym barwom, przechodzącym przez rozmaite odcienie czerwieni, fioletu, niebieskiego czy zielonego, są to zjawiska bardzo interesujące, o czym świadczy wiele wydawanych publikacji dotyczących tego tematu. Kolejne ewenementy odkrywane są do dnia dzisiejszego, czego przykładem są duchy o zielonej barwie odkryte w 2020 roku (Phillips 2020).

## Podstawowe informacje dotyczące jonosfery

Atmosferę ziemską podzielić można na kilka warstw, różniących się między sobą temperaturą, składem chemicznym mieszaniny występujących gazów oraz stopniem jonizacji cząsteczek (Rybka 1975: 101–102). Jonosfera rozciąga się na wysokości około 50–500 km, co oznacza, że jest ona poddana działaniu promieniowania słonecznego oraz kosmicznego. Zarówno promieniowanie słoneczne, jak i kosmiczne są w stanie jonizować atomy oraz cząsteczki znajdujące się w atmosferze, czego produktami są aniony oraz kationy. Skutkiem tego zjawiska jest występowanie w jonosferze znacznych ilości plazmy (Kelley 2009: 5–6). Plazma jest mieszaniną dodatnich, ujemnych, a także elektrycznie obojętnych cząstek znajdujących się w stanie quasi-równowagi. Mimo że plazma w istotnym stopniu składa się ze zjonizowanych indywiduów, w skali makroskopowej jest elektrycznie obojętna. Materia ta powstaje nieustannie w wyniku działania promieniowania wysokoenergetycznego oraz ulega unicestwieniu na skutek zachodzących reakcji rekombinacji (Sedlak 1972: 125–126). Zależnie od tego, który z tych procesów jest procesem przeważającym, zmienia się gęstość plazmy. Gęstość jest parametrem, ze względu na który jonosferę podzielono na trzy warstwy. Warstwę najwyższą stanowi warstwa F, znajdująca się na wysokości około 150–500 km. Ze względu na swoje położenie jest ona najbardziej narażona na jonizujące działanie promieniowania słonecznego oraz kosmicznego. Z tego powodu warstwa F charakteryzuje się największą gęstością plazmy. W regionie tym znaczną część występujących indywiduów stanowią kationy  $O^+$  powstające w wyniku fotodysocjacji cząsteczkowego tlenu. Poniżej, na wysokości 90–150 km, rozciąga się warstwa E charakteryzująca się niższą gęstością plazmy. Warstwę znajdującą się na wysokości 50–90 km stanowi warstwa D, której gęstość plazmy, ze względu na malejącą intensywność dochodzącej wiązki promieniowania, jest zdecydowanie najmniejsza. W warstwie E oraz D znacznie bardziej istotną rolę niż atomy odgrywają zjonizowane cząsteczki – m.in.  $NO^+$ ,  $O_2^+$  oraz  $N_2^+$ . W ciągu nocy, kiedy jonosfera nie jest narażona na działanie promieniowania słonecznego, gęstość plazmy maleje ze względu na przeważające procesy rekombinacji. Jako że zjonizowane cząsteczki znacznie łatwiej

ulegają rekombinacji niż zjonizowane atomy, gęstość plazmy w strefie F maleje nieznacznie, natomiast warstwa D praktycznie zanika (Kelley 2009: 5–11).

## Rodzaje zjawisk świetlnych występujących w jonosferze

Najbardziej znanymi zjawiskami świetlnymi występującymi w jonosferze są zorze polarne, spowodowane wzbudzeniem indywidualów chemicznych przez wiatr słoneczny. Wiatr słoneczny to strumień plazmy składający się głównie z protonów oraz cząstek  $\alpha$ . Na wiatr słoneczny docierający do Ziemi wpływa jej silne pole magnetyczne, co może powodować jego przyspieszenie (Jaugey 2007: 2–7). Zderzający się z występującymi w górnej atmosferze atomami i cząstkami strumień plazmy powoduje ich wzbudzenie. Następnie indywiduala znajdujące się w stanie wzbudzonym wracają do stanu podstawowego, emitując energię w postaci światła. Światło to ma różną barwę, zależnie od tego, na który stan elektronowy została wzbudzona dana cząsteczka lub atom. Przykładowo, atomowy tlen może emitować promieniowanie o długości fali około 556 oraz 630 nm, co skutkuje obserwowaniem kolejno zielonej lub czerwonej barwy zorzy polarnej (Kivelson, Russell 1995: 459–469).

Innymi, zdecydowanie mniej znanymi, zjawiskami świetlnymi są tzw. chwilowe zjawiska świetlne. Są to trudno zauważalne ludzkim okiem krótkotrwałe błyski światła powstające w jonosferze. Zaliczyć do nich można m.in. duszki, elfy, niebieskie strumienie, trolle czy gnomy. Są to zjawiska stale odkrywane, dlatego mechanizm powstawania części z nich nie został jeszcze zbadany. Niejednokrotnie możliwość ich zaobserwowania związana jest z występowaniem chmur burzowych oraz piorunów (Phillips 2020).

## Chmury burzowe oraz pioruny

Chmurami burzowymi odpowiedzialnymi za powstawanie piorunów są najczęściej kłębiaste chmury deszczowe Cumulonimbus. Zazwyczaj rozciągają się one na szerokość do 20 km i mają od 8 do 12 km wysokości (Uman 1984: 1–2). Chmury te powstają na skutek unoszenia się masy ciepłego, wilgotnego powietrza. Wznosząca się para wodna napotyka gęste, zimne powietrze, co powoduje jej skroplenie, a także zamarzanie, czego efektem jest powstanie kryształków lodu. Większe kryształki, ze względu na swoją masę, zaczynają opadać, natomiast kryształki małe unoszone są wraz z kroplami wody. Między przenoszonymi w przeciwnych kierunkach ciałami stałymi prawdopodobnie dochodzi do tarcia, co skutkuje utratą elektronów przez mniejsze kryształki i ułożeniem ich na kryształkach większych (Sokołowska 2009: 15–16). Proces ten powoduje ujemne naelektryzowanie się dolnej warstwy chmury burzowej znajdującej się na wysokości około 7 km n.p.m. oraz dodatnie naelektryzowanie się warstwy górnej rozciągającej się na wysokości około 10 km n.p.m. Na skutek oddziaływań elektrostatycznych elementy znajdujące się na

ziemi pod chmurą burzową zostają naelektryzowane dodatnio, natomiast te występujące w dalszej odległości od chmury burzowej – naelektryzowane ujemnie (Dwyer 2014: 149–150) – rysunek 1.



**Rysunek 1. Rozkład ładunków elektrycznych powstałych na skutek uformowania się chmury burzowej**

Źródło: (Dwyer 2014: 150–151).

Wyładowania piorunowe można podzielić ze względu na ośrodki, między którymi występują. Znane są m.in. wyładowania występujące w obrębie jednej chmury (wewnątrzchmurowe), między dwiema chmurami (międzychmurowe), czy też wyładowania występujące pomiędzy chmurą a ziemią (Uman 1984: 1). Wyładowanie chmura – ziemia powstaje, gdy między chmurą burzową a powierzchnią Ziemi powstaje silne pole elektrostatyczne mogące prowadzić do wyładowania pilotującego. Wyładowanie to prowadzi do zmniejszenia oporności elektrycznej powietrza, a także do powstania zjonizowanego kanału, co skutkuje wystąpieniem wyładowania głównego. Wyładowanie główne charakteryzuje się mniejszą prędkością (10 000 km/h) niż wyładowanie pilotujące (30 000 km/h), niesie natomiast znacznie większy ładunek – natężenie przepływającego prądu może wynieść od 30 do 50 kA (Sokołowska 2009: 16). Ze względu na kierunek wyładowania pioruny można podzielić na doziemne oraz oddolne, natomiast biorąc pod uwagę ładunek przenoszony przez wyładowania, wyróżnić można wyładowania ujemne oraz dodatnie. Zdecydowaną większość wszystkich wyładowań między chmurą a powierzchnią, bo aż 90%, stanowią wyładowania ujemne (Dwyer 2014: 150–151).

## Duszki – charakterystyka i powstawanie

Pierwszym, chwilowym zjawiskiem świetlnym były duszki (*sprites*), zarejestrowane w 1989 roku podczas burzy z piorunami (Franz, Nemzek, Winckler 1990: 48). Są to widoczne gołym okiem błyski światła trwające zaledwie kilka milisekund.

Pojawiają się one nad chmurami burzowymi w dolnej jonosferze, na wysokości 50–90 km. Zależnie od wysokości zjawisko to charakteryzuje się barwą od czerwonej do fioletowoniebieskiej. Duszki składają się z wielu struktur o kształcie pionowych kolumn lub stożków posiadających średnicę do 100 m i mogących rozciągać się na szerokość nawet 40 km (Neubert 2003: 747). Początkowo pojawiają się one na wysokości około 70–75 km, a następnie, zależnie od typu duszka, rozprzestrzeniają się w kierunku dolnym lub dolnym oraz górnym (Cummer i in. 2006: 2) z prędkością  $10^7$ – $10^8$  m/s (McHarg, Haaland 2002: 9). Powstanie duszków najczęściej związane jest z wystąpieniem silnego dodatniego wyładowania doziemnego (Valdivia, Milikh, Papadopoulos 1997: 3169). Wyładowania te stanowią około 10% wszystkich wyładowań między chmurą a ziemią i powodują obniżenie dodatniego ładunku chmury (Dwyer 2014: 150). Przy takim wyładowaniu górna, dodatnio naładowana, część chmury burzowej oddziałuje z ujemnie naelektryzowanymi elementami znajdującymi się na ziemi. Elementy te oddalone mogą być nawet o 50 km od chmury burzowej, dlatego wyładowanie to często charakteryzuje się początkowo poziomym kształtem (Cieślak 2017: 8).

W ciągu kilkudziesięciu lat od zarejestrowania duszków zaprezentowanych zostało wiele teorii ich powstawania, jednak mechanizm ten nie został jeszcze do końca poznany (Singh, Kumar, Pathak 2017: 486). Pewne jest jednak, że duszki powstają na skutek wytworzenia się pola elektrycznego wywołanego przez burzę z piorunami oraz plazmę znajdującą się w jonosferze. Jedną z nowszych teorii jest powstawanie duszków ze sferycznej plazmy o niejednorodnie rozłożonym ładunku. Według tej teorii silne dodatnie wyładowanie doziemne powoduje wytworzenie się niezerównoważonego ładunku ujemnego w chmurze burzowej, co prowadzi do powstania pola elektrycznego między chmurą a plazmą zawartą w jonosferze. W efekcie w jonosferze tworzy się plazma o sferycznym kształcie i niejednorodnie rozłożonym ładunku, co skutkuje powstaniem kolejnego pola elektrycznego, kilkukrotnie silniejszego niż wytworzonego wcześniej między jonosferą a chmurą burzową (Surkov, Hayakawa 2016: 725) – rysunek 2.

Na skutek powstałego w jonosferze pola elektrycznego następuje wzrost szybkości znajdujących się na tym obszarze elektronów, które przez zderzenia wzbudzają sąsiadujące cząstki (Kelley 2009: 365–366). Wracając do poziomu podstawowego, cząstki te emitują energię w postaci światła o konkretnej długości fali. Górna część duszków ma barwę czerwoną, natomiast dolna – fioletowoniebieską. Oba kolory są związane z przeważającym udziałem cząsteczkowego azotu w składzie powietrza na tej wysokości. Zmiana barwy duszków w miarę niższych wysokości jest spowodowana szybko zwiększającą się wartością ciśnienia, które determinuje emisję niebieskiej barwy światła przez cząsteczki wzbudzonego azotu (Pasko, Inan, Bell 1997: 4532). Część duszków może zostać zaobserwowana gołym okiem, jednak, przez niewielką intensywność, postrzeganie ich czerwono-niebieskiej barwy może być zaburzone (Füllekrug, Mareev, Rycroft 2004: 35).



Rysunek 2. Rozkład ładunków przed oraz w trakcie wyładowania doziemnego dodatniego (po lewej) oraz po wystąpieniu wyładowania (po prawej), wraz z utworzeniem się plazmy o niejednorodnym rozkładzie ładunków oraz sferycznym kształcie

Źródło: (Dwyer 2014: 151; Surkov, Hayakawa 2016: 725).

## Charakterystyka i powstawanie elfów

Elfy (*elves*) są to rozprzestrzeniające się z ogromną prędkością okręgi o czerwonej barwie (Neubert 2003: 747). Jest to zjawisko występujące w dolnej jonosferze, na wysokości około 90 km, a szerokość powstałego okręgu światła może dochodzić do 300 km (Siingh i in. 2009: 513–514). Przez bardzo dużą szybkość poszerzania się elfów ich czas trwania wynosi zaledwie około 1 ms. Fakt ten, w połączeniu z niewielką intensywnością zjawiska, powoduje, iż elfy nie są widoczne gołym okiem, a ich obserwacja za pomocą aparatury jest trudniejsza niż w przypadku duszków (Barrington-Leigh, Inan 2001: 1741). Mimo trudności w obserwacji elfów jest to chwilowe zjawisko świetlne rejestrowane najczęściej. Większość elfów zarejestrowana została nad oceanami, co spowodowane jest dziesięciokrotnie częstszym występowaniem w tych obszarach wyładowań o wysokiej wartości prądu szczytowego (Chen i in. 2008: 3–4). Takie silne doziemne wyładowania, zarówno dodatnie, jak i ujemne, prowadzą do wytworzenia impulsu elektromagnetycznego, który rozprzestrzenia się w górę w kształcie stożka. Gdy impuls dotrze na wysokość około 90 km, powoduje zwiększenie szybkości znajdujących się w tym obszarze elektronów, a także zwiększenie gęstości elektronowej, co skutkuje wzmożonymi zderzeniami indywidualów chemicznych. Zderzenia te mogą prowadzić do jonizacji oraz wzbudzenia znajdujących się w warstwie D jonosfery cząstek, prowadząc do emisji światła (Nagano i in. 2003: 619–620; Mende i in. 2005: 10). Kształt elfów jest zdeterminowany przez fakt, że środkowa część stożka powstałego impulsu elektromagnetycznego dojdzie na określoną wysokość szybciej niż jego boki.

Prędkość rozprzestrzeniania się elfów jest równa prędkości światła (Barrington-Leigh, Inan, Stanley 2001: 1741–1744) – rysunek 3.



**Rysunek 3. Schemat powstawania elfów**

Źródło: (Barrington-Leigh, Inan, Stanley 2001: 1741–1744).

Jako że elfy powstają na wysokości około 80–90 km, podobnie jak górne części duszków charakteryzują się barwą czerwoną związaną z emisją energii w postaci światła przez cząsteczki azotu wracające do stanu podstawowego (Nagano i in. 2003: 619–620; Mende i in. 2005: 10).

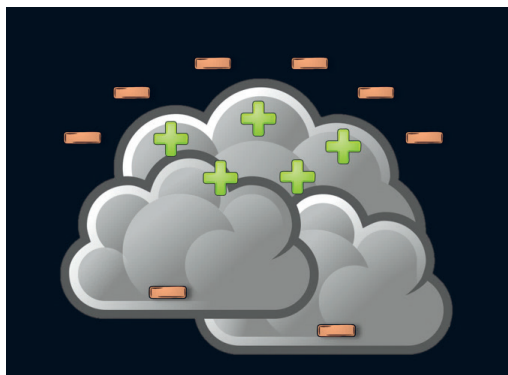
### Niebieskie strumienie oraz gigantyczne strumienie – charakterystyka i powstawanie

Niebieskie strumienie (*blue jets*) mają postać szybko wznoszących się z górnych partii chmur burzowych stożków niebieskiego światła (Neubert 2003: 747). Zjawisko to osiąga prędkość ponad  $10^5$  m/s i wznosi się na wysokość około 40 km, dlatego trwa ułamki sekund (Wescott i in. 2001: 21549; Pasko 2008: 3). Kolor niebieskich strumieni, podobnie jak w przypadku duszków czy elfów, wynika z wysokiej zawartości cząstkowego azotu na tych wysokościach. Zjawisko to charakteryzuje się barwą podobną do koloru niskich partii duszków. Energia niebieskich strumieni jest wystarczająca, aby nie tylko wzbudzić, ale także częściowo zjonizować występujące w atmosferze cząsteczki azotu (Wescott i in. 1998: 718–719). Dzięki dosyć intensywnej barwie oraz niskiej, w porównaniu do innych chwilowych zjawisk świetlnych, wysokości występowania niebieskie strumienie w idealnych warunkach są widoczne dla ludzkiego oka przystosowanego do ciemności (Füllekrug, Mareev, Rycroft 2004: 38).

Zjawiskiem przypominającym niebieskie strumienie są gigantyczne strumienie (*gigantic jets*). Osiągają one jednak wysokość nawet 90 km n.p.m., a więc dochodzą do dolnej jonosfery. Gigantyczne strumienie w początkowej fazie przypominają niebieskie strumienie, natomiast ich najwyższe partie, ze względu na kształt, podzielono

na dwa typy: „drzewa” oraz „marchewki” (Su i in. 2003: 974). Dolne części tego zjawiska charakteryzują się kolorem niebieskim, natomiast górne (powyżej około 50 km n.p.m.) – kolorem czerwonym. Barwa gigantycznych strumieni jest więc, analogicznie do duszków, zależna od ciśnienia, a co za tym idzie – wysokości. W początkowej fazie zjawiska jego prędkość wynosi około  $10^5$  m/s, natomiast wraz z osiągnięciem coraz wyższej wysokości prędkość ta rośnie do  $10^6$  m/s (da Silva 2015: 5). Podobnie do elfów, ze względu na fakt, że nad oceanami występują silniejsze burze niż nad lądem, jest to obszar, nad którym gigantyczne strumienie są obserwowane zdecydowanie najczęściej. Gigantyczne strumienie są zjawiskiem niezwykle rzadkim, stanowiącym około 0,2% łącznej ilości najczęściej występujących chwilowych zjawisk świetlnych (Chen i in. 2008: 3–4).

Oba typy strumieni występują między szybko powstającymi chmurami burzowymi a jonosferą, ale ich wystąpienie nie jest wywoływane bezpośrednio przez wyładowania piorunowe (Lyonsi in. 2003: 452–453). Prawdopodobnie strumienie powstają na skutek wytworzenia się niezrównoważonych ładunków w chmurze burzowej, spowodowanych wyładowaniem doziemnym lub wewnątrzchmurowym. W takiej sytuacji, na skutek oddziaływań kulombowskich, do górnej części chmury przyciągane są ładunki o przeciwnym znaku, co prowadzi do powstania warstwy ekranującej (Krehbiel i in. 2008: 233–235) – rysunek 4.



**Rysunek 4.** Wytworzenie się nadmiaru ładunku dodatniego w chmurze burzowej po wystąpieniu wyładowania ujemnego oraz powstanie ujemnej warstwy ekranującej

Źródło: (Krehbiel i in. 2008: 233–235).

Niebieskie strumienie mogą powstać po kilku sekundach po wystąpieniu wyładowania ujemnego, skutkującego powstaniem w chmurze nadmiaru ładunków dodatnich, natomiast gigantyczne strumienie są wywoływane przewagą ładunków ujemnych, spowodowanych wyładowaniem dodatnim. W przypadku niebieskich strumieni między chmurą burzową a powstałą ujemną warstwą ekranującą powstaje silne pole elektryczne, które, po przekroczeniu odpowiedniej wartości, prowadzi do wystąpienia dodatniego wyładowania skierowanego do góry (Krehbiel i in. 2008).



Wystąpienie dodatniego niebieskiego strumienia skutkuje usunięciem nadmiaru ładunku dodatniego z chmury burzowej, a co za tym idzie – prowadzi do wyrównania ładunków. Fakt ten powoduje również redukcję warstwy ekranującej. Przeciwnie wyładowanie dodatnie doziemne lub wewnątrzchmurowe prowadzi do zmniejszenia się ładunku dodatniego w górnej części chmury, a powstała warstwa ekranująca potęguje ten efekt. Zdarzenia te prowadzą do konieczności usunięcia nadmiaru ładunku ujemnego przez chmurę, co może zająć na skutek wyładowania ujemnego skierowanego do góry, widocznego jako gigantyczny strumień (Riousset i in. 2010: 6–9).

### Inne chwilowe zjawiska świetlne

Do innych poznanych zjawisk świetlnych zaliczyć można m.in. gnomy (*gnomes*), wróżki (*pixies*), trolle (*trolls*) oraz duchy (*ghosts*). Gnomy powstają nad intensywnymi chmurami burzowymi i mają postać wznoszących się wiązek światła, trwających od kilkudziesięciu do kilkuset milisekund. Mogą osiągać około 200 m szerokości i wznosić się na wysokość 1 kilometra. Innym, podobnie jak gnomy, słabo poznanym zjawiskiem świetlnym są wróżki. Mają one postać wielu kropek światła o średnicy około 100 metrów. Zarówno kolor, jak i mechanizm powstawania gnomów i wrózek nie został jeszcze poznany, jednak prawdopodobnie ich pojawienie się nie jest bezpośrednio związane z wyładowaniami piorunowymi (Lyons i in. 2003: 450). Powstawanie trolli i duchów jest uwarunkowane wystąpieniem silnych duszków (Mirzayeva 2022: 30; Phillips 2020). Trolle charakteryzują się czerwonym kolorem, a kształtem przypominają dolne części duszków. Pojawiają się one w seriach wznoszących się na wysokość około 50 km nad chmury burzowe błysków (Surkov, Hayakawa 2020: 1030). Duchy zostały zarejestrowane w 2019 roku, są zatem do tej pory najpóźniej odkrytym chwilowym zjawiskiem świetlnym. Mają one postać zielonej poświaty występującej nad intensywnymi duszkami, są więc wytwarzane na wysokości około 90 km (Phillips 2020).

### Nazewnictwo chwilowych zjawisk świetlnych

Mimo że terminologia chwilowych zjawisk świetlnych wydaje się być przypadkowa, okazuje się, że w niektórych przypadkach powstała ona od pierwszych liter pełnych nazw tych ewenementów. Pełna nazwa duszków brzmi więc stratosferyczne/mezoferyczne zaburzenia wynikające z elektryzacji intensywnej burzy z piorunami (Stratospheric/Mesospheric Perturbations Resulting from Intense Thunderstorm Electrification), elfy wzięły swoją nazwę od emisji światła i zaburzeń o bardzo niskiej częstotliwości, wywołanych przez źródła impulsów elektromagnetycznych (Emission of Light and Very Low Frequency perturbations due to Electromagnetic Pulse Sources) (Herzog 1997), trolle są akronimem od krótkotrwałych czerwonych świecących lineamentów (Transient Red Optical Luminous Lineaments) (Surkov, Hayakawa 2020: 1030), a skrót duchy oznacza zielone emisje ze wzbudzonego tlenu z górnych części duszków (Green emissions from excited Oxygen in Sprite Tops) (Phillips 2020).

## Bibliografia

- Barrington-Leigh C., Inan U., 2001, *Identification of sprites and elves with intensified video and broadband array photometry*, „Journal of Geophysical Research”, Vol. 106, No. A2.
- Chen ., Kuo C., Lee Y., Su H., Hsu R., Chern J., Frey H., Mende S., Takahashi Y., Fukunishi H., Chang Y., Liu T., Lee L., 2008, *Global distributions and occurrence rates of transient luminous events*, „Journal of Geophysical Research”, Vol. 113, No. A8.
- Cieślak K., 2017, *Duszki, elfy i niebieskie strumienie, czyli o egzotycznych wyładowaniach elektrycznych*, „Neutrino”, nr 38.
- Cummer S., Jaugey N., Li J., Lyons W., Nelson T., Gerken E., 2006, *Submillisecond imaging of sprite development and structure*, „Geophysical Research Letters”, Vol. 33, No. 4.
- Da Silva C., 2015, *Numerical Modeling of Leader Discharge Mechanisms in Lightning, Blue Jets, Gigantic Jets, And Sprites*, A Dissertation in Electrical Engineering.
- Dwyer J., 2014, *The physics of lightning*, „Physics Reports”, Vol. 534, No. 4.
- Franz R., Nemzek R., Winckler J., 1990, *Television Image of a Large Upward Electrical Discharge Above a Thunderstorm System*, „Science”, Vol. 249, No. 5964.
- Füllekrug M., Mareev E., Rycroft M., 2004, *Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges*, „NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry”, Vol. 225.
- Herzog C., *Sprites and Elves in the Atmosphere*, PennState, 1.09.1997, <https://www.psu.edu/news/research/story/sprites-and-elves-atmosphere>.
- Jaugey G., 2007, *Space Physics: Aurora Borealis*, AUspace.
- Kelley M., 2009, *The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics*, USA.
- Kivelson M., Russell C., 1995, *Introduction to Space Physics*, Cambridge.
- Krehbiel P., Riousset J., Pasko V., Thomas R., Rison W., Stanley M., Edens H., 2008, *Upward Electrical Discharges From Thunderstorm*, „Nature Geoscience”, Vol. 1, No. 4.
- Lyons W., Nelson T., Armstrong R., Pasko V., Stanley M., 2003, *Upward Electrical Discharges From Thunderstorm Tops*, „Bulletin of the American Meteorological Society”, Vol. 84, No. 4.
- McHarg M., Halland R., 2002, *Altitude-time development of sprites*, „Journal of Geophysical Research”, Vol. 107, No. A11.
- Mende S., Frey H., Hsu R., Su H., Chen A., Lee L., Sentman D., Takahashi Y., Fukunishi H., 2005, *D region ionization by lightning-induced electromagnetic pulses*, „Journal of Geophysical Research”, Vol. 110, No. A11.
- Nagano I., Yagitani S., Miyamura K., Makino S., 2003, *Full-wave analysis of elves created by lightning-generated electromagnetic pulses*, „Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics”, Vol. 65, No. 5.
- Neubert T., 2003, *On Sprites and Their Exotic Kin*, „Science”, Vol. 300, No. 5620.
- Pasko V., 2008, *Blue jets and gigantic jets: transient luminous events between thunderstorm tops and the lower ionosphere*, „Plasma Physics And Controlled Fusion”, Vol. 50, No. 12.
- Pasko V., Inan U., Bell T., 1997, *Sprites produced by quasi-hyphen; electrostatic heating and ionization in the lower ionosphere*, „Journal of Geophysical Research”, Vol. 102, No. A3.
- Phillips T., 2020, *Introducing, The Green Ghost*, Space Weather, 31.05.2020, <https://spaceweatherarchive.com/2020/05/31/introducing-the-green-ghost/>
- Riousset J., Pasko V., Krehbiel P., Rison W., Stanley M., 2010, *Modeling of thundercloud screening charges: Implications for blue and gigantic jets*, „Journal of Geophysical Research”, Vol. 1015, No. A1.

- Rybka E., 1975, *Astronomia Ogólna*, Warszawa.
- Sedlak W., 1972, *Plazma fizyczna jako podstawa bioenergetyki*, „Roczniki Filozoficzne”, t. 20, nr 3.
- Siingh D., Singh A., Patel R., Singh R., Singh R., Veenadhari B., Mukherjee M., 2009, *Thunderstorms, lightning, sprites and magnetospheric whistler-mode radio waves*, „Surveys in Geophysics”, Vol. 29, No. 6.
- Singh M., Kumar A., Pathak P., 2017, *Review of various findings about sprites*, „Journal of Environment and Bio-Sciences”, Vol. 31, No. 2.
- Sokołowska D., 2009, *Piorunujące wrażenie*, „Neutrino”, nr 5.
- Su H., Hsu R., Chen A., Wang Y., Hsiao W., Lai W., Lee L., Sato M., Fukunishi H., 2003, *Gigantic jets between a thundercloud and the ionosphere*, „Nature”, Vol. 423, No. 6943.
- Surkov V., Hayakawa M., 2016, *Semianalytical Models of Sprite Formation from Plasma Inhomogeneities*, „Geomagnetism and Aeronomy”, Vol. 56, No. 6.
- Surkov V., Hayakawa M., 2020, *Progress in the Study of Transient Luminous and Atmospheric Events: A Review*, „Surveys in Geophysics”, Vol. 41, No. 5.
- Uman M., 1984, *Lightning*, New York.
- Valdivia J., Milikh G., Papadopoulos K., 1997, *Red sprites: Lightning as a fractal antenna*, „Geophysical Research Letters”, Vol. 24, No. 24.
- Wescott E., Sentman D., Heavner M., Hampton D., Vaughan Jr O., 1998, *Blue Jets: their relationship to lightning and very large hailfall, and their physical mechanisms for their production*, „Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics”, Vol. 60, No. 7–9.
- Wescott E., Sentman D., Stenbaek-Nielsen H., Huet P., Heavner M., Moudry D., 2001, *New evidence for the brightness and ionization of blue starters and blue jets*, „Journal of Geophysical Research”, Vol. 106, No. A10.

## Biogram

**Emilia Mykowska** – studentka studiów drugiego stopnia na Wydziale Chemii Uniwersytetu Gdańskiego na kierunku chemia oraz specjalności analityka i diagnostyka chemiczna. Zainteresowania autorki dotyczą radiosensybilizatorów biologicznych oraz astronomii.

**Emilia Mykowska** – a student of the second degree studies at the Faculty of Chemistry, University of Gdańsk, in the field of chemistry and specialisation in analytics and chemical diagnostics. Her interests include biological radiosensitizers and astronomy.