

Anna ODZIMEK 

Instytut Geofizyki Polskiej Akademii Nauk

**SUPERDARN W POLSCE - PERSPEKTYWY
DLA BADAŃ ATMOSFERY****SUPERDARN IN POLAND - OPPORTUNITY
FOR ATMOSPHERIC SCIENCE RESEARCH****Wstęp**

Atmosfera Ziemi jest gazową powłoką rozciągającą się od powierzchni planety do tysięcy kilometrów w przestrzeni wokółziemskiej. Wyróżniamy w niej kilka charakterystycznych warstw, przy czym stratyfikacja może zależeć od temperatury, składu chemicznego oraz stopnia jonizacji (np. Hargreaves 1992; Dworak 1994). Warstwa o wyższym stopniu jonizacji, czyli jonosfera pokrywa się z termosferą oraz częściowo leżącą niżej mezosferą i najwyższą egzosferą, będącymi warstwami termicznymi (rys. 1). Pomiedzy nimi leżą warstwy przejściowe. W dolnej atmosferze wyróżniamy troposferę, w której zachodzą zjawiska kształtujące pogodę; pozostałe warstwy zaliczają się do górnej atmosfery. Ponadto, atmosferę Ziemi przenika ziemskie pole magnetyczne o charakterze w przybliżeniu dipolowym i osi dipola przesuniętego o $12,5^\circ$ względem osi obrotu Ziemi wokół Słońca. Obszar oddziaływania ziemskiego pola magnetycznego w przestrzeni wokółziemskiej nazwany jest magnetosferą (np. Hargreaves 1992; Popielawska 1996; Wodnicka 1996).

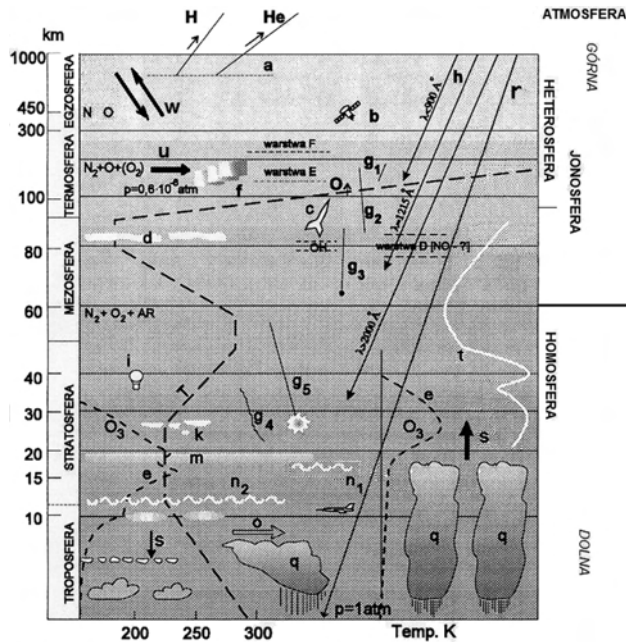
Docierające do Ziemi galaktyczne promieniowanie kosmiczne (np. Dorman 1991) jonizuje lekko atmosferę aż do powierzchni Ziemi, tworząc złożone jony atmosferyczne o ładunku dodatnim i ujemnym (Swider 1985), odpowiedzialne za przepływ prądu w atmosferze między powierzchnią (grunt, woda) a dobrze przewodzącymi warstwami atmosfery powyżej. Odpowiedzialne za jonizację atmosfery w warstwie od kilkudziesięciu kilometrów wzwyż jest promieniowanie słoneczne w zakresie UV oraz X wytwarzające elektrony oraz jony cząsteczkowe,

a w górnej części atomowe (dominują tlen i azot, od 1000 km wodór i hel). Korpuskularne promieniowanie ze Słońca wytwarza dodatkową jonizację w warstwie D jonosfery w czasie zaburzeń, takich jak rozbłyski protonowe. Powierzchnia Ziemi i jej dolna atmosfera oraz jonosfera tworzą obwód prądowy, tzw. globalny obwód elektryczny GOE (Odzimek 2019). Jonosfera Ziemi jest wspólną warstwą sprzęgającą dolną atmosferę z magnetosferą, obu pozostających pod silnym wpływem ogółu zjawisk pogody kosmicznej (Popielawska 2002). Pogoda kosmiczna nie jest również obojętna dla dolnej atmosfery, w tym elektrycznego obwodu globalnego, a także parametrów pogodowych (Tinsley 2000). Odwrotnie, zjawiska pogodowe i inne mające miejsce w troposferze lub pochodzące od nich (także i wyżej w stratosferze lub mezosferze), np. promieniowanie wyładowań atmosferycznych czy atmosferyczne fale grawitacyjne, propagują się i oddziałują z materią jonosferyczną. Omówienie nawet podstawowych pojęć i zjawisk dynamicznych oraz elektrodynamicznych wynikających ze sprzężenia atmosfery, jonosfery i magnetosfery, pozostających pod wpływem Słońca i materii międzyplanetarnej, wykracza poza zakres tego artykułu – od kilku dekad jest to obiekt szerokich i wielodyscyplinarnych badań przy pomocy wielu instrumentów naziemnych i satelitarnych. Niniejsza praca poświęcona jest tematyce naziemnej sieci radarów SuperDARN i jej możliwościach w zakresie badań atmosferycznych, ze szczególnym uwzględnieniem elektryczności atmosfery.

SuperDARN

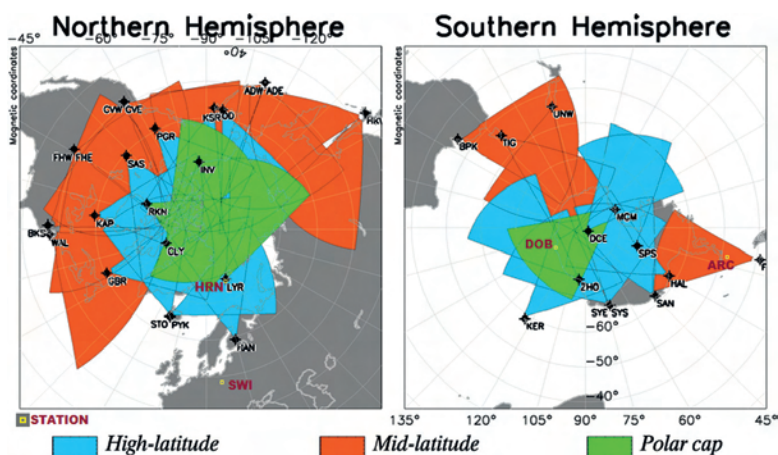
Fale radiowe w paśmie wysokich częstotliwości (HF) propagują się i rozpraszają w jonosferze, co oprócz łączności wykorzystuje się również do jej badania za pomocą jonosond i radarów. Szczególną infrastrukturą badawczą w tym zakresie jest światowa sieć pod nazwą SuperDARN, czyli „Super Dual Auroral Radar Network”. Jest to sieć radarów HF wykorzystujących zjawisko rozpraszania koherentnego¹ do badania górnych warstw atmosfery i jonosfery (Greenwald i in. 1995; Chisham i in. 2007; Lester 2008). SuperDARN miała początek w latach 1990 i pozostaje w ciągłym rozwoju wysiłkiem instytucji badawczych wielu państw. Od roku 2005 powstaje, w uzupełnieniu do polarnego, pierścień radarów średnich szerokości tj. niższych od 55° szerokości magnetycznej, umożliwiający badanie większego obszaru jonosfery, a także sprzężonej z nią magnetosfery, w tym dużych zaburzeń sięgających niższych szerokości wokół biegunów magnetycznych (Lester 2013; Nishitani i in. 2019). Nowy radar, który mógłby powstać na obszarze Polski, uzupełniałby pierścień radarów średnich szerokości (rys. 2).

¹ Do badania jonosfery stosuje się również radary rozpraszania niekoherentnego (ang. *incoherent scatter radar*) o większej mocy i działające w paśmie bardzo wysokich częstotliwości VHF, np. europejski radar EISCAT (Rietveld i in. 2016).



Rys. 1. Budowa ziemskiej atmosfery – adaptacja rysunku z książki Dworaka (1994): a – poziom dyssypacji, b – promieniowanie słoneczne, c – rakiety badawcze, d – obłoki srebrzyste, e – profile zawartości ozonu, T – rozkład temperatury, f – zorze polarne, $g_{1,2,3}$ – meteory szybkie słabe; szybkie; powolne, g_4 – ślady pyłowe, g_5 – bolidy, h – przenikanie promieniowania nadfioletowego o różnej długości fali, i – sondy radiowe, j – prądy strumieniowe, k – obłoki perłowe (chmury stratosferyczne), m – warstwa aerozolu stratosferycznego, $n_{1,2}$ – tropopauza biegunowa; równikowa, o – podzwrotnikowe prądy strumieniowe, p – profil ciśnienia q – obłoki burzowe, r – promieniowanie kosmiczne, s – atmosferyczny prąd elektryczny, t – fale planetarne, u, w – jonosferyczne prądy elektryczne; po lewej stronie na osi pionowej stratyfikacja atmosfery względem temperatury, po prawej – stratyfikacja względem składu, stopnia jonizacji, położenia – strefy wpływu; symbolami cząsteczkowymi oznaczone są główne składniki chemiczne atmosfery

Fig. 2. Earth's atmospheric structure – drawing adapted from Dworak (1994): a – level of dissipation, b – solar radiation, c – research rockets, d – noctilucent clouds, e – ozone concentration profiles, T – temperature distribution, f – polar aurora, $g_{1,2,3}$ – fast, weak; fast; slow meteors, g_4 – dust traces, g_5 – fireballs, h – penetration of ultraviolet radiation at different wavelengths, i – radio probes, j – jet currents, k – stratospheric clouds, m – stratospheric aerosol layer, $n_{1,2}$ – polar; equatorial tropopause, o – subtropical jet currents, p – pressure profile, q – thunderstorm clouds, r – cosmic rays, s – atmospheric electric current, t – planetary waves, u, w – ionospheric electric currents; on the left vertical axis stratification with respect to temperature, on the right – stratification with respect to composition or degree of ionization, or location – sphere of influence; atomic symbols refer to main chemical atmospheric constituents



Rys. 2. Mapa lokalizacji i pól widzenia sieci radarów (akronimy czarne) SuperDARN na dzień 1 X 2019 r., wygenerowana za pomocą aplikacji na stronie SuperDARN <http://vt.superdarn.org/tiki-index.php?page=radarFoV>; pola widzenia radarów pokolorowane są według szerokości lokalizacji i zastosowania: wysokich szerokości (niebieskie), czapy polarnej (zielone) i średnich szerokości (czerwony); naniesiono także lokalizacje polskich stacji elektryczności atmosfery (akronimy brązowe) w Świdrze (SWI), Polskiej Stacji Polarnej im. S. Siedleckiego w Hornsundzie (HRN), Stacji Antarktycznej im. H. Arctowskiego (ARC) oraz dodatkowo Stację Antarktyczną im. A.B. Dobrowolskiego (DOB)

Fig. 2. Map of locations and fields of view of the SuperDARN radars (black acronyms) as of Oct 1, 2019, generated using the „field of view” tool on the SuperDARN website <http://vt.superdarn.org/tiki-index.php?page=radarFoV>; the radar fields of view are coloured according to location latitude and usage: high latitudes (blue), polar cap (green) and middle latitudes (red); marked are also locations of Polish atmospheric electricity stations (brown acronyms) in Świder (SWI), S. Siedlecki Polar Station in Hornsund (HRN), H. Arctowski Antarctic Station (ARC), and additionally A.B. Dobrowolski Antarctic Station (DOB)

Radary SuperDARN wykorzystują rozpraszanie fal radiowych na nieregularnościach jonosferycznych wielkości dekametrowej, układających się wzdłuż linii pola magnetycznego Ziemi. Radar nadaje i odbiera echo sygnału po rozproszeniu w obszarze atmosfery oraz od powierzchni Ziemi, gdy wiązka fal załamała się w jonosferze, przy czym może nastąpić więcej takich odbić i ech (np. Góral 2019). Zasięg radaru wynosi nawet 3000 km. Obserwowane są echa fal radarowych po odbiciu od powierzchni gruntu, morza, zjonizowanej materii jonosferycznej lub śladów jonizacji po przelocie meteoroidu albo kryształków lodu w mezosferze. W szczególności echa jonosferyczne służą do wyznaczania dryfu plazmy jonosferycznej, co ma znaczenie przy badaniu zjawiska tzw. konwekcji jonosferycznej będącej wielkoskalowym ruchem horyzontalnym plazmy

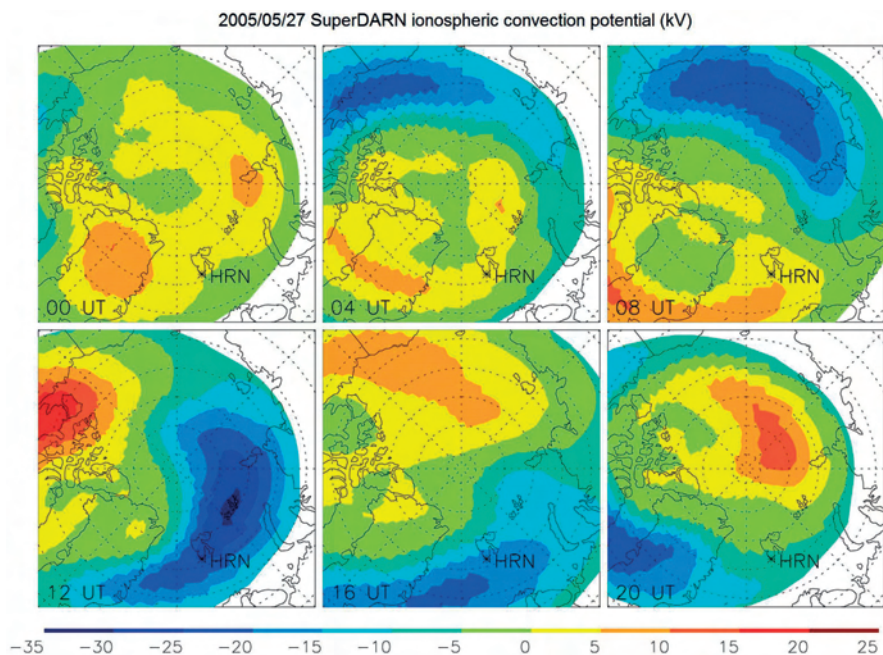
jonosferycznej i magnetosferycznej, a także inne – w tym przemieszczające się zaburzenia jonosferyczne (Nishitani i in. 2019).

Konwekcja jonosferyczna

Magnetosfera Ziemi oddziałuje bezpośrednio z wiatrem słonecznym i międzyplanetarnym polem magnetycznym (MPM), w wyniku czego po rekoneksji pola MPM i ziemskiego powstaje zjawisko tzw. konwekcji magnetosferycznej, tj. charakterystycznego obiegu plazmy w obszarach magnetycznych polarnych (Cowley, Owen 1989). Ów obieg związany jest z istnieniem pola elektrycznego i różnicy potencjałów czaszy polarnej (ang. *cross polar cap potential*) na kierunku zmierzch-świt (ang. *dawn-dusk*) w charakterystycznym rozkładzie potencjału elektrycznego w formie dodatnich i ujemnych zatok potencjału jonosfery w rejonach polarnych (rys. 3). Konwekcja wymusza także powstanie układu prądów tzw. FAC (ang. *field-aligned currents*), inaczej prądów Birkelanda, powstających w odpowiedzi na ruch plazmy w polu magnetycznym. Z powodu dużej przewodności elektrycznej wzdłuż linii pola magnetycznego i „mapowania”, tj. przenoszenia się pól elektrycznych, zjawisko ma odzwierciedlenie w jonosferze jako konwekcja jonosferyczna (np. Wernik 1996; Milan 2015).

W szerokiej tematyce badań dotyczących warunków w atmosferze i przestrzeni wokółziemskiej, a możliwych dzięki infrastrukturze SuperDARN, zjawisko konwekcji jonosferycznej pozostaje głównym zagadnieniem badawczym (Chisham i in. 2007; Lester 2013; Nishitani i in. 2019). Wykorzystując założenie spełnienia kryteriów plazmy namagnetyzowanej w głównej warstwie F jonosfery (np. Hargreaves 1992; Kelley 2009), tj. gdy prędkość plazmy daje się wyrazić iloczynem wektorowym pola elektrycznego i magnetycznego, można z obserwacji radarowych dopplerowskich składowych prędkości plazmy i empirycznego modelu pola geomagnetycznego wyznaczać rozkład pola elektrycznego. W praktyce wyznacza się raczej rozkład potencjału elektrycznego za pomocą oryginalnej techniki opracowanej przez badaczy związanych z SuperDARN, tzw. „Map Potential” (Ruohoniemi, Baker 1998) lub unowocześnionej techniki „SuperDARN Assimilative Mapping” (Cousins i in. 2013). Uruchomienie radarów SuperDARN na średnich szerokościach geomagnetycznych pozwoliło na badania konwekcji na zwiększonym obszarze, w tym intensywne studia przepływu plazmy pod wpływem polaryzacyjnego pola elektrycznego w strefie subzorzowej, tzw. SubAuroral Polarisation Streams (przegląd badań w Nishitani i in. 2019).

Analiza konwekcji jonosferycznej może być bezpośrednio wykorzystana w badaniach atmosfery z uwagi na elektrodynamiczne sprzężenie przez jonosferę z dolną atmosferą i jej obwodem elektrycznym (Michnowski 1998), choć obwód globalny GOE do tej pory nie jest wymieniany jako obecny lub potencjalny temat badawczy SuperDARN (Nishitani i in. 2019, rys. 7 tamże).



Rys. 3. Przykład rozkładu potencjału elektrycznego konwekcji jonosferycznej w okolicach geograficznych biegunowych północnych, wyznaczonego techniką „Map Potential” na podstawie obserwacji radarami SuperDARN dla dnia 27 maja 2005 r. w terminach 00, 04, 08, 12, 16 i 20 UT; gwiazdką zaznaczone jest położenie Polskiej Stacji Polarnej Hornsund (HRN) na wyspie Spitsbergen w archipelagu Svalbard (Norwegia); dane oraz część procedur IDL przetwarzających dane uzyskane dzięki Uniwersytetowi z Leicester w Wielkiej Brytanii w roku 2011

Fig. 3. An example of the distribution of the electric potential of ionospheric convection in northern geographic polar region, calculated on the basis of the „Map Potential” technique and observations with SuperDARN radars, on 27 May 2005 at 00, 04, 08, 12, 16 and 20 UT; the location of the Polish Polar Station Hornsund (HRN) on Spitsbergen in the Svalbard archipelago, Norway, is marked with an asterisk; data and part of the IDL procedures that process the data obtained through the University of Leicester, United Kingdom in 2011

Wybrane tematy badań przy użyciu SuperDARN związanych z atmosferą

Dotychczasowe tematy badawcze SuperDARN bezpośrednio związane z fizyką atmosfery obejmują głównie analizę ech mezosferycznych oraz ech jonosferycznych i naziemnych będących sygnaturami oddziaływań atmosferycznej materii neutralnej ze zjonizowaną w jonosferze ziemskiej. Nie jest wykluc-

zione, że rozwój sieci SuperDARN przyczyni się do nowych kierunków badań w dziedzinie fizyki atmosfery i ogólnie fizyki Ziemi, co zaczyna mieć miejsce biorąc pod uwagę tematy najnowszych problemów omawianych na corocznym spotkaniu naukowców i techników działających z SuperDARN, jakim jest SuperDARN Workshop². Rozszerzenie lokalizacji radarów na szerokości średnie do badania obszarów subzorzowych i poniżej tej strefy, niewątpliwie jest źródłem rozwoju i poszerzenia problematyki badawczej SuperDARN (Nishitani i in. 2019).

Echa mezosferyczne

Znane są dwa rodzaje radarowych ech mezosferycznych, z których jedno pierwotnie nosiło nazwę letniego echa mezosferycznego (PMSE), które obserwowano na szerokościach polarnych w okresie letnim. Z czasem odkryto kolejne rodzaje ech mezosferycznych i nazwano je polarnymi mezosferycznymi echemi zimowymi, PMWE (Kirkwood 2007). PMSE pochodzą z mezosfery na wysokości około 85 km i pojawiają się w okresie od maja do sierpnia na półkuli północnej (Kelley 2009). Zostały one zaobserwowane przez radary VHF na półkuli północnej i południowej oraz na szerokim zakresie szerokości geograficznych, aż do średnich szerokości geograficznych MSE (Rapp, Lübken 2004). Wykazano, że pomiary SuperDARN można również stosować do obserwacji PMSE (Hosokawa i in. 2005). Identyfikacja ech mezosferycznych nie jest jednak łatwa w pomiarach SuperDARN z powodu niejednoznaczności w porównaniu z innymi bliskimi źródłami rozpraszania wstecznego, jakimi są nieregularności w warstwie E jonosfery (Ponomarenko i in. 2016). W związku z tym zgodność rzeczywistego rozkładu występowania ech mezosferycznych i zidentyfikowanego w danych SuperDARN pozostaje niewystarczająca (Nishitani i in. 2019).

Fale planetarne, oddziaływanie atmosfery neutralnej ze zjonizowaną

Sygnatury fal planetarnych, w tym atmosferycznych fal grawitacyjnych, widoczne są w sygnale z radarów SuperDARN wywołanym przez efekty jonosferyczne zwane przemieszczającymi się zaburzeniami jonosferycznymi, w skrócie TIDs – *Travelling Ionospheric Disturbances* (Hunsucker 1982; Hocke, Schlegel 1996), w klasie tych zjawisk zwanymi MSTID – średnioskalowych TID obserwowanych przez SuperDARN w porze dziennej (np. Ishida i in. 2008; Grocott i in. 2013; Frissel i in. 2014). Przemieszczające się zaburzenia jonosferyczne, a z nimi tematyka atmosferycznych fal grawitacyjnych (Samson i in.

² SuperDARN Workshop http://vt.superdarn.org/tiki-read_article.php?articleId=313

1989), pozostają jednym z głównych tematów badań SuperDARN. Aktualny przegląd wyników badań nad tymi zjawiskami został ostatnio dokonany przez Nishitani i in. (2019). SuperDARN również zajmuje się badaniem oddziaływań jonów i cząstek neutralnych (wpływ na prędkość jonów, kierunek ruchu cząstek neutralnych) w jonosferze (np. Joshi i in. 2015; Yakymenko i in. 2015), wiatru mezosferycznego (np. Hibbins i in. 2011).

Inne zagadnienia geofizyczne i klimatyczne

Pojawiają się również inne tematy związane z geofizyką, np. efekty jonosferyczne po dużych trzęsieniach ziemi (Nishitani i in. 2011), monitorowanie stanu powierzchni oceanów, zaniku pokrywy lodowej w obszarach polarnych, zjawisk pogodowych jak huragany i burze tropikalne, a także zjawisk pogody kosmicznej, np. wpływ rozbłysków słonecznych na niższe warstwy jonosfery (Berngardt i in. 2018). Monitorowanie wielkoskalowej dynamiki atmosfery, tj. w rozszerzonej wersji sieci radarów w pierścieniu polarnym i średnich szerokości, być może w przyszłości pozwala na połączenie go z monitoringiem zmian klimatu.

Sprężenie z elektrycznym obwodem globalnym Ziemi

Problem wpływu magnetosfery na główne parametry elektryczne atmosfery, tj. pionową, dominującą składową pola elektrycznego (E_z) lub gęstości prądu (J_z), został zidentyfikowany teoretycznie (Park 1976) i eksperymentalnie w latach 1960-1980 (np. Olson i in. 1971; Bandilet i in. 1986), następnie podjęto pierwsze próby uwzględnienia go w modelach GOE (Hays, Roble 1979; Roble, Hays 1979). Wpływ konwekcji jest nazywany w badaniach nad GOE jego generatorem magnetosferycznym z powodu dodatkowego potencjału nakładanego na jonosferę przez konwekcję, dodatniego lub ujemnego, od kilku do kilkudziesięciu kV do globalnego dodatniego potencjału ~ 250 kV jonosfery względem Ziemi, wynikającego z działania obwodu dolnej jonosfery (np. Roble 1985; Morozov, Troshichev 2008; Lucas i in. 2015; Odzimek 2019). Potencjał jonosferyczny jest więc modyfikowany przez konwekcję jonosferyczną, co może bezpośrednio wpływać na gęstość prądu elektrycznego i pionowe pole elektryczne atmosfery w rejonie jej oddziaływania – dotyczy to głównie obszarów polarnych magnetycznych (np. Apsen 1988; Raina 1991; Sheftel 1991; Michnowski 1998). Na półkuli północnej w obszarach subpolarnych (subzorzowych) badano wpływ elektrodzeta zorzowych na pole elektryczne obserwowane przy powierzchni Ziemi. Stwierdzono występowanie zaburzeń dodatnich E_z (tzn. pole wzrastało) lub ujemnych (pole malało) w odmiennych lokalizacjach miejsca obserwacji

względem położenia zorzowego elektrodżetu (Apsen i in. 1988). W następnych dekadach wpływ konwekcji jonosferycznej na pionowe pole E_z w czasie tzw. „pięknej pogody”, tj. przy minimum wpływów lokalnych, obserwowano m.in. na stacjach antarktycznych (Burns i in. 1995, 2012; Tinsley i in. 1998; Frank-Kamenetsky i in. 2001; Corney i in. 2003; Victor i in. 2015).

Technika radarów SuperDARN do tej pory nie była zbyt szeroko używana w podobnych badaniach, podczas gdy, jak już wspomniano, mapy potencjału jonosferycznego są jednym ze standardowych produktów z danych sieci SuperDARN. Najczęściej z wykorzystaniem map potencjału jonosferycznego z SuperDARN badano skutki nagłych zaburzeń magnetosfery i jonosfery oraz możliwy wpływ na E_z w indywidualnych przypadkach (np. Kleimenova i in. 2010, 2012; Frank-Kamenetskii i in. 2012; Kubicki i in. 2014; Victor i in. 2015), wykorzystując pojedyncze mapy potencjału. Lukianova i in. (2011) porównywali statystyczny wpływ konwekcji na pole elektryczne w południowej czaszy polarnej (stacja Vostok na płaskowyżu antarktycznym) według różnych modeli, w tym map potencjału SuperDARN. Wykazano korelację o współczynniku około 0.8 przebiegów potencjału konwekcji i pola oraz jej zmiany przy zmianach składowej MPM B_y wpływającej na asymetrię zatok potencjału konwekcji jonosferycznej. Odzimek i in. (2011) badali statystyczny wpływ potencjału konwekcji na podstawie SuperDARN na pionowe pole elektryczne w Hornsundzie na Spitsbergenie (północna czapa polarna) w okresie słabo zaburzonym. Otrzymano słabą korelację przebiegów czasowych, natomiast przy zestawieniu wszystkich wartości z różnych okresów okazało się, że średnio zmiana rzędu ~ 10 kV potencjału elektrycznego konwekcji jonosferycznej nad stacją w Hornsundzie powoduje zmianę pola elektrycznego atmosferycznego o 10%.

Należy przy tym pamiętać, że szczególnie starsze przypadki z lat 2000-2005, w czasie których działał tylko polarny pierścień radarów SuperDARN, mogły być porównywane z zanizonym potencjałem konwekcji. Rozszerzenie lokalizacji radarów na szerokości średnie daje możliwość pełniejszego i dokładniejszego odwzorowania mapy potencjału konwekcji jonosferycznej. Na przykład według Thomasa i Shepherd (2018) różnice w wynikach wartości różnicy potencjału w czaszy polarnej, przy SuperDARN rozszerzonym o radary zlokalizowane na średnich szerokościach, od modelu w jego starszej konfiguracji sięgają nawet 40%. Uzyskany wynik jest ważnym argumentem dla kontynuowania tych badań oraz rozszerzenia zasięgu radarów SuperDARN, o czym przekonano się już po powstaniu pierwszego radaru średnich szerokości na Wyspie Wallops w USA (Baker i in. 2007), a ostatnio potwierdza to analiza Walach i Grocott (2019).

Powstanie nowych radarów w Europie rozszerzyłoby możliwości wykorzystania techniki map potencjału przy wykorzystaniu obserwacji w regionach nieobjętych dotychczas pomiarami radarowymi, a pozostają one wciąż dużym obszarem od strony północnej Europy i Azji (rys. 1). Przy większej gęstości radarów możliwa jest również lepsza dokładność obliczeń parametrów pla-

zmy jonosferycznej, w tym potencjału elektrycznego na obszarze, na którym nakładają się pola widzenia radarów. Rozszerzenie zasięgu sieci SuperDARN było też związane z potrzebą obserwacji silniejszej i rozszerzającej się konwekcji (i owalu zorzowego) ku średnim szerokościom magnetycznym przy silnych zaburzeniach, jak burze magnetyczne po wyrzutach koronalnych ze Słońca (Ruohoniemi i in. 2001; Walach, Grocott 2019). Ma to bezpośrednie konsekwencje w potencjalnym rozwoju badań elektryczności atmosfery i GOE, gdyż wpływ sprzężenia wiatru słonecznego z magnetosferą i jonosferą na pole atmosferyczne jest obserwowany w czasie burz magnetycznych także na średnich szerokościach (Nikiforova i in. 2005; Kleimenova i in. 2008; Michnowski 1996; Michnowski i in. 2014). Nie jest jednak do końca wyjaśniony mechanizm tego wpływu i główne czynniki powodujące zmiany parametrów elektrycznych. Odzworowanie bardziej realistycznego obrazu i ewolucji konwekcji jonosferycznej w czasie burz magnetycznych oraz w czasie spokojnym może być pomocne w rozwiązaniu tego problemu, jak i potwierdzeniu lub rewizji dotychczasowych wyników.

Perspektywy krajowych badań elektryczności atmosfery z użyciem SuperDARN

Badania krajowe, oprócz wielu korzyści naukowych i technicznych płynących z udziału w projekcie SuperDARN, mogą zostać wzbogacone lub podjęte dzięki możliwości korzystania z danych sieci SuperDARN także w dziedzinie fizyki atmosfery w wymienionych wyżej problemach badawczych (Popielawska i in. 2011).

Na uwagę zasługuje temat elektryczności atmosfery i jej globalnego obwoadu, gdyż w tej dziedzinie w Polsce od lat prowadzone są badania w jednostkach krajowych, własne i we współpracy zagranicznej, w tym nad generatorem magnetosferycznym i wpływem pogody kosmicznej (Michnowski i in. 1991; Kłos i in. 2009). Modelowanie wpływu tego generatora na dolną atmosferę można zastosować w nowoczesnych modelach GOE, takich jak model EGA-TEC (Odzimek i in. 2010). Model ten nadal wymaga włączenia układu prądu magnetosfery-jonosfery w system prądów dolnej atmosfery, aby realistycznie modelować zjawisko GOE, co można uzyskać wykorzystując dane SuperDARN (Odzimek, Lester 2009). W zakresie analizy indywidualnych przypadków unowocześnionym podejściem byłoby porównanie z obserwowanymi parametrami elektryczności atmosfery uaktualnionych przebiegów potencjału konwekcji otrzymanych za pomocą sieci SuperDARN, przy nowej konfiguracji sieci z pierścieniem radarów na średnich szerokościach, w przyszłości potencjalnie z nowym radarem europejskim, którego obecnie brakuje.

W zakresie obserwacji elektryczności atmosfery wciąż prowadzone są pomiary w obserwatoriach Instytutu Geofizyki Polskiej Akademii Nauk (PAN):

Polskiej Stacji Polarnej in. Stanisława Siedleckiego w Hornsundzie ($77,00^{\circ}\text{N}$, $15,55^{\circ}\text{E}$, szerokość geomagnetyczna $\sim 74^{\circ}\text{N}$) na Spitsbergenie w archipelagu Svalbard (Norwegia) oraz w Polsce w Świdrze pod Warszawą ($52,12^{\circ}\text{N}$, $21,24^{\circ}\text{E}$, szer. geomag. $\sim 50^{\circ}\text{N}$). Od końca 2012 roku przez kilka ostatnich lat pomiary pola elektrycznego prowadzono także w Stacji Antarktycznej im. Henryka Arctowskiego Instytutu Biologii i Biofizyki PAN ($62,16^{\circ}\text{S}$, $58,47^{\circ}\text{W}$, szer. geomag. $\sim 52^{\circ}\text{S}$). Stacja im. Arctowskiego leży na Wyspie Króla Jerzego w archipelagu Szetlandów Południowych, jednak jej szerokość geomagnetyczna jest zbliżona do Świdra, tj. w zakresie średnich (Kubicki i in. 2016, patrz także rys. 1). Szczególnie w przypadku Świdra, jak i Arctowskiego, możliwe byłyby badania wpływu konwekcji jonosferycznej przy dużych zakłóceniach magnetosfery, takich jak burza magnetyczna (ang. *solar storm* lub *magnetic storm*) po wyrzucie plazmy koronalnej ze Słońca w kierunku Ziemi (Bojanowska 2005). Zrozumienie wpływu konwekcji na pole elektryczne w lokalizacji takich jak Hornsund również wymaga dalszych studiów, mimo że pewne prawidłowości zachowania pola elektrycznego w czasie subburz zostały zidentyfikowane (Michnowski i in. 1991; Kleimenova i in. 2011, 2012). Pokazała to analiza wykonana w pracy Franka-Kamenetskiego i in. (2012), w której wyjaśniono brak korelacji pola elektrycznego z potencjałem konwekcji w przypadku Hornsundu, wskutek położenia poza lejem (kaspem) polarnym, pod obszarem oddziaływania elektrodzetań zorzowych, dyskretnych prądów FAC i na granicy zatok o różnych znakach potencjału, co nie zawsze dokładnie odzwierciedla model konwekcji jonosferycznej.

Nowo rewitalizowana Stacja Antarktyczna im. A.B. Dobrowolskiego Instytutu Geofizyki PAN, leżąca geograficznie w Antarktydzie wschodniej w Oazie Bungera ($66,27^{\circ}\text{S}$ $100,75^{\circ}\text{E}$, szer. geomag. $\sim 74^{\circ}\text{S}$), a co do szerokości magnetycznej podobnie jak Hornsund, byłaby cenną lokalizacją do wymienionych badań (Odzimek 2019), także pod kątem różnic występujących w konwekcji na półkuli północnej i południowej. Prowadzenie takich badań raczej wymagałoby obecności personelu nadzorującego pomiary elektryczne i meteorologiczne na stacji, czego na razie nie ma w planach rewitalizacji (Lewandowski 2019), choć zdarzyły się już próby prowadzenia automatycznych i autonomicznych rejestracji elektryczności atmosfery na Antarktydzie (Odzimek 2019). Nowa całoroczna stacja antarktyczna wymagałaby ogromnych inwestycji i środków.

Należy w tym miejscu podkreślić, że oprócz Świdra wspomniane wyżej polarne krajowe stacje pomiarowe elektryczności atmosfery, a także stacja Dobrowolskiego, znajdują się w polu widzenia radarów SuperDARN (rys. 1). W przypadku krajowych stacji polarnych jest możliwość sięgnięcia po te dane, natomiast uwagi wymagają pomiary naziemne, w przypadku Świdra – brak europejskich radarów znacznie ogranicza możliwości wykorzystania tego niezwykłego monitoringu pogody kosmicznej, jaki daje sieć SuperDARN. Natomiast poza tą siecią, będącą infrastrukturą naziemną, możliwości badawcze

otworzyły się także dzięki projektowi AMPERE (*Active Magnetosphere and Planetary Electrodynamics Response Experiment*), który dostarcza wyników rozkładu przestrzennego prądów Birkelanda na podstawie pomiarów z magnetometrów na pokładzie konstelacji satelitów telekomunikacyjnych Iridium (Anderson i in. 2014; Milan i in. 2017), wykorzystano w pracy Kleimenova i in. (2017).

Podsumowanie

Radary SuperDARN są ważnym i skutecznym narzędziem w badaniu górnych warstw atmosfery, w tym jej oddziaływaniem z wiatrem słonecznym oraz innych wpływów pogody kosmicznej. Związane z tym zjawiska wpływają również na obwód elektryczny dolnej atmosfery. Postulujemy, by problemy sprzężenia obwodów elektrycznych dolnej atmosfery, jonosfery i magnetosfery ściślej przynależały do tematyki badawczej uprawianej przy pomocy sieci radarów SuperDARN. Możliwości w tym względzie dają prowadzone badania w kraju i we współpracy zagranicznej. Dodatkowy radar umiejscowiony na średnich szerokościach w Europie byłby cennym uzupełnieniem tej sieci radarów potrzebnym dla rozwoju geofizyki, w szczególności fizyki atmosfery i elektryczności atmosferycznej, w kraju i na świecie.

Podziękowania

Dane potencjału elektrycznego SuperDARN zobrazowane na rysunku 4 oraz możliwość wykorzystania części procedur numerycznych je przetwarzających uzyskano dzięki Uniwersytetowi w Leicester w Wielkiej Brytanii w roku 2011. Szczególne podziękowania autor składa prof. Markowi Lesterowi oraz dr. Adrianowi Grocottowi.

L i t e r a t u r a

- Anderson B.J., Korth H., Waters C.L., Green D.L., Merkin V.G., Barnes R.J., Dyrud L.P., 2014, Development of large-scale Birkeland currents determined from the Active Magnetosphere and Planetary Electrodynamics Response Experiment, *Geophysical Research Letters*, 41 (9), 3017-3025, DOI: 10.1002/2014GL059941
- Apsen A.G., Kanonidi K.D., Chernysheva S.P., Chetaev D.N., Scheftel V.M., 1988, *Magnetosfernye efekty v atmosfernom elektrichestve*, Publications of the Academy of Sciences USSR, IZMIRAN, Nauka, Moskwa, 149 s.
- Baker J.B.H., Greenwald R.A., Ruohoniemi J.M., Oksavik K., Gjerloev J.W., Paxton L.J., Hairston M.R., 2007, Observations of ionospheric convection from the Wallops Super-

- DARN radar at middle latitudes, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 112 (A1), DOI: 10.1029/2006JA011982
- Bandilet O.I., Kanonidi Kh.D., Chernysheva S.P., Sheftel V.M., 1986, Efekty magnitosfernych subbur' v atmosfernom elektricheskom pole, *Geomagnetizm i Aeronomiya*, 26 (1), 159-160
- Berngardt O.I., Ruohoniemi J.M., Nishitani N., Shepherd S.G., Bristow W.A., Miller E.S., 2018, Attenuation of decameter wavelength sky noise during X-ray solar flares in 2013-2017 based on the observations of midlatitude radars, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 173, 1-13, DOI: 10.1016/j.jastp.2018.03.022
- Bojanowska M., 2005, Niezwykłe silne burze pogody kosmicznej: zorze polarne nad Polską, *Przegląd Geofizyczny*, 50 (3-4), 219-227
- Burns G.B., Hesse M.H., Parcell S.K., Malachowski S., Cole K.D., 1995, The geoelectric field at Davis station, Antarctica, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 57 (14), 1783-1797, DOI: 10.1016/0021-9169(95)00098-M
- Burns G.B., Tinsley B.A., Frank-Kamenetsky A.V., Troshichev O.A., French W.J.R., Klekociuk A.R., 2012, Monthly diurnal global atmospheric circuit estimates derived from Vostok electric field measurements adjusted for local meteorological and solar wind influences, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 69 (6), 2061-2082, DOI: 10.1175/JAS-D-11-0212.1
- Chisham G., Lester M., Milan S.E., Freeman M.P., Bristow W.A., Grocott A., McWilliams K.A., Ruohoniemi J.M., Yeoman T.K., Dyson P.L., Greenwald R.A., Kikuchi T., Pinnock M., Rash J.P.S., Sato N., Sofko G.J., Villain J.-P., Walker A.D.M., 2007, A decade of the Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN): scientific achievements, new techniques and future directions, *Surveys in Geophysics*, 28 (1), 33-109, DOI: 10.1007/s10712-007-9017-8
- Corney R.C., Burns G.B., Michael K., Frank-Kamenetsky A.V., Troshichev O.A., Bering E.A., Papitashvili V.O., Breed A.M., Duldig M.L., 2003, The influence of polar-cap convection on the geoelectric field at Vostok, Antarctica, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 65 (3), 345-354, DOI: 10.1016/S1364-6826(02)00225-0
- Cousins E.D.P., Matsuo T., Richmond A.D., 2013, SuperDARN assimilative mapping, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 118 (12), 7954-7962, DOI: 10.1002/2013JA019321
- Cowley S.W.H., Owen C.J., 1989, A simple illustrative model of open flux tube motion over the dayside magnetopause, *Planetary and Space Science*, 37 (11), 1461-1475, DOI: 10.1016/0032-0633(89)90116-5
- Dorman L.I., 1991, Cosmic rays and atmospheric electricity, [w:] *Proceedings of the International Workshop on Global Atmospheric Electricity Measurements*, S. Michnowski, L.H. Ruhnke (red.), Publications of the Institute of Geophysics Polish Academy of Sciences: Physics of the Atmosphere Series, D-35 (238), 215-221
- Dworak T.Z., 1994, *Fizyka środowiska atmosferycznego*, Wydawnictwo Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica, Kraków, 111 s.

- Frank-Kamenetsky A.V., Kotikov A.L., Kruglov A.A., Burns G.B., Kleimenova N.G., Kozyreva O.V., Kubicki M., Odzimek A., 2012, Variations in the near-surface atmospheric electric field at high latitudes and ionospheric potential during geomagnetic perturbations, *Geomagnetism and Aeronomy*, 52 (5), 629-638, DOI: 10.1134/S0016793212050064
- Frank-Kamenetsky A., Troshichev O., Burns G., Papitashvili V., 2001, Variations of the atmospheric electric field in the near-pole region related to the interplanetary magnetic field, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 106 (A1), 179-190, DOI: 10.1029/2000JA900058
- Frissell N.A., Baker J.B.H., Ruohoniemi J.M., Gerrard A.J., Miller E.S., Marini J.P., West M.L., Bristow W.A., 2014, Climatology of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed by the midlatitude Blackstone SuperDARN radar, *Journal of Geophysical Research – Space Physics* 119 (9), 7679-7697, DOI: 10.1002/2014JA019870
- Góral G., 2019, SuperDARN radars – Introduction, [w:] *Book of extended abstracts, “Electromagnetic ULF/ELF Fields on Earth and in Space” Conference*, Warsaw, Poland, 3-5 July 2019, Publications of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, 425 (M-32), 73-81, DOI: 10.25171/InstGeoph_PAS_Publs-2019-015
- Greenwald R.A., Baker K.B., Dudeney J.R., Pinnock M., Jones T.B., Thomas E.C., Villain J.-P., Cerisier J.-C., Senior C., Hanuise C., Hunsucker R.D., Sofko G., Koehler J., Nielsen E., Pellinen R., Walker A.D.M., Sato N., Yamagishi H., 1995, DARN/SuperDARN. A global view of the dynamics of high-latitude convection, *Space Science Reviews*, 71 (1-4), 761-796, DOI: 10.1007/BF00751350
- Grocott A., Hosokawa K., Ishida T., Lester M., Milan S.E., Freeman M.P., Sato N., Yuki-matu A.S., 2013, Characteristics of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed near the Antarctic Peninsula by HF radar, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 118 (9), 5830-5841, DOI: 10.1002/jgra.50515
- Hargreaves J.K., 1992, *The solar-terrestrial environment*, Cambridge University Press, 420 s.
- Hays P., Roble R., 1979, Coupling of magnetospheric electrical effects into the Global Atmospheric Electrical Circuit, [w:] *Quantitative modeling of magnetospheric processes*, W.P. Olson (red.), American Geophysical Union, 326-337
- Hibbins R.E., Freeman M.P., Milan S.E., Ruohoniemi J.M., 2011, Winds and tides in the midlatitude Southern Hemisphere upper atmosphere recorded with the Falkland Islands SuperDARN radar, *Annales Geophysicae*, 29 (11) 1985-1996, DOI: 10.5194/angeo-29-1985-2011
- Hocke K., Schlegel K., 1996, A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982-1995, *Annales Geophysicae*, 14 (9), 917-940, DOI: 10.1007/s00585-996-0917-6
- Hosokawa K., Ogawa T., Arnold N.F., Lester M., Sato N., Yukimatu A.S., 2005, Extraction of polar mesosphere summer echoes from SuperDARN data, *Geophysical Research Letters*, 32 (12), DOI: 10.1029/2005GL022788
- Hunsucker R.D., 1982, Atmospheric gravity waves generated in the high latitude ionosphere: a review, *Reviews of Geophysics – Space Physics*, 20 (2), 293-315, DOI: 10.1029/RG020i002p00293

- Ishida T., Hosokawa K., Shibata T., Suzuki S., Nishitani N., Ogawa T., 2008, SuperDARN observations of daytime MSTIDs in the auroral and mid-latitudes: Possibility of long-distance propagation, *Geophysical Research Letters*, 35 (13), DOI: 10.1029/2008GL034623
- Joshi P.P., Baker J.B.H., Ruohoniemi J.M., Makela J.J., Fisher D.J., Harding B.J., Frissell N.A., Thomas E.G., 2015, Observations of storm time midlatitude ion-neutral coupling using SuperDARN radars and NATION Fabry-Perot interferometers, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 120 (10), 8989-9003, DOI: 10.1002/2015JA021475
- Kelley M.C., 1989, *The Earth's ionosphere*, Academic Press, 576 s.
- Kirkwood S., 2007, Polar mesosphere winter echoes – A review of recent results, *Advances in Space Research*, 40 (6), 751-757, DOI: 10.1016/j.asr.2007.01.024
- Kleimenova N.G., Kozyreva O.V., Kubicki M., Michnowski S., 2010, Morning polar substorms and variations in the atmospheric electric field, *Geomagnetism and Aeronomy*, 50 (1), 48-57, DOI: 10.1134/S0016793210010068
- Kleimenova N.G., Kozyreva O.V., Kubicki M., Michnowski S., 2011, Variations in the near-ground electric field at high latitudes and the potential drop across the polar cap during morning polar substorms, *Geomagnetism and Aeronomy*, 51 (3), 394-401, DOI: 10.1134/S0016793211030091
- Kleimenova N.G., Kozyreva O.V., Kubicki M., Odzimek A., Malysheva L.M., 2012, Effect of substorms in the Earth's nightside sector on variations in the surface atmospheric electric field at polar and equatorial latitudes, *Geomagnetism and Aeronomy*, 52 (4), 467-473, DOI: 10.1134/S001679321204007X
- Kleimenova N.G., Kozyreva O.V., Michnowski S., Kubicki M., 2008, Effect of magnetic storms in variations in the atmospheric electric field at midlatitudes, *Geomagnetism and Aeronomy*, 48 (5), 622-630, DOI: 10.1134/S0016793208050071
- Kleimenova N.G., Kubicki M., Odzimek A., Malysheva L.M., Gromova L.I., 2017, Effects of geomagnetic disturbances in daytime variations of the atmospheric electric field in polar regions, *Geomagnetism and Aeronomy*, 57 (3), 266-273, DOI: 10.1134/S0016793217030070
- Kłos Z., Stanisławska I., Michnowski S., 2009, *Globalny elektryczny obwód atmosfery i pogoda kosmiczna*, [w:] *Polskie Towarzystwo Geofizyczne 1947-2007*, E. Bogdanowicz, U. Kossowska-Cezak, J. Szkutnicki (red.), IMGW, Warszawa, 50-58
- Kubicki M., Odzimek A., Kleimenova N.G., Kozyreva O.V., Neska M., 2014, Synchronization of main global electric circuit generators from ground-level electric field E_z at three distant locations on the globe at middle and high latitudes, [w:] *Proceedings of the 15th International Conference on Atmospheric Electricity, ICAE 2014 Organizing Committee*
- Kubicki M., Odzimek A., Neska M., Berlinski J., Michnowski S., 2016, First observations of the atmospheric electric field at Arctowski Antarctic station by the new Polish atmospheric electricity observation network, *Acta Geophysica*, 64 (6), 2630-2649, DOI: 10.1515/acgeo-2016-0096

- Lester M., 2008, SuperDARN: An example of a network approach to geospace science in the twenty-first century, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 70 (18), 2309-2323, DOI: 10.1016/j.jastp.2008.08.003
- Lester M., 2013, The Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN): An overview of its development and science, *Advances in Polar Science*, 24 (1), 1-11, DOI: 10.3724/SP.J.1085.2013.00001
- Lewandowski M., 2019, A new concept for the Polish Antarctic Station Dobrowolski: autonomic research module for geophysical research, Open Meeting with Russian researchers from All-Russia Research Institute for Geology and Mineral Resources of the World Ocean, 1 października 2019, Instytut Geofizyki PAN
- Lucas G.M., Baumgaertner A.J.G., Thayer J.P., 2015, A global electric circuit model within a community climate model, *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, 120 (23), 12054-12066, DOI: 10.1002/2015JD023562
- Lukianova R.Y., Kruglov A.A., Frank-Kamenetskii A.V., Kotikov A.L., Burns G.B., French V.D.R., 2011, Relationship between the ionospheric potential and the ground level electric field in the southern polar cap, *Geomagnetism and Aeronomy*, 51 (3), 383-393, DOI: 10.1134/S0016793211030121
- Michnowski S., 1996, O zastosowaniach obserwacji atmosferycznych i geomagnetycznych w Hornsundzie w badaniach oddziaływania wiatru słonecznego na atmosferę ziemską, *Przegląd Geofizyczny*, 41 (1-2), 49-55
- Michnowski S., 1998, Solar wind influences on atmospheric electricity variables in polar regions, *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, 103 (D12), 13939-13948, DOI: 10.1029/98JD01312
- Michnowski S., Odzimek A., Kleimenova N., Kozyreva O., Kubicki M., Nikiforova N.N., 2014, Review of examples of solar wind-lower atmosphere coupling observed in the electric field (Ez) variations at the Earth's surface during magnetic storms, [w:] *Proceedings of the 15th International Conference on Atmospheric Electricity, ICAE 2014* Organizing Committee
- Michnowski S., Szymański A., Nikiforova N.N., Kozyreva O.V., Ermolenko D., Zielkowski K., 1991, On simultaneous observations of geomagnetic and atmospheric electric field changes in Arctic station Hornsund, Spitsbergen, [w:] *Proceedings of the International Workshop on Global Atmospheric Electricity Measurements*, S. Michnowski, L.H. Ruhnke (red.), Publications of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences: Physics of the Atmosphere Series, D-35 (238), 83-96
- Milan S.E., 2015, Sun et Lumière: solar wind-magnetosphere coupling as deduced from ionospheric flows and polar auroras, [w:] *Magnetospheric plasma physics: the impact of Jim Dungey's research*, D. Southwood, S.W.H. Cowley FRS, S. Mitton (red.), Springer, Berlin, 33-64
- Milan S.E., Clausen L.B.N., Coxon J.C., Carter J.A., Walach M.-T., Laundal K., Ostgaard N., Tenfjord P., Reistad J., Snekvik K., Korth H., Anderson B.J., 2017, Overview of solar wind-magnetosphere-ionosphere-atmosphere coupling and the generation of

- magnetospheric currents, *Space Science Review*, 206 (1-4), 547-573, DOI: 10.1007/s11214-017-0333-0
- Morozov V.N., Troshichev O.A., 2008, Simulation of variations in the polar atmospheric electric field related to the magnetospheric Field-Aligned Currents, *Geomagnetism and Aeronomy*, 48 (6), 759-769 [Geomagn. Aeron. (Engl. Transl.), 48, 727-736]
- Nikiforova N.N., Kleimenova N.G., Kozyreva O.V., Kubicki M., Michnowski S., 2005, Unusual variations in the atmospheric electric field during the main phase of the strong magnetic storm of October 30, 2003, at Świder Polish mid-latitude observatory, *Geomagnetism and Aeronomy*, 45 (1), 140-144
- Nishitani N., Ogawa T., Otsuka Y., Hosokawa K., Hori T., 2011, Propagation of large amplitude ionospheric disturbances with velocity dispersion observed by the SuperDARN Hokkaido radar after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets and Space*, 63 (7), 891-896, DOI: 10.5047/eps.2011.07.003
- Nishitani N., Ruohoniemi J.M., Lester M., Baker J.B.H., Koustov A.V., Shepherd S.G., Chisham G., Hori T., Thomas E.G. Makarevich R.A., Marchaudon A., Ponomarenko P., Wild J.A., Milan S.E., Bristow W.A., Devlin J., Miller E., Greenwald R.A., Ogawa T., Kikuchi T., 2019, Review of the accomplishments of mid-latitude Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN) HF radars, *Progress in Earth and Planetary Science*, 6 (1), 27 s., DOI: 10.1186/s40645-019-0270-5
- Odzimek A., 2019, Obszary polarne w badaniach globalnego atmosferycznego obwodu elektrycznego Ziemi, *Przegląd Geofizyczny*, 64 (1-2), 35-72, DOI: 10.32045/PG-2019-002
- Odzimek A., Kubicki M., Lester M., Grocott A., 2011, Relation between the SuperDARN ionospheric potential and ground electric field at polar station Hornsund, [w:] *Proceedings of the 13th International Committee on Atmospheric Electricity Conference*, 7-12 października 2011, Rio de Janeiro, Brazil, 4 s.
- Odzimek A., Lester M., 2009, Modelling the Earth's global atmospheric electric circuit - development, challenges and directions, [w:] *Recent developments in atmospheric electricity (Publication to commemorate the 90th birthday of Stanisław Michnowski)*, P. Barański, M. Kubicki (red.), Publications of the Institute of Geophysics Polish Academy of Sciences: Physics of the Atmosphere Series, D-73 (214), 37-54
- Odzimek A., Lester M., Kubicki M., 2010, EGATEC: a new high-resolution engineering model of the global atmospheric electric circuit - Currents in the lower atmosphere, *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 115 (D18), DOI: 10.1029/2009JD013341
- Olson D.E., 1971, The evidence for auroral effects on atmospheric electricity, *Pure and Applied Geophysics*, 84 (1), 118-138, DOI: 10.1007/BF00875461
- Park C.G., 1976, Downward mapping of high-latitude ionospheric electric fields to the ground, *Journal of Geophysical Research*, 81 (1), 168-174, DOI: 10.1029/JA081i001p00168
- Ponomarenko P., Iserhienrhien B., St-Maurice JP., 2016, Morphology and possible origins of near-range oblique HF backscatter at high and midlatitudes, *Radio Science*, 51 (6), 718-730, DOI: 10.1002/2016RS006088

- Popielawska B., 1996, Propozycja wykorzystania stacji Hornsund w międzynarodowym programie badawczym GEM (Geospace Environment Modelling), *Przegląd Geofizyczny*, 41 (1-2), 17-24
- Popielawska B., 2002, Pogoda kosmiczna – bardzo przyziemna sprawa, *Publications of the Institute of Geophysics. Polish Academy of Sciences: Miscellanea Series*, M-25 (347), 305-319
- Popielawska B., Odzimek A., Stanisławska I., Kubicki M., Wernik M., Góral G., Grzesiak M., Pożoga M., 2011, SuperDARN in Poland – study of potential scientific benefits, *SuperDARN Workshop 2011*, 30 maja-3 czerwca 2011, Dartmouth College, Hanover, New Hampshire, USA, dostępne online: <http://superdarn.thayer.dartmouth.edu/workshop/proceedings.html> (08.11.2019)
- Raina L.I., Modulation of global circuit by extra-terrestrial influences, [w:] *Proceedings of the International Workshop on Global Atmospheric Electricity Measurements*, S. Michnowski, L.H. Ruhnke (red.), *Publications of the Institute of Geophysics Polish Academy of Sciences: Physics of the Atmosphere Series*, D-35 (238), 33-46
- Rapp M., Lübken F.-J., 2004, Polar mesosphere summer echoes (PMSE): Review of observations and current understanding, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 4 (11-12), 2601-2633, DOI: 10.5194/acp-4-2601-2004
- Rietveld M.T., Senior A., Markkanen J., Westman A., 2016, New capabilities of the upgraded EISCAT high-power HF facility, *Radio Science*, 51 (9), 1533-1546, DOI: 10.1002/2016RS006093
- Roble R.G., 1985, On solar-terrestrial relationships in atmospheric electricity, *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, 90 (D4), 6000-6012, DOI: 10.1029/JD090iD04p06000
- Roble R.G., Hays P.B., 1979, A quasi-static model of global atmospheric electricity 2. Electrical coupling between the upper and lower atmosphere, *Journal of Geophysical Research*, 84 (A12), 7247-7256, DOI: 10.1029/JA084iA12p07247
- Ruohoniemi J., Baker K., 1998, Large-scale imaging of high-latitude convection with Super Dual Auroral Radar Network HF radar observations, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 103 (A9), 20797-20811, DOI: 10.1029/98JA01288
- Ruohoniemi J.M., Barnes R.J., Greenwald R.A., Shepherd S.G., 2001, The response of the high-latitude ionosphere to the coronal mass ejection event of April 6, 2000: a practical demonstration of space weather nowcasting with the Super Dual Auroral Radar Network HF radars, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 106 (A12), 30085-30097, DOI: 10.1029/2000JA000217
- Samson J.C., Greenwald R.A., Ruohoniemi J.M., Baker K.B., 1989, High-frequency radar observations of atmospheric gravity waves in the high-latitude ionosphere, *Geophysical Research Letters*, 16 (8), 875-878, DOI: 10.1029/GL016i008p00875
- Sheftel V.M., 1991, Effects of magnetosphere-ionosphere generators and solar flares on the atmospheric electricity of high latitudes, [w:] *Proceedings of the International Workshop on Global Atmospheric Electricity Measurements*, S. Michnowski, L.H. Ruhnke

- (red.), Publications of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences: Physics of the Atmosphere Series, D-35 (238), 23-31
- Swider W., 1988, Ionic mobility, mean mass, and conductivity in the middle atmosphere from near ground level to 70 km, *Radio Science*, 23 (3), 389-399, DOI: 10.1029/RS023i003p00389
- Thomas E.G., Shepherd S.G., 2018, Statistical patterns of ionospheric convection derived from mid-latitude, high-latitude, and polar SuperDARN HF radar observations, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 123 (4), 3196-3216, DOI: 10.1002/2018JA025280
- Tinsley B.A., 2000, Influence of the solar wind on the global electric circuit, and inferred effects on cloud microphysics, temperature, and dynamics in the troposphere, *Space Science Reviews*, 94 (1-2), 231-258, DOI: 10.1023/A:1026775408875
- Tinsley B.A., Liu W., Rohrbaugh R.P., Kirkland M.W., 1998, South Pole electric field responses to overhead ionospheric convection, *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, 103 (D20), 26137-26146, DOI: 10.1029/98JD02646
- Victor N.J., Panneerselvam C., Anil Kumar C.P., 2015, Variation of surface electric field during geomagnetic disturbed period at Maitri, Antarctica, *Journal of Earth System Science*, 124 (8), 1721-1733, DOI: 10.1007/s12040-015-0638-x
- Walach M.-T., Grocott A., 2019, SuperDARN observations during geomagnetic storms, geomagnetically active times, and enhanced solar wind driving, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 124 (7), 5828-5847, DOI: 10.1029/2019JA026816
- Wernik A.W., 1996, Jonosfera na dużych szerokościach i jej badania w polskiej stacji polarnej na Spitsbergenie, *Przegląd Geofizyczny*, 41 (1-2), 31-37
- Wodnicka E.B., 1996, Magnetosfera Ziemi i jej wyróżnione obszary, *Przegląd Geofizyczny*, 41 (1-2), 25-29
- Yakymenko K.N., Koustov A.V., Nishitani N., 2015, Statistical study of midlatitude E-region echoes observed by the Hokkaido SuperDARN HF radar, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 120 (11), 9959-9976, DOI: 10.1002/2015JA021685

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

SuperDARN (Super Dual Auroral Radar Network) jest światową siecią radarów koherentnego rozpraszania w paśmie wysokich częstotliwości HF (High Frequency) do badań górnych warstw atmosfery, mezosfery, jonosfery, termosfery oraz ich sprzężenia z magnetosferą i wiatrem słonecznym. Do głównych tematów badawczych SuperDARN z dziedziny fizyki atmosfery należą echa mezosferyczne, fale planetarne i związane z nimi przemieszczające się zaburzenia jonosferyczne oraz inne przejawy oddziaływania atmosfery neutralnej ze zjonizowaną. W artykule przedstawiamy perspektywy dla rozwoju badań atmosfery z użyciem radarów SuperDARN w kraju, ze szczególnym uwzględnieniem badań z dziedziny elektryczności atmosferycznej.

Słowa kluczowe: SuperDARN, atmosfera, jonosfera, magnetosfera, konwekcja jonosferyczna, elektryczność atmosfery, pogoda kosmiczna, sprzężenie warstw atmosfery, badania, perspektywy, Polska.

S u m m a r y

SuperDARN (Super Dual Auroral Radar Network) is a global network of coherent scatter radars in the HF (High Frequency) band for studying the upper atmosphere, mesosphere, ionosphere, thermosphere and their coupling with the magnetosphere and solar wind. SuperDARN research topics in the field of atmospheric physics include mesospheric echoes, planetary waves and associated travelling ionospheric disturbances, and other manifestations of the interaction of neutral and ionised atmosphere. In the article we present prospects for the development of atmospheric research in Poland using SuperDARN radars, with particular emphasis on research studies in the field of atmospheric electricity.

Keywords: SuperDARN, atmosphere, ionosphere, magnetosphere, ionospheric convection, coupling of atmospheric layers, atmospheric electricity, space weather, research, prospects, Poland.