

◆◆◆◆ ORIGINALNE PRACE ◆◆◆◆ I PRZYZYCNKI

Barbara POPIELAWSKA 

Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk

Anna ODZIMEK , Joanna DOROSZKIEWICZ 

Instytut Geofizyki Polskiej Akademii Nauk

Grzegorz GÓRAL 

SUPERDARN W POLSCE – PERSPEKTYWY

SUPERDARN IN POLAND – A PERSPECTIVE

Wstęp

W dwudziestym trzecim cyklu słonecznym podczas ekstremalnie silnych burz magnetycznych Polska kilkakrotnie znalazła się pod znacznie przesuniętą ku równikowi strefą zórz polarnych. Zorze widoczne nad Polską były niezwykle, różniące się od typowych w owalu zorzowym. Wiele zjawisk w bliskiej przestrzeni wokółziemskiej przebiegało wówczas niezgodnie z dotychczasowymi modelami, co wykazały obserwacje licznej floty satelitów (Gopalswamy 2009). Powstało przekonanie, że tak silne burze w pogodzie kosmicznej jak te, które wydarzyły się w październiku i listopadzie 2003 r. oraz listopadzie 2004 r. (Bojanowska 2005), prowadzą do przejścia układu Słońce-Ziemia w nowy stan, którego konsekwencje są trudne do oceny (np. Sojka i in. 2004; Liemohn i in. 2008). Nauczony tym doświadczeniem naukowcy starali się lepiej przygotować do kolejnego maksimum aktywności Słońca.

O ile klasyczna strefa zorzowa była dość dobrze pokryta siecią obserwatoriów optycznych i radarowych, o tyle na subzorzowych i średnich szerokościach geomagnetycznych takiego monitoringu brakowało. Już w roku 2005 naukowcy z JHU/APL uruchomili w Wirginii na Wallops Island pierwszy radar koherentnego rozpraszania typu SuperDARN (Super Dual Auroral Radar Network, SD) służący do obserwacji jonosfery na średnich szerokościach geomagnetycznych.

W 2006 roku ruszył średnio-szerokościowy radar w Japonii na Hokkaido East, a od 2014 r. drugi na Hokkaido West. W 2008 roku zbudowano w Wirginii bliźniaczy dla Wallops Island radar w Blackstone. Obserwacje radarowe na średnich szerokościach okazały się na tyle interesujące i pożyteczne, iż w roku 2010 amerykańska National Science Foundation ufundowała w ramach programu Mid-sized Infrastructure sześć nowych radarów SuperDARN, których pola widzenia obejmują pierścieniem obszar średnich szerokości magnetycznych od Aleutów do stanu Kansas, co w połączeniu z radarami w Wirginii zapewniło pokrycie całego pasa średnich szerokości kontynentu Ameryki Północnej. Pełny opis historii budowy światowej sieci SuperDARN na średnich szerokościach (nazywanej StormDARN) znajduje się w pracy Nishitani i in. (2019). Warto nadmienić, iż w latach 2006-2016 zbudowano także kilka radarów SD na obu półkulach w rejonach polarnych, tzn. wewnątrz owalu zorzowego. Radary te, tworzące tzw. PolarDARN, monitorują jonosferę w czapie polarnej, gdzie ma miejsce najsilniejsze sprzężenie jonosfery z magnetosferą i wiatrem słonecznym. Ponadto, Rosyjska Akademia Nauk podpisała w tym okresie umowę z University of Leicester w Wielkiej Brytanii na budowę dwóch radarów SD – za Uralem (Jekaterynburg) i na środkowej Syberii (Magadan). Jeden z nich (EKB) już działa w Obserwatorium Arti koło Jekaterynburga (Berngardt i in. 2015b). Szerokość magnetyczna tej stacji to 53,0°N, czyli nieco powyżej szerokości optymalnej dla sieci StormDARN. Amerykańska National Science Foundation (NSF) zapewniła także finansowanie dwóch radarów SD na Azorach. Niestety, ostatecznie nie udało się tego projektu zrealizować ze względów logistycznych (i częściowo politycznych).

Kolejne próby postawienia radaru na średnich szerokościach bliżej Europy i w samej Europie (Irlandia) jak na razie się nie powiodły. W listopadzie 2014 roku brytyjska Natural Environment Research Council (NERC) przyznała fundusze na radar SD, który miał powstać w południowej Francji niedaleko Tarbes, ale prawdopodobnie ostateczną jego lokalizacją będzie Cypr (współpraca z Frederick University, informacja prywatna dr H. Haralambous). Radar ten zapewne nie obejmie zasięgiem strefy subzorzowej.

Dla domknięcia nad Europą globalnego średnioszerokościowego pierścienia radarów SD korzystnym miejscem byłaby Polska (np. Baker i in. 2008, tamże rysunek 3). Pierwszą próbę wprowadzenia SuperDARN-u na Polską Mapę Infrastruktury Badawczej podjęto w roku 2009 (autor wniosku B. Popielawska). Niestety, w Ministerstwie Nauki i Szkolnictwa Wyższego wniosku nawet nie rozpatrzono ze względu na zbyt małe, jak na ten strumień finansowania, koszty budowy radaru. W roku 2011 został złożony projekt badawczy do Narodowego Centrum Nauki (wnioskodawcy B. Popielawska – kierownik projektu, I. Stanisławska, A. Odzimek), który także nie został rozpatrzony, tym razem ze względu na zbyt wysokie koszty aparatury. SuperDARN w Europie na średnich

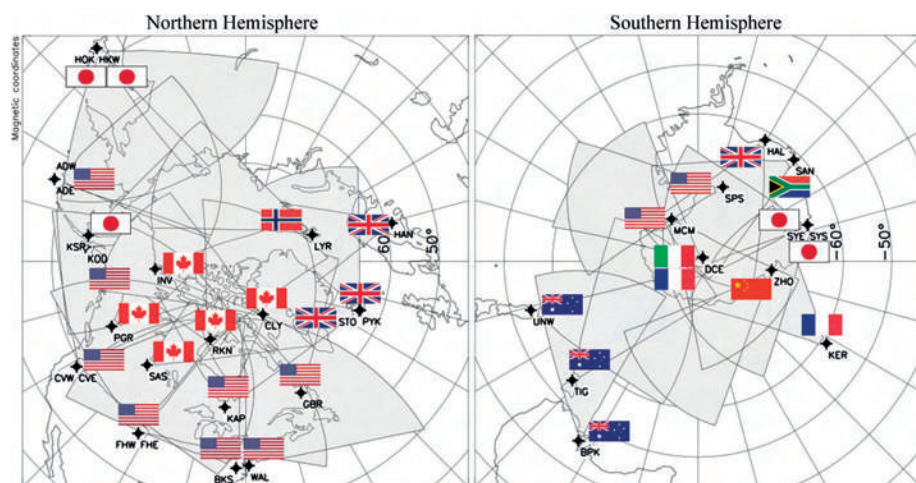
szerokościach nadal jest pożądanym źródłem danych geofizycznych¹. W niniejszym artykule przedstawiamy potencjalne korzyści płynące z umiejscowienia takiego obiektu w Polsce, proponowane lokalizacje, jak i obiektywne trudności związane z instalacją i działaniem radaru w naszym kraju.

Super Dual Auroral Radar Network

Radary Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN) rozmieszczane są w strefach zorzowych (klasyczne radary SuperDARN), począwszy od radaru w Goose Bay na Labradorze uruchomionego w roku 1983 (Greenwald i in. 1985), w strefach polarnych, tzw. PolarDARN (Chisham i in. 2007; Lester 2008, 2013), i od roku 2005 na średnich szerokościach wspomniany StormDARN (Oksavik i in. 2006; Lester 2013; Nishitani i in. 2019). Na półkuli północnej działające i budowane obecnie radary w pasie średnich szerokości geomagnetycznych swoim polem widzenia pokrywają pierścień obejmujący zasięgiem jonosferę w obszarze subzorzowym na niemal wszystkich długościach półkuli z wyjątkiem Europy (rys. 1). Proponowany radar, szczególnie radar tzw. podwójny, umiejscowiony w Polsce mógłby tę lukę w dużym stopniu wypełnić.

Typ radaru w sieci SuperDARN to monostatyczny radar pozahoryzontalny, który emituje fale radiowe w zakresie wysokich częstotliwości, czyli HF (ang. *High Frequency*) od 3 do 30 MHz, i odbiera ich echo. Wysyłane przez radar fale radiowe ulegają efektywnemu koherentnemu rozproszeniu wstecznemu na nieregularnościach jonosferycznych w warstwie E i F, w miejscach, gdzie kierunek wiązki fal jest lokalnie prostopadły do kierunku pola magnetycznego, a charakterystyczna skala przestrzenna lokalnych nieregularności koncentracji elektronowej jest równa połowie długości fali. Wzmocnione wskutek konstruktywnej interferencji fale odbite pod kątem 90° do pola magnetycznego trafiają z powrotem do radaru i stanowią tzw. echo jonosferyczne. Refrakcja fal radiowych w jonosferze może również doprowadzić do zakrzywienia w dół wyemitowanej w górę wiązki, a wtedy dochodzi do odbicia wiązki od powierzchni Ziemi i uzyskujemy tzw. echo gruntowe. Oba echa, jonosferyczne i gruntowe, są źródłem informacji geofizycznej. Dla radarów na średnich szerokościach prostopadły kierunek wiązki falowej względem pola B w trakcie propagacji przez jonosferę może zostać osiągnięty przez wiązki, które zostały wyemitowane w kierunku azymutalnym w zakresie około (–40°;+40°) względem lokalnego azymutu bieguna magnetycznego. Rozdzielczość czasowa sygnałów zebranych całego pola widzenia radaru wynosi 1-2 minuty, choć możliwych jest wiele trybów pracy, w tym także dających rozdzielczość sub-sekundową (np. Greenwald i in. 2008). Pojedyncze pole radarowe stacji ma wielkość zale-

¹ http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Safety/Monitoring_space_weather



Rys. 1. Mapa lokalizacji radarów SuperDARN, ich pola widzenia (kolor szary) i trzyliterowe akronimy oraz flagi państw, które są fundatorami i operatorami poszczególnych radarów w konsorcjum SuperDARN; szczegółowy spis radarów można znaleźć na stronie źródła <http://vt.superdarn.org/tiki-index.php?page=Radar+Overview>; radary rosyjskie współpracują z SuperDARNEM poza konsorcjum i nie są naniesione na mapie

Fig. 1. Map of SuperDARN radars location, their field of view (gray), three-letter acronyms and flags of countries that are the founders and operators of individual radars in the SuperDARN consortium; a detailed list of radars can be found on the source page <http://vt.superdarn.org/tiki-index.php?page=Radar+Overview>; Russian radars are collaborating outside of the SuperDARN consortium and are not shown

dwie 260 m na 140 m (dla zestawu szesnastu anten transmitujących i czterech anten interferometru), ale widać z niego odbicia z pikseli przestrzennych ($30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$) oddalonych radialnie od 200 km do 3000 km, z rozszerzających się pasów o szerokościach do $\sim 1500 \text{ km}$ (wycinek koła, patrz rys. 1). Jest to zatem technika niezwykle efektywna, umożliwiającą stosunkowo tanim kosztem i niewielką ilością mocy ($\sim 10 \text{ kW}$) prowadzenie pomiarów parametrów jonosfery jednocześnie i na dużej przestrzeni. Rysunek 2 przedstawia radar SD w Fort Hays, Kansas, USA.

Zasięg i tryb pomiarowy

Radary sieci SuperDARN są radarami o elektronicznie sterowanym fazowanym szyku antenowym, składającym się z szesnastu anten nadawczo-odbiorczych rozstawionych w układzie liniowym (rys. 2). Uzupełniająco stosowane są cztery anteny odbiorcze, umieszczone równolegle do szyku głównego

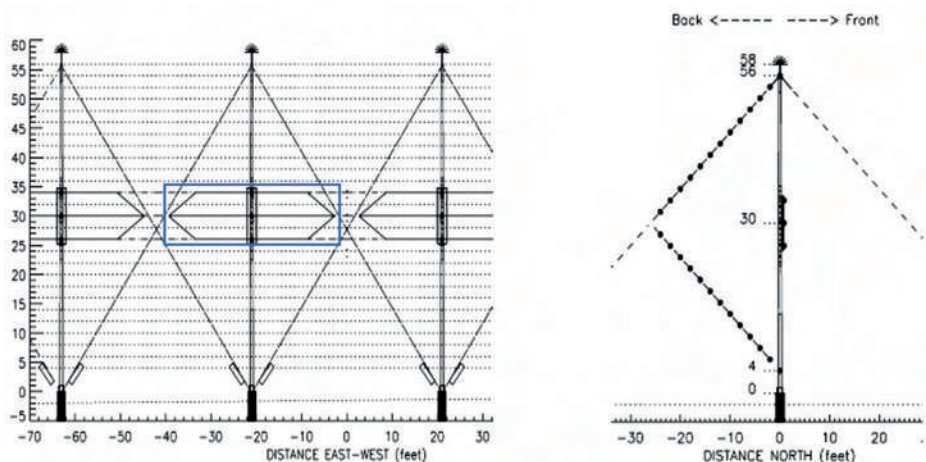


Rys. 2. Fotografia przedstawia bliźniaczy (podwójny) radar SuperDARN w Fort Hays, Kansas, USA; biały pawilon po środku mieści elektronikę radaru i stanowisko dla wizytującego konserwatora

Fig. 2. The photograph shows the SuperDARN twin (dual) radar in Fort Hays, Kansas, USA; the white pavilion in the middle houses the radar electronics and room for visiting engineers

w pewnej odległości od niego (<100 m), przeznaczone do interferometrycznego pomiaru kąta elewacji odbieranej wiązki wstecznej. Ostatnio zaproponowano i przetestowano wersję z dwoma szeregami pomocniczymi w postaci trzech anten z tyłu szeregu głównego i jednej z przodu. Konfiguracja taka pozwala wyeliminować niejednoznaczność wyznaczania kąta elewacji odbieranej wiązki (Custovic i in. 2013; McDonald i in. 2013). Począwszy od roku 2005 w radarach SuperDARN-u wykorzystuje się do transmisji i odbioru echa anteny typu Twin Terminated Folded Dipole (TTFD) – rys. 3 – będące odmianą dipola pętlowego (Baker i in. 2008; Sterne 2010), z reflektorem ograniczającym wiązkę tylną (ang. *back lobe*). Wcześniejsze radary wyposażone są w anteny logarytmicznie periodyczne montowane na solidnych metalowych kolumnach. Niższe koszty radaru z antenami TTFD, które umieszcza się na typowych miejskich słupach oświetleniowych, łatwiejsza obsługa oraz lepsza odporność na warunki atmosferyczne stanowią o przewadze tego wyboru. Ze względu na logistykę, buduje się też zwykle dwa radary obok siebie, o styknych polach widzenia – w ten sposób z jednego punktu możemy zobaczyć obraz zjawisk rozgrywających się na olbrzymim obszarze jonosfery (rys. 1-2).

Radary SuperDARN charakteryzują się rozległym polem widzenia: rozciągłość radialna sięga 3000 km (lub 5000 km – TIGER-3, o którym niżej), kątowa azymutalna wynosi 53° (lub 90° dla TIGER-3) z jednocześnie dobrą rozdzielczością przestrzenną. Jednowymiarowy szysk antenowy SuperDARN-a złożony



Rys. 3. Schematyczny widok z przodu (z lewej) i z boku (z prawej) konstrukcji radaru SuperDARN z wykorzystaniem anten TTFD (Twin Terminated Folded Dipole) stosowanych od 2005 r.; niebieskim konturem zaznaczona heksagonalna antena umieszczona na wysokości 30 stóp; poziome kropkowane linie na rysunku z lewej (grube kropki po prawej) to reflektor przebiegający przez całą długość szeregu antenowego (rysunek zaadaptowany z Baker i in. 2008, tamże rys. 2)

Fig. 3. Front view (left) and side view (right) of the SuperDARN Twin-Terminated Folded-Dipole (TTFD) antenna design, used in SuperDARN since 2005; contours of the hexagonal antenna mounted at the height of 30 feet is marked in blue; the horizontal dotted lines in the left panel (thick dots in the right panel) mark a reflector running through the entire length of the antenna array (drawing adapted from Baker et al. 2008, fig. 2)

z szesnastu anten jest zaprojektowany do wysyłania kolejno szesnastu (tradycyjnie) lub dwudziestu czterech (nowe realizacje) wąskich wiązek o narastających względem kierunku głównego (wzdłuż osi symetrii szyku) kątach azymutalnych. Wszystkie stacje SuperDARN przez co najmniej 50% czasu pracują według jednakowego schematu, w którym cykl wyemitowania wiązek fal radiowych w szesnastu kolejnych kierunkach powtarza się co 1 lub 2 minuty. Emisja w danym kierunku azymutalnym jest zorganizowana w krótkie impulsy o stałej długości, następujące po sobie w zmiennych odstępach czasu (ang. *multipulse sequence*). Długość trwania pojedynczego impulsu to 300 ms (CP1) lub 100 ms (CP2). Sekwencja składa się z siedmiu (CP1) lub ośmiu (CP2) impulsów, przy czym minimalny odstęp pomiędzy impulsami t_0 wynosi 2,4-155 ms, a odstępy pomiędzy kolejnymi sygnałami są całkowitymi wielokrotnościami t_0 . Pełna długość jednego cyklu emisji-odbioru echa sekwencji siedmiu (standard) lub ośmiu (tzw. katscan) impulsów wynosi 90-100 ms. Czas emisji-obszacji w danym kierunku azymutalnym to 3 do 7 sekund, co odpowiada 30-70 cyklom emisji-odbioru. Chwilowe próbki echa (sygnał napięciowy) z jednej

sekwencji impulsów, rejestrowane przez odbiornik i cyfrowane z rozdzielczością równą długości pojedynczego impulsu, są online przetwarzane w celu obliczenia zespolonej funkcji autokorelacji (ACF), oddzielnie dla każdej komórki zasięgu radaru (ang. *range gate*, odpowiada określonemu opóźnieniu echa względem impulsu źródłowego). Charakterystyki zespolonej funkcji autokorelacji sygnału echa służą do określenia dopplerowskiego przesunięcia częstotliwości (a zatem prędkości odbijającego ośrodka), mocy sygnału odebranego echa (proporcjonalnej do koncentracji elektronowej N_e) oraz rozmycia widma prędkości Dopplera (ang. *spectral width*). Wielkości te są uśredniane po czasie 3-7 s, zapisywane w pamięci urządzenia lub przesyłane do centrum danych w celu natychmiastowej wizualizacji i udostępnienia w sieci. Standardowo próbki chwilowe odebranego echa są niszczone, ponieważ ich przechowywanie wiąże się z produkcją olbrzymich zbiorów danych.

Specjalne tryby pracy

Do niektórych badań (np. mezosferycznych) prowadzi się analizę przebiegu czasowego amplitudy i fazy danych surowych z odbiornika, bez wyliczania uśrednionej ACF (np. Yukimatu, Tsutsumi 2002). Stosuje się także niestandardowe sekwencje, np. trzynastoimpulsową, przy użyciu której otrzymuje się niższy poziom szumu przy wyliczaniu parametrów echa, co pozwala na rezygnację z uśredniania oraz uzyskanie subsekundowej (200 ms) rozdzielczości czasowej pomiarów prędkości Dopplera (Greenwald i in. 2008). Standardowa sekwencja impulsów nadajnika, nieprzetworzony sygnał echa oraz kolejne etapy analizy danych, w celu wyodrębnienia próbek „czystego” echa od śladów jonizacji po przelotach meteoroidów, niezakłóconego przez *range aliasing*, opisane są np. w pracy Yukimatu i Tsutsumi (2002). *Range aliasing* to efekt niejednoznaczności w wyznaczeniu odległości do źródła echa w sytuacji, gdy w tym samym czasie docierają do odbiornika sygnały echa z dwóch lub więcej źródeł znajdujących się w różnych odległościach od radaru, czyli echa dwóch lub trzech poprzedzających impulsów. Dzięki dodatkowemu wyposażeniu, kilka radarów SD (np. CUTLASS – brytyjskie radary w Arktyce w Finlandii i Islandii, najnowsze radary TIGER-3 w Australii oraz rosyjski EKB pod Jekaterynburgiem) ma ponad standardowy, rozszerzony potencjał diagnostyczny, dzięki lepszemu rozdzielczości czasowej, większej liczbie opcji trybu pracy, możliwości jednoczesnej pracy w różnych trybach na dwóch różnych częstotliwościach. Taka odmiana radarów SD i ich trybów pracy nosi nazwę Stereo (Lester i in. 2004).

Zakres wykorzystywanych częstotliwości nadawania

Radary SuperDARN powinny być tak zaprojektowane, aby mogły wysyłać sygnały o dyskretnej częstotliwości w zakresie 8-20 MHz, przy szerokości sygnału 10 kHz na poziomie -20 dB. Optymalną częstotliwość z tego zakresu wybiera się zależnie od przewidywanego średniego stanu jonosfery, a regularne nadawanie poprzedza się nasłuchem szumów i zakłóceń oraz fal rozproszonych wstecznie z emisji próbnych, wybierając z zakresu dozwolonych prawem częstotliwości pasmo najmniej zaszumione i dające najsilniejsze echo. Praktycznie radary te rzadko operują poniżej 9 MHz lub powyżej 16 MHz. Optymalna częstotliwość nadawania zależy od pory dnia, sezonu roku i fazy cyklu słonecznego. Średnia częstotliwość nadawania to 12-13 MHz i dla niej jest optymalizowana antena, która powinna dobrze pracować w całym otaczającym paśmie o szerokości ± 6 MHz.

Interpretacja danych

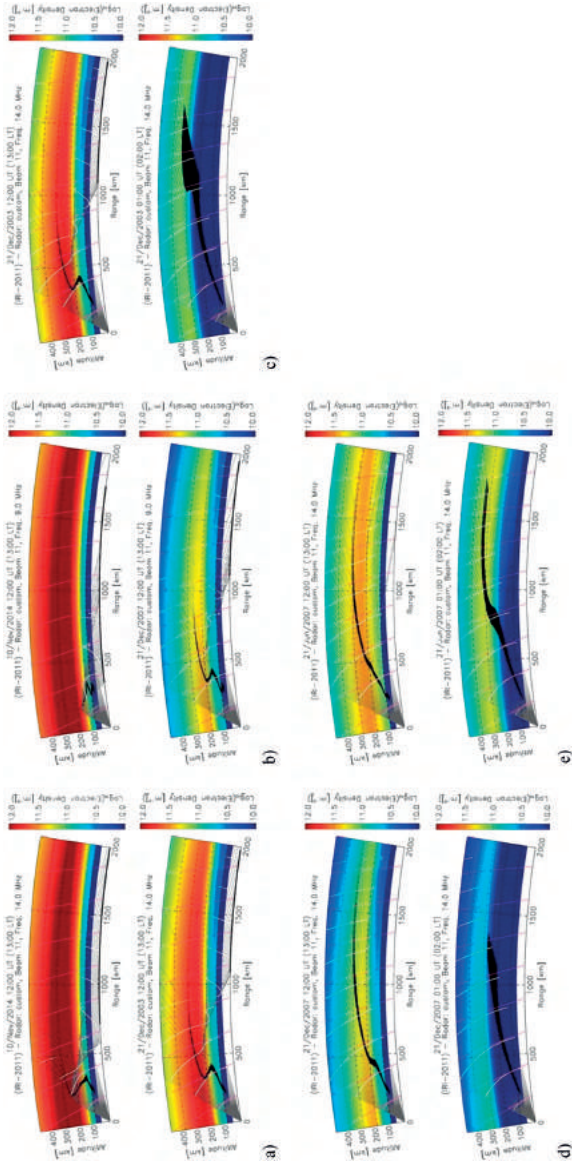
Interpretacji danych radarowych dokonuje się na podstawie teoretycznych przewidywań co do przebiegu trajektorii propagacji promienia fali (tzw. analiza *ray tracing*). Trasowanie wykonuje się w modelowej jonosferze, o rozkładach koncentracji elektronowej bądź analitycznych (np. symulujących pojedynczą lub podwójną warstwę Chapmana), bądź z wykorzystaniem modeli empirycznych (np. IRI, NeQuick). Jonosfera jest czasami silnie zmienna, nawet w okresie spokojnym magnetycznie, stąd interpretacja echa nie zawsze jest prosta. Modele statystyczne jonosfery można lokalnie uaktualniać (skalować), wykorzystując dane z jonosond znajdujących się w rejonach wstępnie przewidywanej trasy promienia.

Na rysunkach 4a-e pokazano przykłady trasowania promienia i przewidywany rozkład położenia źródeł echa jonosferycznego i naziemnego (punkty odbicia od gruntu), w jonosferze modelowej IRI-2011 spokojnej (2007, 2010) i zaburzonej (2003, 2014), dla dwóch różnych częstotliwości (14 MHz i 9 MHz), w południe i o północy, w czasie zimy lub lata oraz dla różnych kątów elewacji wysłanego sygnału. Na rysunku 4a widać m.in. znaczną różnicę odległości pierwszego skoku (ang. *skip distance*) pomiędzy dniem a nocą. Powodem zmiany trajektorii promieni jest zmiana koncentracji elektronowej w jonosferze (na rysunku zaznaczonej odpowiednim kolorem cieniowania). W przypadku fal o częstotliwości 9 MHz, które ulegają silnemu załamaniu w dolnej jonosferze, w przykładowym dniu 10 listopada 2014 r. nie sięgnęłyby one do warstwy F. Przy wykorzystaniu częstotliwości 9 MHz otrzymalibyśmy natomiast dzienne echo od gruntu w dniu 21 grudnia 2007 r., inaczej niż przy 14 MHz (rys. 4b-d). Podczas zwiększonej aktywności Słońca w roku 2003 duży stopień jonizacji

dolnej jonosfery sprawia, że fale 14 MHz ulegają silnemu załamaniu już w warstwie E i stąd bierze się pierwsze echo od gruntu. Nocą załamanie ku ziemi fal wyemitowanych pod małymi kątami elewacji zaczyna się w jonosferze na odległościach ponad 1500 km i ewentualne echo będzie zbyt słabe do zarejestrowania przez radar. Natomiast niższy stopień jonizacji jonosfery nocą sprawia, że fala 14 MHz ulega znacznie mniejszemu załamaniu i swobodnie przechodzi przez jonosferę (różnica pomiędzy panelem górnym i dolnym na rys. 4c) nie dając echa. Podczas głębokiego minimum aktywności Słońca w roku 2007 niższy niż w roku 2003 stopień jonizacji jonosfery sprawia, że fale 14 MHz ulegają znacznie mniejszemu załamaniu i z wyjątkiem tych o najmniejszych początkowych kątach elewacji swobodnie przechodzą przez górną jonosferę nawet w południe. Jedyne echo, jakie moglibyśmy uzyskać to echo jonosferyczne z obszarów zaczernionych, jeśli wystąpiłyby w tych miejscach odpowiednie nieregularności jonosferyczne (rys. 4d). Podczas głębokiego minimum aktywności Słońca w roku 2007 mniejszy niż w roku 2003 stopień jonizacji jonosfery sprawia, że fale 14 MHz ulegają słabszemu załamaniu w warstwie F i pierwsze z nią związane echo od gruntu wystąpi na odległościach ponad 2000 km, zatem będzie na ogół zbyt słabe do zarejestrowania przez radar (rys. 4e).

Zakres kątów elewacji początkowej trasowanych promieni na rysunku 4 odpowiada charakterystycznej szerokości wiązki w płaszczyźnie pionowej. Wiązka wysyłana ma dość szeroką charakterystykę elewacyjną, czyli dużą szerokość kątową w płaszczyźnie pionowej ($\sim 50^\circ$), o maksimum pod kątem około 25° względem poziomu. Echa od różnych części tej wiązki przychodzą w różnym czasie, bowiem trajektoria promienia zależy od początkowego kąta elewacji. Określenie kąta elewacji odebranej w danej chwili fali wstecznej (równego kątowi elewacji początkowej odpowiadającego fragmentu wiązki wysłanej) może być dokonane dzięki antenom interferometru. Kąt ten oblicza się mierząc różnicę faz sygnału echa odebranego przez szysk główny i przez cztery anteny interferometru. Przewidywane położenie źródeł echa dla danej częstotliwości sygnału i danego kąta elewacji zależy od własności jonosfery, które zmieniają się z cyklem aktywności Słońca, porą roku i porą dnia. Przykładowo latem w południe sygnały o wyższych częstotliwościach zostaną załamane ku Ziemi i uzyskamy echo od gruntu, a zimą lub w nocy te same sygnały przejdą do góry przez jonosferę bez odbicia nie wywołując żadnego echa.

Konsorcjum SuperDARN zorganizowało w Blackstone w stanie Virginia centrum analizy danych prowadzone przez pracowników i studentów College of Engineering na politechnice Virginia Tech (patrz vt.superdarn.org). Software i narzędzia do analizy pomiarów SuperDARNa są dostępne online dla wszystkich członków konsorcjum. Jednym z najważniejszych narzędzi jest właśnie program do trasowania promienia fali radiowej w jonosferze (ang. *Ray-Tracing Tool*), który wspomaga identyfikację źródeł echa radarowego, które zostało wykorzystane do analiz z rysunku 4.



Rys. 4. Przykłady dwuwymiarowych symulacji trajektorii promienia w modelowej jonosferze IRI2011 dla fal o częstotliwości 14 MHz (a, c, d) i 9 MHz (b) wyemitowanych z hipotetycznego radaru SuperDARN zlokalizowanego w pld.-zach. Polsce w dniach: a) 10/11/2014 (panel górny) i 21/12/2003 (panel dolny) o godz. 12 UT, b) 10/11/2014 i 21/12/2007 o godz. 12 UT, c) 21/12/2003 o 12 UT (panel górny) i 01 UT (panel dolny), d) 21/12/2007 o 12 UT i 01 UT, e) 21/06/2007 o 12 UT i 01 UT; echo radarowe można otrzymać z obszarów zaczernionych, jeśli wystąpiłyby w tych miejscach nieregularności jonosferyczne; różowe linie to linie pola magnetycznego, linie białe oznaczają granice co piątej komórki zasięgu (Ray-Tracing Tool – <http://vt.superdarn.org>)

Fig. 4. Examples of two-dimensional simulations of ray trajectories in the IRI2011 model ionosphere for 14 MHz (a, c, d) and 9 MHz (b) emitted from a hypothetical radar in southwest Poland on: a) 10/11/2014 (top panel) and 21/12/2003 (bottom panel) at 12 UT, b) 10/11/2014 and 21/12/2007 at 12 UT, c) 21/12/2003 at 12 UT (top panel) and 01 UT (bottom panel), d) 21/12/2007 at 12 UT and 01 UT, e) 21/06/2007 at 12 UT and 01 UT; radar echo might have been retrieved from blackened areas if ionospheric irregularities occurred there; pink lines are magnetic field lines, white lines indicate the boundaries of every fifth range cell (Ray-Tracing Tool – <http://vt.superdarn.org>)

Zastosowania techniki SuperDARN

Poniżej omawiamy zastosowania techniki radarów SuperDARN w badaniach nad zjawiskami w ziemskiej atmosferze i jonosferze.

Konwekcja jonosferyczna

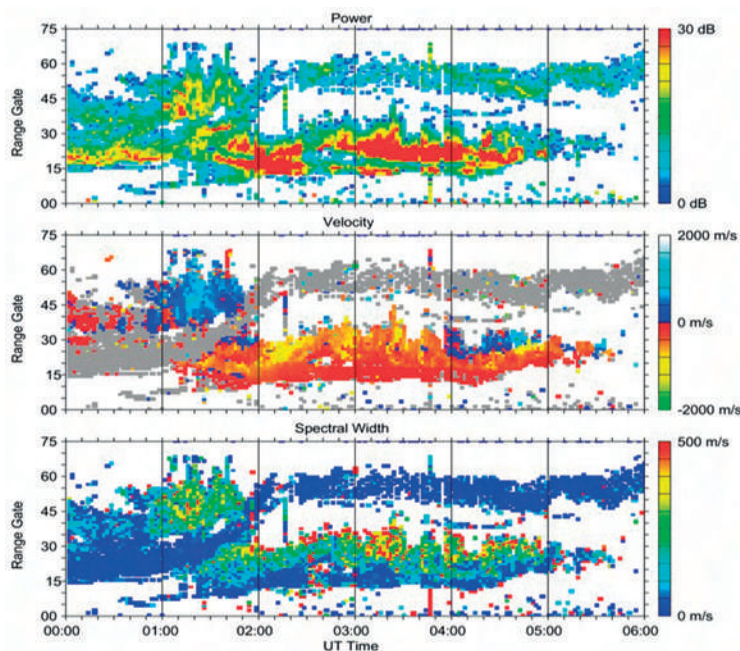
Sieć radarów SuperDARN została pierwotnie zaprojektowana do uzyskiwania ciągłego obrazu elektrodynamiki plazmy jonosferycznej w skali pokrywającej obszary polarne na obu półkulach, przede wszystkim konwekcji jonosferycznej, w dostatecznie dobrej rozdzielczości czasowej i przestrzennej, jaką mogły osiągnąć radary (Greenwald i in. 1995; Lester i in. 2004). Było to zdecydowanym postępem w porównaniu do wcześniejszych możliwości diagnostyki opartej na pomiarach satelitarnych i modelach statystycznych (Chisham i in. 2007). Na rysunku 5 pokazano przykład wizualizacji danych uzyskanych z pomiaru echa z jednego kierunku azymutalnego w okresie sześciu godzin, z wykresami trzech wspomnianych głównych parametrów: mocy sygnału, prędkości Dopplera i szerokości widmowej. Inny rodzaj standardowej wizualizacji danych z całego pola widzenia pojedynczego radaru SuperDARN (szesnastu kierunków azymutalnych $\times$ siedemdziesiąt pięć komórek radialnych) przedstawiony jest na rysunku 6, z mapą lokalizacji otrzymanych prędkości.

Zestawienie pomiarów chwilowej prędkości radialnej (LOS – ang. *line of sight*) z wielu radarów (rys. 7) pozwala na obliczenie dwuwymiarowego pola konwekcji plazmy w jonosferze, a stąd – rozkładu pola elektrycznego konwekcji (Chisham i in. 2007). Jest to podstawowy produkt naukowy SuperDARNu o olbrzymim znaczeniu dla monitorowania elektrodynamiki jonosfery (Ruohoniemi, Baker 1998).

Konwekcja jonosferyczna jest wynikiem oddziaływania wiatru słonecznego z magnetosferą i jonosferą ziemską, w którym główną rolę pełni zjawisko rekoneksji pola magnetycznego Ziemi z międzyplanetarnym polem magnetycznym niesionym przez wiatr słoneczny. Rekoneksja linii magnetycznych wymusza w jonosferze charakterystyczny ruch namagnetyzowanej plazmy, powodując efekty elektryczne, tj. powstanie zatok o różnym potencjale elektrycznym oraz przepływ prądu. Przedmiotem badań z użyciem SuperDARN-u jest dynamika i struktura konwekcji – opierają się one na pomiarach prędkości Dopplera wykonywanych radarem. Korzystając z pozostałych parametrów echa, tj. mocy odbieranego echa i szerokości spektralnej, można badać teledetekcyjnie np. strukturę sprzężonej magnetosfery – jej obszar, gdzie linie magnetyczne są otwarte – po rekoneksji połączone z polem międzyplanetarnym (widmo echa poszerzone) lub zamknięte (wąskie widmo echa), można też ustalić położenie dziennego leja (kaspu) polarnego (Baker i in. 1995), tzw. *Spectral Width*

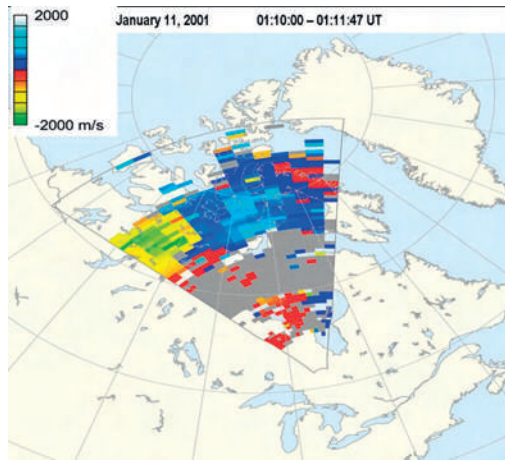
Boundary. Śledzenie zmiany położenia granicy otwartych i zamkniętych linii magnetycznych służy określaniu prędkości rekoneksji, czyli szybkości zmian otwartego strumienia magnetycznego i wielkości pola elektrycznego rekoneksji. Są to ważne parametry sprzężenia magnetosfery i jonosfery z wiatrem słonecznym (Chisham i in. 2007; Milan i in. 2007; Kunduri 2013; Lester 2013).

Radary rozmieszczone na średnich szerokościach geograficznych pozwoliły w szczególności na zbadanie pełniejszego obrazu konwekcji w warunkach silnych burz i subburz magnetycznych pozwoliły (Baker i in. 2007). Jednym z ważnych wyników była korekta wielkości spadku potencjału poprzez czapę polarną (ang. *Cross-Polar Cap Potential*), wynikająca z uwzględnienia pomiarów



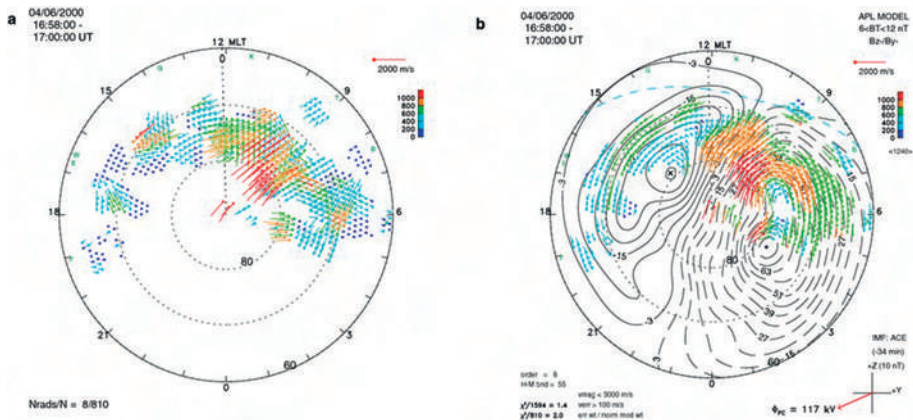
Rys. 5. Standardowa, przykładowa wizualizacja pomiarów z jednego kierunku azymutalnego (czyli dane dla jednej wiązki fal sondujących); na osi pionowej odległość radialna (numer okienka w kierunku radialnym), na osi poziomej czas UT; od góry: moc sygnału echa, średnia prędkość Dopplera, i rozmycie prędkości; szarym kolorem na panelu prędkości zaznaczono sygnał odbity od gruntu; pozostałe fragmenty echa to odbicie od nieregularności jonosferycznych (http://vt.superdarn.org/tiki-index.php?page=sd_tutorial)

Fig. 5. Standard example visualization of measurements from one azimuth direction (i.e. data for one probe beam); radial distance on the vertical axis (window number in the radial direction), UT on the horizontal axis; from above: echo signal strength, average Doppler velocity, and spectral width; the signal reflected from the ground is marked in gray on the speed panel; the remaining fragments of the echo are reflected from ionospheric irregularities (http://vt.superdarn.org/tiki-index.php?page=sd_tutorial)



Rys. 6. Standardowa wizualizacja prędkości Dopplera z całego pola widzenia radaru (uśredniona dla 1 minuty 47 sekund – 51 cykli pomiarowych) (http://vt.superdarn.org/tiki-index.php?page=sd_tutorial)

Fig. 6. Standard Doppler velocity visualization from the whole radar field of view (averaged over 1 minute 47 seconds – 51 measurement cycles) (http://vt.superdarn.org/tiki-index.php?page=sd_tutorial)



Rys. 7. Górny panel: zestawienie pomiarów chwilowej prędkości radialnej (*line of sight* (LOS) *velocity*) plazmy w jonosferze uzyskanych z echa jonosferycznego odbieranego przez radary SuperDARN; panel dolny: wyliczony z pomiarów techniką *Map Potential* rozkład potencjału elektrycznego w jonosferze; konwekcja $v \sim E \times B$ odbywa się stycznie do linii ekwipotencjalnych (Chisham i in. 2007, rys. 2)

Fig. 7. Top panel: summary of measurements of radial velocity (*line of sight* (LOS) *velocity*) of plasma in the ionosphere obtained from the ionospheric radar echo received by SuperDARN radars; bottom panel: calculated from measurements spatial distribution of the electric potential in the ionosphere with *Map Potential* technique; convection $v \sim E \times B$ is tangent to the equipotential lines (Chisham et al. 2007, fig. 2)

na niższych szerokościach (Lester 2013; Walach, Grocott 2019). W ostatnim opracowaniu Walach i Grocott podsumowali obserwacje z całej sieci SuperDARN w różnych warunkach zaburzonych, takich jak subburze lub wzmocnione sprzężenie z wiatrem słonecznym (np. większa prędkość lub gęstość wiatru słonecznego), wskazując na zwiększony w porównaniu z wcześniejszym obrazem statystycznym zasięg przestrzenny konwekcji napędzanej polem elektrycznym wiatru słonecznego, sięgającej nawet do 40° szerokości geomagnetycznej w fazie głównej silnych subburz.

Możliwość pomiarów radarami pierścienia średnio-szerokościowego (sieć StormDARN) przełożyła się również na możliwość szerszych badań zjawisk przepływu plazmy pod wpływem polaryzacyjnego pola elektrycznego w strefie subzorzowej, znanych jako PJ – *Polarization Jet*, SAPS – *SubAuroral Polarization Streams* i SAID – *SubAuroral Ion Drifts*, wcześniej wykrywanych lokalnie za pomocą satelitów oraz radarów niekoherentnego rozpraszania VHF (Spiro i in. 1979; Karlsson i in. 1998; przegląd w Nishitani i in. 2019). Pokazano, że zjawiska SAPS i SAID są częste, występują podczas nawet niewielkich zaburzeń magnetycznych i można badać ich subtelą dynamikę i strukturę przestrzenną oraz aktywność na obu półkulach (Oksavik i in. 2006; Clausen i in. 2012; Makarevich, Bristow 2014; Kunduri i in. 2018, przegląd wyników w Nishitani i in. 2019).

Monitorowanie jonosfery

Pomiar mocy sygnału docierającego do odbiornika jest wskaźnikiem rozkładu gęstości elektronów w jonosferze (Oksavik i in. 2010). Ma to zastosowanie, przy jednoczesnym pomiarze konwekcji, w prognozowaniu np. ruchów gęstszej plazmy jonosferycznej w rejonie polarnym (ang. *polar patches*) (Milan i in. 2002; Oksavik i in. 2010). Obecnie grupy australijskich radiowców pracują intensywnie nad wykorzystaniem nowej generacji radaru SuperDARN z cyfrową elektroniką do precyzyjnego wyznaczania kąta elewacji odbieranego sygnału (McDonald i in. 2013; Bland i in. 2014a), co pozwoli na wykorzystanie radaru do operacyjnego monitorowania rozkładu koncentracji elektronowej w warstwie F w całym polu widzenia radaru. Prace te rozpoczęli Amerykanie już w roku 2002 (Hughes i in. 2002). Ostatnie prace przyniosły też wyniki pokazujące możliwość monitorowania SuperDARN-em jonosferycznych efektów rozbłysków słonecznych (Berngardt i in. 2018, 2019).

Nieregularności jonosferyczne

Nieregularności jonosferyczne są naturalnym obiektem badań radarowych SuperDARN, bowiem zasada działania radarów koherentnego rozpraszania

opiera się na istnieniu odpowiednich nieregularności jonosferycznych w interesujących nas obszarach jonosfery. W szczególności systematyczne pomiary nowszych radarów sieci średnich szerokości pozwoliły uzyskać dane o systematycznym występowaniu nieregularności jonosferycznych w strefie subzorzowej i strefie średnich szerokości, w tym związanych ze zjawiskami SAPS (Ribeiro i in. 2012; de Larquier i in. 2013) i zjawiskami MSTID (ang. *Medium Scale Traveling Ionospheric Disturbances*) (Koustov i in. 2014), o których piszemy niżej.

Fale ULF

Radary SuperDARN stanowią również użyteczne narzędzie w badaniach nad falami magneto hydrodynamicznymi (MHD) ultra-niskich częstotliwości, o okresach rzędu 45–600 s (Bland i in. 2014b). Mają one znaczący udział w transferze energii w obrębie magnetosfery. Powodowane są przez zjawiska zewnętrzne, takie jak np. opływ magnetosfery przez wiatr słoneczny wzbudzający fale Kelvina-Helmholtza na magnetopauzie. Fale te mają stosunkowo duże, charakterystyczne rozmiary. Fale o mniejszych rozmiarach w azymucie generowane są przez mechanizmy wewnętrzne, jak np. dryfy wielkoskalowych „chmur” wysokoenergetycznych cząstek w magnetosferze. Przeprowadzane były testy, podczas których za pomocą nadajników wysokiej mocy generowano rejony podwyższonej jonizacji, na których następnie uzyskiwano rozproszenie sygnału. Podczas doświadczeń obserwowane były fale o niewielkich rozmiarach (Yeoman i in. 1997). Badania te przyczyniły się do lepszego poznania mechanizmów oddziaływania fala-cząstka, odpowiedzialnych za wzbudzanie tychże fal (Yeoman i in. 2012). W tej grupie badań pewną modyfikację stanowi technika Stereo (Lester i in. 2004) pozwalająca na jednoczesną pracę radarów w dwóch różnych trybach, z których jeden może oferować dużą rozdzielczość czasową. Obserwacje ULF radarami SuperDARN dotyczą zazwyczaj modulowanych pól elektrycznych w jonosferze, mających związek z falami (Ruohoniemi i in. 1991). Niekiedy wpływ fal objawia się cykliczną zmianą w wysokości punktu rozproszenia, co jest widoczne w ecach pochodzących od gruntu (Ponomarenko i in. 2003).

Zjawiska TID i fale grawitacyjne

Fale grawitacyjne w atmosferze (ang. *atmospheric gravity waves* – AGW) są jednym ze źródeł powstawania zaburzenia opisywanego jako *Travelling Ionospheric Disturbances* (TID), powodującego pionowe ruchy warstwy odbijającej, co z kolei skutkuje cyklicznymi zmianami takich właściwości obserwowanego na radarze echa, jak odległość odbicia i moc sygnału odbitego. TID kolejno ogniskuje i rozprasza sygnał radarowy w punkcie odbicia, co objawia się jako

modulacja echa pochodzącego od gruntu (Samson i in. 1990; Bristow i in. 1994). Również odległość, na jakiej zachodzi pierwsze odbicie od ziemi (tzw. *skip distance*) ulega zmianom (Stocker i in. 2000). W tym przypadku użyteczna staje się technika Stereo (Lester i in. 2004), która pozwala dokładnie zlokalizować źródło zjawiska (Karhunen 2006). Rozszerzenie sieci SuperDARN na średnie szerokości pozwala na badanie TID przy mniejszym udziale zakłóceń związanych z warunkami propagacji w rejonie formowania się fal, czyli w strefie zorzowej.

Fale o długościach od 150 do 350 km, quasi-periodyczne zaburzenia gęstości w warstwie F jonosfery o okresach 15-60 min, obserwowane przez radary średnio-szerokościowe, klasyfikowane są jako średnio-skalowe (ang. *Medium Scale TID* – MSTID). Obserwacje tych zjawisk, w połączeniu z obserwacjami optycznymi urządzeniem *all-sky imager* oraz pomiarami odbiornikami GPS, były prowadzone za pomocą radaru na Hokkaido (Ogawa i in. 2009) oraz radarem zlokalizowanym na Falklandach (Grocott i in. 2011).

Wielkoskalowe tzw. LSTID (ang. *Large Scale TID*) mają swe źródła w rejonie zorzowym. Ich rozmiary sięgają kilku tysięcy kilometrów, a okresy rzędu kilku godzin. Wnioski z obserwacji sugerują, że za ich powstawanie odpowiedzialne jest grzanie Joule’a w magnetosferze w rejonie kaspu (leja) polarnego, powiązane ze zwiększoną konwekcją (Karpachev i in. 2010). Obserwacje LSTID były prowadzone również równolegle z pomiarami TEC (ang. *Total Electron Content*) wykonywanymi odbiornikami GPS (Ogawa i in. 2009).

Występowanie zjawisk MSTID można za pomocą radarów SuperDARN śledzić na dużym obszarze jonosfery. Źródłem MSTID mogą być procesy elektrodynamiczne związane z intensyfikacją aktywności zorzowej, którym towarzyszy zwiększone sprzężenie atmosfery neutralnej i zjonizowanej. Ten rodzaj MSTID propaguje się od strefy zorzowej ku równikowi. Innym źródłem MSTID są atmosferyczne wewnętrzne fale grawitacyjne (AGW), wzbudzane w troposferze we wszystkich sektorach czasu lokalnego, niezależnie od pory roku i aktywności geomagnetycznej. AGW propagują się w górę, pobudzając ruchy mas powietrza w stratosferze oraz w mezosferze i dolnej termosferze. W pracy Frissell i in. (2014) przedstawiono wyniki analizy statystycznej zjawisk MSTID obserwowanych w warunkach dziennych radarem SuperDARN na stacji Blackstone, w okresie jednego roku przypadającego na fazę narastania dwudziestego czwartego cyklu aktywności słonecznej. Zjawisk MSTID poszukiwano w dwugodzinnych przedziałach czasu, analizując przebieg jednodominutowych średnich mocy echa pochodzącego z odbicia sygnału od gruntu. Spośród 1533 dwugodzinnych próbek danych, zjawiska MSTID zaobserwowano w 568 przypadkach (37%), w 368 przypadkach obserwowano wolnozmiennne echo od gruntu, zaś 597 próbek było bez echa lub z echem bardzo słabym. Jest wiele sposobów obserwacji MSTID (np. RTO Technical Report 2009; Dymond i in. 2011), ale SuperDARN pozwala widzieć z jednego punktu te zjawiska na olbrzymim obszarze.

Uruchomienie zaś dla sieci SuperDARN wspólnego centrum obliczeniowego (podobnie jak np. dla radioteleskopu LOFAR – *Low-Frequency Array for Radio astronomy*) umożliwi śledzenie TID i AGW w skali globalnej.

Ślady meteorów

Przelatujące w górnych warstwach ziemskiej atmosfery meteory, tworzą za sobą zjonizowane ślady stanowiące obiekty rozpraszające fale radarowe. Obserwację tych formacji prowadzi się przy użyciu dedykowanej aparatury, ale można do tego wykorzystać również radary SuperDARN (Hall i in. 1997; Berngardt i in. 2013, 2015a). Wyniki wykorzystywane są do badań długookresowych fal planetarnych (Jenkins i in. 1998; Bristow i in. 1999) oraz wiatrów mezosferycznych (Jenkins i in. 1998; Tsutsumi i in. 2009; Hibbins i in. 2011).

PMSE – Polar Mesosphere Summer Echoes

W okresie letnim, w rejonach polarnych na półkuli południowej, na radarach SuperDARN czasami obserwowane są echa pochodzące od struktur jonosferycznych znajdujących się w odległości zaledwie od 180 do 315 km od stacji radarowej. Echa te występują podczas okresów magnetycznie niezaburzonych i tworzą się wysokościach od 80 do 100 km, w strefie mezopauzy. Utrzymują się do 80 minut, a moc ich echa oscyluje quasi-periodycznie. Związane są prawdopodobnie ze zjawiskiem *Polar Mesosphere Summer Echoes* (PMSE) obserwowanym radarami VHF (Lester 2013). Podobne zjawiska na półkuli północnej, dające echa z wysokości 80 i 100 km, były obserwowane również na dedykowanych radarach MST (ang. *Mesosphere-Stratosphere-Troposphere*) (Ogawa i in. 2003).

Znaczenie dla innych działów nauki

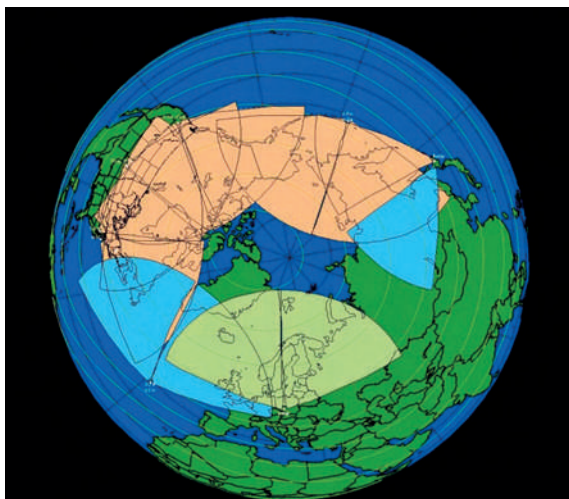
Monitorowanie i mierzenie przez sieć SuperDARN charakterystyk zjawisk TID i AGW, SAPS/SAID i SAIS podczas kampanii obserwacyjnych radioteleskopami czy dużą infrastrukturą radioastronomiczną, jak LOFAR, ma duże znaczenie dla radioastronomii (np. Kassim i in. 2007; Dymond i in. 2011).

Źródłami jonosferycznych nieregularności w atmosferze Ziemi mogą być też przeszkody topograficzne zaburzające przepływ mas powietrza, wybuchy wulkanów, trzęsienia ziemi, ekstremalne zjawiska pogodowe, turbulencja związana z atmosferycznym prądem strumieniowym. Istnienie i własności echa od gruntu zależą zaś od rodzaju i charakterystyk podłoża, od którego odbija się sygnał radarowy, np. ocean, masa lodowa (np. Greenwood i in. 2006; Ponomarenko i in.

2010; Thomas i in. 2014). Otwiera to wciąż nowe zastosowania badań techniką SuperDARN w geofizyce, fizyce atmosfery, zagadnieniach dotyczących klimatu (Nishitani i in. 2019).

SuperDARN w Polsce

Należy wykorzystać unikalną szansę, jaką w sieci StormDARN daje położenie geograficzne Polski. Na mapie lokalizacji i obszarów pracy radarów na półkuli płn. (rys. 1) wyraźnie widać puste miejsce na potrzebny dodatkowy radar w Europie. Na rysunku 8 przedstawiono pole widzenia hipotetycznych bliźniaczych radarów umiejscowionych w Borach Dolnośląskich (Wierzbowa) i planowanego radaru amerykańskiego na Azorach (pole niebieskie). Radar japoński Hokkaido West (pole niebieskie na wschodzie) jest już uruchomiony. Wraz z istniejącym już rosyjskim SuperDARN-em w Arti (jego pole widzenia nie jest zaznaczone) pierścień średnich szerokości zostałby w ten sposób zamknięty.



Rys. 8. Pierścień średnio-szerokościowy radarów StormDARN (kolor żółty); zaznaczono pole widzenia hipotetycznych bliźniaczych radarów umiejscowionych w Borach Dolnośląskich (Wierzbowa, kolor jasnozielony) i planowanego radaru amerykańskiego na Azorach (pole niebieskie); radar japoński Hokkaido West (pole niebieskie na wschodzie) jest już uruchomiony (mapa dzięki uprzejmości Simona Shepherd, Dartmouth, USA)

Fig. 8. Middle-latitude StormDARN radar ring (yellow); the field of view of hypothetical twin radars located in Bory Dolnośląskie (Wierzbowa, light green) and planned American radar in the Azores (blue field) was marked; the Japanese Hokkaido West radar (blue field in the east) is now operational (map courtesy of Simon Shepherd, Dartmouth, USA)

Korzyści płynące z uczestnictwa w jednorodnej globalnej infrastrukturze pomiarowej, działającej w sieci naukowej, centralnie zarządzanej przez międzynarodowy zespół doświadczonych naukowców, są atrakcyjne. Radar daje olbrzymie możliwości badawcze w szerokiej współpracy z najlepszymi ośrodkami naukowymi na świecie. Ponadto polska społeczność będzie mogła wykorzystać 40% czasu na projekty własne. Udział krajowy nie tylko wzmocniłby potencjał badawczy w tematyce, którą już uprawiamy (zjawiska pogody kosmicznej, współpraca przez naziemne wspomaganie misji satelitarnych, takich jak: ERG, ICON, THEMIS, SWARM, RBSP, badanie jonosfery, fal ULF, elektryczności atmosfery), ale może także zaowocować rozwojem nowej tematyki, np. badania globalnej dynamiki górnej atmosfery i jej zmian towarzyszących zmianom klimatu (np. Alexander i in. 2010). Perspektywy rozwoju badań nad elektrycznym obwodem globalnym Ziemi z pomocą SuperDARN są tematem osobnego artykułu (Odzimek 2019).

Centralna organizacja bazy danych ze wszystkich stacji sieci SuperDARN umożliwi badania dowolnych obszarów kuli ziemskiej. Dzięki polskiemu wkładowi naukowcy z naszego kraju mogliby swobodnie korzystać z całej zawartości bazy. Zaawansowanie technologiczne i informatyczne tej infrastruktury radarowej (techniki cyfrowe – DigiDARN (Parkinson i in. 2006)) da także szansę wykształcenia specjalistów informatyków i inżynierów-radiowców. Dotychczas siecią SuperDARN zainteresowani byli głównie naukowcy z Centrum Badań Kosmicznych PAN i Instytutu Geofizyki PAN (sieć GeoPlanet). W przyszłości naszymi partnerami mogłyby być inne instytucje krajowe oraz zagraniczne, np.: Applied Physics Laboratory of Johns Hopkins University, Virginia Polytechnic Institute and State University, University of Alaska, Dartmouth College, USA; British Antarctic Survey, University of Leicester, Anglia; University of Saskatchewan, Kanada; The Research Institute in Astrophysics and Planetology w Tuluzie, Francja; National Institute for Polar Research, Communications Research Laboratory, 60 Nagoya University, Japonia; La Trobe University, Australia; Institute for Space Astrophysics and Planetology w Rzymie-Frascati, Włochy; i inne (RAN, Chiny, RPA). Co najważniejsze, po pełnym opanowaniu tej techniki radarowej i koncepcyjnym przygotowaniu serwisów, polskie Regional Warning Center w CBK PAN w ramach International Space Environment Service (ISES) i ESA SSA otrzyma narzędzie, dzięki któremu będzie skutecznie wypełniać swoje zadania dla UE i ESA Space Weather Program – w serwisie jonosferycznym dla Galileo i użytkowników GPS, dla stacji LOFAR, dla Sztabu Generalnego Wojska Polskiego i innych odbiorców.

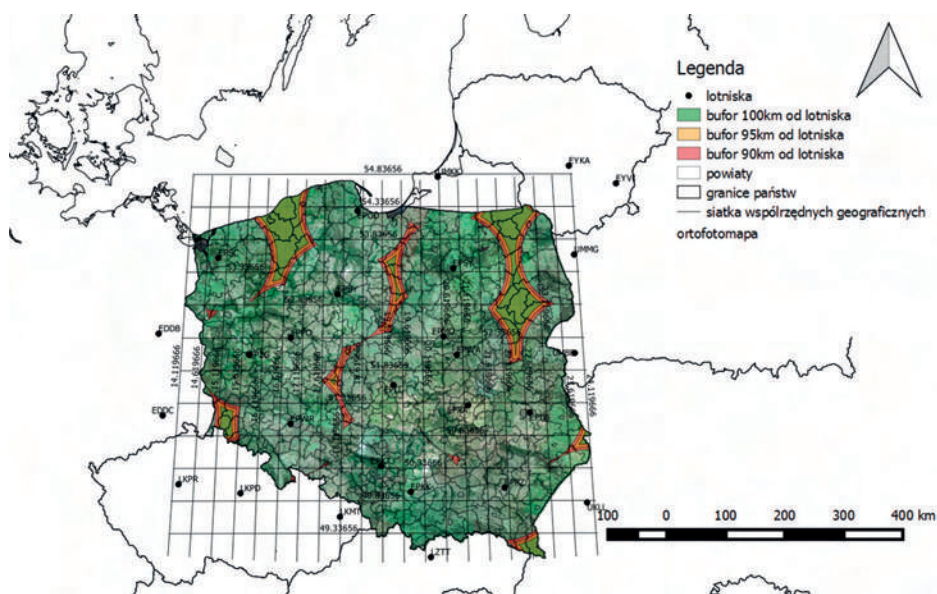
Kwestie lokalizacji

Z uwagi na oddziaływanie elektromagnetycznej wiązki radarowej generowanej przez nadajniki na różne aspekty bezpieczeństwa, stosuje się specjalne

kryteria dla lokalizacji radaru. Kryteria te to ograniczenie lokalizacji w odległości od kontrolowanych portów lotniczych (ok. 100 km) i większych siedzib mieszkalnych lub przemysłowych w polu pod dolną częścią wiązki w promieniu ok. 5-6 km (2-3 km od pojedynczych budynków) dla uniknięcia interferencji z innymi sygnałami oraz uniknięcia wpływu na działanie urządzeń radiowych (informacja własna – prof. Mark Lester i dr Chris Thomas, University of Leicester, Wielka Brytania). W kontekście możliwych efektów zdrowotnych przy narażeniu na działanie pól elektromagnetycznych, wykonane zostały pomiary w otoczeniu radarów Cutlass oraz nowego typu radaru SD na Svalbardzie. Mierzone pola EM bezpośrednio pod radarem i w bliskim sąsiedztwie były kilkakrotnie mniejsze niż zalecane maksymalne wartości dozwolone według norm prawa Unii Europejskiej². Radary SuperDARN starszego i nowego typu pozostają radarami małej mocy.

W przypadku Polski, kraju o powierzchni 312 tysięcy km², gdzie obecnie działa około dziesięciu lotnisk kontrolowanych rozrzuconych w różnych częściach kraju oraz średniej w Europie gęstości zaludnienia, ze względu na interferencję, wybór lokalizacji nie jest łatwy. Możliwe obszary lokalizacji radaru spełniających kryterium odległości od lotnisk kontrolowanych (uwzględniono działające i budowane lotniska cywilne w roku 2019) w Polsce i w krajach ościennych w obszarach w bliskiej odległości od granicy przedstawiono na rysunku 9. Zastosowano bufor o stałej odległości wokół lotnisk o promieniu 90, 95 i 100 km. Zastosowanie największego bufora pozwala na poszukiwanie dogodnej lokalizacji w kilku zakątkach Polski. Dozwolone obszary na północy Polski nie są najbardziej korzystne ze względu na redukcję pola widzenia radaru, który ma działać w pierścieniu StormDARN. Lokalizacja radaru na południowym wschodzie kraju, w Bieszczadach, również nie jest korzystna ze względu na ukształtowanie terenu oraz utrudniony dostęp w przypadku konieczności konserwacji, napraw czy modernizacji. W tej sytuacji pozostaje rejon Polski południowo-zachodniej, w województwie dolnośląskim (powiat lwówecki, zgorzelecki, bolesławiecki) albo bliżej centrum w województwie wielkopolskim (powiat pleszewski, ostrowski, kaliski), ewentualnie na wschodzie (powiat hrubieszowski), choć lokalizacje zachodnia i wschodnia mogą być kłopotliwe lub nieakceptowalne ze względu na bliskość granicy państwowej. Zmniejszony bufor daje również możliwości umiejscowienia radaru w województwie świętokrzyskim, na granicy powiatu kieleckiego z powiatami sąsiadującymi od południa: koneckim, buskim lub włoszczowskim, jędrzejowskim. Ta ostatnia lokalizacja jest bardzo korzystna ze względu na dostęp (magistrala i linia kolejowa, infrastruktura drogowa). Wymienione miejsca odznaczają się również niewysoką średnią gęstością zaludnienia: powiat hrubieszowski 51 mieszkańców/km², powiat włoszczowski 50

² patrz także <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/HTML/?uri=CELEX:32013L0035&from=EN#d1e39-1-1>



Rys. 9. Lokalizacja obszarów w odległości większej niż (poza buforem) 100, 95 i 90 km od lotnisk kontrolowanych (4-literowe kody Organizacji Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego, ICAO) na obszarze kraju wraz z podziałem na powiaty oraz ortofotomapą*

Fig. 9. Locations of regions outside buffers of 100, 95 and 90 km distance from controlled airports (denoted by codes of International Civil Aviation Organization, ICAO) on the orthophoto map of Poland divided into „powiaty” – local government administrative divisions

* ortofotomapa udostępniona przez Główny Urząd Geodezji i Kartografii w usłudze WMS <https://www.geoportal.gov.pl/uslugi/usluga-przegladania-wms>

mieszkańców/km², powiat jędrzejowski 69 mieszkańców/km², powiat bolesławiecki 69 osób/km², powiat kaliski 72 mieszkańców/km², powiat pleszewski 89 mieszkańców/km² tj. od około 40 do 60% średniego zaludnienia kraju 123/km²³.

W dotychczasowych rozważaniach i analizach przyjmowano hipotetyczne lokalizacje w Polsce w województwie dolnośląskim w Wierzbowej, np. Popielawska i in. (2011), Góral i in. (2013). Góral (2019b) przedstawia symulacje wiązki radarowej dla przyjętych dla tego celu lokalizacji w Wierzbowej (powiat bolesławiecki) oraz w okolicach Włoszczowej (Góral 2019a).

Jak widać na rysunku 8, polski „podwójny” radar (tzn. dwa szyki antenowe pod kątem 53° względem siebie) umieszczony na południu Polski miałby wspólne pole widzenia z amerykańskim radarem na Azorach w przypadku pola zachodniego. Pole wschodnie przecinałoby się częściowo z polem rosyjskiego

³ dane GUS, <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/ludnosc/ludnosc/powierzchnia-i-ludnosc-w-przekroju-terytorialnym-w-2018-roku,7,15.html>

radaru na stacji geofizycznej Arti koło Jekaterynburga (EKB) i planowanym chińskim radarem w Kashi oraz z radarami na Grenlandii i w Finlandii (SuperDARN zorzowy). W przypadku zastosowania wersji elektroniki takiej, jak w radarze TIGER-3 (patrz poniżej – cyfrowe formowanie wiązki, wbudowana cyfrowa kalibracja i kontrola fazy, 38 kW mocy), jonosfera nad Hornsundem znajdowałaby się głęboko wewnątrz pola widzenia polskiego radaru, przy zastosowaniu zaś elektroniki klasycznej byłaby zaledwie na skraju pola widzenia, skąd echa są bardzo słabe i rzadko obserwowane.

Częstotliwościowe uwarunkowania prawne

Analiza rysunków 4a-e pozwala zrozumieć, dlaczego nie można określić z góry optymalnej częstotliwości pracy radaru i dlaczego zależy ona (poprzez kąt zenitalny Słońca) od czasu lokalnego i pory roku oraz od stanu aktywności Słońca (poprzez poziom promieniowania jonizującego, który determinuje koncentrację elektronową). Dodatkowo powinno się uwzględnić aktualny stan aktywności geomagnetycznej, a dla stacji w Polsce także aktualne położenie owalu zorzowego, wykorzystując np. modyfikację modelu jonosfery STORM (Araujo-Pradere i in. 2002; Bilitza i in. 2014). Wybrane zakresy pracy radaru muszą jednak spełniać wymagania prawne obowiązujące w danym kraju. W Polsce uwarunkowania te określają, aby radar działał w zakresach częstotliwości przewidzianych prawem krajowym i wskazanych w Krajowej Tablicy Przeznaczeń Częstotliwości (KTPCZ) o przeznaczeniu dla służby radiolokalizacyjnej i użytkowaniu cywilnym lub cywilno-rządowym (informacja od państwowego Urzędu Komunikacji Elektronicznej na zapytanie A. Odzimek, M. Kubicki, B. Popielawska). W obecnej wersji KTPCZ (załącznik do Rozporządzenia Rady Ministrów z dnia 24 kwietnia 2017, pozycja 920) tylko trzy zakresy częstotliwości z zakresu pracy radaru SuperDARN spełniają te kryteria: 9305-9355 kHz, 13450-13550 kHz oraz 16100-16200 kHz. Jest to zbyt wąski i częściowo nieodpowiedni zakres częstotliwości, by radar mógł działać zgodnie z prawem w Polsce. W chwili obecnej jest to podstawowy problem uniemożliwiający lokalizację radaru w kraju. Dlatego też nie można było wykorzystać propozycji z Uniwersytetu w Leicester (prof. M. Lester) i Uniwersytetu w Lancaster (prof. J. Wild) usadowienia w Polsce radaru brytyjskiego i podpisania umowy o współpracy.

Projekt budowy nowego radaru w Polsce wymaga więc usunięcia ograniczeń częstotliwościowych oraz wskazania odpowiedniej i akceptowalnej lokalizacji. Do interpretacji pomiarów radarowych będzie można wykorzystywać oprogramowanie opierające się na klasycznym fortranowskim programie do trasowania w trzech wymiarach promienia fali radiowej propagującej się w zadanej jonosferze (Jones, Stephenson 1975; Bianchi i in. 2011; Azzarone i in. 2012; Góral 2019a-b).

Inne kwestie techniczne

Poza lokalizacją i uzyskaniem pozwoleń w UKE na korzystanie z potrzebnych częstotliwości, poważnym wyzwaniem jest znalezienie odpowiedniego terenu i uzyskanie zgody na budowę radaru. Zakładając, że powyższe trudności da się rozwiązać, w ostatecznej wersji wniosku o finansowanie SuperDARN-u w Polsce należy podjąć decyzję co do rodzaju radaru. Niezbędna jest ocena skuteczności monitorowania jonosfery w całym polu widzenia radaru typu TIGER-3 oraz zbadanie zapotrzebowania na te pomiary, jeśli wydawałyby się one bardziej odpowiednie dla nauki i użytkowników, takich jak wojsko, telekomunikacja itp., niż dane z klasycznego SuperDARN-u. Ważnym aspektem jest również cena – radar TIGER-3 jest co najmniej trzy razy droższy od klasycznego radaru SuperDARN wraz z elektroniką.

Powinniśmy ocenić, czy, a jeśli tak, to jakie elementy elektroniki radaru moglibyśmy wykonać w Polsce. Współpraca z wydziałami elektronicznym i telekomunikacyjnym jest bardzo pożądana, wręcz niezbędna, nie tylko przy wyborze rodzaju elektroniki i współwykonawstwie radaru, lecz także w okresie uruchamiania, testowania i konserwacji systemu. Elektrycy z CBK mają duże doświadczenie w budowie klasycznych jonosond, w technologii FPGA i oprogramowaniu jonosond, co jest ważnym atutem w tym projekcie. Istnieje również opcja zakupu kompletnej elektroniki, np. w University of Leicester lub Saskatchewan, wraz z montażem i uruchomieniem systemu (podobnie jak to się dzieje w przypadku POLFAR-u, czyli polskiej części międzynarodowego projektu LOFAR). Opcja współwykonawstwa w Polsce ma zalety nie tylko ze względu na cenę, ale przede wszystkim z uwagi na możliwość wykształcenia własnych specjalistów radioinżynierów, w celu pełnego wykorzystania potencjału badawczego radaru (projekty niestandardowe własne, konserwacja, naprawy). Z kolei opcja zakupu być może umożliwi szybsze wdrożenie pomiarów.

Podsumowanie

Sieć radarów SuperDARN stanowi potężne narzędzie do obserwacji i badań zjawisk w atmosferze, jonosferze i na rozległych powierzchniach Ziemi oraz związków Ziemia-Słońce. Lokalizacja nowego radaru w Polsce jest korzystna dla całej międzynarodowej społeczności naukowej SuperDARN-u, a polskie uczestnictwo w konsorcjum dałoby pozytywne korzyści dla rozwoju nauki o Ziemi u nas i wzmocniłoby nasz udział w europejskiej służbie pogody kosmicznej. W obecnej chwili najpoważniejszą przeszkodą w kontynuacji prac przygotowawczych do lokalizacji radaru w Polsce jest kwestia dostępności częstotliwości zgodnie z prawem krajowym.

L i t e r a t u r a

- Alexander M.J., Geller M., McLandress C., Polavarapu S., Preusse P., Sassi F., Sato K., Eckermann S., Ern M., Hertzog A., Kawatani Y.A., Pulido M., Shaw T., Sigmond M., Vincent R., Watanabe S., 2010, Recent developments in gravity-wave effects in climate models and the global distribution of gravity-wave momentum flux from observations and models, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 136 (650), 1103-1124, DOI: 10.1002/qj.637
- Araujo-Pradere E.A., Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V., 2002, STORM: An empirical storm-time ionospheric correction model 1. Model description, *Radio Science*, 37 (5), DOI: 10.1029/2001RS002467
- Azzarone A., Bianchi C., Pezzopane M., Pietrella M., Scotto C., Settimi A., 2012, IONORT: A Windows software tool to calculate the HF ray tracing in the ionosphere, *Computers & Geosciences*, 42, 57-63, DOI: 10.1016/j.cageo.2012.02.008
- Baker K.B., Dudeney J.R., Greenwald R.A., Pinnock M., Newell P.T., Rodger A.S., Mattin N., Meng C.-I., 1995, HF radar signatures of the cusp and low-latitude boundary layer, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 100 (A5), 7671-7696, DOI: 10.1029/94JA01481
- 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 SuperDARN radar at middle latitudes, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 112 (A1), DOI: 10.1029/2006JA011982
- Baker J.B.H., Ruohoniemi J.M., Shepherd S.G., McWilliams K.A., Greenwald R.A., Bristow W.A., 2008, Those DARN radars: new directions for the Super Dual Auroral Radar Network, [w:] *Proceedings of XXIX URSI General Assembly*, 7-16 sierpień 2008, Chicago, USA, Union Radio Scientifique Internationale
- Berngardt O.I., Kurkin V.I., Zherebtsov G.A., Kusonski O.A., Grigorieva S.A., 2013, Ionospheric effects during first 2 hours after the Chelyabinsk meteorite impact, Cornell University, arXiv:1308.3918 [physics.geo-ph]
- Berngardt O.I., Perevalova N.P., Dobrynina A.A., Kutelev K.A., Shestakov N.V., Bakhtiarov V.F., Kusonsky O.A., Zagretidinov R.V., Zherebtsov G.A., 2015b, Toward the azimuthal characteristics of ionospheric and seismic effects of “Chelyabinsk” meteorite fall according to the data from coherent radar, GPS, and seismic networks, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 120 (12), 10754-10771, DOI: 10.1002/2015JA021549
- 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
- Berngardt O.I., Ruohoniemi J.M., St-Maurice J.-P., Marchaudon A., Kosch M.J., Yukimatu A.S., Nishitani N., Shepherd S.G., Marcucci M.F., Hu H., Nagatsuma T., Lester M., 2019, Global diagnostics of ionospheric absorption during X-Ray solar flares based

- on 8- to 20-MHz noise measured by over-the-horizon radars, *Space Weather*, 17 (6), 907-924, DOI: 10.1029/2018SW002130
- Berngardt O.I., Zolotukhina N.A., Oinats A.V., 2015a, Observations of field-aligned ionospheric irregularities during quiet and disturbed conditions with EKB radar: first results, *Earth, Planets and Space*, 67 (1), DOI: 10.1186/s40623-015-0302-3
- Bianchi C., Settini, A., Scotto C., Azzarone A., Lozito A., 2011, A method to test HF ray tracing algorithm in the ionosphere by means of the virtual time delay, *Advances in Space Research*, 48 (10), 1600-1605, DOI: 10.1016/j.asr.2011.07.020
- Bilitza D., Altadill D., Zhang Y., Mertens C., Truhlik V., Richards P., McKinnell L-A., Reinisch B., 2014, The International Reference Ionosphere 2012 a model of international collaboration, *Journal of Space Weather and Space Climate*, 4, DOI: 10.1051/swsc/2014004
- Bland E.C., McDonald A.J., de Larquier S., Devlin J.C., 2014a, Determination of ionospheric parameters in real time using SuperDARN HF Radars, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 119 (7), 5830-5846, DOI: 10.1002/2014JA020076
- Bland E.C., McDonald A.J., Menk F.W., Devlin J.C., 2014b, Multipoint visualization of ULF oscillations using the Super Dual Auroral Radar Network, *Geophysical Research Letters*, 41 (18), 6314-6320, DOI: 10.1002/2014GL061371
- Bojanowska M., 2005, Niezwykłe silne burze pogody kosmicznej: zorze polarne nad Polską, *Przegląd Geofizyczny*, 50 (3-4), 219-227
- Bristow W.A., Greenwald R.A., Samson J.C., 1994, Identification of high-latitude acoustic gravity wave source using the Goose Bay HF radar, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 99 (A1), 319-331, DOI: 10.1029/93JA01470
- Bristow W.A., Yee J.-H., Zhu X., Greenwald R.A., 1999, Simultaneous observations of the July 1996 2-day wave event using the Super Dual Auroral Radar Network and the High Resolution Doppler Imager, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 104 (A6), 12715-12722, DOI: 10.1029/1999JA900030
- 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., Pin-nock 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
- Clausen L.B.N., Baker J.B.H., Ruohoniemi J.M., Greenwald R.A., Thomas E.G., Shepherd S.G., Talaat E.R., Bristow W.A., Zheng Y., Coster A.J., Sazykin S., 2012, Large-scale observations of a subauroral polarization stream by midlatitude SuperDARN radars: Instantaneous longitudinal velocity variations, *Journal Geophysical Research – Space Physics*, 117 (A5), DOI: 10.1029/2011JA017232
- Custovic E., McDonald A.J., Whittington J., Elton D., Kane T.A., Devlin J.C., 2013, New antenna layout for a SuperDARN HF radar, *Radio Science*, 48 (6), 722-728, DOI: 10.1002/2013RS005156

- Dymond K.F., Watts C., Coker C., Budzien S.A., Bernhardt P.A., Kassim N., Lazio T.J., Weiler K., Crane P.C., Ray P.S., Cohen A., Clarke T., Rickard L.J., Taylor G.B., Schinzel F., Pihlstrom Y., Kuniyoshi M., Close S., Colestock P., Myers S., Datta, A., 2011, A medium-scale traveling ionospheric disturbance observed from the ground and from space, *Radio Science*, 46 (5), DOI: 10.1029/2010RS004535
- 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
- Gopalswamy N., 2009, Introduction to special section on Large Geomagnetic Storms, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 114 (A3), DOI: 10.1029/2008JA014026
- Góral G., 2019a, 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
- Góral G., 2019b, Radary SuperDARN – narzędzie do badania i monitorowania atmosfery i przestrzeni wokółziemskiej, *Przegląd Geofizyczny*, artykuł wysłany
- Góral G., Koperski P., Kubicki M., Odzimek A., 2013, IRI-2011 ray paths simulation for mid-latitude SuperDARN station in Poland, *International Reference Ionosphere (IRI) Workshop*, 24-28 czerwca 2013, Olsztyn, Polska
- 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
- Greenwald R.A., Baker K.B., Hutchins R.A., Hanuise C., 1985, An HF phased-array radar for studying small-scale structure in the high-latitude ionosphere, *Radio Science*, 20 (1), 63-79, DOI: 10.1029/RS020i001p00063
- Greenwald R.A., Oksavik K., Barnes R., Ruohoniemi J.M., Baker J., Talaat E.R., 2008, First radar measurements of ionospheric electric fields at sub-second temporal resolution, *Geophysical Research Letters*, 35 (3), DOI: 10.1029/2007GL032164
- Greenwood R.I., Parkinson M.L., Ye H., Dyson P.L., 2006, Oceanographic research: A new application for SuperDARN radars, [w:] *Proceedings of Workshop on Applications of Radio Science*, WARS 2006 Conference, 15-17 luty, Leura, Australia
- Grocott A., Milan S.E., Baker J.B.H., Freeman M.P., Lester M., Yeoman T.K., 2011, Dynamic subauroral ionospheric electric fields observed by the Falkland Islands radar during the course of a geomagnetic storm, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 116 (A11), DOI: 10.1029/2011JA016763
- Hall G.E., MacDougall J.W., Moorcroft D.R., St.-Maurice J.-P., Manson A.H., Meek C.R., 1997, Super Dual Auroral Radar Network observations of meteor echoes, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 102 (A7), 14603-14624, DOI: 10.1029/97JA00517

- 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
- Hughes J.M., Bristow W.A., Greenwald R.A., Barnes R.J., 2002, Determining characteristics of HF communications links using SuperDARN, *Annales Geophysicae*, 20 (7), 1023-1030, DOI: 10.5194/angeo-20-1023-2002
- Jenkins B., Jarvis M.J., Forbes D.M., 1998, Mesospheric wind observations derived from SuperDual Auroral Radar Network (SuperDARN) HF radar meteor echoes at Halley, Antarctica: Preliminary results, *Radio Science*, 33 (4), 957-965, DOI: 10.1029/98RS01113
- Jones R.M., Stephenson J.J., 1975, A versatile 3-D ray tracing computer program for radio waves in the ionosphere, OT Report 75-76, US Dept. of Commerce, Office of Telecommunications, Waszyngton, 197 s.
- Karhunen T.J.T., Robinson T.R., Arnold N.F., Lester M., 2006, Determination of the parameters of travelling ionospheric disturbances in the high-latitude ionosphere using CUTLASS coherent scatter radars, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 68 (3-5), 558-567, DOI 10.1016/j.jastp.2005.03.021.
- Karlsson T., Marklund G.T., Blomberg L.G., Mälkki A., 1998, Subauroral electric fields observed by the Freja satellite: a statistical study, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 103 (A3), 4327-4341, DOI: 10.1029/97JA00333
- Karpachev A.T., Beloff N., Carozzi T.D., Denisenko P.F., Karhunen T.J.T., Lester M., 2010, Detection of large scale TIDs associated with the dayside cusp using SuperDARN data, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 72 (9-10), 653-661, DOI: 10.1016/j.jastp.2010.02.018
- Kassim N.E., Lazio T.J.W., Erickson W.C., Perley R.A., Cotton W.D., Greisen E.W., Cohen A.S., Hicks B., Schmitt H.R., Katz D., 2007, The 74 MHz System on the Very Large Array, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 172 (2), 686-719, DOI: 10.1086/519022
- Koustov A.V., Yakymenko K.N., Nishitani N., Ponomarenko P.V., 2014, Hokkaido HF radar signatures of periodically reoccurring nighttime medium scale traveling ionospheric disturbances detected at short ranges, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 119 (2), 1200-1218, DOI: 10.1002/2013JA019422
- Kunduri B., 2013, A study of interhemispheric magnetic conjugacy and large scale magnetosphere-ionosphere coupling using SuperDARN radars, PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 109 s.
- Kunduri B.S.R., Baker J.B.H., Ruohoniemi J.M., Nishitani N., Oksavik K., Erickson P.J., Coster A.J., Shepherd S.G., Bristow W.A., Miller E.S., 2018, A new empirical model of the subauroral polarization stream, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 123 (9), 7342-7357, DOI: 10.1029/2018JA025690
- de Larquier S., Ponomarenko P., Ribeiro A.J., Ruohoniemi J.M., Baker J.B.H., Sterne K.T., Lester M., 2013, On the spatial distribution of decameter-scale sub-auroral ionospheric

- irregularities observed by SuperDARN radars, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 118 (8), 5244-5254, DOI: 10.1002/jgra.50475
- 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), DOI: 10.3724/SP.J.1085.2013.00001
- Lester M., Chapman P., Cowley S., Crooks S., Davies J., Hamadyk P., McWilliams K., Milan S., Parsons M., Payne D., Thomas E., Thornhill J., Wade N., Yeoman, T., Barnes R., 2004, Stereo CUTLASS – A new capability for the SuperDARN HF radars, *Annales Geophysicae*, 22 (2), 459-473, DOI: 10.5194/angeo-22-459-2004
- Liemohn M.W., Zhang J.-C., Thomsen M.F., Borovsky J.E., Kozyra J.U., Ilie R., 2008, Plasma properties of superstorms at geosynchronous orbit: How different are they?, *Geophysical Research Letters*, 35 (6), DOI: 10.1029/2007GL031717
- Makarevich R.A., Bristow W.A., 2014, Fine structure of subauroral electric field and electron content, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 119 (5), 3789-3802, DOI: 10.1002/2014JA019821
- McDonald A.J., Whittington J., de Larquier S., Custovic E., Kane T.A., 2013, Elevation angle of arrival determination for a standard and a modified SuperDARN HF radar layout, *Radio Science*, 48 (6), 709-721, DOI: 10.1002/2013RS005157
- Milan S.E., Lester M., Yeoman T.K., 2002, HF radar polar patch formation revisited: summer and winter variations in dayside plasma structuring, *Annales Geophysicae*, 20 (4), 487-499, DOI: 10.5194/angeo-20-487-2002
- Milan S.E., Provan G., Hubert B., 2007, Magnetic flux transport in the Dungey cycle: A survey of dayside and nightside reconnection rates, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 112 (A1), DOI: 10.1029/2006JA011642
- 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), DOI: 10.1186/s40645-019-0270-5
- Odzimek A., 2019, SuperDARN – perspektywy dla badań atmosfery, *Przegląd Geofizyczny*, artykuł wysłany
- Ogawa T., Arnold N.F., Kirkwood S., Nishitani N., Lester M., 2003, Finland HF and Esrange MST radar observations of polar mesosphere summer echoes, *Annales Geophysicae*, 21 (4), 1047-1055, DOI: 10.5194/angeo-21-1047-2003
- Ogawa T., Nishitani N., Otsuka Y., Shiokawa K., Tsugawa T., Hosokawa K., 2009, Medium-scale traveling ionospheric disturbances observed with the SuperDARN Hokkaido radar, all-sky imager, and GPS network and their relation to concurrent

- sporadic E irregularities, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 114 (A3), DOI: 10.1029/2008JA013893
- Oksavik K., Barth V.L., Moen J., Lester M., 2010, On the entry and transit of high-density plasma across the polar cap, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 115 (A12), DOI: 10.1029/2010JA015817
- Oksavik K., Greenwald R.A., Ruohoniemi J.M., Hairston M.R., Paxton L.J., Baker J.B.H., Gjerloev J.W., Barnes R.J., 2006, First observations of the temporal/spatial variation of the sub-auroral polarization stream from the SuperDARN Wallops HF radar, *Geophysical Research Letters*, 33 (12), DOI: 10.1029/2006GL026256
- Parkinson M.L., Whittington J.S., Devlin J.C., Why do we need DIGIDARN – a global network?, [w:] *Proceedings of Workshop on Applications of Radio Science, WARS 2006 Conference*, 15-17 luty, Leura, Australia
- Ponomarenko P.V., Menk F.W., Waters C.L., 2003, Visualization of ULF waves in SuperDARN data, *Geophysical Research Letters*, 30 (18), 1926-1929, DOI: 10.1029/2003GL017757
- Ponomarenko P.V., St. Maurice J.-P., Hussey G.C., Koustov A.V., 2010, HF ground scatter from the polar cap: Ionospheric propagation and ground surface effects, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 115 (A10), DOI: 10.1029/2010JA015828
- Popielawska B., A. Odzimek, I. Stanisławska, M. Kubicki, A. Wernik, G. Góral, M. Grzesiak, M. Pożoga, 2011, SuperDARN in Poland – study of potential scientific benefits, *SuperDARN Workshop 2011*, 30 maja – 3 czerwca 2011, Dartmouth College, Hanover, New Hampshire, USA, <http://superdarn.thayer.dartmouth.edu/workshop/proceedings.html>
- Ribeiro A.J., Ruohoniemi J.M., Baker J.B.H., Clausen L.B.N., Greenwald R.A., Lester M., 2012, A survey of plasma irregularities as seen by the midlatitude Blackstone SuperDARN radar, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 117 (A2), DOI: 10.1029/2011JA017207
- RTO Technical Report TR-IST-051, 2009, Characterising the Ionosphere, Final Report of Task Group IST-051, chapt.1.1.1.2 (Hawlitschka Stefan), chapt. 1.3.8 (Prikrýl Paul)
- Ruohoniemi J.M., Baker K.B., 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., Greenwald R.A., Baker K.B., Samson J.C., 1991, HF radar observations of Pc 5 Field Line Resonances in the midnight/early morning MLT sector, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 96 (A9), 15697-15710, DOI: 10.1029/91JA00795
- Samson J.C., Greenwald R.A., Ruohoniemi J.M., Frey A., Baker K.B., 1990, Goose Bay radar observations of Earth-reflected, atmospheric gravity-waves in the high-latitude ionosphere, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 95 (A6), 7693-7709, DOI: 10.1029/JA095iA06p07693
- Sojka J.J., Rice D., Eccles J.V., Berkey F.T., Kintner P., Denig W., 2004, Understanding midlatitude space weather: Storm impacts observed at Bear Lake Observatory on 31 March 2001, *Space Weather*, 2 (10), DOI: 10.1029/2004SW000086

- Spiro R.W., Heelis R.A., Hanson W.B., 1979, Rapid subauroral ion drifts observed by Atmosphere Explorer C, *Geophysical Research Letters*, 6 (8), 657-660, DOI: 10.1029/GL006i008p00657
- Sterne K.T., 2010, Testing the re-designed SuperDARN HF radar and modeling of a Twin Terminated Folded Dipole Array, MSc. Electr. Eng. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 104 s.
- Stocker A.J., Arnold N.F., Jones T.B., 2000, The synthesis of travelling ionospheric disturbance (TID) signatures in HF radar observations using ray tracing, *Annales Geophysicae*, 18 (1), 56-64, DOI: 10.1007/s00585-000-0056-4
- Thomas E.G., Sterne K.T., Ponomarenko P.V., Baker J.B.H., Ruohoniemi J.M., 2014, Remote sensing of sea ice cover using SuperDARN HF radars, 2014 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM), DOI: 10.1109/USNC-URSI-NRSM.2014.6928034
- Tsutsumi M., Yukimatu A.S., Holdsworth D.A., Lester M., 2009, Advanced SuperDARN meteor wind observations based on raw time series analysis technique, *Radio Science*, 44 (2), DOI: 10.1029/2008RS003994
- 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
- Yeoman T.K., James M., Mager P.N., Klimushkin D.Y., 2012, SuperDARN observations of high-m ULF waves with curved phase fronts and their interpretation in terms of transverse resonator theory, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 117 (A6), DOI: 10.1029/2012JA017668
- Yeoman T.K., Wright D.M., Robinson T.R., Davies J.A., Rietveld M., 1997, High spatial and temporal resolution observations of an impulse driven field line resonance in radar backscatter artificially generated with the Tromsø heater, *Annales Geophysicae*, 15 (6), 634-644, DOI: 10.1007/s00585-997-0634-9
- Yukimatu A.S., Tsutsumi M., 2002, A new SuperDARN meteor wind measurement: Raw time series analysis method and its application to mesopause region dynamics, *Geophysical Research Letters*, 29 (20), DOI: 10.1029/2002GL015210

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

SuperDARN (Super Dual Auroral Radar Network) jest światową siecią radarów do badania górnych warstw atmosfery, jonosfery i ich sprzężenia z magnetosferą i wiatrem słonecznym (Greenwald i in. 1995; Chisham i in. 2007; Lester 2008, 2013, Nishitani i in. 2019). W artykule przybliżamy szczegóły techniczne, tematy badawcze i publikacje związane z działalnością SuperDARN oraz korzyści płynące z polskiego w nim udziału, który mógłby wzmocnić badania krajowe, jak i współpracę międzynarodową oraz otworzyć nowe tematy badawcze. Zanim to będzie możliwe, należy rozwiązać kilka technicznych kwestii, których tło i perspektywy nakreślamy.

Słowa kluczowe: SuperDARN, radar, jonosfera, magnetosfera, atmosfera, fale radiowe, HF, infrastruktura badawcza, Polska.

S u m m a r y

SuperDARN (Super Dual Auroral Radar Network) is a global radar network for studying the upper atmosphere, ionosphere, thermosphere and mesosphere and their coupling with the magnetosphere and solar wind (Greenwald et al. 1995; Chisham et al. 2007; Lester 2008, 2013, Nishitani et al. 2019). In the article we bring closer to national readers the SuperDARN network through describing its technical details, projects and publications. In addition to strengthening present research Polish participation in SuperDARN could result in development of new topics in national research and in international cooperation. Before it is possible, several technical issues should be solved, the background and perspectives of which we outline in the article.

Keywords: SuperDARN, radar, ionosphere, magnetosphere, atmosphere, radio waves, HF, research infrastructure, Poland.