

Marek GOŁKOWSKI 

University of Colorado Denver, Department of Electrical Engineering

HAARP – UNIKALNA STACJA DO BADAŃ GEOFIZYCZNYCH

HAARP – A UNIQUE FACILITY FOR GEOPHYSICAL RESEARCH

Wstęp

HAARP (ang. *High Frequency Active Auroral Research Program*) – to nazwa amerykańskiego programu badań naukowych, a także głównej stacji badawczej tego programu na Alasce. Pierwotnym celem projektu było wg słów jego twórców: *»Zrozumienie, symulowanie i kontrola procesów zachodzących w jonosferze, które mogą mieć wpływ na działanie systemów komunikacji i nadzoru elektronicznego«*. Głównym elementem stacji, która powstała na przełomie XXI w., to układ stu osiemdziesięciu anten dipolowych o całkowitej mocy promieniowania 3,6 MW w pasmie 2,8-9 MHz. Stacja HAARP jest podobna do innych istniejących ośrodków badawczych tego typu na świecie, lecz góruje nad nimi w całkowitej mocy promieniowania i możliwościach dynamicznego sterowania i kształtowania wiązki promieniowania. Mimo że główne środki finansowe do budowy instalacji i późniejszych badań pochodziły z departamentu obrony USA, badania były przeprowadzone głównie przez cywilne zespoły ze świata akademickiego, a ich wyniki publikowane w ogólnodostępnych czasopismach naukowych. Obecnie stacja jest zarządzana przez University of Alaska Fairbanks i jest dostępna dla naukowców z całego świata, również z Polski, w ramach modelu biznesowego „pay to play” w którym użytkownik płaci za czas eksploatacji instalacji do danego eksperymentu. Obecny koszt operacji układu antenowego przy pełnej mocy 3,6 MW wynosi \$5000 na godzinę i pokrywa głównie koszt oleju napędowego do generatorów. Niniejsza praca zawiera informacje techniczne o stacji i opis kluczowych wyników i badań.

Historia stacji i dane techniczne

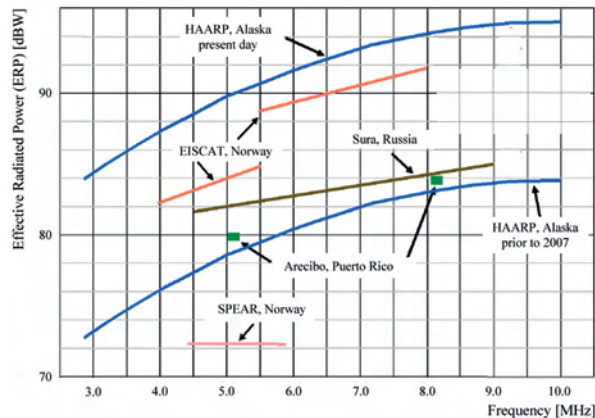
Stacja HAARP znajduje się 5 km od miejscowości Gakona w centralnej Alasce (współrzędne geograficzne stacji: 62,39°N; 145,15°W). Słowo „miejscowość” należy rozumieć w kontekście warunków na środkowej Alasce i zwrócić uwagę na fakt, że infrastruktura Gakony jest ograniczona do jednopokojowej placówki poczty, jednej restauracji z noclegami (która jest zresztą nieczynna zimą) i polowego pasu startowego, gdzie mogą lądować małe samoloty. Niewątpliwie konstrukcja dużej instalacji wojskowej o powierzchni 16 ha w środku puszczy (patrz rys. 1) i pod opieką załogi składającej się z nie więcej niż kilka osób, budziła od początku zdziwienie i jest częściowo źródłem rozmaitych teorii spiskowych. Oryginalny plan na lokalizację, który ostatecznie nie doszedł do skutku, zawierał umieszczenie tam radaru poza-horyzontalnego. Wybór tego obszaru na stację naukową pozwolił ominąć kosztowny i czasochłonny proces kolejnych badań środowiskowych (ang. *environmental impact study*) niezbędnych do formalnego pozwolenia na budowę w innym miejscu. W ostatecznym rozrachunku lokalizacja stacji w strefie sub-zorzowej, okazała się też korzystna dla badań, bo daje dostęp do rozmaitych warunków geofizycznych. Jonosfera na tej szerokości jest często stabilna, ale jednocześnie zjawiska zorzy polarnej nie są rzadkie, co pozwala na eksperymenty w warunkach spokojnych, jak i też mocno zaburzonych. Jonosfera nad HAARP regularnie zawiera też naturalne prądy zorzowe, do których można wprowadzić kontrolowane perturbacje. Czynniki McIlwaina [McIlwain 1961], lokalnego pola geomagnetycznego, wynosi $L = 4,9$, co oznacza, że linie pola magnetycznego łączą się z głęboką magnetosferą, ale są wciąż zamknięte i punkt sprzężony jest dostępny na południowej półkuli.



Rys. 1. Widok na układ antenowy i główny budynek stacji HAARP (fot. US Air Force)

Fig. 1. View of HAARP dipole array and main building (photo: U.S. Air Force)

Głównym instrumentem stacji jest układ antenowy, który początkowo zawierał 96 dipoli przy łącznej mocy promieniowania 960 kW (1994 r.) i został ostatecznie rozbudowany do 180 dipoli przy łącznej mocy promieniowania 3,6 MW w 2007 r., kiedy stacja została dokończona. Układ antenowy HAARP jest w stanie promieniować fale z polaryzacją kołową prawoskrętną (X-mode) lub polaryzacją kołową lewoskrętną (O-mode). Forma polaryzacji odgrywa istotną rolę w sposób oddziaływania fal z plazmą w jonosferze. Rysunek 2 przedstawia moc i zakres częstotliwości stacji HAARP razem z danymi w podobnych stacjach w Rosji (SURA), Norwegii (EISCAT, SPEAR) i Portoryko (Arecibo). Przewaga HAARP nad innymi ośrodkami w tych parametrach jest znaczna i warto również zwrócić uwagę, że charakterystyka promieniowania układu w HAARP może być dynamicznie zmieniona w skali czasowej poniżej jednej milisekundy. Również możliwe jest rozdzielanie układu antenowego na dwie niezależne części i taki tryb operacji pozwala na promieniowanie fal na dwóch różnych częstotliwościach, a nawet równocześnie w odmiennych polaryzacjach. Maksymalne odchylenie promieniowania od pionu wynosi 30°. Dzięki wyżej wymienionym cechom, HAARP jest najbardziej zaawansowanym „podgrzewaczem jonosfery” (ang. *ionospheric heater*) na świecie. Poza układem dipolowym stacja zawiera jonosondę i riometr, instrumenty do obserwacji optycznych, oraz mały radar UHF, *Modular UHF Ionospheric Radar* (MUIR). Niestety radar MUIR jest za słaby (ze względu na zbyt małą ilość elementów antenowych) żeby funkcjonować jako niekoherentny radar rozpraszania, dający dynamiczny profil koncentracji elektronów w jonosferze. Można powiedzieć, że brak takiego



Rys. 2. Porównanie mocy promieniowania i zakres częstotliwości HAARP od 2007 r. i wcześniej z innymi stacjami, w tym EISCAT (Rietveld i in. 2016), SURA (Belikovich i in. 2007), SPEAR (Wright i in. 2000) i Arecibo (Streltsov i in. 2018)

Fig. 2. Comparison of radiated power and frequency of HAARP from 2007 and earlier with other similar facilities including EISCAT (Rietveld et al. 2016), SURA (Belikovich et al. 2007), SPEAR (Wright et al. 2000) and Arecibo (Streltsov et al. 2018)

radaru to jedyna słabość stacji HAARP w porównaniu do ośrodków EISCAT w Tromsø w Norwegii lub Arecibo w Portoryko, gdzie takie radary są w stanie bardzo dokładnie zdiagnozować lokalną jonosferę i zachodzące zmiany podczas eksperymentów (Streltsov i in. 2018). Najbliższy radar tego typu znajduje się w stacji Poker Flat, 400 km na północ od HAARP.

Większość eksperymentów przeprowadzonych w HAARP polega na promieniowaniu w jonosferę, co powoduje podwyższenie temperatury elektronów, tworzy nieregularności gęstości plazmy, perturbacje naturalnych prądów jonosferycznych lub ekscytację interakcji fala-cząstka na różnych wysokościach. Ogólnie tego typu eksperymenty określa się mianem modyfikacji jonosferycznej (ang. *ionospheric modification*). Trzeba podkreślić, że nawet z mocą 3,6 MW wiązka fal elektromagnetycznych HAARP nie jest w stanie doprowadzić do bezpośredniej jonizacji, a obserwowane zwiększenie gęstości plazmy podczas eksperymentów spowodowane jest procesami wtórnymi, które są często skomplikowane i nie do końca zrozumiałe. Zjawiska fizyczne pobudzone przez HAARP są zróżnicowane w zależności od wysokości w jonosferze (70-400 km) na jakiej zachodzą. W niskich jonosferycznych warstwach, np. w warstwach D (wysokość 70-90 km) i E (wysokość 95-110 km), dominują zderzenia elektronów z molekułami neutralnymi. Wyżej, w warstwie F (150-400 km), częstość kolizji maleje i gęstość plazmy jest znacznie wyższa, co pozwala na znaczne przyspieszenie elektronów i obserwacje różnorodnych zjawisk. Ogólnie mówiąc, badania dokonane w HAARP można podzielić na dwie kategorie. Pierwszy rodzaj eksperymentów skupia się na interakcji fal elektromagnetycznych z HAARP z cząstkami w warstwie F, gdzie wprowadza się lokalne perturbacje w celu obserwacji rozmaitych procesów fizycznych. Drugi nurt badań skupia się na warstwie D i promieniowanie HAARP-a używane jest do cyklicznej perturbacji naturalnych prądów zorzowych w jonosferze. Cykliczna perturbacja tych prądów, tzw. elektrodzietu zorzowego, przy częstotliwościach kilku kiloHertzów, zmienia jonosferę nad HAARP w promieniającą antenę w pasmie bardzo niskich i ekstremalnie niskich częstotliwości, tzw. pasmie ELF/VLF. Kontrolowane źródło fal ELF/VLF trudno zrealizować w konwencjonalny sposób, bo wielokilometrowa długość tych fal wymaga anteny o podobnej skali. Generacja tych fal w jonosferze nad stacją HAARP umożliwia badania procesów w jonosferze i magnetosferze daleko od samej stacji.

HAARP i ekscytacja warstwy F

Fale radiowe wysyłane przez HAARP pobudzają turbulencje w jonosferycznej plazmie blisko wysokości odbicia, h_o , gdzie częstość plazmy, $f_{pe} \approx 9\sqrt{n}$ Hz (n jest koncentracją plazmy w jednostkach m^{-3}), jest przybliżona do częstotliwości fali radiowej, f_0 , która jako źródło zewnętrznej energii jest zwana falą pompą.

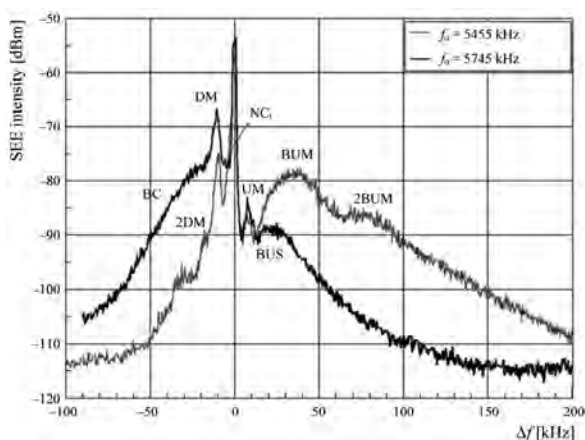
W odróżnieniu od próżni, namagnetyzowana plazma jonosfery jest nośnikiem bogatych zjawisk falowych. Poprzez polaryzacje O-mode fale pompy mogą pobudzić fale Langmuira, które zawierają cechy głównie elektrostatyczne. Występują również turbulencje Langmuira, które mają cechy wydrżeń plazmy i lokalne wzmocnienia pola elektrycznego. Możliwe jest również sprzężenie energii od pompy do tzw. modu nadzwyczajnego, który jest hybrydowym modem i zawiera cechy elektromagnetyczne i również elektrostatyczne. Mod nadzwyczajny osiąga rezonans przy częstotliwości zwanej górną częstotliwością hybrydową $f_{uhr} = \sqrt{f_{pe}^2 + f_{ce}^2}$ gdzie f_{ce} jest częstotliwością cyklotronową elektronów. Warunek efektywnego sprzężenia $f_0 = f_{uhr}$ jest spełniony na wysokości poniżej h_0 . Turbulencje wywołane falą pompy charakteryzują się bardzo nieliniowym oddziaływaniem i prowadzą do wielu wtórnych zjawisk. Ponadto, obserwowane zjawiska są bardzo zależne od kąta między wiązką pompy a polem geomagnetycznym i na ogół orientacja wiązki pompy do zenitu magnetycznego sprzyja ich powstawaniu (Isham i in. 1999; Watanabe i in. 2015). Warunki podwójnego rezonansu, jak na przykład $f_0 = f_{uhr} = m f_{ce}$ gdzie m jest liczbą całkowitą, też wzmacniają lokalne perturbacje. Zatem stan jonosfery i wybór częstotliwości promieniowania f_0 mają duży wpływ na przebieg eksperymentu. Prace Gurevicha (2007) i Streltsova i in. (2018) mogą posłużyć za źródło informacji na temat szczegółów procesów fizycznych i sposobów ich modelowania, tematów które leżą poza zakresem niniejszego artykułu. Cel tej pracy ogranicza się do streszczenia najważniejszych obserwacji i wyników badań przytoczonych poniżej.

Stymulowane Emisje Elektromagnetyczne (SEE)

Pobudzanie warstwy F przez HAARP powoduje wtórne promieniowanie elektromagnetyczne z perturbowanej jonosfery w zakresie częstotliwości f_0 -200 kHz do f_0 +600 kHz. Takie zjawisko nosi nazwę stymulowanej emisji elektromagnetycznej (SEE, ang. *stimulated electromagnetic emissions*) i pierwsze jego obserwacje zostały przeprowadzone w EISCAT (Thide i in. 1982). W praktyce SEE pojawia się jako rozszerzone i niesymetryczne widmo wokół częstotliwości pompy f_0 (patrz rys. 3). Obserwacja SEE jest przydatnym narzędziem diagnostycznym w przypadku procesów nieliniowych, bo w widmie można rozpoznać charakterystyczne sygnatury procesów turbulencji, jak i bardziej długotrwałych nieregularności koncentracji plazmy.

Nieregularności plazmowe

Powstanie nieregularności plazmowych równoległych do pola geomagnetycznego (ang. *field aligned irregularities*) to jedno z kluczowych zjawisk interakcji



Rys. 3. Przykład widma SEE z pracy Sergeev i in. (2006) z charakterystycznymi cechami BUM (ang. *broad upshifted maximum*) DM (ang. *downshifted maximum*) BUS (ang. *broad upshifted structure*) i BC (ang. *broad continuum*)

Fig. 3. Example of SEE spectrum from Sergeev et al. (2006) with characteristic features of BUM (*broad upshifted maximum*) DM (*downshifted maximum*), BUS (*broad upshifted structure*) and BC (*broad continuum*)

fali radiowych od HAARP z plazmą w warstwie F. Owe nieregularności są podzielone na małe (1-100 m), średnie (200-1000 m) i duże (1-10 km). Jeden z praktycznych skutków nieregularności jest powstanie echa radiolokacyjnego dla radarów diagnostycznych. W przypadku HAARP diagnoza radarowa może pochodzić ze wspomnianego radaru UHF MUIR na terenie stacji oraz radarów HF sieci superDARN (Greenwald i in. 1995) na południowej Alasce. Obecność nieregularności zwiększa absorpcję fali pompy i może to być dominująca forma absorpcji na wysokości odbicia fali h_0 (Robinson 1989).

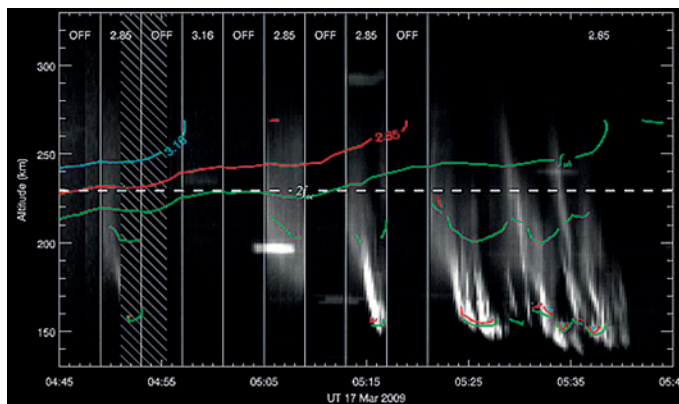
Sztuczne emisje optyczne

Sztuczne emisje optyczne o częstotliwościach podobnych do tych, jakie występują w przypadku naturalnych emisji zorzy polarnej, mogą być wywołane przez HAARP, jeżeli elektrony przyspieszone przez interakcje osiągają wystarczająco dużo energii, aby kolizyjnie ekscytować otaczające je molekuły tlenu i azotu. Generalnie emisja $O(^1D)$ z długością fal 630 nm jest najmocniejsza z dodatkowymi emisjami w kolejności malejącej intensywności z długościami fal: 557,7 nm $O(^1S)$; 777,4 nm $O(^5P)$; 844,6 nm $O(^3P)$; 427,8 nm (N_2^+) . Energie progowe elektronów przy wspomnianych emisjach wynoszą odpowiednio: 2 eV; 4,2 eV; 9 eV; 11 eV. Temperatura otoczenia w warstwie F jest $\sim 0,1$ eV, co oznacza znaczne przyspieszenie elektronów w lokalnych warunkach promie-

niowania HAARP. Przyspieszenie może być skutkiem rezonansu przy wyższej częstotliwości hybrydowej (Kosch i in. 2002), turbulencje Langmuira (Ashrafi i in. 2007) lub kilka niestabilności równocześnie (Kosch i in. 2007). W większość przypadków obserwacja sztucznej zorzy polarnej wymaga specjalnej aparatury, lecz warto zwrócić uwagę na przypadek opisany w pracy Pedersen, Gerken (2005), gdzie sztuczne emisje optyczne wywołane przez HAARP w warstwie E były widoczne gołym okiem.

Sztuczne warstwy jonosfery

Można powiedzieć że kulminacyjne eksperymenty i wyniki z ekscytacji warstwy F nastąpiły pod koniec okresu, kiedy stacja HAARP była zarządzana przez Siły Powietrzne Stanów Zjednoczonych (US Air Force) i zaowocowały w stworzeniu sztucznych warstw jonosfery. Warstwy te charakteryzują się zwiększoną koncentracją plazmy w wiązce promieniowania HF. Sztucznie podwyższona gęstość plazmy tworzy się na wysokości blisko 200 km i potem powoli spada do wysokości ~150 km (patrz rys. 4). Obniżanie się sztucznej warstwy jest spowodowany tym, że napływ energii jest ograniczony głównie do dolnej granicy warstwy i front sztucznej jonizacji posuwa się coraz niżej aż do momentu, w któ-



Rys. 4. Powstanie spadającej sztucznej warstwy w HAARP jak odzwierciedlają emisje optyczne (557.7 nm) na różnych wysokościach; ciągłe linie wskazują wysokości, gdzie $f_p = 3,16$ MHz (niebieska), $f_p = 2,85$ MHz (czerwona), $f_{uh} = 2,85$ MHz (zielona) i $2f_{ce} = 2,85$ MHz (biała przerywana); pozioma kreska na 200 km wysokości o 5:05 UT pochodzi od gwiazd i nie jest związana z eksperymentem (Pedersen i in. 2010)

Fig. 4. Creation of a descending artificial layer at HAARP as seen in optical emissions (557.7 nm) at different altitudes; the contours show altitudes where $f_p = 3,16$ MHz (blue), $f_p = 2,85$ MHz (red), $f_{uh} = 2,85$ MHz (green) and $2f_{ce} = 2,85$ MHz (dashed white), horizontal blip near 200 km altitude at 5:05 UT is from stars passing through the view (Pedersen et al. 2010)

rym warunki otoczenia przestają sprzyjać dalszym interakcjom (Pedersen i in. 2010; Sergeev i in. 2013). Temu zjawisku, nazwanemu „schodzącymi warstwami sztucznej jonizacji” (ang. *descending artificial ionization layers*), towarzyszą i SEE i emisje optyczne, które są źródłem ważnych elementów diagnostyki. Symulacje i analizy teoretyczne wskazują na przyspieszenie elektronów w procesach turbulencji Langmuira jako źródło jonizacji (Mishin, Pedersen 2011).

W tym kontekście nieco ironiczny jest fakt, że pomyślny eksperyment tworzenia sztucznej warstwy, który ma wiele praktycznych zastosowań i jest najbliższy pierwotnej wizji militarnych założycieli stacji, mianowicie „kontroli procesów zachodzących w jonosferze”, nie doprowadził do większego zaangażowania Departamentu Obrony USA w stację HAARP. Wręcz odwrotnie, niedługo po tych eksperymentach US Air Force całkowicie wycofał się z poparcia finansowego dla badań i o mało co nie ruszyły plany rozbioru całej stacji. Owa nagła zmiana podejścia do stacji HAARP przez władze wojskowe była częściowo skutkiem kryzysu finansowego 2009 r. i miała dalekosiężne negatywne skutki. Wprawdzie dzięki apelom naukowców stacja uniknęła zniszczenia i przeszła w ręce cywilne, ale przez wiele lat zespoły badawcze, które przeprowadziły pomyślne eksperymenty tworzenia sztucznych warstw nie były w stanie wrócić do pracy nad tym zjawiskiem.

HAARP i jonosferyczna antena ELF/VLF

Pierwsza demonstracja modulowania naturalnych prądów w jonosferze falami w pasmie HF i tworzenia w ten sposób jonosferycznej anteny w pasmie ELF/VLF została przeprowadzona w Związku Radzieckim (Getmanstev i in. 1974). Później owe zjawisko zostało głębiej zbadane w stacji EISCAT w Norwegii przez zespoły niemieckie (Stubbe i in. 1982; Barr, Stubbe 1991). Rozpoczęcie podobnych badań w HAARP otworzyło możliwości ekscytacji fal ELF/VLF wzdłuż zamkniętych linii pola geomagnetycznego i w ten sposób prowadzenie aktywnych badań w sercu magnetosfery, jak to zilustrowano na rysunku 5 (Gołkowski i in. 2008). Naturalne prądy w jonosferze są skoncentrowane na wysokości 100 km i są skutkiem obrotu Ziemi we jej polu magnetycznym (efekt dynamo) oraz oddziaływania Słońca, które również powoduje zorze polarne i zaburzenia pogody kosmicznej. W konsekwencji prądy jonosferyczne są skoncentrowane przy biegunach – tzw. elektrodzie zorzowej – oraz przy równiku, gdzie występuje elektrodzie równikowej. Jonosfera na innych szerokościach też jest nośnikiem naturalnych prądów, ale o znacznie mniejszym natężeniu niż w tych dwóch rejonach, np. w Elektrycznym Obwodzie Globalnym dolnej atmosfery (Odzimek 2019). Przewodność jonosferycznej plazmy zależy od koncentracji elektronów i częstości zderzeń z neutralnymi molekułami. Pole geomagnetyczne wprowadza anizotropię i przewodność opisuje się tensorem:

$$\vec{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_P & \sigma_H & 0 \\ -\sigma_H & \sigma_P & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{//} \end{bmatrix}$$

$$\sigma_P = \frac{\varepsilon_0 \omega_{pe}^2 \nu}{\nu^2 + \omega_{ce}^2} \quad \sigma_H = \frac{\varepsilon_0 \omega_{pe}^2 \omega_{ce}}{\nu^2 + \omega_{ce}^2} \quad \sigma_{//} = \frac{\varepsilon_0 \omega_{pe}^2}{\nu}$$

gdzie ω_{pe} , ω_{ce} i ν są odpowiednio częstotliwością plazmy, częstotliwością cyklotronową i częstotliwością zderzeń. Element $\sigma_{//}$ jest w kierunku pola geomagnetycznego. Częstość zderzeń w warstwie D jest zależna od temperatury elektronów, T_e , i można ją przedstawić:

$$\nu(T_e) = \frac{5}{3} 10^{-17} [2.33 N_N (1 - 1.25 \times 10^{-4} T_e) T_e + 18.2 N_O (1 - 3.6 \times 10^{-2} \sqrt{T_e}) \sqrt{T_e}]$$

gdzie N_N i N_O to odpowiednio koncentracje molekuł azotu i tlenu.

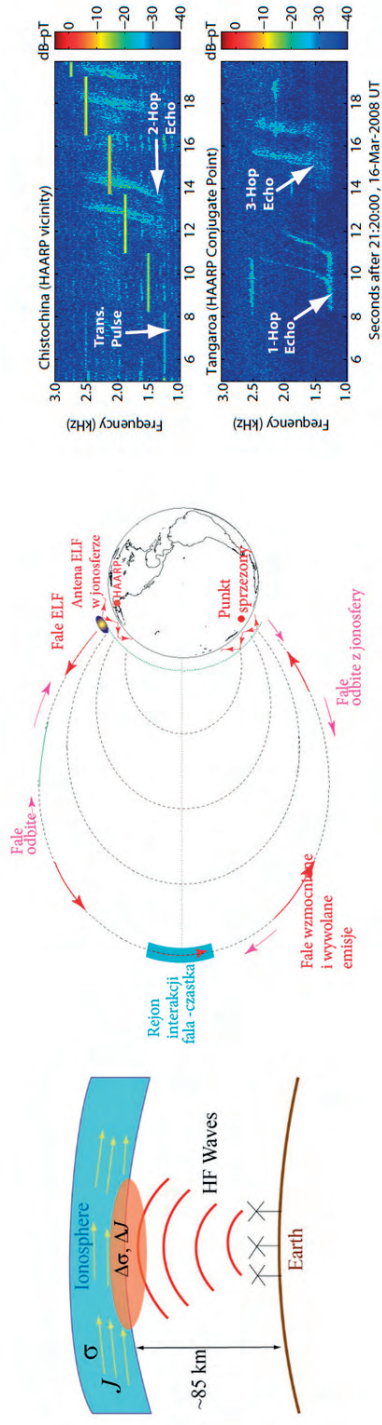
Fale w pasmie HF od HAARP zwiększają temperaturę w warstwie D mniej więcej dziesięciokrotnie, od ~200 K do ~2000 K. Cykliczne zmiany w przewodności powodują modulacje naturalnych prądów. W praktyce wprowadza się modulacje amplitudy w kilku kHz (0,1-8 kHz) na fale nośną HF emitowaną z HAARP. Polaryzacja X-mode jest bardziej skuteczna niż O-mode, ale obie polaryzacje działają podobnie (Maxworth i in. 2015). Najniższe częstotliwości HF (2,75 MHz w przypadku HAARP) są najbardziej efektywne, bo związane z większą absorpcją w dolnych warstwach jonosfery (Cohen i in. 2012). Element tensora przewodności, który doświadcza największych perturbacji to σ_H . Cohen i in. (2008a) przedstawili pomiary w odległości ~700 km od stacji, na podstawie których można wnioskować, że źródło ELF/VLF w jonosferze nad HAARP jest przybliżone do dipola elektrycznego prostopadłego do kierunku elektrodzetu i z długością ~30 km odpowiadającą szerokości wiązki na wysokości 75-85 km. Pomiary bliżej HAARP wskazują na to, że prądy promieniujące są częściowo eliptycznie spolaryzowane (Maxworth i in. 2015).

Fale ELF/VLF produkowane przez HAARP propagują w falowodzie jonosfera-ziemia jak i też przebijają się przez jonosferę do magnetosfery. W falowodzie fale z HAARP zostały obserwowane w odległościach, sięgając aż do 4400 km na wyspie Midway (Moore i in. 2007). Maksymalne amplitudy zachodzą przy częstotliwościach ~2 kHz, ~4 kHz, ~6 kHz na skutek pionowych rezonansów między ziemią i jonosferą (Maxworth i in. 2015). Moc pobudzonych fal ELF/VLF zależy przede wszystkim od siły naturalnych prądów, które nad HAARP są bardzo zmienne, ale profil dolnej jonosfery też wpływa na efektywność modulacji (Jin i in. 2011). Najczęściej stosowana jest modulacja amplitudowa w kształcie funkcji skokowej lub sinusoidalnej. Są też stosowane bardziej skomplikowane formy modulacji, na przykład tzw. modulacja geometryczna, gdzie wiązka HF szybko się przemieszcza naświatlając różne części jonosfery z częstotliwością w kHz

(Cohen i in. 2008b). Na podstawie pomiarów na ziemi, jak i też danych z francuskiej sondy DEMETER można przyjąć, że całkowita moc promieniowania w pasmie ELF/VLF mieści się między 1 W i 30 W (Cohen, Gołkowski 2013). Taka pozornie mała moc jest wyjątkowa, jeżeli chodzi o kontrolowane promieniowanie w tym pasmie. Stacja naukowa Siple, która operowała w latach 1973-1988 na Antarktydzie, dysponowała większą mocą i generowała ELF/VLF w sposób konwencjonalny z 40 km anteną (Helliwell 1988). Warto zwrócić uwagę, że dla efektywnego źródła ELF/VLF konieczna jest nie tylko wielokilometrowa antena, ale owa antena musi też być znacznie podniesiona nad powierzchnią ziemi, która w tym pasmie ma właściwości dobrego przewodnika. W przypadku stacji Siple to warstwa lodu o grubości 2 km zapewniła wymagany odstęp od ziemi.

Wspomniana wyżej stacja Siple odegrała kluczową rolę w badaniach nad oddziaływaniami fala-cząsteczka w magnetosferze, mianowicie interakcjami między falami świsłami w pasmie ELF/VLF i elektronami z energiami 1-300 keV w pasach radiacyjnych (pasy Van Allena). Na skutek tych interakcji powstaje nieliniowe wzmocnienie wprowadzonej fali i wywołanie falowych emisje (ang. *triggered emissions*), które charakteryzują się swobodną zmianą częstotliwości. Zjawisko to opiera się na tych samych procesach fizycznych, jakie występują w naturalnych falach świsłowych typu *chorus* i *hiss*, które odgrywają kluczową rolę w dynamice przetwarzania energii w magnetosferze, szczególnie podczas geomagnetycznych zaburzeń (Gołkowski, Gibby 2017; Hosseini i in. 2017). Badania magnetosfery w HAARP były kontynuacją badań z Siple, koncentrując się na mocno zaburzonych warunkach w pasach radiacyjnych powstających na skutek burz geomagnetycznych lub wybuchu broni jądrowej w jonosferze. Korzystając z interakcji fal ELF/VLF z energetycznymi elektronami, możliwe jest łagodzenie pobudzonego stanu pasów radiacyjnych (ang. *radiation belt mitigation*) (Inan i in. 2003; Carlsten i in. 2019).

Rysunek 5 przedstawia spektrogram sygnałów ELF/VLF z HAARP i emisje z magnetosfery, które są tymi transmisjami pobudzone. Fale z HAARP propagują wzdłuż pola geomagnetycznego i mogą być obserwowane na drugim końcu linii geomagnetycznej w punkcie sprzężonym na południowej półkuli. Propagacja wzdłuż linii pola wymaga nieregularności plazmy wzdłuż pola zwana duktem magnetosferycznym (ang. *magnetospheric duct*), działającej na zasadach podobnych do falowodu optycznego. Część energii fali odbija się od jonosfery nad punktem sprzężonym i wraca do okolic stacji na Alasce. Każde odbicie nazywa się kolejnym echem skokowym (ang. *1-hop echo*, *2-hop echo*). W spektrogramie na rysunku 5 można zauważyć, jak puls monochromatyczny z HAARP pobudza (i można powiedzieć zyskuje) dodatkowe emisje o wzrastających częstotliwościach. Powstanie nowych częstotliwości jest jasnym dowodem na to, że oddziaływanie jest mocno nieliniowe i oznacza, że fale ELF/VLF od HAARP bezpośrednio zmieniają rozkład energetycznych cząstek plazmy w magne-



Rys. 5. Modulacja naturalnych prądów jonosferycznych i badania magnetosfery falami ELF/VLF propagującymi wzdłuż linii pola geomagnetycznego; spektrogram po prawej stronie przedstawia transmisję fal ELF/VLF przez HAARP (*trans. pulse*) obserwacja wzmacnionych fal i wywołanych emisji na południowej półkuli (*1 hop echo*) oraz powrót fal do okolic HAARP (*2 hop echo*)

Fig. 5. Modulation of natural overhead currents and probing of the magnetosphere with ELF/VLF propagating along the geomagnetic field line; the spectrogram on the right shows ELF/VLF waves transmitted by HAARP (*trans. pulse*), the observation of the amplified waves and triggered emissions in the southern hemisphere (*1 hop echo*) and the return of the wave to the HAARP vicinity (*2 hop echo*)

tosferze, przynajmniej lokalnie. Mimo że wiele szczegółów tego procesu jest jeszcze nie do końca zrozumianych, ogólny proces wywodzi się z rezonansu cyklotronowego i powstania dziury w przestrzeni fazowej energetycznych elektronów (ang. *electron phase space hole*) (Omura i in. 1991; Gołkowski, Gibby 2017). Przegląd bogatych obserwacji z Siple i HAARP oraz metody symulacji owych procesów fizycznych przedstawiony jest w pracy Gołkowski i in. (2019).

Pobudzenie emisji ELF//VLF w magnetosferze przez HAARP wymaga specyficznych warunków. W pracy Gołkowski i in. (2011) stwierdzono, że obecność magnetosferycznego duktu jest najważniejsza i jest najbardziej prawdopodobna w spokojnych warunkach geomagnetycznych. Z drugiej strony ekscytacja procesu nieliniowego wymaga wystarczającej amplitudy stworzonej fali ELF/VLF; najbardziej sprzyjające warunki z mocnymi prądami naturalnymi w jonosferze mają korelację z warunkami geomagnetycznie zaburzonymi (Popielawska 2002). Istnieje więc okienko po zaburzeniu, kiedy eksperyment ma największe prawdopodobieństwo sukcesu. W przeciwieństwie do fizycznych procesów wywołanych falami HF w jonosferze, fale ELF/VLF w magnetosferze oddziałują z plazmą w trybie bezkolizyjnym na ogromnym obszarze setek kilometrów. Podobnych warunków nie da się uzyskać w laboratorium i eksperymenty ze stacją jak HAARP są konieczne do potwierdzania teorii i sprawdzenia dokładności symulacji komputerowych.

Podsumowanie

Mimo nieco kontrowersyjnej reputacji stacja HAARP reprezentuje wyjątkowy wkład kapitału i wysiłku ludzkiego w zrozumienie fundamentalnych zjawisk naszej planety. Dotychczasowe badania wykonane w tej stacji znacznie posunęły wiedzę w zakresie problematyki jonosfery i magnetosfery i ogólnie w nieliniowej fizyce plazmy w warunkach kolizyjnych, jak i bezkolizyjnych. Utrzymanie stacji jest jednak kosztowne i niestety brak stałego sponsora stanowi zagrożenie dla jej przyszłości. Z drugiej strony obecnie stacja jest w pełni otwarta dla badaczy z całego świata i współpraca międzynarodowych zespołów na pewno zaowocuje dalszymi odkryciami w przestrzeni okołoziemskiej.

L i t e r a t u r a

- Ashrafi M., Kosch M.J., Kaila K., Isham B., 2007, Spatiotemporal evolution of radio wave pump-induced ionospheric phenomena near the fourth electron gyroharmonic, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 112 (A5), DOI: 10.1029/2006JA011938
- Barr R., Stubbe P., 1991, ELF radiation from the Tromsø “super heater” facility, *Geophysical Research Letters*, 18 (6), 1035-1038, DOI: 10.1029/91GL01156

- Belikovich V.V., Grach S.M., Karashtin A.N., Kotik D.S., Tokarev Y.V., 2007, The "Sura" facility: study of the atmosphere and space (a review), 50 (7), 497-526, DOI: 10.1007/s11141-007-0046-4
- Carlsten B.E., Colestock P.L., Cunningham G.S., Delzanno G.L., Dors E.E., Holloway M.A., Reeves G.D., 2019, Radiation-belt remediation using space-based antennas and electron beams, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 47 (5), 2045-2063, DOI: 10.1109/TPS.2019.2910829
- Cohen M.B., Gołkowski M., 2013, 100 days of ELF/VLF generation via HF heating with HAARP, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 118 (10), 6597-6607, DOI: 10.1002/jgra.50558
- Cohen M.B., Gołkowski M., Inan U.S., 2008a, Orientation of the HAARP ELF ionospheric dipole and the auroral electrojet, *Geophysical Research Letters*, 35 (2), DOI: 10.1029/2007GL032424
- Cohen M.B., Gołkowski M., Lehtinen N.G., Inan U.S., McCarrick M.J., 2012, HF beam parameters in ELF/VLF wave generation via modulated heating of the ionosphere, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 117 (A5), DOI: 10.1029/2012JA017585
- Cohen M.B., Inan U.S., Gołkowski M.A., 2008b, Geometric modulation: A more effective method of steerable ELF/VLF wave generation with continuous HF heating of the lower ionosphere, *Geophysical Research Letters*, 35 (12), DOI: 10.1029/2008GL034061
- Getmantsev G.G., Zuikov N.A., Kotik D.S., Mironenko L.F., Mitiakov N.A., Rapoport V.O., Eidman V.I., 1974, Combination frequencies in the interaction between high-power short-wave radiation and ionospheric plasma, *ZhETF Pisma Redaktsiiu*, 20, 229-232
- Gołkowski M., Cohen M.B., Carpenter D.L., Inan U.S., 2011, On the occurrence of ground observations of ELF/VLF magnetospheric amplification induced by the HAARP facility, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 116 (A4), DOI: 10.1029/2010JA016261
- Gołkowski M., Gibby A.R., 2017, On the conditions for nonlinear growth in magnetospheric chorus and triggered emissions, *Physics of Plasmas*, 24 (9), DOI: 10.1063/1.4986225
- Gołkowski M., Harid V., Hosseini P., 2019, Review of controlled excitation of nonlinear wave-particle interactions in the magnetosphere, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 6 (2), DOI: 10.3389/fspas.2019.00002
- Gołkowski M., Inan U.S., Gibby A.R., Cohen M.B., 2008, Magnetospheric amplification and emission triggering by ELF/VLF waves injected by the 3.6 MW HAARP ionospheric heater, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 113 (A10), DOI: 10.1029/2008JA013157
- 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

- Gurevich A.V., 2007, Nonlinear effects in the ionosphere, *Physics-Uspekhi*, 50 (11), DOI: 10.1070/PU2007v050n11ABEH006212
- Helliwell R.A., 1988, VLF wave stimulation experiments in the magnetosphere from Siple Station, Antarctica, *Reviews of Geophysics*, 26 (3), 551-578, DOI: 10.1029/RG026i003p00551
- Hosseini P., Gołkowski M., Turner D.L., 2017, Unique concurrent observations of whistler mode hiss, chorus, and triggered emissions, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 122 (6), 6271-6282, DOI: 10.1002/2017JA024072
- Inan U.S., Bell T.F., Bortnik J., Albert J.M., 2003, Controlled precipitation of radiation belt electrons, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 108 (A5), DOI: 10.1029/2002JA009580
- Isham B., Rietveld M.T., Hagfors T., La Hoz C., Mishin E., Kofman W., Leyser T.B., van Eyken A.P., 1999, Aspect angle dependence of HF enhanced incoherent backscatter, *Advances in Space Research*, 24 (8), 1003-1006, DOI: 10.1016/S0273-1177(99)00555-4
- Jin G., Spasojevic M., Cohen M.B., Inan U.S., Lehtinen N.G., 2011, The relationship between geophysical conditions and ELF amplitude in modulated heating experiments at HAARP: Modeling and experimental results, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 116 (A7), DOI: 10.1029/2011JA016664
- Kosch M.J., Pedersen T., Rietveld M.T., Gustavsson B., Grach S.M., Hagfors T., 2007, Artificial optical emissions in the high-latitude thermosphere induced by powerful radio waves: An observational review, *Advances in Space Research*, 40 (3), 365-376, DOI: 10.1016/j.asr.2007.02.061
- Kosch M.J., Rietveld M.T., Kavanagh A.J., Davis C., Yeoman T.K., Honary F., Hagfors T., 2002, High-latitude pump-induced optical emissions for frequencies close to the third electron gyro-harmonic, *Geophysical Research Letters*, 29 (23), DOI: 10.1029/2002GL015744
- Maxworth A.S., Gołkowski M., Cohen M.B., Moore R.C., Chorsi H.T., Gedney S.D., Jacobs R., 2015, Multistation observations of the azimuth, polarization, and frequency dependence of ELF/VLF waves generated by electrojet modulation, *Radio Science*, 50 (10), 1008-1026, DOI: 10.1002/2015RS005683
- McIlwain C.E., 1961, Coordinates for mapping the distribution of magnetically trapped particles, *Journal of Geophysical Research*, 66 (11), 3681-3691, DOI: 10.1029/JZ066i011p03681
- Mishin E., Pedersen T., 2011, Ionizing wave via high-power HF acceleration, *Geophysical Research Letters*, 38 (1), DOI: 10.1029/2010GL046045
- Moore R.C., Inan U.S., Bell T.F., Kennedy E.J., 2007, ELF waves generated by modulated HF heating of the auroral electrojet and observed at a ground distance of ~4400 km, *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 112 (A5), DOI: 10.1029/2006JA012063
- Odzimek A.W., 2019, Obszary polarne w badaniach Globalnego Atmosferycznego Obwodu Elektrycznego Ziemi, *Przegląd Geofizyczny*, 64 (1-2), 35-70, DOI: 10.32045/PG-2019-002

- Omura Y., Nunn D., Matsumoto H., Rycroft M.J., 1991, A review of observational, theoretical and numerical studies of VLF triggered emissions, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 53 (5), 351-368, DOI: 10.1016/0021-9169(91)90031-2
- Pedersen T.R., Gerken E.A., 2005, Creation of visible artificial optical emissions in the aurora by high-power radio waves, *Nature*, 433 (7025), 498-500, DOI: 10.1038/nature03243
- Pedersen T., Gustavsson B., Mishin E., Kendall E., Mills T., Carlson H.C., Snyder A.L., 2010, Creation of artificial ionospheric layers using high-power HF waves, *Geophysical Research Letters*, 37 (2), DOI: 10.1029/2009GL041895
- 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
- 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
- Robinson T.R., 1989, The heating of the high latitude ionosphere by high power radio waves, *Physics Reports*, 179 (2-3), 79-209, DOI: 10.1016/0370-1573(89)90005-7
- Sergeev E.N., Frolov V.L., Grach S.M., Kotov P.V., 2006, On the morphology of stimulated electromagnetic emission spectra in a wide pump wave frequency range, *Advances in Space Research*, 38 (11), 2518-2526, DOI: 10.1016/j.asr.2005.02.046
- Sergeev E., Grach S., Shindin A., Mishin E., Bernhardt P., Briczinski S., Watkins B., 2013, Artificial ionospheric layers during pump frequency stepping near the 4th gyroharmonic at HAARP, *Physical Review Letters*, 110 (6), DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.065002
- Streltsov A.V., Berthelier J.J., Chernyshov A.A., Frolov V.L., Honary F., Kosch M.J., Rietveld M.T., 2018, Past, present and future of active radio frequency experiments in space, *Space Science Reviews*, 214 (8), DOI: 10.1007/s11214-018-0549-7
- Stubbe P., Kopka H., Rietveld M.T., Dowden R.L., 1982, ELF and VLF wave generation by modulated HF heating of the current carrying lower ionosphere, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 44 (12), 1123-1135, DOI: 10.1016/0021-9169(82)90023-X
- Thidé B., Kopka H., Stubbe P., 1982, Observations of stimulated scattering of a strong high-frequency radio wave in the ionosphere, *Physical Review Letters*, 49 (21), DOI: 10.1103/PhysRevLett.49.1561
- Watanabe N., Gołkowski M., Sheerin J.P., Watkins B.J., 2015, Simultaneous multi-angle observations of Strong Langmuir Turbulence at HAARP, *Earth, Moon, and Planets*, 116 (1), 89-100, DOI: 10.1007/s11038-015-9471-0
- Wright D.M., Davies J.A., Robinson T.R., Chapman P.J., Yeoman T.K., Thomas E.C., Lester M., Cowley S.W.H., Stocker A.J., Horne R.B., Honary F., 2000, Space Plasma Exploration by Active Radar (SPEAR): an overview of a future radar facility, *Annales Geophysicae*, 18 (9), 1248-1255, DOI: 10.1007/s00585-000-1248-7

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

W artykule zaprezentowano informacje o amerykańskiej stacji HAARP na Alasce i opisano główne eksperymenty tam przeprowadzone. Stacja jest unikalna, bo posiada dużą moc promieniowania w wysokich częstotliwościach w pasmie HF (2,75-9 MHz), co pozwala na ciekawe badania nad zjawiskami w jonosferze, jak i w magnetosferze. W ostatnich latach stacja przeszła pod zarządek University of Alaska i jest dostępna dla naukowców z całego świata.

Słowa kluczowe: aktywne eksperymenty, podgrzewanie jonosfery, sztuczna zorza polar-
na, interakcje fala-cząsteczka, wywołane emisje, niestabilności plazmy.

S u m m a r y

We present details of the American geophysical research facility in Alaska known as HAARP and summarize the main experiments that have been carried out therein. The facility is unique due to the high power available for radiation in the HF band (2.75-9 MHz), which enables the investigation of processes in the ionosphere and magnetosphere. In the last few years the facility has come under the administration of the University of Alaska and is now open to international researchers.

Key words: Active experiments, ionospheric heating, artificial aurora, wave-particle interactions, triggered emissions, plasma instabilities.