

WPLYW JONOSFERY NA PROPAGACJĘ FAL RADIOWYCH

14

14.1. BUDOWA JONOSFERY

Jonosferą nazywamy zjonizowaną część atmosfery zalegającą na wysokości powyżej 60 km.

Zanim zajmiemy się jonosferą, celowe będzie zapoznać się z podstawowymi właściwościami fizycznymi górnych warstw atmosfery [33]. Wyniki obserwacji pośrednich i pomiarów bezpośrednich, wykonywanych za pomocą balonów, rakiet i sztucznych satelitów Ziemi, wskazują na to, że do wysokości 90 km atmosfera ma skład taki sam jak w pobliżu powierzchni Ziemi. Na dużych wysokościach różnice mas gazów wchodzących w skład atmosfery wpływają na jej rozwarstwienie: cięższe gazy gromadzą się w warstwach położonych niżej. W rozrzedzonej atmosferze pod wpływem promieniowania słonecznego zachodzi dysocjacja tlenu i azotu polegająca na tym, że cząstki tych gazów przyswajają sobie kwant energii i rozszczepiają się na atomy. Dysocjacja O_2 rozpoczyna się na wysokości ok. 90 km, natomiast dysocjacja N_2 zachodzi na wysokościach przewyższających 220 km. Orientacyjny skład atmosfery pokazano na rys. 14-1.

Rozkład temperatury w troposferze omówiliśmy już w p. 13.1. W miarę wzrostu wysokości, po przekroczeniu górnej granicy troposfery spadek temperatury ustaje, temperatura utrzymuje się na poziomie 210 K do ok. 20 km. Przy dalszym wzroście wysokości temperatura powietrza zaczyna wzrastać i osiąga maksimum rzędu 400 K na wysokości około 60 km. Na wysokości około 80 km występuje drugie minimum temperatury (ok. 200...250 K), po czym temperatura zaczyna wzrastać do wartości rzędu tysiąca kelwinów i więcej. Średni rozkład temperatury powietrza w funkcji wysokości przedstawiono na rys. 14-2. Przez temperaturę rozrzedzonej atmosfery należy rozumieć, w świetle kinetycznej teorii gazów, wielkość charakteryzującą przeciętną prędkość chaotycznych ruchów cieplnych cząsteczek.

Jak wiadomo, jonizacja polega na usunięciu jednego lub rzadziej kilku elektronów z atomów gazu wchodzącego w skład atmosfery. W celu usunięcia elektronu z atomu należy wykonać pewną pracę W , zwaną *pracą jonizacji*.

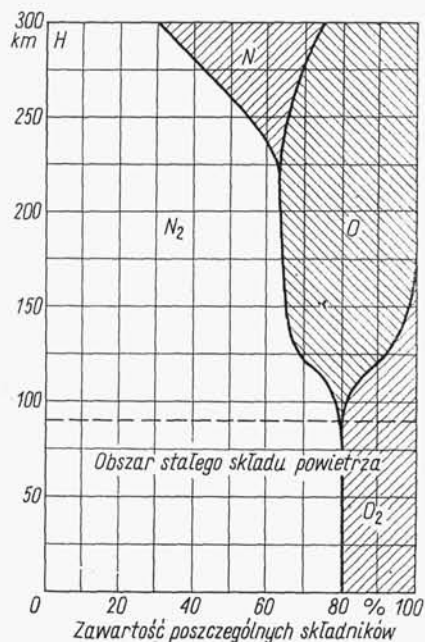
Jeśli dany gaz zostaje poddany działaniu promieniowania o energii kwantów hf , to jonizacja może nastąpić przy spełnieniu warunku

$$hf > W \quad (14-1)$$

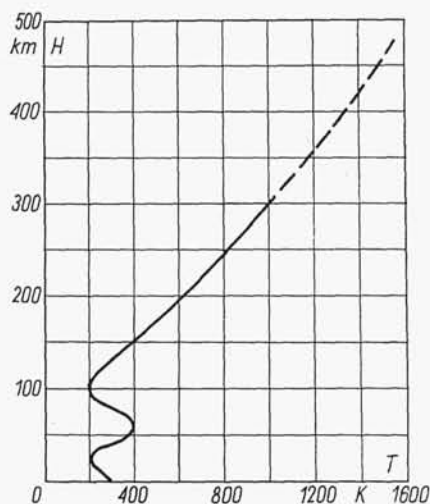
przy czym:

$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ — stała Plancka;

f — częstotliwość promieniowania oddziaływającego na gaz.



Rys. 14-1. Orientacyjny skład atmosfery na różnych wysokościach (według M. П. Долуханов: Распространение радиоволн. Изд. Связь, Москва 1965)



Rys. 14-2. Średni rozkład temperatury powietrza w funkcji wysokości (według M. П. Долуханов: Распространение радиоволн. Изд. Связь, Москва 1965)

Nierówność (14-1) wskazuje na to, że jonizacja danego gazu zachodzi pod wpływem promieniowania, o częstotliwości przewyższającej pewną wartość krytyczną, zwaną *częstotliwością jonizacji* (odpowiada jej *jonizująca długość fali*).

Atomy gazu mogą ulec jonizacji również wskutek zderzenia z cząstką o dostatecznie dużej energii. Jeśli pominąć poprawkę relatywistyczną, to dla wywołania jonizacji cząstka o masie m musi mieć prędkość v spełniającą warunek

$$\frac{mv^2}{2} > W \quad (14-2)$$

Energię poruszającej się cząstki wyrażamy w elektronowoltach¹⁾. Znając energię kinetyczną cząstki, energię w elektronowoltach znajdujemy z wzoru

$$\frac{mv^2}{2} = eV \quad (14-3)$$

przy czym:

e — ładunek elektronu;

V — różnica potencjałów w woltach, po przejściu której elektron nie mający prędkości początkowej nabiera prędkości v .

Tablica 14-1
Praca jonizacji gazów wchodzących w skład atmosfery

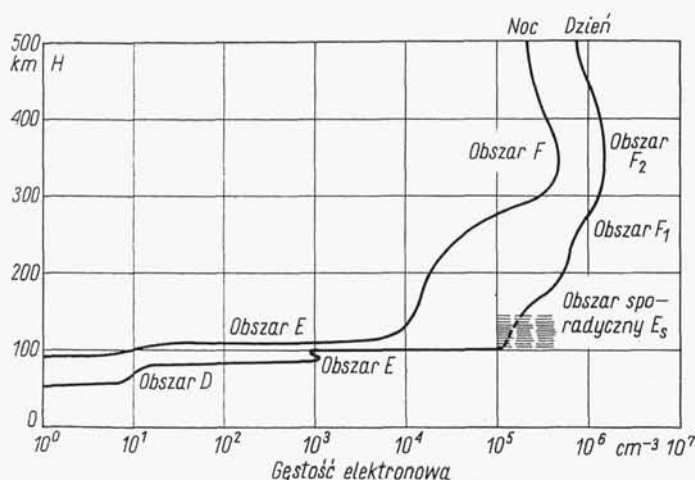
Gaz	Długość fali jonizującej [nm]	Praca jonizacji [eV]
O ₂	102,6	12,2
O	91	13,6
N ₂	79,5	15,5
N	85	14,5

W tablicy 14-1 podano wartości pracy jonizacji gazów wchodzących w skład atmosfery. Dane zawarte w tablicy wskazują na to, że jonizacja najłatwiej jonizującego się gazu, jakim jest cząsteczkowy tlen, może zostać dokonana tylko przez promieniowanie ultrafioletowe.

Podstawowym źródłem jonizacji atmosfery jest Słońce. Fotosfera o temperaturze ok. 6000 K promieniuje fale radiowe o bardzo szerokim widmie częstotliwości. Chromosfera i korona o temperaturze rzędu $2 \cdot 10^6$ K są źródłami promieniowania ultrafioletowego (2...30 nm) i miękkiego promieniowania rentgenowskiego (0,8...2 nm). Ponadto Słońce wyrzuca strumienie elektronów i innych cząstek tworzących promieniowanie korpuskularne. Oprócz Słońca czynnikami jonizującymi są: promieniowanie gwiazd, promieniowanie kosmiczne, pył kosmiczny i meteory.

¹⁾ W układzie SI stosuje się jednostkę J ($1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$).

Równocześnie z powstawaniem jonów i elektronów swobodnych zachodzi w atmosferze proces odwrotny, polegający na ponownym łączeniu się swobodnych elektronów z jonami. Nosi on nazwę *rekombinacji*. Przy rekombinacji wydzielą się ilość energii równa uprzednio włożonej pracy jonizacji. Prawdopodobieństwo rekombinacji jest tym większe, im większa jest gęstość elektronowa (liczba elektronów w jednostce objętości gazu), a ta z kolei zależy od intensywności jonizacji. Przy określonych warunkach jonizacji wytwarza się więc pewien stan równowagi dynamicznej.



Rys. 14-3. Orientacyjny rozkład gęstości elektronowej w funkcji wysokości (według M. П. Долуханов: Распространение радиоволн, Изд. Связь, Москва 1965)

W rzeczywistości warunki jonizacji ulegają ciągłym zmianom, przez co gęstość elektronowa podlega ciągłej fluktuacji. Ponieważ głównym źródłem jonizacji atmosfery ziemskiej jest Słońce, dlatego w godzinach porannych i przedpołudniowych przeważa proces jonizacji i gęstość elektronowa wzrasta. Po południu zaczyna stopniowo górować rekombinacja, która w porze nocnej znacznie postępuje, nie niwecząc jednak całkowicie jonizacji dokonanej w porze dziennej. Ostatecznie górne warstwy atmosfery utrzymują się w permanentnym stanie jonizacji. Oprócz zmian dobowych obserwuje się zmiany sezonowe oraz długookresowe związane z cykliczną zmiennością aktywności słonecznej.

Wskutek różnej intensywności czynników jonizujących, jak również wskutek niejednorodności składu atmosfery oraz różnicy ciśnień na różnych wysokościach, rozkład gęstości elektronowej jonosfery jest nierównomierny. Dawniej dzielono jonosferę na warstwy o określonej grubości. Wyniki pomiarów gęstości elektronowej za pomocą przyrządów umieszczonych na raketach i sztucznych satelitach Ziemi wykazały, że podział taki jest niesłuszny. Można mówić tylko o jednym wyraźnym zarysowanym maksimum gęstości elektronowej i trzech dalszych, słabo zarysowanych maksimach (rys. 14-3).

W ciągu dnia wyróżnia się cztery obszary (tabl. 14-2): D — od 60 do 90 km, E — od 100 do 120 km, F_1 — od 180 do 240 km (występuje tylko w porze letniej), F_2 — od 230 do 400 km. W nocy obszary D i F_1 znikają, pozostają tylko obszary E i F_2 , przy czym gęstość elektronowa w tych obszarach wyraźnie maleje.

Obszary D , E i F_1 charakteryzują się dużą stabilnością, tzn. dobowe zmiany gęstości elektronowej i wysokości maksimum powtarzają się z dnia na dzień. Obszar F_2 jest natomiast niestabilny. Gęstość elektronowa i wysokość maksimum w tym obszarze ulegają znacznym zmianom z dnia na dzień.

Tablica 14-2

Podstawowe parametry charakterystycznych obszarów jonosfery

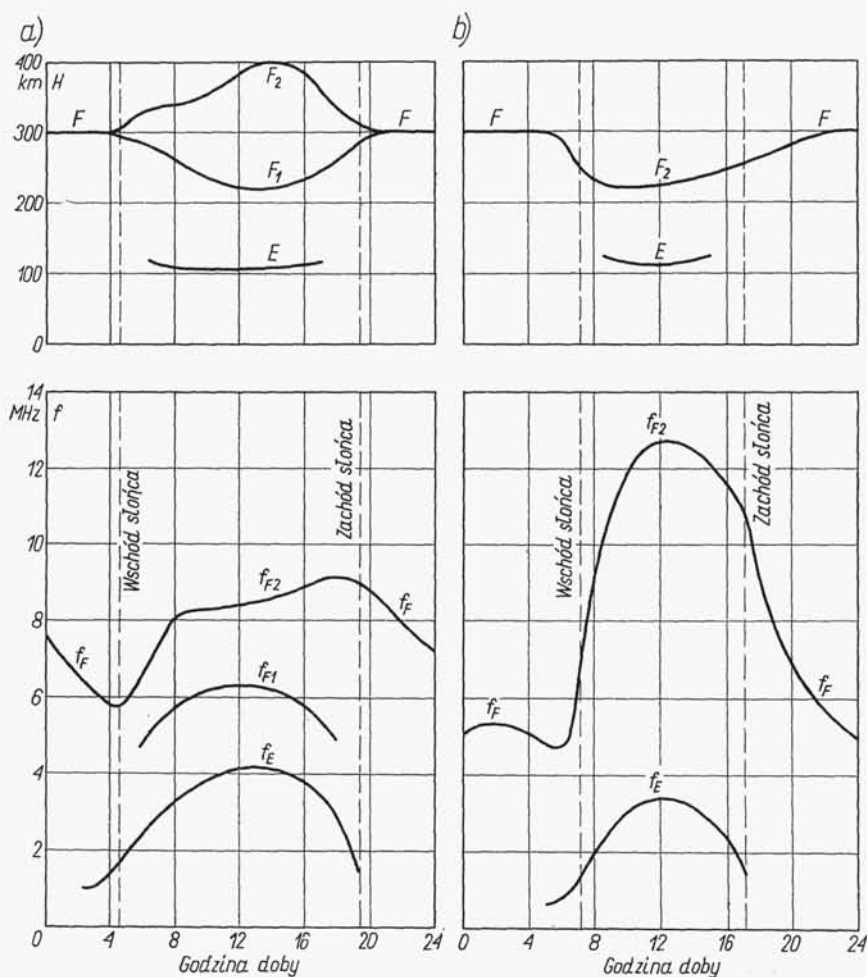
Parametr	Obszar D	Obszar E	Obszar F_1	Obszar F_2
Mechanizm jonizacji	jonizacja NO promieniowaniem linii L_α ; jonizacja wszystkich gazów miękkim promieniowaniem rentgenowskim	jonizacja wszystkich gazów miękkim promieniowaniem rentgenowskim	jonizacja O przy szybkim zmniejszaniu się współczynnika rekombinacji z wysokością	jonizacja O ultrafioletowym, rentgenowskim i prawdopodobnie korpuskularnym promieniowaniem
Wysokość [km]	w ciągu dnia 60...90 w nocy obszar D znika	100...120	w ciągu dnia 180...240 w nocy obszar F_1 znika	w lecie 300...400 w zimie 230...350
Gęstość molekularna [1/cm ³]	$10^{14} \dots 10^{16}$	$5 \cdot 10^{11} \dots 10^{13}$	$\sim 10^{11}$	$\sim 10^{10}$
Gęstość elektronowa [1/cm ³]	$10^2 \dots 10^3$	w ciągu dnia $10^5 \dots 4 \cdot 10^5$ w nocy $5 \cdot 10^3 \dots 10^4$	$2 \cdot 10^5 \dots 4,5 \cdot 10^5$	w ciągu dnia: — w porze zimowej $2 \cdot 10^6$ — w porze letniej $2 \cdot 10^5$ w nocy w porze zimowej $3 \cdot 10^5$
Liczba zderzeń [1/s]	10^7 przy dolnej granicy	10^5	10^4	$10^3 \dots 10^4$
Współczynnik rekombinacji [cm ³ /s]	$10^{-5} \dots 10^{-7}$	w ciągu dnia 10^{-7} w nocy 10^{-8}	$4 \cdot 10^{-9}$	w ciągu dnia $8 \cdot 10^{-11}$ w nocy $3 \cdot 10^{-11}$

Na rysunku 14-4 przedstawiono dobowe zmiany częstotliwości krytycznej i wysokości maksimów dla obszarów E , F_1 i F_2 . Gęstość elektronowa jest związana z częstotliwością krytyczną zależnością

$$N = 1,24 \cdot 10^4 f_{kr}^2 \quad (14-4)$$

przy czym gęstość elektronowa jest wyrażona w elektronach/cm³, a częstotliwość w MHz.

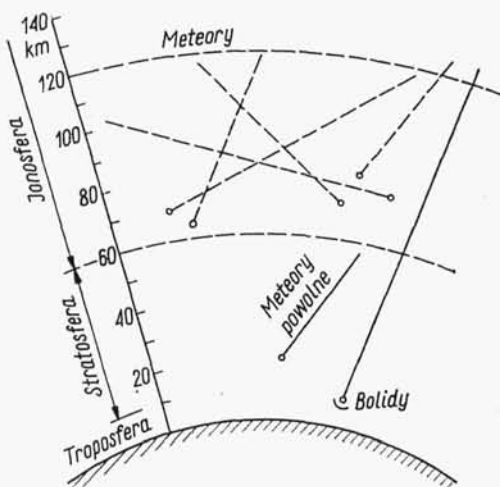
Od czasu do czasu na wysokości obszaru E pojawia się silnie zjonizowana warstwa, którą nazywamy warstwą sporadyczną E i oznaczamy przez E_s . Warstwa E_s może powstać w dowolnej porze doby i roku, jednakże w średnich szerokościach geograficznych najczęściej pojawia się w ciągu dnia w porze letniej.



Rys. 14-4. Uśrednione dobowe zmiany częstotliwości krytycznej i wysokości dla warstw E i F :
a) miesiące letnie; b) miesiące zimowe

W jonosferze mają miejsce ruchy związane z przyływami i odpływami, wywołanymi oddziaływaniem Księżyca i Słońca, przy czym w grę wchodzi nie tylko siły grawitacyjne, ale również wpływy cieplne. Z przyływami i odpływami są związane *wiatry jonosferyczne*. W jonosferze powstają również *wiry (turbulencje)*, które powodują lokalne niejednorodności jonosfery. Niejednorodności te są przyczyną rozpraszania fal elektromagnetycznych rozchodzących się w jonosferze.

W pewnych okresach stan zjonizowania jonosfery ulega silnym zaburzeniom, związanym z występowaniem zorzy polarnej i zaburzeń w polu geomagnetycznym.

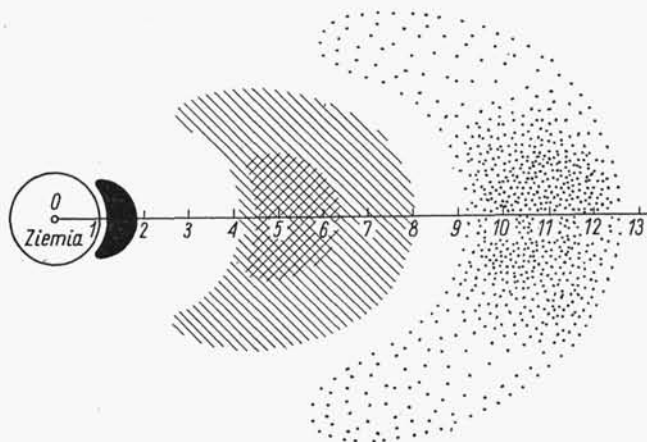


Rys. 14-5. Tory meteorów w atmosferze

Noszą one nazwę *burz jonosferycznych*. W czasie burzy jonosferycznej gęstość elektronowa warstwy F_2 zmniejsza się tak dalece, że praktycznie biorąc przestaje ona istnieć.

Atmosfera ziemską jest bezustannie bombardowana przez liczne cząstki ciała stałego, zwane meteorami. Tory meteorów w atmosferze są liniami prostymi o różnych kierunkach (rys. 14-5). Meteory wchodząc z ogromną prędkością w gęste warstwy atmosfery rozgrzewają się i ulegają wyparowaniu. Podczas wyparowania pozostawiają za sobą silnie zjonizowany ślad. Średnia długość śladu jest rzędu 25 km, a jego średnica w początkowej fazie — rzędu kilku centymetrów.

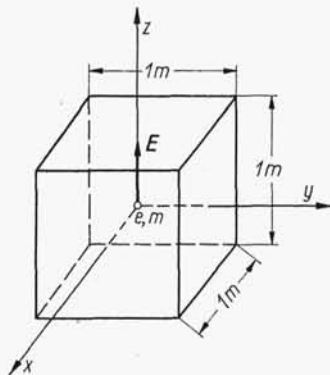
Najbardziej zewnętrzną część jonosfery tworzą naturalne obszary promienionowania, tzw. *strefy Van Allena*. Strefy Van Allena są obszarami otaczającymi kulę ziemską, mającymi konfigurację linii sił pola geomagnetycznego, wypełnionymi cząstkami o dużej energii kinetycznej. Cząstki te wykonują skomplikowane ruchy wzdłuż i wokół geomagnetycznych linii sił. Schematyczny rozkład stref Van Allena pokazano na rys. 14-6.



Rys. 14-6. Strefy Van Allena

14.2. ROZCHODZENIE SIĘ FAL RADIOWYCH W JEDNORODNEJ PLAZMIE

Założmy, że w jednorodnej plazmie o gęstości elektronowej N , w której elektron w ciągu sekundy dokonuje ν zderzeń z neutralnymi cząstkami, rozchodzi się wzdłuż osi x liniowo spolaryzowana fala płaska, przy czym wektor pola elektrycznego jest skierowany wzdłuż osi z (rys. 14-7). Przypuśćmy na początku, że w objętości 1 m^3



Rys. 14-7. Rysunek pomocniczy do określenia warunków rozchodzenia się fal radiowych w jednorodnej plazmie

znajduje się tylko 1 elektron o ładunku e i masie m . Pole elektryczne rozchodzącej się fali, którego amplitudę oznaczmy przez E_m , a pulsację przez ω , oddziałuje na ten elektron z siłą

$$F = eE_m e^{j\omega t} \quad (14-5)$$

pod wpływem której będzie on wykonywał ruch drgający wzdłuż osi z .